

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ  
UNIVERSITY OF WEST ATTICA



ΜΠΑΡΟΥΤΣΟΥ ΜΑΡΙΑ

Μελέτη εξαερισμού καπνού κτηρίου με φυσική απαγωγή σε  
περίπτωση πυρκαγιάς για διαφορετικές διατομές και τοποθετήσεις  
των ανοιγμάτων στο κέλυφος του

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Ακαδημαϊκό Έτος: 2021 - 2022

Επιβλέπων: Δρ. ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΒΑΣΙΛΟΠΟΥΛΟΣ  
Επιβλέπων: Δρ. ΙΩΑΝΝΗΣ ΣΑΡΡΗΣ

Αιγάλεω, Ιούλιος 2022

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ  
UNIVERSITY OF WEST ATTICA

ΜΠΑΡΟΥΤΣΟΥ ΜΑΡΙΑ

Μελέτη εξαερισμού καπνού κτηρίου με φυσική απαγωγή σε  
περίπτωση πυρκαγιάς για διαφορετικές διατομές και τοποθετήσεις  
των ανοιγμάτων στο κέλυφος του

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Ακαδημαϊκό Έτος: 2021 - 2022

Επιβλέπων: Δρ. ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΒΑΣΙΛΟΠΟΥΛΟΣ  
Επιβλέπων: Δρ. ΙΩΑΝΝΗΣ ΣΑΡΡΗΣ

Αιγάλεω, Ιούλιος 2022

© UNIVERSITY OF WEST ATTICA 2022. All rights reserved. No  
part of this publication may be reproduced without the written  
permission of the copyright owner.



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**Μελέτη εξαερισμού καπνού κτηρίου με φυσική απαγωγή σε περίπτωση πυρκαγιάς για διαφορετικές διατομές και τοποθετήσεις των ανοιγμάτων στο κέλυφος του**

**Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του Εισηγητή**

Η διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή:

<b>A/α</b>	<b>ΟΝΟΜΑ ΕΠΩΝΥΜΟ</b>	<b>ΒΑΘΜΙΔΑ/ΙΔΙΟΤΗΤΑ</b>	<b>ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ</b>
1	Δρ. Ιωάννης Σαρρής	Καθηγητής	
2	Δρ. Κωνσταντίνος Ιωάννης Βασιλόπουλος	Διδάκτορας ΕΣΠΑ	
3	Δρ. Απόστολος Γκούντας	Διδάκτορας ΕΣΠΑ	

## ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη ΜΠΑΡΟΥΤΣΟΥ ΜΑΡΙΑ του ΦΩΤΙΟΥ, με αριθμό μητρώου 46147042, φοιτήτρια του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Η Δηλούσα  
Μαρία Μπαρούτσου



## **ABSTRACT**

The rapid spread of a fire within an atrium is a highly dangerous and potentially deadly phenomenon. Therefore, this study focuses on the smoke behavior and the natural ventilation systems in atriums with openings in different positions for different climatological conditions. Smoking behavior is analyzed using Computer Fluid dynamics (CFD) computational techniques and more particular, the Fire Dynamic Simulation (FDS) code. FDS uses the Large Eddy Simulation (LES) methodology. The obtained numerical results commented on the flow velocity, temperature and combustion characteristics in the atrium and compared with experimental results selected from the bibliography.

Keywords: Fire in a atrium; Computational Fluid Dynamics (CFD); Dynamic Fire Simulator (FDS); Large Eddy Simulator (LES);

## Ευχαριστίες

Ξεκινώντας θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Δρ. Κωνσταντίνο Βασιλόπουλο για την ανάθεση του θέματος. Η καθοδήγηση και η πολύτιμη βοήθεια που έλαβα από μέρος του, καθώς και η υπομονή που επέδειξε όλο αυτό το χρονικό διάστημα, έπαιξαν καθοριστικό ρόλο για την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Με τις συμβουλές και την υποστήριξη του με βοήθησε να ξεπεράσω τα εμπόδια που δημιουργούνταν, για την περάτωση της εργασίας μου. Επίσης θέλω να ευχαριστήσω τον Δρ. Ιωάννη Σαρρή, για τις υπολογιστικές προσομοιώσεις και την εξασφάλιση όλων των υπολογιστικών πόρων που χρειάστηκαν, όπως και την επίβλεψη της εργασίας. Συγχρόνως πολύ σημαντική ήταν και η συμβολή όλων των παιδιών από την ομάδα του εργαστηρίου καθώς η παραμικρή συμβουλή του καθενός για την συγγραφή αυτής της εργασίας ήταν πολύτιμη.

Τέλος θα ήθελα να αναφερθώ ξεχωριστά στην οικογένεια μου και τους φίλους μου οι οποίοι ήταν πάντα κοντά μου, πρόθυμοι να με ακούσουν. Με την αγάπη τους και με τον δικό του μοναδικό τρόπο ο καθένας, μου στάθηκε όλο αυτό το διάστημα.

## Περιεχόμενα

ABSTRACT .....	iii
Ευχαριστίες .....	iv
Κατάλογος Σχημάτων .....	vii
Κατάλογος Πινάκων .....	xiv
Κατάλογος Εξισώσεων .....	xv
Λίστα Συντομογραφιών .....	xvi
1 Εισαγωγή .....	1
2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση .....	2
2.1 Εισαγωγή .....	2
2.1.1 Ορισμός αίθριου .....	3
2.1.2 Προβλήματα δυναμικής και ασφάλειας του αίθριου σε περίπτωση πυρκαγιάς .....	6
2.1.3 Συστήματα πυροπροστασίας .....	8
2.1.4 Συστήματα ελέγχου καπνού .....	13
3 Μεθοδολογία του κώδικα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής FDS .....	15
3.1 Εισαγωγή .....	15
3.1.1 Θεμελιώδης εξισώσεις .....	16
4 Μελέτη των καπναερίων στο εσωτερικό κτηρίου .....	20
4.1 Περιγραφή πειραματικής διάταξης .....	20
4.2 Υπολογιστικό χωρίο .....	22
4.3 Ισοϋψή γραφήματα ταχυτήτων .....	24
4.3.1 Ισοϋψή γραφήματα θερμοκρασιακού πεδίου .....	28
4.3.2 Ισοϋψή γραφήματα προϊόντων καύσης ως ποσόστωση της μάζας του αέρα .....	31
4.3.3 Χρονικά μεταβαλλόμενες τιμές της θερμοκρασίας .....	34
4.3.4 Μέσες ροϊκές γραμμές, ταχύτητες και θερμοκρασίες .....	36
5 Μελέτη της επίδρασης των ανοιγμάτων στην κατανομή των καπναερίων στο εσωτερικό κτηρίου .....	40
5.1 Πλήρωση με σταθερή φωτιά .....	40
5.1.1 Μέθοδος Εξίσωσης για Σταθερή Εξάτμιση Καπνού .....	41
5.1.2 Πυρκαγιά σε Αίθριο .....	42
5.1.3 Θερμοκρασία στρώματος καπνού .....	45
5.1.4 Ογκομετρική Ροή Καυσαερίων Καπνού .....	45
5.1.5 Επιφάνεια ανοιγμάτων εξαγωγής των καυσαερίων .....	46
5.2 Μελέτη περίπτωσης για φωτιά σε κλειστό χώρο .....	47
5.3 Μελέτη περιπτώσεων για φωτιά σε χώρο με ανοίγματα εισόδου και εξόδου .....	49
5.3.1 Περίπτωση 1 .....	51
5.3.2 Περίπτωση 2 .....	57
5.3.3 Περίπτωση 3 .....	62

5.3.4 Περίπτωση 4 .....	68
5.3.5 Περίπτωση 5 .....	74
5.3.6 Περίπτωση 6 .....	80
5.3.7 Περίπτωση 7 .....	85
6 Συμπεράσματα .....	91
6.1 Συμπεράσματα μελέτης αίθριου με ανοίγματα .....	91
6.2 Συμπεράσματα μελέτης για διαφορετικές θέσεις των ανοιγμάτων στο κέλυφος του κτηρίου .....	91
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	102



## Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2-1 Σύγχρονα αίθρια: Debis Haus (Βερολίνο) στο a) Gaylord Opryland Resort & Convention Center (Νάσβιλ) στο b) (Εικόνα από Gutiérrez Montes, Sanmiguel Rojas et al. (2009) ) .....	2
Σχήμα 2-2 Τυπολογία απλών αίθριων ( Εικόνα από Gutiérrez Montes, Sanmiguel Rojas et al. (2009) ) .....	3
Σχήμα 2-3 Τυπολογία πολύπλοκων αίθριων ( Εικόνα από Gutiérrez Montes, Sanmiguel Rojas et al. (2009) ) .....	4
Σχήμα 2-4 Τυπολογία αίθριου σύμφωνα με το περίβλημα ( Εικόνα από Gutiérrez Montes, Sanmiguel Rojas et al. (2009) ) .....	5
Σχήμα 2-5 Κύρια σενάρια πυρκαγιάς. Πυρκαγιά σε αίθριο στο a) Διαρροή στήλης καπνού στο b) ( Εικόνα από Gutiérrez Montes, Sanmiguel Rojas et al. (2009) ) .....	9
Σχήμα 2-6 Το σχέδιο των δύο επιπέδων που λαμβάνονται σε ένα μοντέλο ζώνης στο a) Τα περιγράμματα θερμοκρασίας που υπολογίζονται από ένα μοντέλο CFD στο b) ( Εικόνα από Gutiérrez Montes, Sanmiguel Rojas et al. (2009) ) .....	13
Σχήμα 4-1 Σχέδιο και διαστάσεις του κτηρίου «Μούρθια» ( Εικόνα από Gutiérrez-Montes, Sanmiguel-Rojas et al. (2009) ) .....	20
Σχήμα 4-2 Πρόσοψη υπολογιστικής προσομοίωσης αίθριου με το πρόγραμμα Pyrosim .....	23
Σχήμα 4-3 Ισοϋψές γράφημα ταχυτήτων για $Y= 7,800$ και $t= 250s$ .....	24
Σχήμα 4-4 Ισοϋψές γράφημα ταχυτήτων για $Y= 7,800$ και $t= 500s$ .....	25
Σχήμα 4-5 Ισοϋψές γράφημα ταχυτήτων για $Y= 7,800$ και $t= 750s$ .....	26
Σχήμα 4-6 Ισοϋψές γράφημα ταχυτήτων για $Y= 7,800$ και $t= 1000s$ .....	27
Σχήμα 4-7 Ισοϋψές γράφημα θερμοκρασιακού πεδίου για $Y= 7,800$ και $t= 250s$ .....	28
Σχήμα 4-8 Ισοϋψές γράφημα θερμοκρασιακού πεδίου για $Y= 7,800$ και $t= 500s$ .....	28
Σχήμα 4-9 Ισοϋψές γράφημα θερμοκρασιακού πεδίου για $Y= 7,800$ και $t= 750s$ .....	29
Σχήμα 4-10 Ισοϋψές γράφημα θερμοκρασιακού πεδίου για $Y= 7,800$ και $t= 1000s$ .....	30
Σχήμα 4-11 Ισοϋψές γράφημα προϊόντων καύσης ως ποσόστωση της μάζας του αέρα για $Y= 7,800$ και $t= 250s$ .....	31
Σχήμα 4-12 Ισοϋψές γράφημα προϊόντων καύσης ως ποσόστωση της μάζας του αέρα για $Y= 7,800$ και $t= 500s$ .....	32

Σχήμα 4-13	Ισοϋψές γράφημα προϊόντων καύσης ως ποσόστωση της μάζας του αέρα για $Y= 7,800$ και $t= 750s$ .....	32
Σχήμα 4-14	Ισοϋψές γράφημα προϊόντων καύσης ως ποσόστωση της μάζας του αέρα για $Y= 7,800$ και $t= 1000s$ .....	33
Σχήμα 4-15	Διάγραμμα σύγκρισης των αποτελεσμάτων θερμοκρασίας της υπολογιστικής προσομοίωσης με των πειραματικών μετρήσεων του Gutierrez-Montes, Sanmiguel-Rojas et al. (2009) στο σημείο 24 .....	34
Σχήμα 4-16	Διάγραμμα σύγκρισης των αποτελεσμάτων θερμοκρασίας της υπολογιστικής προσομοίωσης με των πειραματικών μετρήσεων του Gutierrez-Montes, Sanmiguel-Rojas et al. (2009) στο σημείο 28 .....	35
Σχήμα 4-17	Μέσες ροϊκές γραμμές στο επίπεδο συμμετρίας .....	36
Σχήμα 4-18	Μέσες τιμές ταχύτητας $U_z$ στο επίπεδο συμμετρίας .....	37
Σχήμα 4-19	Μέσες τιμές της θερμοκρασίας στο επίπεδο συμμετρίας .....	38
Σχήμα 4-20	Γραφική παράσταση μέσων τιμών θερμοκρασίας .....	39
Σχήμα 5-1	Θερμοκρασία Στρώματος Καπνού για Σταθερά Συστήματα Εξάτμισης Καπνού .....	44
Σχήμα 5-2	Ρυθμός Εξάτμισης Καπνού για Σταθερά Συστήματα Εξάτμισης Καπνού .....	44
Σχήμα 5-3	Κατανομή του καπνού στο εσωτερικό του χώρου .....	48
Σχήμα 5-4	Κατανομή του καπνού στο εσωτερικό του χώρου .....	49
Σχήμα 5-5	Εμβαδόν ανοιγμάτων $A_{inlet}$ και $A_{outlet}$ για την μελέτη περίπτωσης 151 .....	151
Σχήμα 5-6	Γεωμετρία των α) ανοιγμάτων εισόδου νωπού αέρα και β) ανοιγμάτων εξόδου των καπναερίων για την περίπτωση 1 .....	52
Σχήμα 5-7	Ισοϋψές γράφημα της ταχύτητας $U_x$ (m/sec) στο επίπεδο $Y= 2,750$ μετά από $t= 400s$ από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 1 .....	53
Σχήμα 5-8	Ισοϋψές γράφημα της ταχύτητας $U_x$ (m/sec) στο επίπεδο $Y= 9,750$ μετά από $t= 400s$ από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 1 .....	53
Σχήμα 5-9	Ισοϋψές γράφημα κατανομής της πίεσης (Pa) στο επίπεδο $Y= 9,750$ μετά από $t= 400s$ από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 1 .....	54
Σχήμα 5-10	Ισοϋψές γράφημα της θερμοκρασίας των καπναερίων ( $^{\circ}C$ ) στο επίπεδο $Y= 2,750$ μετά από $t= 400s$ από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 1 .....	55

Σχήμα 5-11	Ισοϋψές γράφημα της θερμοκρασίας των καπναερίων (°C) στο επίπεδο $Y= 9,750$ μετά από $t= 400s$ από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 1 .....	55
Σχήμα 5-12	Ισοϋψές γράφημα της συγκέντρωσης του καπνού (soot) (kg/kg) στο επίπεδο $Y= 9,750$ μετά από $t= 400s$ από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 1 .....	56
Σχήμα 5-13	Συγκέντρωση του καπνού στο χώρο μετά από $t= 400s$ από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 1 .....	56
Σχήμα 5-14	Εμβαδόν ανοιγμάτων $A_{inlet}$ και $A_{outlet}$ για την μελέτη περίπτωσης 2 .....	57
Σχήμα 5-15	Γεωμετρία των α) ανοιγμάτων εισόδου νωπού αέρα και β) ) ανοιγμάτων εξόδου των καπναερίων για την περίπτωση 2 .....	58
Σχήμα 5-16	Ισοϋψές γράφημα της ταχύτητας $U_x$ (m/sec) στο επίπεδο $Y= 9,750$ μετά από $t= 400s$ από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 2 .....	59
Σχήμα 5-17	Ισοϋψές γράφημα της ταχύτητας $U_z$ (m/sec) στο επίπεδο $Y= 9,750$ μετά από $t= 400s$ από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 2 .....	59
Σχήμα 5-18	Ισοϋψές γράφημα κατανομής της πίεσης (Pa) στο επίπεδο $Y= 9,750$ μετά από $t= 400s$ από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 2 .....	60
Σχήμα 5-19	Ισοϋψές γράφημα της θερμοκρασίας των καπναερίων (°C) στο επίπεδο $Y= 9,750$ μετά από $t= 400s$ από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 2 .....	61
Σχήμα 5-20	Ισοϋψές γράφημα της συγκέντρωσης του καπνού (soot) (kg/kg) στο επίπεδο $Y= 9,750$ και $t= 400s$ για την μελέτη περίπτωσης 2 .....	61
Σχήμα 5-21	Συγκέντρωση του καπνού στο χώρο μετά από $t= 400s$ από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 2 .....	62
Σχήμα 5-22	Εμβαδόν ανοιγμάτων $A_{inlet}$ και $A_{outlet}$ για την μελέτη περίπτωσης 3 .....	63
Σχήμα 5-23	Γεωμετρία των α) ανοιγμάτων εισόδου νωπού αέρα και β) ) ανοιγμάτων εξόδου των καπναερίων για την περίπτωση 3 .....	63
Σχήμα 5-24	Ισοϋψές γράφημα της ταχύτητας $U_x$ (m/sec) στο επίπεδο $Y= 9,750$ μετά από $t= 400s$ από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 3 .....	64
Σχήμα 5-25	Ισοϋψές γράφημα κατανομής της πίεσης (Pa) στο επίπεδο $Y= 9,750$ μετά από $t= 400s$ από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 3 .....	65

Σχήμα 5-26	Ισοϋψές γράφημα της θερμοκρασίας των καπναερίων (°C) στο επίπεδο $Y = 9,750$ μετά από $t = 400s$ από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 3 .....	66
Σχήμα 5-27	Ισοϋψές γράφημα της συγκέντρωσης του καπνού (soot) (kg/kg) στο επίπεδο $Y = 9,750$ μετά από $t = 400s$ από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 3 .....	67
Σχήμα 5-28	Συγκέντρωση του καπνού στο χώρο μετά από $t = 400s$ από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 3 .....	67
Σχήμα 5-29	Εμβαδόν ανοιγμάτων $A_{inlet}$ και $A_{outlet}$ για την μελέτη περίπτωσης 4 .....	68
Σχήμα 5-30	Ισοϋψές γράφημα της ταχύτητας $U_x$ (m/sec) στο επίπεδο $Y = 9,750$ μετά από $t = 400s$ από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 4 .....	69
Σχήμα 5-31	Ισοϋψές γράφημα της ταχύτητας $U_z$ (m/sec) στο επίπεδο $Y = 9,750$ μετά από $t = 400s$ από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 4 .....	70
Σχήμα 5-32	Ισοϋψές γράφημα κατανομής της πίεσης (Pa) στο επίπεδο $Y = 9,750$ μετά από $t = 400s$ από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 4 .....	71
Σχήμα 5-33	Ισοϋψές γράφημα της θερμοκρασίας των καπναερίων (°C) στο επίπεδο $Y = 9,750$ μετά από $t = 400s$ από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 4 .....	72
Σχήμα 5-34	Ισοϋψές γράφημα της συγκέντρωσης του καπνού (soot) (kg/kg) στο επίπεδο $Y = 9,750$ μετά από $t = 400s$ από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 4 .....	73
Σχήμα 5-35	Συγκέντρωση του καπνού στο χώρο μετά από $t = 400s$ από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 4 .....	73
Σχήμα 5-36	Εμβαδόν ανοιγμάτων $A_{inlet}$ και $A_{outlet}$ για την μελέτη περίπτωσης 5 .....	74
Σχήμα 5-37	Ισοϋψές γράφημα της ταχύτητας $U_x$ (m/sec) στο επίπεδο $Y = 9,750$ μετά από $t = 400s$ από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 5 .....	75
Σχήμα 5-38	Ισοϋψές γράφημα της ταχύτητας $U_z$ (m/sec) στο επίπεδο $Y = 9,750$ μετά από $t = 400s$ από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 5 .....	76
Σχήμα 5-39	Ισοϋψές γράφημα κατανομής της πίεσης (Pa) στο επίπεδο $Y = 9,750$ μετά από $t = 400s$ από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 5 .....	77

Σχήμα 5-40	Ισοϋψές γράφημα της θερμοκρασίας των καπναερίων (°C) στο επίπεδο $Y = 9,750$ μετά από $t = 400s$ από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 5 .....	78
Σχήμα 5-41	Ισοϋψές γράφημα της συγκέντρωσης του καπνού (soot) (kg/kg) στο επίπεδο $Y = 9,750$ μετά από $t = 400s$ από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 5 .....	79
Σχήμα 5-42	Συγκέντρωση του καπνού στο χώρο μετά από $t = 400s$ από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 5 .....	79
Σχήμα 5-43	Εμβαδόν ανοιγμάτων $A_{inlet}$ και $A_{outlet}$ για την μελέτη περίπτωσης 6 .....	80
Σχήμα 5-44	Ισοϋψές γράφημα της ταχύτητας $U_x$ (m/sec) στο επίπεδο $Y = 9,750$ μετά από $t = 400s$ από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 6 .....	81
Σχήμα 5-45	Ισοϋψές γράφημα της ταχύτητας $U_z$ (m/sec) στο επίπεδο $Y = 9,750$ μετά από $t = 400s$ από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 6 .....	82
Σχήμα 5-46	Ισοϋψές γράφημα κατανομής της πίεσης (Pa) στο επίπεδο $Y = 9,750$ μετά από $t = 400s$ από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 6 .....	83
Σχήμα 5-47	Ισοϋψές γράφημα της θερμοκρασίας των καπναερίων (°C) στο επίπεδο $Y = 9,750$ μετά από $t = 400s$ από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 6 .....	83
Σχήμα 5-48	Ισοϋψές γράφημα της συγκέντρωσης του καπνού (soot) (kg/kg) στο επίπεδο $Y = 9,750$ μετά από $t = 400s$ από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 6 .....	84
Σχήμα 5-49	Συγκέντρωση του καπνού στο χώρο μετά από $t = 400s$ από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 6 .....	85
Σχήμα 5-50	Εμβαδόν ανοιγμάτων $A_{inlet}$ και $A_{outlet}$ για την μελέτη περίπτωσης 7 .....	86
Σχήμα 5-51	Ισοϋψές γράφημα της ταχύτητας $U_x$ (m/sec) στο επίπεδο $Y = 9,750$ μετά από $t = 400s$ από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 7 .....	87
Σχήμα 5-52	Ισοϋψές γράφημα της ταχύτητας $U_z$ (m/sec) στο επίπεδο $Y = 9,750$ μετά από $t = 400s$ από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 7 .....	87
Σχήμα 5-53	Ισοϋψές γράφημα κατανομής της πίεσης (Pa) στο επίπεδο $Y = 9,750$ μετά από $t = 400s$ από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 7 .....	88

Σχήμα 5-54	Ισοϋψές γράφημα της θερμοκρασίας των καπναερίων (°C) στο επίπεδο Y= 9,750 μετά από t= 400s από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 7 .....	89
Σχήμα 5-55	Ισοϋψές γράφημα της συγκέντρωσης του καπνού (soot) (kg/kg) στο επίπεδο Y= 9,750 μετά από t= 400s από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 7 .....	89
Σχήμα 5-56	Συγκέντρωση του καπνού στο χώρο μετά από t= 400s από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 7 .....	90
Σχήμα 6-1	Συγκέντρωση του καπνού (soot) για 30 mg/kg μετά από t= 400s από την έναρξη της πυρκαγιάς, απόσταση από το δάπεδο 4,7 m .....	92
Σχήμα 6-2	Συγκέντρωση του καπνού (soot) για 40 mg/kg μετά από t= 400s από την έναρξη της πυρκαγιάς .....	92
Σχήμα 6-3	Συγκέντρωση του καπνού (soot) για 10 mg/kg μετά από t= 400s από την έναρξη της πυρκαγιάς, απόσταση από το δάπεδο 0,5m .....	93
Σχήμα 6-4	Συγκέντρωση του καπνού (soot) για 20 mg/kg μετά από t= 400s από την έναρξη της πυρκαγιάς, απόσταση από το δάπεδο 2,7m .....	93
Σχήμα 6-5	Συγκέντρωση του καπνού (soot) για 30 mg/kg μετά από t= 400s από την έναρξη της πυρκαγιάς .....	93
Σχήμα 6-6	Συγκέντρωση του καπνού (soot) για 40 mg/kg μετά από t= 400s από την έναρξη της πυρκαγιάς .....	93
Σχήμα 6-7	Συγκέντρωση του καπνού (soot) για 10 mg/kg μετά από t= 400s από την έναρξη της πυρκαγιάς, απόσταση από το δάπεδο 1,7m .....	94
Σχήμα 6-8	Συγκέντρωση του καπνού (soot) για 20 mg/kg μετά από t= 400s από την έναρξη της πυρκαγιάς, απόσταση από το δάπεδο 3,6m .....	94
Σχήμα 6-9	Συγκέντρωση του καπνού (soot) για 30 mg/kg μετά από t= 400s από την έναρξη της πυρκαγιάς .....	95
Σχήμα 6-10	Συγκέντρωση του καπνού (soot) για 40 mg/kg μετά από t= 400s από την έναρξη της πυρκαγιάς .....	95
Σχήμα 6-11	Συγκέντρωση του καπνού (soot) για 10 mg/kg μετά από t= 400s από την έναρξη της πυρκαγιάς, απόσταση από το δάπεδο 2,78m .....	96
Σχήμα 6-12	Συγκέντρωση του καπνού (soot) για 20 mg/kg μετά από t= 400s από την έναρξη της πυρκαγιάς, απόσταση από το δάπεδο 3,1m .....	96
Σχήμα 6-13	Συγκέντρωση του καπνού (soot) για 30 mg/kg μετά από t= 400s από την έναρξη της πυρκαγιάς .....	96
Σχήμα 6-14	Συγκέντρωση του καπνού (soot) για 40 mg/kg μετά από t= 400s από την έναρξη της πυρκαγιάς .....	96

Σχήμα 6-15 Συγκέντρωση του καπνού (soot) για 10 mg/kg μετά από t= 400s από την έναρξη της πυρκαγιάς, απόσταση από το δάπεδο 2,57m .....	97
Σχήμα 6-16 Συγκέντρωση του καπνού (soot) για 20 mg/kg μετά από t= 400s από την έναρξη της πυρκαγιάς, απόσταση από το δάπεδο 3,1m .....	97
Σχήμα 6-17 Συγκέντρωση του καπνού (soot) για 30 mg/kg μετά από t= 400s από την έναρξη της πυρκαγιάς, απόσταση από το δάπεδο 5,7m .....	98
Σχήμα 6-18 Συγκέντρωση του καπνού (soot) για 40 mg/kg μετά από t= 400s από την έναρξη της πυρκαγιάς .....	98
Σχήμα 6-19 Συγκέντρωση του καπνού (soot) για 10 mg/kg μετά από t= 400s από την έναρξη της πυρκαγιάς .....	99
Σχήμα 6-20 Συγκέντρωση του καπνού (soot) για 20 mg/kg μετά από t= 400s από την έναρξη της πυρκαγιάς .....	99
Σχήμα 6-21 Συγκέντρωση του καπνού (soot) για 30 mg/kg μετά από t= 400s από την έναρξη της πυρκαγιάς .....	99
Σχήμα 6-22 Συγκέντρωση του καπνού (soot) για 40 mg/kg μετά από t= 400s από την έναρξη της πυρκαγιάς .....	99
Σχήμα 6-23 Συγκέντρωση του καπνού (soot) για 10 mg/kg μετά από t= 400s από την έναρξη της πυρκαγιάς .....	100
Σχήμα 6-24 Συγκέντρωση του καπνού (soot) για 20 mg/kg μετά από t= 400s από την έναρξη της πυρκαγιάς .....	100
Σχήμα 6-25 Συγκέντρωση του καπνού (soot) για 30 mg/kg μετά από t= 400s από την έναρξη της πυρκαγιάς .....	100
Σχήμα 6-26 Συγκέντρωση του καπνού (soot) για 40 mg/kg μετά από t= 400s από την έναρξη της πυρκαγιάς .....	100

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 5-1 Περιπτώσεις που μελετήθηκαν με διαφορετικά ανοίγματα εισόδου, εξόδου στο κέλυφος κτηρίου καθώς και διαφορετικές συνθήκες ανέμου στο εξωτερικό του. ....	50
---	----



## Κατάλογος Εξιιώσεων

(3-1 ).....	16
(3-2 ).....	16
(3-3 ).....	16
(3-4 ).....	17
(3-5 ).....	17
(3-6 ).....	17
(3-7 ).....	17
(3-8 ).....	17
(3-9 ).....	18
(3-10 ).....	18
(3-11 ).....	19
(5-1 ).....	40
(5-2 ).....	41
(5-3 ).....	42
(5-4 ).....	42
(5-5 ).....	42
(5-6 ).....	43
(5-7 ).....	45
(5-8 ).....	45
(5-9 ).....	46
(5-10 ).....	46

## **Λίστα Συντομογραφιών**

CFD	Computational Fluid Dynamics
FDS	Fire Dynamics Simulator
LES	Large Eddy Simulation
ARIS	Advanced Research Information System

# 1 Εισαγωγή

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι η μελέτη εξαερισμού καπνού με φυσικό αερισμό σε περίπτωση πυρκαγιάς στην κατηγορία των μεγάλων κτηρίων, στην οποία περιλαμβάνονται και τα αίθρια όπως εμπορικά κέντρα, μεγάλα γραφεία, βιβλιοθήκες με διάφορα ανοίγματα στην οροφή τους, για την καλύτερη κατανόηση και αποτελεσματικότητα των συστημάτων πυρασφάλειας. Η μελέτη γίνεται πάνω σε ένα πείραμα που διενεργήθηκε στην περιοχή Μούρθια της Ισπανίας με στόχο την παρακολούθηση της δυναμικής της φωτιάς και τη κίνηση του καπνού. Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές πυρκαγιάς στο κέντρο του κτηρίου, με σκοπό την μελέτη μεγεθών, όπως την ταχύτητα, την θερμοκρασία, τον καπνό και τα προϊόντα καύσης που δημιουργούνται. Το συγκεκριμένο πείραμα θα προσομοιωθεί με την χρήση μοντέλων Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής (Computational Fluid Dynamics) CFD. Η μέθοδος αυτή ύστερα από διάφορες έρευνες έχει καταστεί ως την πιο κατάλληλη για μοντελοποίηση και προσομοίωση της φωτιάς. Ο κώδικας ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση είναι το FDS (Fire Dynamics Simulator). Το FDS διενεργεί προσομοίωση μεγάλων δινών (LES). Για την διεξαγωγή του LES (Large Eddy Simulation) είναι απαραίτητη η δημιουργία πυκνού πλέγματος, επομένως χρειάζεται και μεγάλη υπολογιστική ισχύ, η οποία παρέχεται από το υπέρ-υπολογιστικό σύστημα (cluster) που ονομάζεται ARIS (Advanced Research Information System), του Εθνικού Δικτύου Υποδομών Τεχνολογίας και Έρευνας. Τέλος θα γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την προσομοίωση που διενεργήθηκε με τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει από το πείραμα.

Η μελέτη αυτή επίσης καθόρισε την επίδραση των ανοιγμάτων στο κέλυφος του κτηρίου στην κατανομή της ροής στο εσωτερικό του. Συγκεκριμένα, μελετήθηκε η ροή των καπναερίων στο εσωτερικό του κτηρίου, η κατανομή των πιέσεων, των θερμοκρασιών και των ταχυτήτων τους.

## 2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

### 2.1 Εισαγωγή

Η γεωμετρία κτηρίου που θα μελετηθεί είναι η περίπτωση ενός κλειστού αίθριου. Το αίθριο πρώτο εμφανίστηκε στην αρχαία Ελλάδα και την Ρώμη (Roaf 2004). Ήταν ένας χώρος όπου είχε ανοιχτή οροφή και περιβάλλονταν από ένα κτήριο. Σκοπός της δημιουργίας του αίθριου ήταν να υπάρξουν καλύτερες και πιο φυσικές συνθήκες αερισμού και φωτισμού. Κατά τον 19<sup>ο</sup> και τον 20<sup>ο</sup> αιώνα, το αίθριο εξελίχθηκε μετά από την δυνατότητα εισαγωγής γυάλινης επιφάνειας στην οροφή του έτσι ώστε να μπορεί να είναι πιο χρήσιμο και ανθεκτικό σε διάφορες καιρικές συνθήκες. Την δεκαετία του 80' ξεκινάει να εμπεριέχεται σε διάφορων ειδών κτίρια όπως εμπορικά κέντρα όπου τοποθετήθηκε έτσι ώστε να είναι πιο ευχάριστο το τοπίο για τους ανθρώπους και την δεκαετία του 90' αρχίζει να χρησιμοποιείται σε πιο κοινά κτήρια όπως γραφεία, βιβλιοθήκες και να παρατηρείται όλο και πιο συχνά στην καθημερινότητα μας (Saxon 1994). Σήμερα το αίθριο σχεδιάζεται σχεδόν σε όλα τα σύγχρονα κτήρια με σκοπό ένα όμορφο περιβάλλον όπου φωτίζεται με φυσικό τρόπο και μοιάζει με τον έξω χώρο (Saxon 1983).



a)



b)

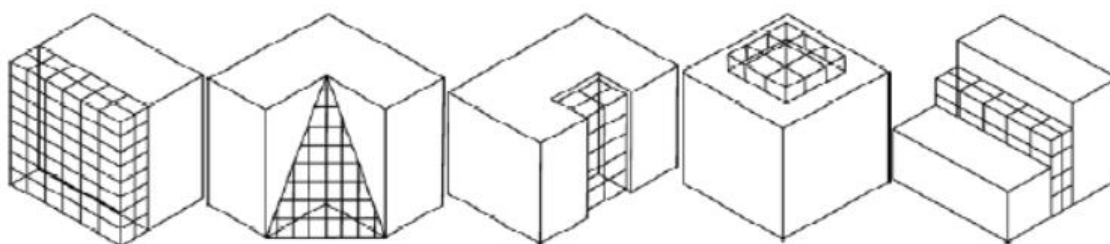
**Σχήμα 2-1 Σύγχρονα αίθρια: Debis Haus (Βερολίνο) στο a) Gaylord Opryland Resort & Convention Center (Νάσβιλ) στο b) (Εικόνα από Gutiérrez Montes, Sanmiguel Rojas et al. (2009) )**

Με τα χρόνια παρατηρήθηκε ότι η κατασκευή των αίθριων θα μπορούσε επίσης να συμβάλει στην μείωση των απωλειών θερμότητας λόγω του συμπαγούς σχεδιασμού και στην μείωση της κατανάλωσης ενέργειας λόγω της προσθήκης φυσικού εξαερισμού (Bryn 1995).

### 2.1.1 Ορισμός αίθριου

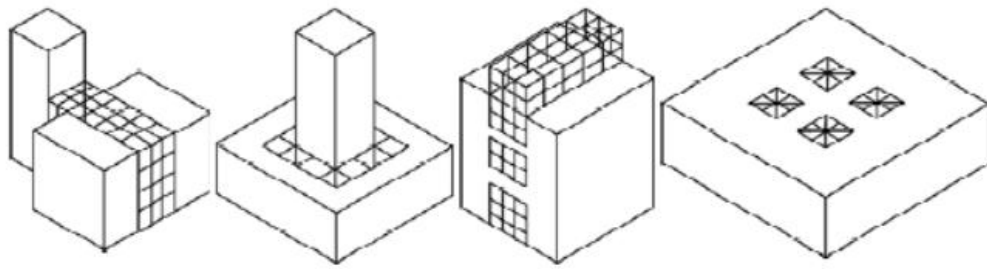
Υπάρχουν διάφοροι ορισμοί για τα αίθρια, η πιο γενική εξήγηση είναι ότι είναι ένας ανοιχτός χώρος μέσα σε ένα κτήριο ο οποίος δημιουργείται από κάποιο άνοιγμα και μπορεί να συνδέει πολλούς ορόφους ταυτόχρονα. Με βάση τον Διεθνή Οικοδομικό Κώδικα το αίθριο πρόκειται για ένα άνοιγμα που ενώνει δύο ή και παραπάνω ορόφους, εκτός από κλειστές σκάλες, ανελκυστήρες, κυλιόμενες σκάλες, κλιματιστικό ή άλλο εξοπλισμό, ο οποίος είναι κλειστός στην οροφή και δεν είναι εμπορικό κέντρο (Council 2006).

Υπάρχουν διάφορα σχέδια αίθριων στα κτήρια. Μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα την διαμόρφωση τους, την κατασκευή τους ή την χρήση τους.



α) Μονής Όψης β) Διπλής Όψης γ) Τριών Πλευρών δ) Τεσσάρων Πλευρών ε) Γραμμικό

**Σχήμα 2-2** Τυπολογία απλών αίθριων ( Εικόνα από Gutierrez Montes, Sanmiguel Rojas et al. (2009) )



α) Γεφύρωση      β) Βάθρο      γ) Πολλαπλά πλευρικά      δ) Πολλά κατακόρυφα

**Σχήμα 2-3 Τυπολογία πολύπλοκων αίθριων ( Εικόνα από Gutiérrez Montes, Sanmiguel Rojas et al. (2009) )**

Τόσο το σχήμα όσο και η γεωμετρία του αίθριου είναι βασικά χαρακτηριστικά για την διαμόρφωση ενός κτηρίου, όπως φαίνεται στις παραπάνω εικόνες (2-2, 2-3) τα αίθρια χωρίζονται σε απλά και πολύπλοκα.

Τα απλά αίθρια χωρίζονται σε 5 κατηγορίες:

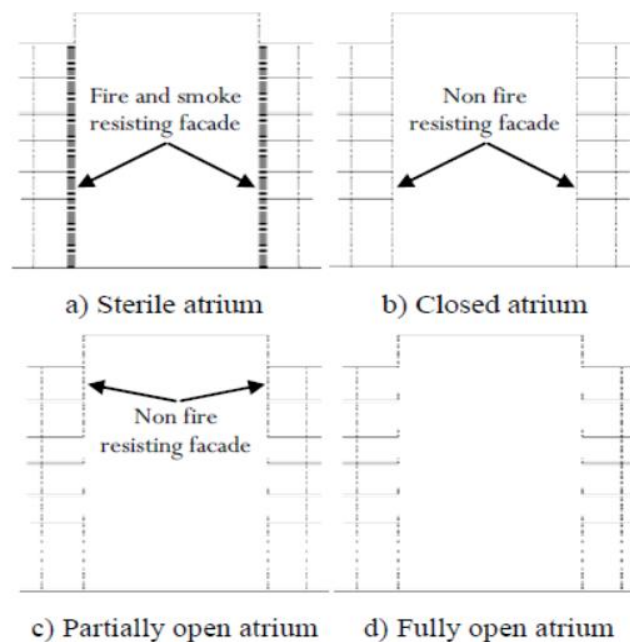
- Μονής Όψης: Τα αίθρια που συνορεύουν με μια πλευρά του τμήματος των κατασκευών.
- Διπλής Όψης: Τα αίθρια που συνορεύουν με δύο πλευρές των κατεχόμενων τμημάτων των κτηρίων.
- Τριών Πλευρών: Τα αίθρια που συνορεύουν με τρεις πλευρές των κατεχόμενων τμημάτων των κτηρίων.
- Τεσσάρων Πλευρών: Τα αίθρια που συνορεύουν με τέσσερις πλευρές των κατεχόμενων τμημάτων των κτηρίων.
- Γραμμικό: Τα αίθρια που βρίσκονται ανάμεσα σε δύο πλευρές των κατεχόμενων τμημάτων των κτηρίων.

Τα πολύπλοκα αίθρια χωρίζονται σε 4 κατηγορίες:

- Γεφύρωση: Όταν τα αίθρια συνδέουν αρκετές πλευρές των κατεχόμενων τμημάτων των κτηρίων.
- Βάθρο: Όταν τα αίθρια βρίσκονται στο κάτω μέρος των κατεχόμενων τμημάτων των κτηρίων.

- Πολλαπλά πλευρικά: Όταν τα αίθρια βρίσκονται διασκορπισμένα σε όλες τις πλευρές των κατεχόμενων τμημάτων των κτηρίων.
- Πολλά κατακόρυφα: Όταν τα αίθρια βρίσκονται διασκορπισμένα στο επάνω μέρος των κατεχόμενων τμημάτων των κτηρίων.

Τα αίθρια μπορούν να κατηγοριοποιηθούν επίσης με βάση τον τύπο του περιβλήματος και την πυρασφάλεια όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-4.



**Σχήμα 2-4** Τυπολογία αίθριου σύμφωνα με το περίβλημα ( Εικόνα από Gutiérrez Montes, Sanmiguel Rojas et al. (2009) )

Η πρώτη περίπτωση που απεικονίζεται στην Εικόνα 2-4a, είναι τα αίθρια όπου ο χώρος τους χωρίζεται από το υπόλοιπο κτήριο μέσω μιας πρόσοψης που λειτουργεί σαν φραγμός στην φωτιά και στον καπνό και βρίσκεται ανάμεσα στο αίθριο και τους γειτονικούς χώρους.

Η δεύτερη περίπτωση που απεικονίζεται στην Εικόνα 2-4b, είναι το κλειστό αίθριο το οποίο χωρίζεται και αυτό από το υπόλοιπο κτήριο με μια πρόσοψη όπου αντιστέκεται στην φωτιά αλλά όχι απαραίτητα στον καπνό. Ο χώρος του αίθριου μπορεί επίσης να είναι λειτουργικός, παραδείγματος χάρη ένα εστιατόριο.

Η τρίτη περίπτωση που απεικονίζεται στην Εικόνα 2-4c, είναι τα μερικώς ανοικτά αίθρια , δηλαδή τα αίθρια όπου έχουν κάποιο επικοινωνιακό χώρο με τους υπόλοιπους χώρους του κτηρίου ακόμα και σε χαμηλότερους ορόφους. Η πρόσοψη που αντιστέκεται στην φωτιά μπορεί να διαχωρίζει το αίθριο με τους υπόλοιπους χώρους στους υψηλούς ορόφους.

Η τέταρτη και τελευταία περίπτωση που απεικονίζεται στην Εικόνα 2-4d, είναι τα πλήρως ανοικτά αίθρια, όπου διαθέτουν μεγάλα ανοίγματα και επικοινωνούν άνετα με τους υπόλοιπους χώρους του κτηρίου σε όλους τους ορόφους.

### **2.1.2 Προβλήματα δυναμικής και ασφάλειας του αίθριου σε περίπτωση πυρκαγιάς**

Τα αίθρια πλέον υπάρχουν στα περισσότερα σύγχρονα κτήρια, όμως για την πυρασφάλεια τους απαιτείται αρκετή μελέτη διότι το ύψος τους δεν βοηθάει στην αποτελεσματικότητα των αυτόματων συστημάτων καταιονισμού και δεν υπάρχει διαχωριστικό δάπεδο μεταξύ των ορόφων που μπορεί να περιορίσει και να καθυστερήσει την εξάπλωση της φωτιάς σε όλο το υπόλοιπο κτήριο.

Με την εμφάνιση πυρκαγιάς σε ένα κτήριο η φωτιά και το νέφος καπνού που δημιουργείται από τα θερμά αέρια πάνω από την φωτιά εξαπλώνονται προς άλλα μέρη του κτηρίου μέσω διάφορων ανοιγμάτων και συστημάτων εξαερισμού. Ο καπνός μπορεί να επηρεάσει πολλούς ορόφους ταυτόχρονα αρκετά γρήγορα, ενώ ανεβαίνει ψηλά λόγω της άνωσης. Καθώς ανεβαίνει το νέφος, εισβάλλει αέρας από το δωμάτιο με αποτέλεσμα να αραιώνεται ο καπνός και να μειώνεται η θερμοκρασία του. Ο καπνός που δημιουργείται εξαπλώνεται



ακτινικά και δίνει δύο στρώματα καπνού, το ανώτερο θερμού καπνού και το κατώτερο ψυχρό στρώμα αέρα. Η εμφάνιση της πυρκαγιάς στα αίθρια και η διαδικασία καταπολέμησης της διαφέρει απ' ό τι στα υπόλοιπα καταλύματα, για αυτό το λόγω απαιτείται ιδιαίτερη μελέτη για την δημιουργία πυρασφάλειας. Ειδικές απαιτήσεις για τα αίθρια έχουν συμπεριληφθεί στους οικοδομικούς κώδικες (Canadian Commission on and Fire 2008). Επίσης πολλές απόψεις για την διαχείριση του καπνού στα αίθρια έχουν γραφτεί σε πολλούς οδηγούς και πρότυπα (Morgan 1999, Klote and Air-Conditioning Engineers 2002).

Μπορεί να υπάρξουν διάφορες περιπτώσεις πυρκαγιάς, όπου ο ρυθμός παραγωγής καπνού να είναι διαφορετικός σε κάθε μια από αυτές. Οι περιπτώσεις χωρίζονται σε 3 βασικές κατηγορίες:

Η πρώτη κατηγορία αφορά την πυρκαγιά σε δάπεδο ανοιχτού χώρου όπου χωρίζεται σε 3 διαφορετικές υποκατηγορίες όσο αναφορά τον καπνό. Η πρώτη υποκατηγορία είναι το αξονικό συμμετρικό νέφος το οποίο βρίσκεται κοντά στο κέντρο ενός αίθριου, είναι μακριά από κάθε τοίχο και ο αέρας το περιβάλλει σε όλο το ύψος του μέχρι να έρθει σε επαφή με ένα στρώμα καπνού. Έχει γίνει ανάλυση πάνω στην μέση χρονική ροή των νεφών (Morton, Taylor et al. 1956). Επίσης έχει γίνει ανάλυση των αξονικών συμμετρικών νεφών για τα τυρβώδη νέφη μέσα σε κτήρια λόγω πυρκαγιάς (McCaffrey 1983, Cetegen, Zukoski et al. 1984, Heskestad 1984). Η δεύτερη υποκατηγορία αφορά τα νέφη που δημιουργούνται στους τοίχους των αίθριων ύστερα από φωτιά, όπου μπορούν και εκπέμπουν αέρα από τη μισή περίμετρο τους. Έχει αναπτυχθεί συσχέτιση διεύθυνσης του νέφους στον τοίχο με βάση την κατοπτρική συμμετρία (Cox 1995, Poreh and Garrad 2000). Η τρίτη και η τελευταία υποκατηγορία είναι το γωνιακό νέφος όπου παράγεται από μια πυρκαγιά στην γωνία ενός αίθριου. Σε ανάλυση που αφορά τα γωνιακά νέφη χρησιμοποιήθηκε παρόμοια τακτική με αυτή του νέφους στον τοίχο (Cox 1995).

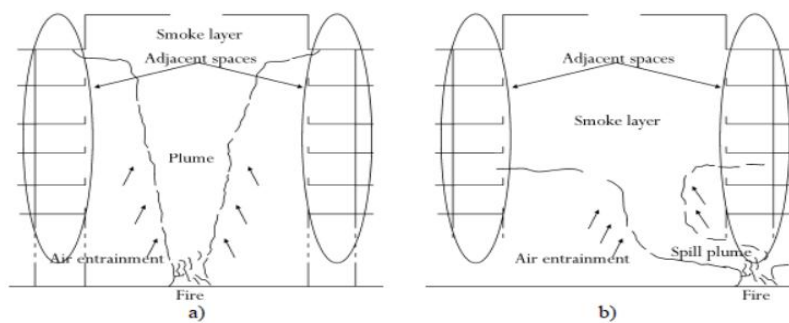
Η δεύτερη κατηγορία αφορά το σενάριο πυρκαγιάς σε έναν χώρο δίπλα στο αίθριο ή στο πεζοδρόμιο, όπου σε αυτή την περίπτωση ο καπνός ακολουθεί μια συγκεκριμένη πορεία οριζοντίως μέσω ενός ανοίγματος πριν εισέλθει στο αίθριο και μετά σχηματιστεί ένα νέφος. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται και spill plume

(Morgan, Marshall et al. 1975). Στην περίπτωση που δημιουργηθεί πυρκαγιά σε κατακλυσμένο χώρο και δεν εξαπλώνεται από αυτόν παρατηρούνται τρία στάδια: ενεργοποίηση ψεκαστήρων με την ανάπτυξη της πυρκαγιάς, σταθερή πυρκαγιά και διάσπαση. Κατά την αύξηση της πυρκαγιάς ο θερμός καπνός θα ρέει στο αίθριο. Όταν σταθεροποιηθεί η πυρκαγιά θα σχηματιστεί ένα στρώμα καπνού στην κορυφή. Τέλος στην φάση της διάσπασης η θερμοκρασία του καπνού θα φτάσει κοντά στην θερμοκρασία του περιβάλλοντος ίσως και χαμηλότερα από αυτήν και θα αναμιχθεί με την φωτιά σε όλο το χώρο κατεβαίνοντας έτσι και στα πιο χαμηλά σημεία του αίθριου.

Η τρίτη κατηγορία αφορά μια πυρκαγιά σε χώρο δίπλα στο αίθριο όπου έχει ελάχιστο εξαερισμό και ο καπνός εισέρχεται στο αίθριο μέσω ενός παραθύρου ή μιας πόρτας και στην συνέχεια σχηματίζεται ένα νέφος (Klote, Milke et al. 1992). Αυτό το νέφος ονομάζεται αλλιώς νέφος παραθύρου και έχουν γίνει διάφορες συσχετίσεις (Klote, Klote et al. 2000, Heskestad 2016).

### **2.1.3 Συστήματα πυροπροστασίας**

Ο σχεδιασμός ενός καλού συστήματος πυροπροστασίας σε ένα κτήριο που περιέχει κλειστό αίθριο είναι απαραίτητος διότι σε περίπτωση πυρκαγιάς σε κάποιον από τους ορόφους μπορεί να υπάρξει ραγδαία εξάπλωση της στους υπόλοιπους μέσω του αίθριου και αυτό να έχει σαν αποτέλεσμα τον κίνδυνο των ανθρώπων που βρίσκονται μέσα. Για αυτό το λόγω η αποτελεσματικότητα των συστημάτων ελέγχου καπνού είναι ένας πολύ βασικός παράγοντας σε αυτά τα κτήρια και διευκολύνει την ενεργοποίηση πυρόσβεσης. Ο σχεδιασμός των συστημάτων ελέγχου καπνού για τα αίθρια είναι περίπλοκη κατάσταση λόγω του ότι παίζουν ρόλο πολλοί παράγοντες για την αποδοτικότητα του. Έχουν αναλυθεί πέντε στόχοι που απέβλεπαν στο σχεδιασμό βελτιωμένων συστημάτων ελέγχου καπνού (Milke 1990):.



**Σχήμα 2-5** Κύρια σενάρια πυρκαγιάς. Πυρκαγιά σε αίθριο στο **a)** Διαρροή στήλης καπνού στο **b)** ( Εικόνα από Gutiérrez Montes, Sanmiguel Rojas et al. (2009) )

- Αρχικά το σύστημα εξάτμισης καπνού θα πρέπει να είναι έτσι διαμορφωμένο ώστε το πλούμιο του καπνού που δημιουργείται να βρίσκεται πιο ψηλά από το ύψος των ανθρώπων που βρίσκονται μέσα και για τέτοιο χρονικό διάστημα που θα είναι εφικτή και η εκκένωση τους από το κτήριο.
- Περιορισμός του καπνού σε ένα συγκεκριμένο μέρος στον χώρο του αίθριου.
- Περιορισμός της εξάπλωσης του καπνού στους γειτονικούς χώρους του αίθριου.
- Η ύπαρξη κατάλληλων συνθηκών για τον έλεγχο αρχικά και στην συνέχεια την κατάσβεση της πυρκαγιάς από το προσωπικό διάσωσης και αντιμετώπισης (Morgan 2003).
- Γενικό ενδιαφέρον για την συνολική προστασία και την μείωση των απωλειών.

Από την δεκαετία του 70 έως την δεκαετία του 80 έχουν περιληφθεί σε οικοδομικούς κανονισμούς κάποια συστήματα ελέγχου του καπνού από την πρόκληση πυρκαγιάς σε ένα αίθριο. Η λογική αυτών των συστημάτων αρχικά ήταν να υπάρχει εξαγωγή του καπνού από τα αίθρια και τα εμπορικά κέντρα με την μέθοδο εναλλαγής του καπνού, η οποία είναι βασισμένη στον όγκο των αίθριων και ορίζεται από κάποιους κώδικες από 4 έως 6 αλλαγές αέρα ανά ώρα (Association 1981, Officials 1982, Code 1994). Στην συνέχεια συμπεριλήφθηκε στις απαιτήσεις ο περιορισμός του στρώματος καπνού στο υψηλότερο σημείο

και κατά την διάρκεια της δεκαετίας του 90 υπήρξε ιδέα για τον σχεδιασμό ανεμιστήρων εξάτμισης προκειμένου να επιτευχθεί η παραμονή του στρώματος καπνού σε ένα καθορισμένο ύψος (Milke 1990).

Όλες οι προσεγγίσεις για την διαχείριση του καπνού σε ένα αίθριο εμφανίζονταν σε μηχανικούς οδηγούς (Klote, Milke et al. 1992, BOCA 1993, Hansell and Morgan 1994, Code 1997, Health 2001), για παράδειγμα μια παρουσίαση όσο αναφορά τον τρόπο πρόβλεψης της κίνησης του καπνού για τον σχεδιασμό συστημάτων που εξηγεί τις φυσικές έννοιες (Klote 1994). Αυτές οι προσεγγίσεις αποτελούνται από αλγεβρικές εξισώσεις οι οποίες έχουν σκοπό τον υπολογισμό του σχεδιασμού, αλλά το εύρος τους θεωρήθηκε ότι είναι περιορισμένο από τον (Klote 1994) και προτάθηκε από μέρους του η χρήση της ανάλυσης CFD.

Ως καθαρό ύψος ορίζεται η απόσταση μεταξύ του επιπέδου φωτιάς και της βάσης στρώματος καπνού στο αίθριο και εξασφαλίζει το σταθερό περιβάλλον για ασφαλή έξοδο. Ανάλογα με τον κανονισμό πυροπροστασίας υπάρχει και διαφορετικός προσδιορισμός του καθαρού ύψους. Η NFPA (Hansell and Morgan 1994) έχει ορίσει ότι το καθαρό ύψος στρώματος πρέπει να είναι 1,85m πάνω από το υψηλότερο επίπεδο πρόσβασης στο δάπεδο που είναι ανοικτό στο αίθριο για περίοδο 20 λεπτά. Η BOCA του εθνικού οικοδομικού κώδικα (Institute, Council et al. 1999) έχει ορίσει ότι το στρώμα καπνού πρέπει να βρίσκεται σε ύψος 1,828m ή μεγαλύτερο για τουλάχιστον 20 λεπτά, ενώ πρόσφατα ανακαλύφθηκε από κάποιους (Chow, Chow et al. 2005) ότι το καθαρό ύψος εκτιμάται σαν την μεγαλύτερη τιμή του 20% του ύψους του αίθριου.

Στα αίθρια με μεγάλο ύψος, η ικανότητα εξάτμισης του καπνού μπορεί να είναι μεγάλη εάν το επίπεδο πάνω από το οποίο είναι καθορισμένο να διατηρείται το στρώμα καπνού για μια ασφαλή έξοδο είναι πολύ κοντά στην κορυφή του αίθριου. Ο αέρας που εισέρχεται στο αίθριο μειώνει την συγκέντρωση καπνού και την θερμοκρασία ταυτόχρονα με αποτέλεσμα να φτάνει σε ένα σημείο να μην είναι απειλή για την ασφάλεια. Έχει προταθεί ένας οικονομικά αποδοτικός σχεδιασμός όπου προκαλεί την μείωση της συγκέντρωσης του καπνού εξασφαλίζοντας έτσι την ακεραιότητα των ανθρώπων (Milke 2003). Η

αποτελεσματικότητα του ρυθμού εξάτμισης καπνού μπορεί να εξεταστεί πειραματικά με την ανάλυση κινδύνου για ανθρώπους ή περιεχόμενα μέσα στο στρώμα καπνού. Κατά τον (Milke 2003) υπάρχουν κάποιοι παράμετροι κινδύνου που πρέπει να ληφθούν υπόψη πριν τον σχεδιασμό του συστήματος ελέγχου καπνού όπως, το βάθος του στρώματος καπνού, τα μειωμένα επίπεδα οξυγόνου, η ορατότητα μέσα από το στρώμα καπνού, η συγκέντρωση μονοξειδίου του άνθρακα και η αύξηση θερμοκρασίας σε αυτό. Για αυτή την ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν αλγεβρικές συσχετίσεις (Lougheed 2000). Παρατηρήθηκε λοιπόν ότι η πιο απαιτητική παράμετρος κινδύνου ήταν η μείωση της ορατότητας, η οποία όμως δεν είναι αρκετή ώστε να δημιουργηθεί κάποια βλάβη αλλά μπορεί να προκαλέσει εμπόδια στους ανθρώπους και να επιβραδύνει τον χρόνο εξόδου τους από τον χώρο με αποτέλεσμα την έκθεση τους στον καπνό για περισσότερο χρονικό διάστημα (Jin and flammability 1978, Jin and Yamada 1985).

Αναφορικά με τον σχεδιασμό συστημάτων ελέγχου καπνού, υπάρχουν αρκετές στρατηγικές για τα αίθρια (Klote, Milke et al. 1992, Morgan 1999, Lougheed 2000). Συγκεκριμένα ο Morgan αναφέρθηκε στις παρακάτω προσεγγίσεις:

- Πλήρωση χώρου με καπνό, που σημαίνει την συσσώρευση του στο πάνω μέρος του αίθριου. Αυτή η προσέγγιση για να είναι αποτελεσματική θα πρέπει ο καπνός να περιοριστεί για το απαιτούμενο χρονικό διάστημα εκκένωσης του χώρου.
- Καθαρισμός του καπνού. Αυτή η προσέγγιση για να επιτευχθεί θα πρέπει μετά την ύφεση της πυρκαγιάς να υπάρχει ο σωστός εξαερισμός για την απομάκρυνση του καπνού.
- Αερισμός του καπνού και της θερμότητας, αυτό γίνεται με την διαδικασία της άνωσης των προϊόντων καύσης από την φωτιά με σκοπό την δημιουργία στρώματος στο ψηλότερο μέρος του κτηρίου και για την αποτελεσματικότητά του θα πρέπει να εισέρχεται μέσα αρκετός αέρας.

- Έλεγχος εξαερισμού με κριτήριο την θερμοκρασία στο εσωτερικό του χώρου. Για την εφαρμογή αυτής της προσέγγισης η τοποθέτηση του στρώματος καπνού σε ψηλό σημείο δεν είναι η πιο κρίσιμη παράμετρος.

- Εξαερισμός του καπνού και της θερμότητας από κάθε όροφο ξεχωριστά, το οποίο μπορεί να επιτευχθεί τοποθετώντας κουρτίνες καπνού σε κάθε όροφο και παρέχοντας έτσι εξαερισμό σε κάθε όροφο ξεχωριστά.

- Αποσυμπίεση, δηλαδή μείωση των αερίων στο στρώμα καπνού με σκοπό την παρεμπόδιση στους διπλανούς χώρους. Παρόλα αυτά αυτή η προσέγγιση δεν παρέχει κάποια ασφάλεια και είναι παρόμοια με τον φυσικό αερισμό (Williams, Perera et al. 1999).

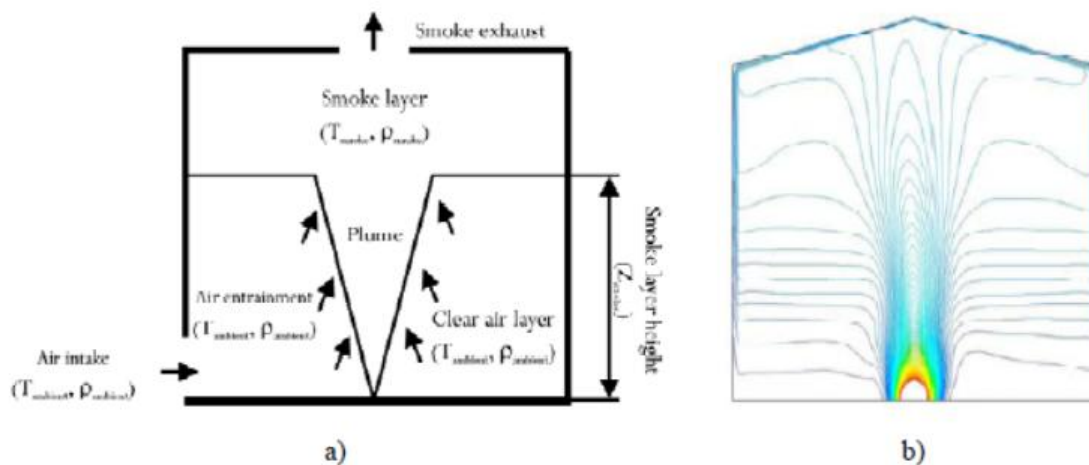
- Συμπύεση, δηλαδή αύξηση της πίεσης του αέρα μέσα όμως σε χώρους όπου λειτουργούν σαν σταθμοί εκκένωσης, παραδείγματος χάρη οι διάδρομοι όπου ο καπνός εξαπλώνεται και στους άλλους ορόφους με καθαρό αέρα και εμποδίζεται έτσι ο καπνός από την είσοδο στους υπόλοιπους χώρους.

- Υβριδικός έλεγχος καπνού, όπου προκύπτει από τον συνδυασμό των παραπάνω προσεγγίσεων όπως για παράδειγμα του εξαερισμού του καπνού και της θερμότητας από το αίθριο και του εξαερισμού του καπνού και της θερμότητας από κάθε όροφο ξεχωριστά (Chow and Applications 1989, Xiong and Conditioning 1994). Τα αποτελέσματα είχαν καλή απόδοση, αλλά η αποτελεσματικότητα ήταν χαμηλή όσο αναφορά μια μεγάλη σε έκταση πυρκαγιά δίπλα σε ένα αίθριο.

Υπάρχουν και άλλοι μέθοδοι ελέγχου του καπνού, όπως η γρήγορη ανίχνευση και η μείωση της πυρκαγιάς χρησιμοποιώντας εγκαταστάσεις αυτόματων καταιωνιστήρων (Klote, Milke et al. 1992, Hansell and Morgan 1994, Klote and Air-Conditioning Engineers 2002, National Fire Protection Association %J Batterymarch Park 2005).

## 2.1.4 Συστήματα ελέγχου καπνού

Για την δημιουργία των συστημάτων ελέγχου καπνού τις τελευταίες δεκαετίες εξετάζεται η απόδοση του σχεδιασμού με βάση τα μοντέλα υπολογιστή. Τα αριθμητικά μοντέλα είναι πολύ σημαντικά όσο αναφορά την μηχανική. Υπάρχουν δύο είδη αριθμητικών μοντέλων τα μοντέλα ζώνης (Mittler 1987, Milke and Mowrer 1993, Jones, Peacock et al. 2005, Peacock, Jones et al. 2005) και τα μοντέλα CFD (Ewer, Jia et al. 2008, McGrattan, Hostikka et al. 2008).



**Σχήμα 2-6 Το σχέδιο των δύο επιπέδων που λαμβάνονται σε ένα μοντέλο ζώνης στο a) Τα περιγράμματα θερμοκρασίας που υπολογίζονται από ένα μοντέλο CFD στο b) ( Εικόνα από Gutiérrez Montes, Sanmiguel Rojas et al. (2009) )**

Το μοντέλο ζώνης διαχωρίζει μια περιοχή σε ενιαίες ζώνες (Cox 1995). Σε αυτό το αριθμητικό μοντέλο υπάρχουν δύο ζώνες το ανώτερο θερμό στρώμα καπνού και το κατώτερο στρώμα ψυχρού αέρα. Μέσα σε κάθε μια ζώνη επιλύονται λοιπόν σχετικοί νόμοι διατήρησης με μαθηματικές εξισώσεις, εκτός της εξίσωση της ορμής διότι πιστεύουν ότι η ροή μέσα σε ένα στρώμα είναι αδρανής. Το νέφος ανάμεσα στις δυο ζώνες του μοντέλου ζώνης λειτουργεί σαν αντλία ενθαλπίας. Στην περίπτωση των μοντέλων CFD, ο χώρος που εξελίσσεται η πυρκαγιά χωρίζεται σε ένα μεγάλο όγκο ελέγχου όπου εκεί μέσα επιλύονται οι εξισώσεις. Αυτή η περίπτωση θεωρείται πιο λεπτομερής από τα μοντέλα ζώνης.

Η περίπτωση του μοντέλου ζώνης χρησιμοποιήθηκε πρώτη (Tanaka, Yamana et al. 1985, Chow and Wong 1993, Chow, Cui et al. 1997). Στη δεκαετία του 90, δεν είχε γίνει ακόμα σαφές αν αυτό το είδος είναι το κατάλληλο και μπορεί να επιφέρει αποτελέσματα για προσομοίωση πυρκαγιών σε κτήρια με μεγάλο όγκο. Κάποια από τα προβλήματα ήταν και είναι ακόμα αν το ανώτερο θερμό στρώμα καπνού που διαχωρίζεται μπορεί να σχηματιστεί στο πάνω μέρος ενός αίθριου, το ότι η θερμοκρασία του ανώτερου στρώματος καπνού δεν ήταν ομοιόμορφη, η εγκυρότητα της εξίσωσης για κάποιες συνθήκες και το ότι οι εξισώσεις δεν ήταν κατάλληλες για προσομοίωση διαφορετικής κλίμακας από το κανονικό μέγεθος (Chow 1995). Την ίδια δεκαετία άρχισαν να χρησιμοποιούνται και τα μοντέλα υπολογιστικής ρευστομηχανικής CFD (Chow and Environment 1996). Τα μοντέλα CFD (Computational Fluid Dynamics) θεωρήθηκαν πιο κατάλληλα για σύνθετες γεωμετρίες από τα μοντέλα ζωνών. Αρχικά διευθετήθηκε το φυσικό πρόβλημα μεταφοράς, δηλαδή την μεταφορά του πεδίου ροής μακριά από την πηγή της πυρκαγιάς λόγω της άνωσης (Chow and Environment 1996). Στην συνέχεια δημιουργήθηκαν και υπό-μοντέλα όσο αναφορά την καύση (Pope 1991, Bilger, Pope et al. 2005), την ακτινοβολία και τις αναταραχές (McGrattan, Baum et al. 1998, McGrattan, Hostikka et al. 2008) τα οποία ονομάστηκαν μοντέλα φωτιάς και χρησιμοποιήθηκαν αποκλειστικά για την περίπτωση πυρκαγιάς με αποτέλεσμα να προκύπτουν πιο ακριβή και αξιόπιστα αποτελέσματα.

Από μελέτες που διενεργήθηκαν για την σύγκριση των δύο μοντέλων (Chow 1995, Rho and Ryou 1999) φτάσανε στο συμπέρασμα ότι τα μοντέλα ζώνης πρέπει να αντικατασταθούν από τα μοντέλα CFD για την δυνατότητα ανάπτυξης τρόπων πυρασφάλειας (Cox 1995).



## 3 Μεθοδολογία του κώδικα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής FDS

### 3.1 Εισαγωγή

Η χρήση του κώδικα FDS ύστερα από αρκετές μελέτες διαπιστώθηκε ότι είναι αποδοτική όσο αναφορά προσομοιώσεις λιμνών φωτιάς επιλύοντας τις εξισώσεις Navier-Stokes και δίνοντας έμφαση στην παραγωγή καπνού, στην μεταφορά μάζας, στην μεταφορά θερμότητας και στις θερμικές ροές χαμηλών ταχυτήτων. Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται είναι, της διατήρησης της μάζας, της ορμής και της ενέργειας χρησιμοποιώντας την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών για την επίλυση των μερικών παραγώγων κάθε μίας από τις εξισώσεις. Ενώ για χαμηλούς αριθμούς Mach χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις καύσης.

Για την επίλυση των χρονικών παραγώγων χρησιμοποιείται η μέθοδος πρόβλεψης-διόρθωσης, η οποία λειτουργεί προβλέποντας κάθε φορά το επόμενο σημείο λύσης μέσω των προηγούμενων σημείων και μετά γίνονται οι διορθώσεις με την σωστή σχέση. Επομένως αφού γίνεται μια υπόθεση για την θερμοκρασία, την πυκνότητα και την πίεσης που είναι τα βαθμωτά μεγέθη του ροϊκού πεδίου, μετά επιλύοντας το πεδίο των ταχυτήτων με τις εξισώσεις Navier-Stokes και χρησιμοποιώντας το πεδίο των πιέσεων προκύπτουν οι νέες τιμές του πεδίου ταχυτήτων. Στη συνέχεια υπολογίζονται οι διορθωμένες τιμές πίεσης με τις εξισώσεις διατήρησης και ξανά αλλάζουν οι τιμές για την πίεση και την ταχύτητα. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να τείνουν πιο κοντά οι τιμές των ταχυτήτων

Για την επίλυση των δινών μεγάλης κλίμακας, το FDS προσομοιώνει τις μεγάλες δίνες χρησιμοποιώντας το μοντέλο τύρβης (LES). Με την συγκεκριμένη διαδικασία λύνονται και τα τυρβώδη μεγέθη. Οι μεγάλες και οι μικρές δίνες είναι υπεύθυνες για την τυρβώδη κινητική ενέργεια με διαφορετικό τρόπο η κάθε μία. Οι μεγάλες επιδρούν στην ανάπτυξη του πεδίου ροής ενώ οι μικρότερες στην

απορρόφηση και καταστροφή της. Οι μικρές δίνες μπορούν πιο εύκολα να μοντελοποιηθούν από τις μεγάλες.

### 3.1.1 Θεμελιώδης εξισώσεις

Παρακάτω παρουσιάζονται οι θεμελιώδης εξισώσεις διατήρησης της μάζας, της ορμής και της ενέργειας. Σκοπός είναι η επίλυση των μερικών παραγώγων τους με την χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών δευτέρας τάξης.

Οι θεμελιώδεις εξισώσεις του FDS κώδικα είναι:

#### α) Εξίσωση συνέχειας της μάζας

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (3-1)$$

#### β) Εξίσωση της Διατήρησης Ορμής

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + f_{d,i} + \dot{m}_{b,i}'''' \quad (3-2)$$

#### γ) Καταστατική εξίσωση ιδανικών αερίων

$$\bar{p} = \rho T R \sum_a \frac{Z_a}{W_a} = \frac{\rho R T}{\bar{W}} \quad (3-3)$$

Όπου ως  $z$  είναι η χωρική συντεταγμένη προς την κατεύθυνση της βαρύτητας, προκειμένου να βρίσκεται στην πίεση του υποβάθρου και η διαστρωμάτωση της ατμόσφαιρας.

#### δ) Εξίσωση διατήρησης της ενέργειας

Η εσωτερική ενέργεια  $e$  και η ενθαλπία  $h$ , μπορούν να συνδεθούν μέσω της εξίσωσης  $h = e + \bar{p}/\rho$ . Επομένως η εξίσωση διατήρησης της ενέργειας μπορεί να γραφτεί με όρους ενθαλπίας,  $h_s$ :

$$\frac{\partial(\rho h_s)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho h_s \mathbf{u}) = \frac{D\bar{p}}{Dt} + \dot{q}''' - \nabla \cdot \vec{q}'' \quad (3-4)$$

όπου  $\dot{q}'''$  ορίζεται ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας ανά μονάδα όγκου. Ο όρος  $\vec{q}''$  ορίζεται ως η ροή θερμότητας από ακτινοβολία και από συναγωγή και ισούται με τον παρακάτω τύπο:

$$\vec{q}'' = -k\nabla T - \sum_a h_{s,a} \rho D_a \nabla Y_a + \dot{q}_r'' \quad (3-5)$$

Όπου  $k$  είναι ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας και  $\vec{q}''$  είναι η ροή θερμότητας λόγω ακτινοβολίας σε στερεή επιφάνεια.

Η απόκλιση της ταχύτητας δίνεται από την σχέση:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = \frac{1}{\rho h_s} \left[ \frac{D}{Dt} (\bar{p} - \rho h_s) + \dot{q}''' + \dot{q}_r''' - \dot{q}_r'' - \nabla \cdot \vec{q}'' \right] \quad (3-6)$$

**ε) Εξίσωση για κάθε αέριο συστατικό που μεταφέρεται στον αέρα:**

$$\frac{\partial(\rho Z_\alpha)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho Z_\alpha \mathbf{u}) = \nabla \cdot (\rho D_\alpha \nabla Z_\alpha) + \dot{m}_\alpha''' \quad (3-7)$$

### Μοντέλο τύρβης στον κώδικα FDS

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω η επίλυση των μεγάλων δινών υλοποιείται με την μέθοδο Προσομοίωσης Μεγάλων Δινών (Large Eddy Simulation-LES), στην οποία χρησιμοποιείται το μοντέλο Smagorinsky για την προσομοίωση των τυρβωδών φαινομένων. Ο άμεσος υπολογισμός των διαδικασιών καύσης και μεταφοράς είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί μέχρι στιγμής σε μικρής κλίμακας πειράματα καύσης.

### Στην εξίσωση της Διατήρησης Ορμής

$$\frac{\partial(\overline{\rho u_i})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{\rho u_i u_j}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} + \bar{\rho} g_i + \bar{f}_{d,i} + \overline{\dot{m}_b''' u_{b,i}} \quad (3-8)$$

εφαρμόζετε το Favre filter,  $\bar{\varphi} = \frac{\bar{\rho}\varphi}{\bar{\rho}}$ , και η εξίσωση της ορμής αποκτά την μορφή:

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho}\tilde{u}_i\tilde{u}_j) = -\frac{\partial\bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial\bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} + \bar{\rho}g_i + \bar{f}_{d,i} + \overline{\dot{m}_b}\tilde{u}_{b,i} \quad (3-9)$$

όπου ο όρος δύναμης  $\bar{f}_{d,i}$  αντιπροσωπεύει τις εξωτερικές δυνάμεις όπως π.χ. η οπισθέλκουσα.

Ο όρος  $\tau_{ij}$  αναφέρεται στον τανυστή τάσεων ο οποίος ισούται με:

$$\tau_{ij} = \mu \left( 2S_{ij} - \frac{2}{3}\delta_{ij}(\nabla \cdot \bar{u}) \right) \quad (3-10)$$

όπου  $\delta_{ij}$  είναι η σταθερά Kroneker,  $\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases}$ ,

$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$  είναι ο τανυστής παραμόρφωσης και  $\mu$  είναι το δυναμικό ιξώδες του ρευστού.

### Διαδικασία Επίλυσης

Ο κώδικας FDS προκειμένου να βρει ποιο από τα αριθμητικά πλέγματα αποτελεί το χωρίο για την λύση του προβλήματος, κάνει χρήση ενός ημι – πεπλεγμένου σχήματος το οποίο επιλύει τις διαφορικές εξισώσεις. Οι μεταβλητές της ροής αλλάζουν στο χρόνο χρησιμοποιώντας ένα ρητό σχήμα Runge-Kutta, δεύτερης τάξης. Για την πίεση χρησιμοποιείται σχήμα πεπλεγμένων διαφορικών εξισώσεων πρώτης τάξης.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα 5 βήματα που χρειάζονται για την διαδικασία που ακολουθεί ο αλγόριθμος επίλυσης:

1. Υπολογισμός του μέσου ροϊκού πεδίου  $\bar{u}^n$ .

2. Εκτίμηση των  $\rho$ ,  $Y_\alpha$  και  $\bar{p}_m$  στο επόμενο χρονικό βήμα με χρήση ρητού σχήματος Euler. Για παράδειγμα η πυκνότητα προκύπτει από την σχέση:

$$\frac{\rho^* - \rho^n}{\delta t} + \nabla \cdot \rho^n \bar{u}^n = 0 \quad (3-11)$$

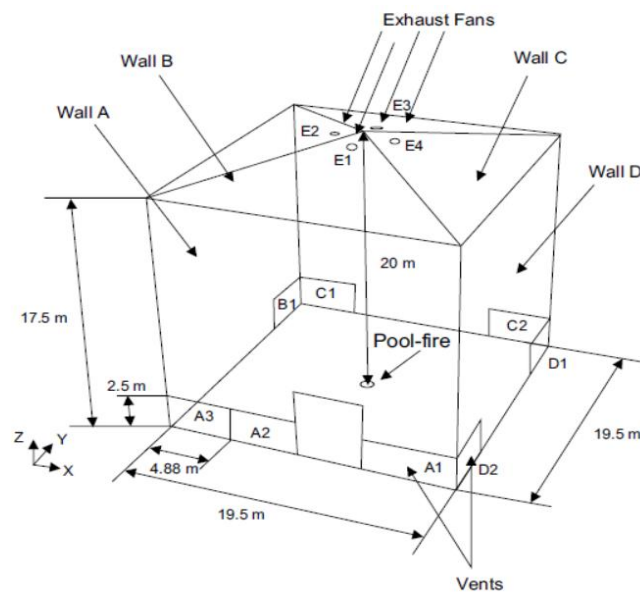
3. Ανταλλαγή των τιμών  $\rho^*$  και  $Y_\alpha^*$  στα όρια πλεγμάτων.
4. Εφαρμογή οριακών συνθηκών για  $\rho^*$  και  $Y_\alpha^*$ .
5. Υπολογισμός της απόκλισης,  $\nabla \cdot \bar{u}^*$ , με χρήση της εξίσωσης διατήρησης της ενέργειας. Σε αυτό το στάδιο το πεδίο ταχύτητας δεν έχει υπολογιστεί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

## 4 Μελέτη των καπναερίων στο εσωτερικό κτηρίου

### 4.1 Περιγραφή πειραματικής διάταξης

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε στο Τεχνολογικό Κέντρο Μετάλλων της περιοχής Μούρθια της Ισπανίας και είχε ως στόχο να μελετήσει την δυναμική της φωτιάς και την κίνηση του καπνού μέσα σε μεγάλους χώρους όπου διαθέτουν φυσικό και μηχανικό αερισμό. Εκτελέστηκαν 3 δοκιμές όπου χρησιμοποιήθηκε λίμνη φλόγας με καύσιμο υλικό το επτάνιο, 2 διαφορετικές διαμέτρους, 0.92m, 1.17m, 3 διαφορετικές τιμές ισχύος, 1,32MW, 2,28MW και 2,34MW.

Η κατασκευή που μελετήθηκε έχει διαστάσεις 19,5m x 19,5m x 17,5m , η οροφή είναι υπερυψωμένη κατά 2,5m στο κέντρο σε σχήμα πυραμίδας. Για τους τοίχους και την οροφή χρησιμοποιήθηκε 6mm παχύς χάλυβας και για το πάτωμα σκυρόδεμα. Στην οροφή είναι εγκατεστημένοι 4 ανεμιστήρες όπου ο καθένας τους έχει διάμετρο 0,56m και ονομαστική παροχή  $38 \text{ m}^3 / \text{s}$ . Επίσης υπάρχουν 8 ανοίγματα τα οποία είναι τοποθετημένοι στο κάτω μέρος του κτηρίου και το καθένα έχει διαστάσεις 4,88m x 2,5m.



Σχήμα 4-1 Σχέδιο και διαστάσεις του κτηρίου «Μούρθια» ( Εικόνα από Gutiérrez-Montes, Sanmiguel-Rojas et al. (2009) )

Για την μελέτη του θερμοκρασιακού πεδίου και την κατανομή των ταχυτήτων των καπναερίων που προκαλούνται από την πυρκαγιά εγκαταστάθηκαν 61 αισθητήρες οι οποίοι μετρούν τις ιδιότητες του αέρα, την θερμοκρασία στους τοίχους και την οροφή, την πτώση της πίεσης στους ανεμιστήρες καθώς και τις ταχύτητες στα ανοίγματα. Ελήφθησαν μετρήσεις θερμοκρασίας των καπναερίων με θερμοστοιχεία τύπου K διαμέτρου 3mm τα οποία χρησιμοποιήθηκαν σε διαφορετικές θέσεις στο εσωτερικό του κτηρίου. Για τις μετρήσεις θερμοκρασιών κοντά στους τοίχους, στα ανοίγματα και στους ανεμιστήρες χρησιμοποιήθηκαν ανιχνευτές θερμίστορ Pt100 κατηγορίας B διαμέτρου 6mm. Για τις μετρήσεις της θερμοκρασίας της επιφάνειας χρησιμοποιήθηκαν θερμοστοιχεία τύπου K διαμέτρου 6mm. Διαφορετικοί αισθητήρες πίεσης εγκαταστάθηκαν στους ανεμιστήρες για την μέτρηση της ροής του αέρα και θερμαινόμενα σύρματα για την μέτρηση της ταχύτητας στους αεραγωγούς. Ένα αυτόματο Modicom TSX Premium συνδεδεμένο σε έναν υπολογιστή χρησιμοποιήθηκε για την καταγραφή των δεδομένων με συχνότητα 5Hz. Δύο κάμερες εγκαταστάθηκαν επίσης για την καταγραφή του σχήματος και του ύψους της φλόγας. Οι ατμοσφαιρικές συνθήκες μετρήθηκαν μέσω μετεωρολογικού σταθμού που παρακολουθεί την ταχύτητα του ανέμου, τη θερμοκρασία, την υγρασία και την πίεση εκτός της εγκατάστασης.

Οι αισθητήρες στον τοίχο A ήταν συνολικά 19. Πάνω στον τοίχο 4 θερμοζεύγη για την μέτρηση θερμοκρασίας του τοίχου. Για 30 cm μέσα από τον τοίχο 9 θερμοζεύγη Pt100 για την μέτρηση της θερμοκρασίας αέρα. Στους αεραγωγούς υπήρχαν 3 θερμοζεύγη πάνω ακριβώς για την μέτρηση της ταχύτητας αέρα και 3 θερμοζεύγη Pt100 30 cm πιο μέσα για την μέτρηση θερμοκρασίας του αέρα.

Στον τοίχο C ήταν συνολικά 18 αισθητήρες. Πάνω στον τοίχο 4 θερμοζεύγη για την μέτρηση θερμοκρασίας του τοίχου. Για 30 cm μέσα από τον τοίχο 10 θερμοζεύγη Pt100 για την μέτρηση της θερμοκρασίας αέρα. Στους αεραγωγούς υπήρχαν 2 θερμοζεύγη πάνω ακριβώς για την μέτρηση της ταχύτητας αέρα και 2 θερμοζεύγη Pt100 30 cm πιο μέσα για την μέτρηση θερμοκρασίας του αέρα.

Στο κεντρικό τμήμα ήταν συνολικά 19 θερμοζεύγη σε 3 διαφορετικά ύψη και υπήρχαν 3 σε κάθε οριζόντια γραμμή.

Στην οροφή και στους ανεμιστήρες υπήρχαν συνολικά 12 αισθητήρες οι 6 από τους οποίους ήταν για την μέτρηση θερμοκρασίας της οροφής, 2 αισθητήρες πίεσης στον ανεμιστήρα κοντά στον τοίχο A και 1 κοντά στον τοίχο C, για τον υπολογισμό του ρυθμού ροής των καυσαερίων. Από 1 θερμοζεύγος Pt100 θερμιστόρ υπήρχε στην E1 και στην E3 για την μέτρηση της θερμοκρασίας ροής των καυσαερίων. Για την παρακολούθηση της φωτιάς η οποία βρισκόταν στο κέντρο της κατασκευής, τοποθετήθηκε κοντά στους τοίχους μια κάμερα. Τέλος διενεργήθηκε ανάλυση αβεβαιότητας για τις μετρήσεις.

Το καύσιμο που κάηκε για το πείραμα ήταν το επτάνιο και τοποθετήθηκε σε κυκλική κατασκευή στο κεντρικό σημείο του δαπέδου του αίθριου. Τα μεταλλικά μέρη έχουν βάθος 25cm. Για τις 3 δοκιμές που διεξάχθηκαν χρησιμοποιήθηκαν 2 διαφορετικές διαμέτροι για την λίμνη φλόγας, 0.92m για τη πρώτη δοκιμή φωτιάς και 1.17m για τις άλλες 2 δοκιμές. Στα μεταλλικά μέρη προτού χυθεί το επτάνιο προστέθηκε νερό το οποίο κατέλαβε ύψος 2cm έτσι ώστε να υπάρχει καλύτερη μόνωση του μετάλλου από την θερμότητα, παρέχοντας έτσι σταθερό σύστημα καύσης.

Το ύψος της φλόγας για κάθε δοκιμή ήταν διαφορετικό. Για την πρώτη δοκιμή (0.92m και 1.32MW) έφτασε 3.3m, για την δεύτερη δοκιμή (1.17m και 2.28MW) έφτασε 4.6m και για την τρίτη δοκιμή (1.17m και 2.34MW) έφτασε 4,4m.

## **4.2 Υπολογιστικό χωρίο**

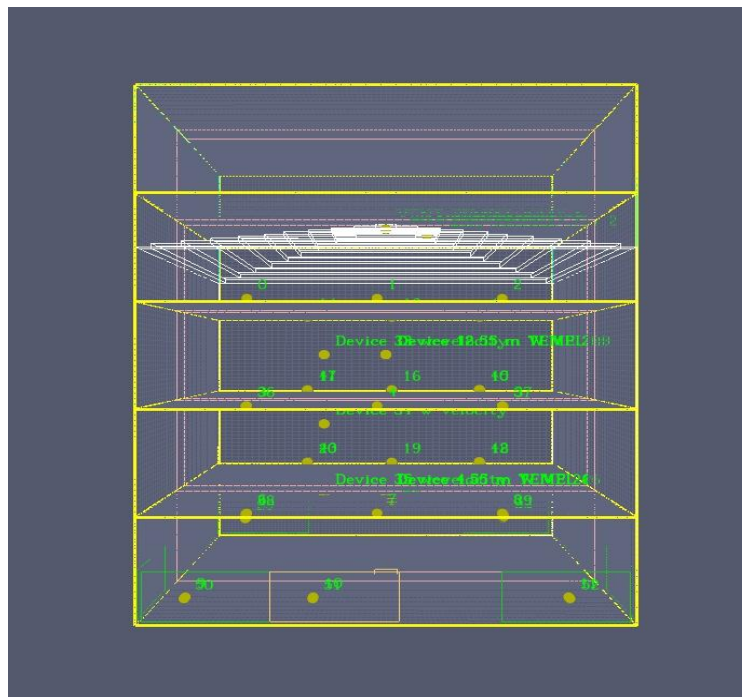
Για την μελέτη της κατασκευής και τον υπολογισμό των μεγεθών χρειάστηκε η δημιουργία υπολογιστικού πεδίου μέσω της χρήσης του λογισμικού Pyrosim. Το υπολογιστικό πεδίο αποτελείται από ένα σύνολο κελιών τα οποία ορίζονται ως πλέγμα.

Για την μελέτη της συγκεκριμένη κατασκευής χρησιμοποιήθηκε ένα πλέγμα με διαστάσεις 19.5 x 19.5 x 25.0 m που συνολικά αποτελείται από 5 διαφορετικά υπό-πλέγματα όπου όλα έχουν την ίδια διάσταση στον x και τον y άξονα δηλαδή 19.5 x 19.5 m και η διάσταση αλλάζει στον z άξονα όπου το πρώτο έχει z= 5.0 m, το δεύτερο z= 10.0 m, το τρίτο z= 15.0 m, το τέταρτο z= 20.0 m και



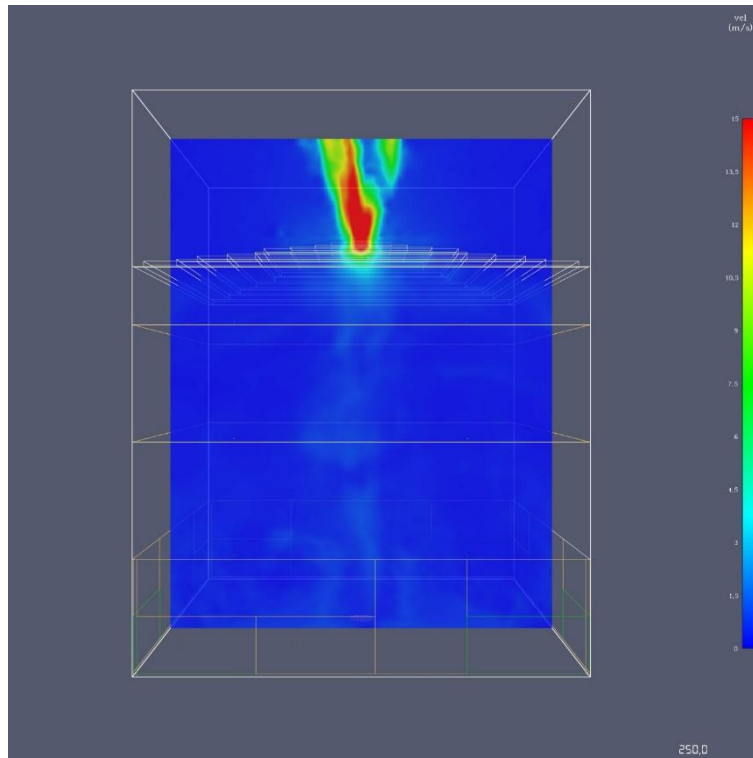
τέλος το πέμπτο  $z = 25.0 \text{ m}$ . Τα υπό-πλέγματα χρησιμοποιήθηκαν για μεγαλύτερη ακρίβεια.

Για την μελέτη του εξαερισμού το καπνού τοποθετήθηκε φωτιά στο κέντρο του αίθριου όπου η περιοχή της καταλάμβανε χώρο  $1.1 \times 1.1 \text{ m}$ . Η σύνθεση των προϊόντων της καύσης του καύσιμο που χρησιμοποιήθηκε είναι C: 7 H: 16, με απόδοση παραγωγής του μονοξειδίου του άνθρακα CO  $\text{yield} = 0.006$  και με απόδοση παραγωγής καπνού soot  $\text{yield} = 0,015$ . Η εκλυόμενη θερμότητα ανά μονάδα επιφάνειας ορίστηκε ως  $2070.0 \text{ Kw/m}^2$



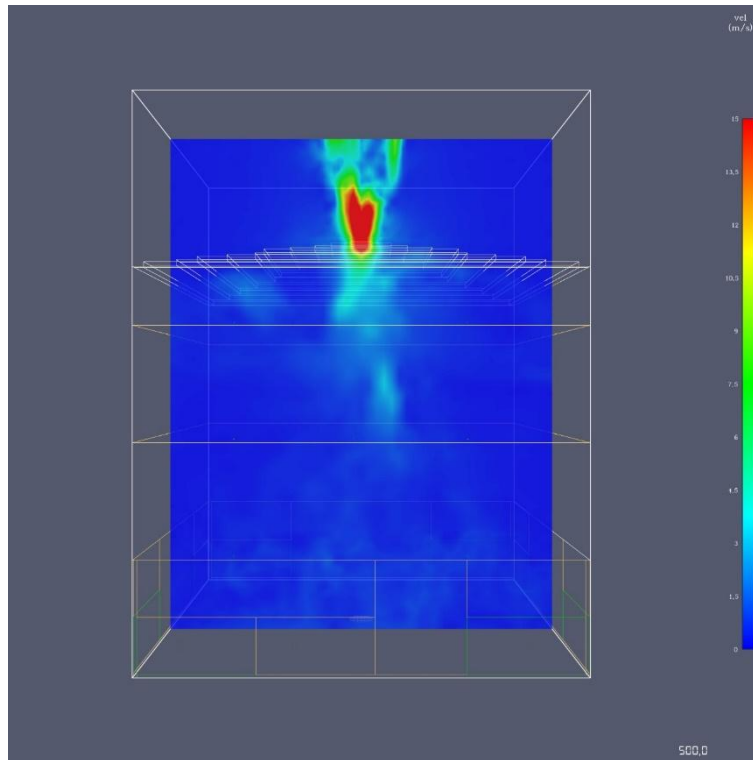
**Σχήμα 4-2 Πρόσωση υπολογιστικής προσομοίωσης αίθριου με το πρόγραμμα Pyrosim**

### 4.3 Ισοϋψή γραφήματα ταχυτήτων



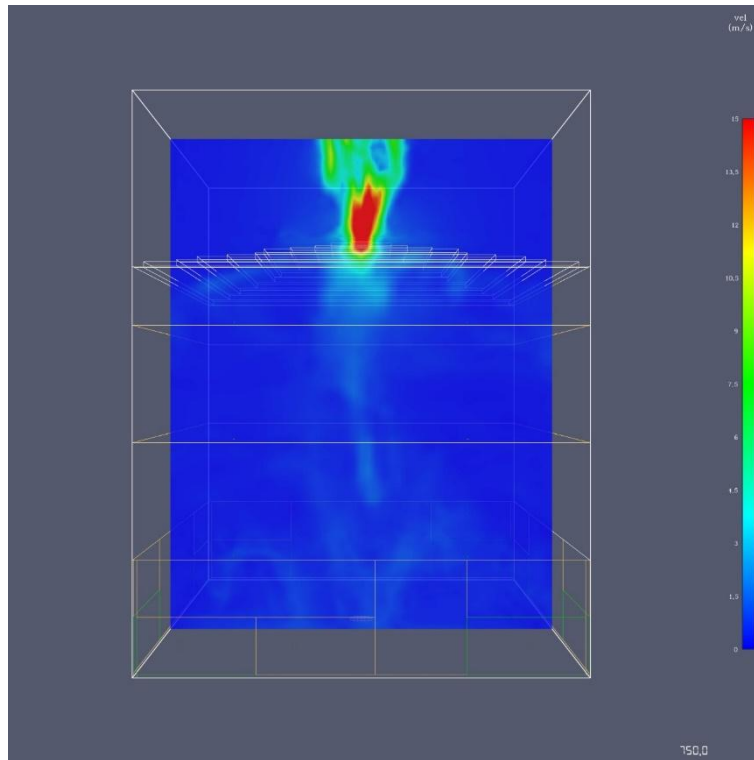
Σχήμα 4-3 Ισοϋψές γράφημα ταχυτήτων για  $Y= 7,800$  και  $t= 250s$

Στο Σχήμα 4-3 δίνεται το ισοϋψές γράφημα των ταχυτήτων για την θέση  $Y= 7,8$  και  $t= 250s$ , στο οποίο παρατηρείται ότι στο άνοιγμα που βρίσκεται στο επάνω μέρος του κτηρίου υπάρχει αύξηση των ταχυτήτων και πτώση της πίεσης, το οποίο φαίνεται από την κλίμακα στα δεξιά όπου δείχνει με βάση τα χρώματα πόσο αυξημένη είναι η ταχύτητα. Στο υπόλοιπο πεδίο ροής εντός του αίθριου δεν παρατηρούνται έντονες αλλαγές στα μέτρα των ταχυτήτων. Τα μέτρα των ταχυτήτων είναι μικρά καθώς το θερμοκρασιακό πεδίο δεν δημιουργεί μεγάλες ανωστικές δυνάμεις και σε συνδυασμό με την μορφολογία του αίθριου δεν υπάρχουν στενώσεις.



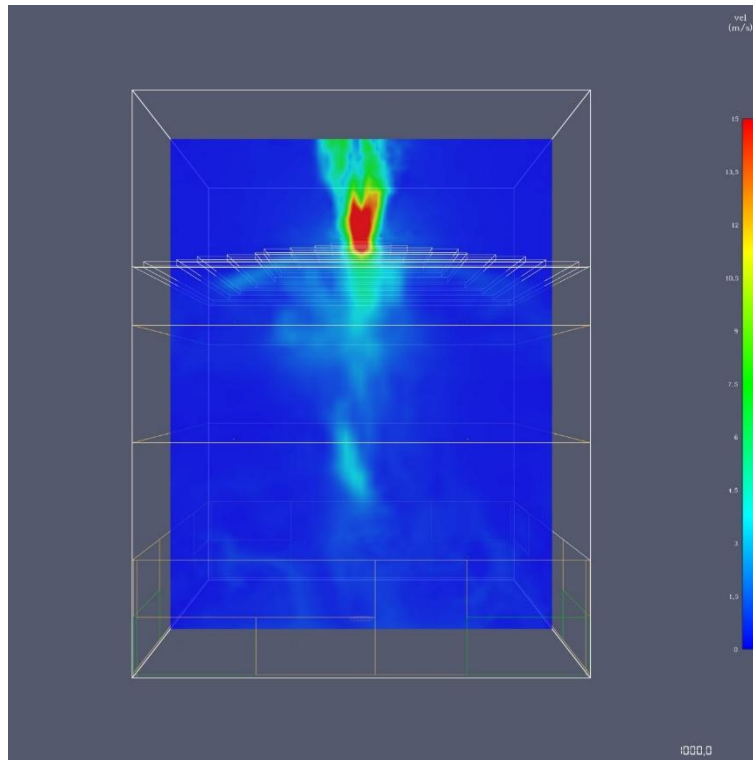
**Σχήμα 4- 4** Ισοϋψές γράφημα ταχυτήτων για  $Y= 7,800$  και  $t= 500s$

Στο Σχήμα 4-4 δίνεται το ισοϋψές γράφημα των ταχυτήτων για την ίδια θέση αλλά για την χρονική στιγμή  $t= 500s$ . Παρατηρείται ότι παραμένουν αυξημένες οι ταχύτητες και συνεχίζει να υπάρχει η πτώση της πίεσης στο άνοιγμα που βρίσκεται στο άνω μέρος του κτηρίου. Στο πεδίο ροής εντός του κτηρίου από την μέση και πάνω και κυρίως στον φεγγίτη που υπάρχει στην οροφή φαίνεται ότι σε σχέση με την χρονική στιγμή των  $250s$  υπάρχει μία μικρή αύξηση των ταχυτήτων και πτώση πίεσης αντίστοιχα καθώς έχει περάσει κάποιος χρόνος άρα συσσωρεύονται όλο και πιο θερμές μάζες αέρα στο εσωτερικό μέρος.



**Σχήμα 4-5** Ισοϋψές γράφημα ταχυτήτων για  $Y= 7,800$  και  $t= 750s$

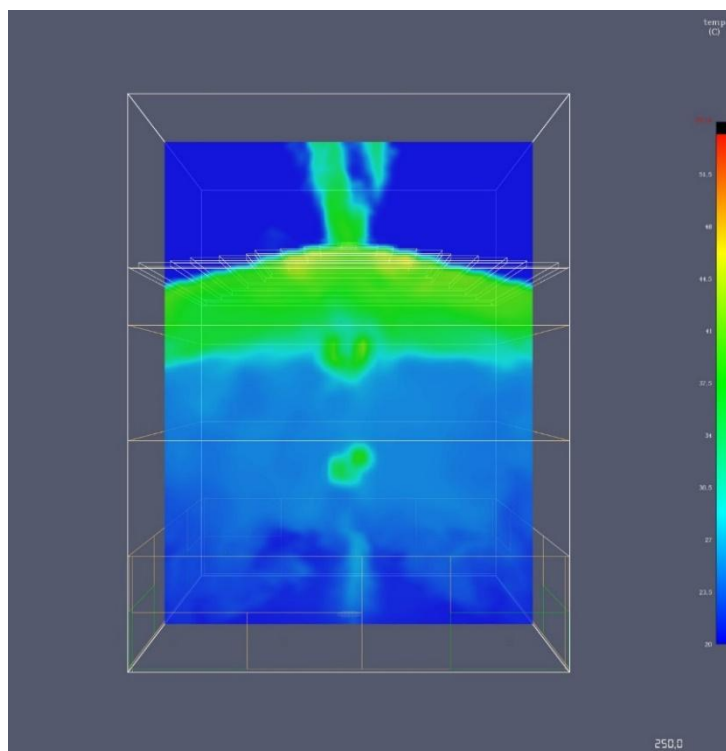
Στο Σχήμα 4-5 δίνεται το γράφημα των ταχυτήτων για την χρονική στιγμή  $t= 750s$ , στο οποίο συνεχίζουν να είναι αυξημένες οι ταχύτητες και να υπάρχει πτώση της πίεσης στο άνοιγμα του άνω μέρους του κτηρίου. Στο πεδίο ροής εντός του κτηρίου παρατηρείται ότι σε σύγκριση με το Σχήμα 4-3 υπάρχει μικρότερη αύξηση στις ταχύτητες, πρόκειται όμως για στιγμιότυπο μιας συγκεκριμένης χρονικής στιγμής όπως και όλα τα υπόλοιπα γραφήματα, οπότε δεν είναι αντιπροσωπευτικό αυτό που παρουσιάζεται.



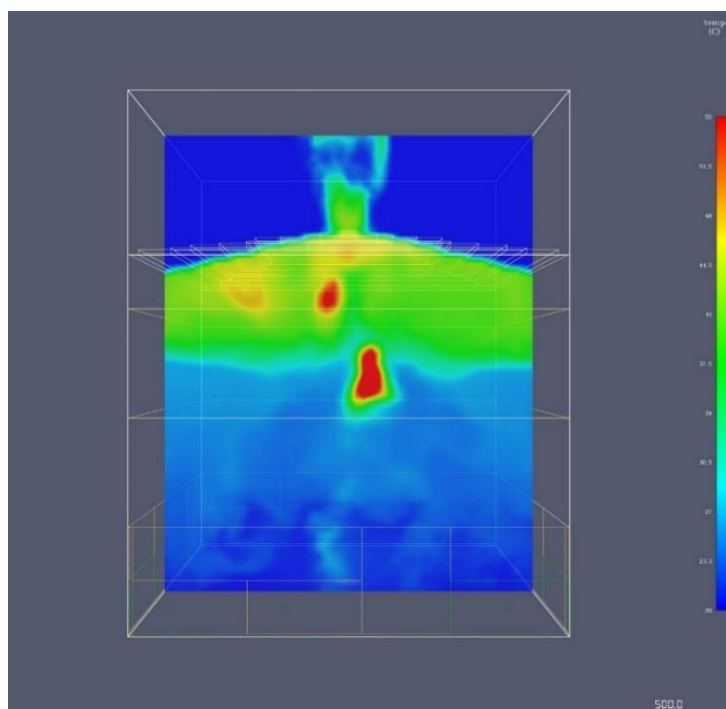
**Σχήμα 4- 6 Ισοϋψές γράφημα ταχυτήτων για  $Y= 7,800$  και  $t= 1000s$**

Στο Σχήμα 4-6 παρουσιάζονται οι ταχύτητες για την χρονική στιγμή των 1000s όπου, όπως και στις προηγούμενες χρονικές στιγμές συνεχίζουν σταθερά να φαίνονται αυξημένες οι ταχύτητες και να υπάρχει πτώση της πίεσης αντίστοιχα, ενώ στο πεδίο ροής στο εσωτερικό του κτηρίου παρατηρείται αύξηση των ταχυτήτων σε αντίθεση με την χρονική στιγμή των 750s όπου είχαν μειωθεί και φαίνεται ότι η αύξηση εκδηλώνεται και στα πιο χαμηλά επίπεδα σε αντίθεση με το γράφημα της χρονικής στιγμής των 250s.

### 4.3.1 Ισοϋψή γραφήματα θερμοκρασιακού πεδίου

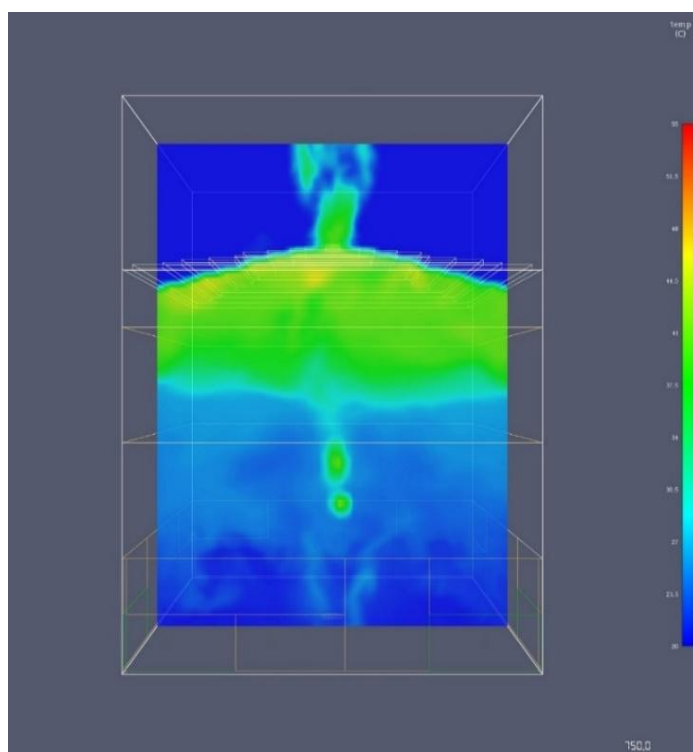


Σχήμα 4-7 Ισοϋψές γράφημα θερμοκρασιακού πεδίου για  $Y=7,800$  και  $t=250s$



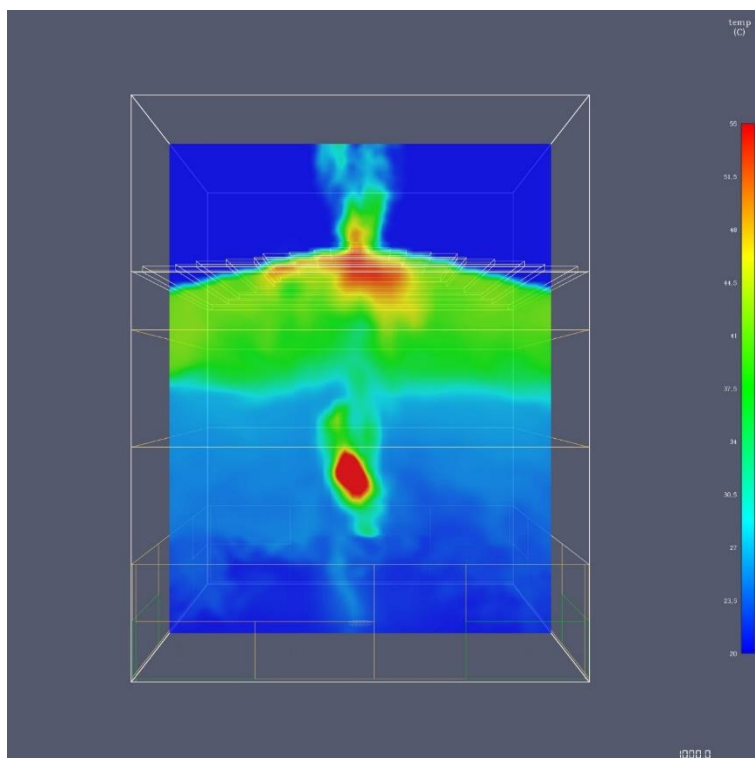
Σχήμα 4-8 Ισοϋψές γράφημα θερμοκρασιακού πεδίου για  $Y=7,800$  και  $t=500s$

Στο Σχήμα 4-7 δίνεται το ισοϋψές γράφημα του θερμοκρασιακού πεδίου για την χρονική στιγμή των 250s, στο οποίο παρατηρείται ότι πάνω ακριβώς από την λίμνη φλόγας που δημιουργείται αλλά και στο επάνω μέρος του κτηρίου υπάρχει μία αύξηση της θερμοκρασίας η οποία φαίνεται να μεταφέρετε και στο φεγγίτη πάνω από το κτήριο. Αυτό συμβαίνει διότι με το που ξεκινάει η φωτιά αρχίζει να δημιουργείται καπνός ο οποίος διαφεύγει προς τα πάνω. Στο Σχήμα 4-8 δίνεται το ισοϋψές γράφημα του θερμοκρασιακού πεδίου για την χρονική στιγμή των 500s, στο οποίο παρατηρείται ότι με την πάροδο του χρόνου και όσο η φωτιά βρίσκεται σε εξέλιξη ο καπνός καταλαμβάνει περισσότερο χώρο στο εσωτερικό του κτηρίου και οι θερμές μάζες αέρα γίνονται πιο έντονες. Επομένως η θερμοκρασία αυξάνεται περισσότερο, ιδιαίτερα σε κάποια συγκεκριμένα σημεία και φαίνεται ότι αρχίζει να διαχέεται προς τα κάτω.



**Σχήμα 4-9** Ισοϋψές γράφημα θερμοκρασιακού πεδίου για  $Y= 7,800$  και  $t= 750s$

Στο Σχήμα 4-9 δίνεται το ισοϋψές γράφημα του θερμοκρασιακού πεδίου για την χρονική στιγμή των 750s. Στην συγκεκριμένη χρονική στιγμή παρατηρείται ότι η θερμοκρασία συνεχίζει να είναι σταθερή χωρίς να παρουσιάζει περαιτέρω αύξηση και δεν υπάρχει η αυξημένη θερμοκρασία στα συγκεκριμένα σημεία που υπήρχε σε σχέση με την χρονική στιγμή των 500s.

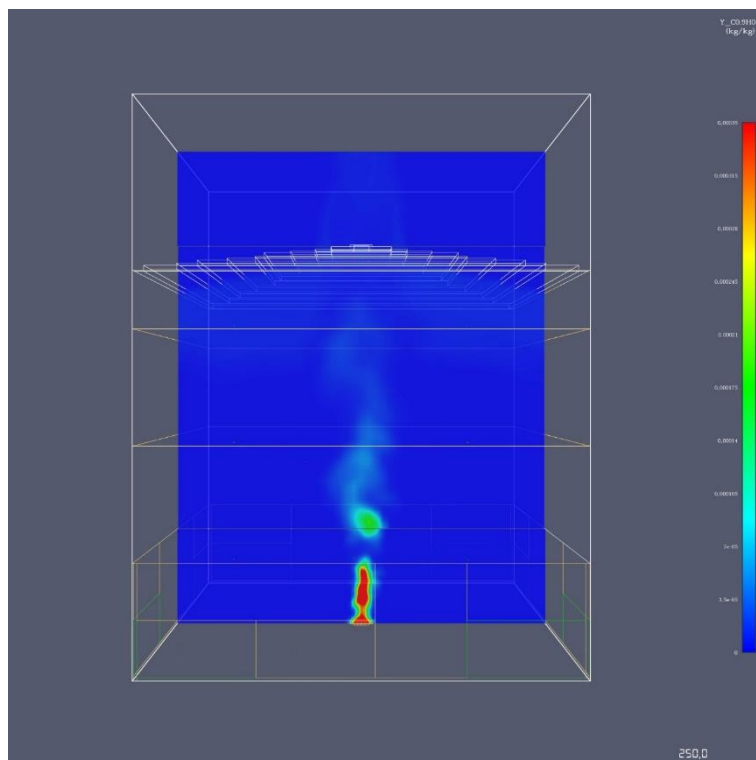


**Σχήμα 4- 10 Ισοϋψές γράφημα θερμοκρασιακού πεδίου για  $Y= 7,800$  και  $t= 1000s$**

Στο Σχήμα 4-10 δίνεται το ισοϋψές γράφημα του θερμοκρασιακού πεδίου για την χρονική στιγμή των 1000s, όπου φαίνεται ότι η θερμοκρασία είναι πιο έντονη στο σημείο που βρίσκεται ακριβώς πάνω από την λίμνη φλόγας και στην οροφή που υπάρχει το άνοιγμα, ενώ σε όλο το υπόλοιπο μέρος παραμένει σταθερή όπως την χρονική στιγμή  $t= 750s$ .

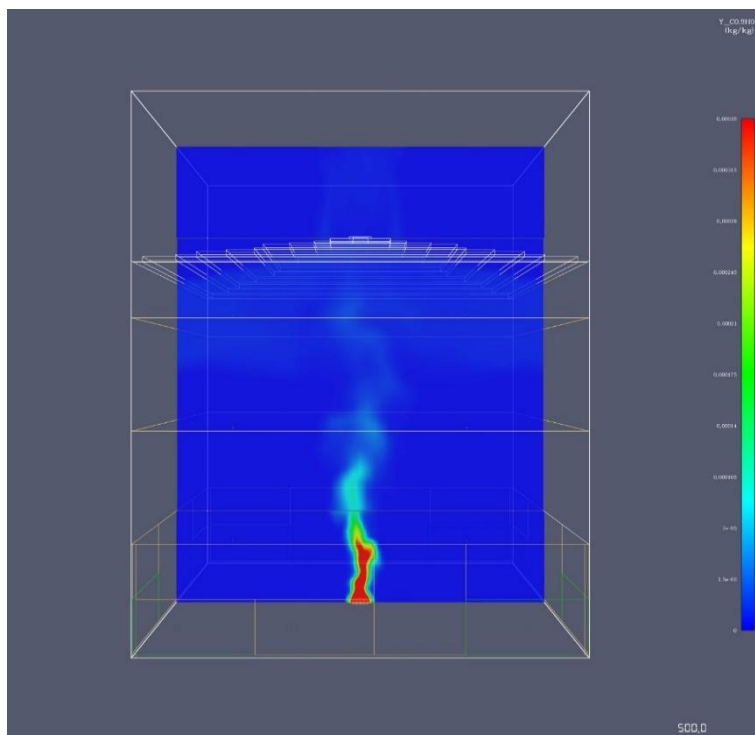


### 4.3.2 Ισοϋψή γραφήματα προϊόντων καύσης ως ποσόστωση της μάζας του αέρα

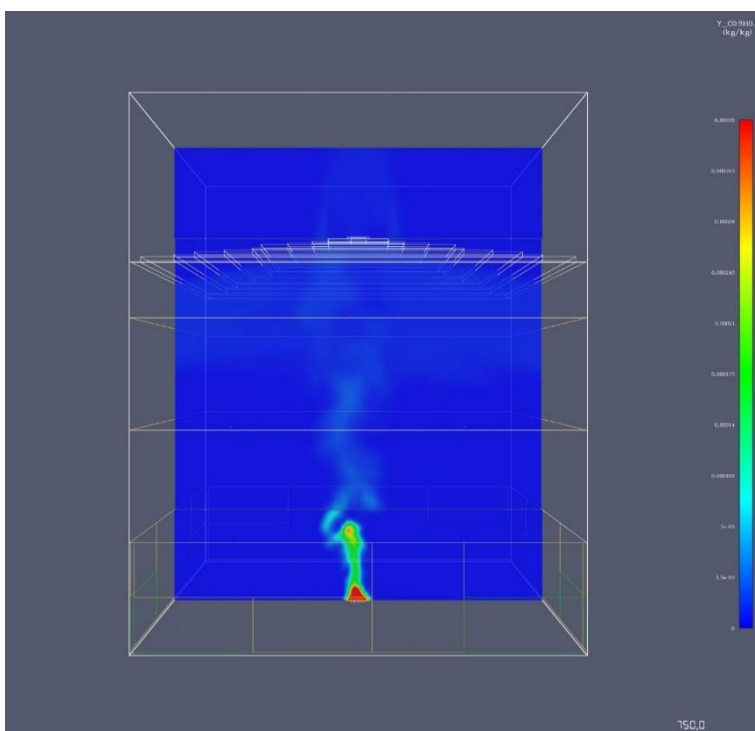


**Σχήμα 4- 11** Ισοϋψές γράφημα προϊόντων καύσης ως ποσόστωση της μάζας του αέρα για  $Y= 7,800$  και  $t= 250s$

Στο Σχήμα 4- 11 δίνεται το ισοϋψές γράφημα του για την χρονική στιγμή των 250s, στο οποίο παρατηρούνται σωματίδια του άνθρακα που είναι τα προϊόντα καύσης ανά μάζα αέρα. Βλέπουμε ότι τα προϊόντα καύσης την συγκεκριμένη χρονική στιγμή έχουν δημιουργηθεί πάνω από το σημείο παραγωγής της φωτιάς αλλά δεν υπάρχει μεγάλη παραγωγή και διάδοση.

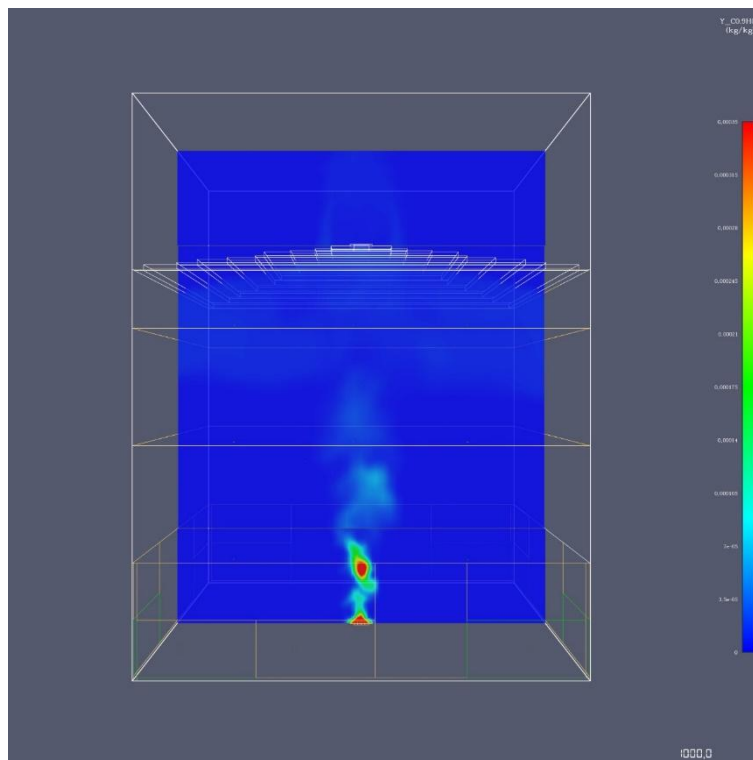


Σχήμα 4-12 Ισοϋψές γράφημα προϊόντων καύσης ως ποσότητα της μάζας του αέρα για  $Y= 7,800$  και  $t= 500s$



Σχήμα 4-13 Ισοϋψές γράφημα προϊόντων καύσης ως ποσότητα της μάζας του αέρα για  $Y= 7,800$  και  $t= 750s$

Στο Σχήμα 4-12 δίνεται το ισοϋψές γράφημα του για την χρονική στιγμή των 500s, στο οποίο παρατηρείται ότι σιγά σιγά η παραγωγή των προϊόντων καύσης γίνεται πιο έντονη και υπάρχει μεγαλύτερη διάδοση σε σχέση με την χρονική στιγμή των 250s. Στο Σχήμα 4-13 δίνεται το ισοϋψές γράφημα του για την χρονική στιγμή των 750s, στο οποίο παρατηρείται ότι υπάρχει μείωση των προϊόντων καύσης σε σχέση με την χρονική στιγμή των 500s που όπως αναφέρθηκε όμως και σε προηγούμενο σχολιασμό πρόκειται για στιγμιότυπο οπότε δεν είναι αντιπροσωπευτικό.

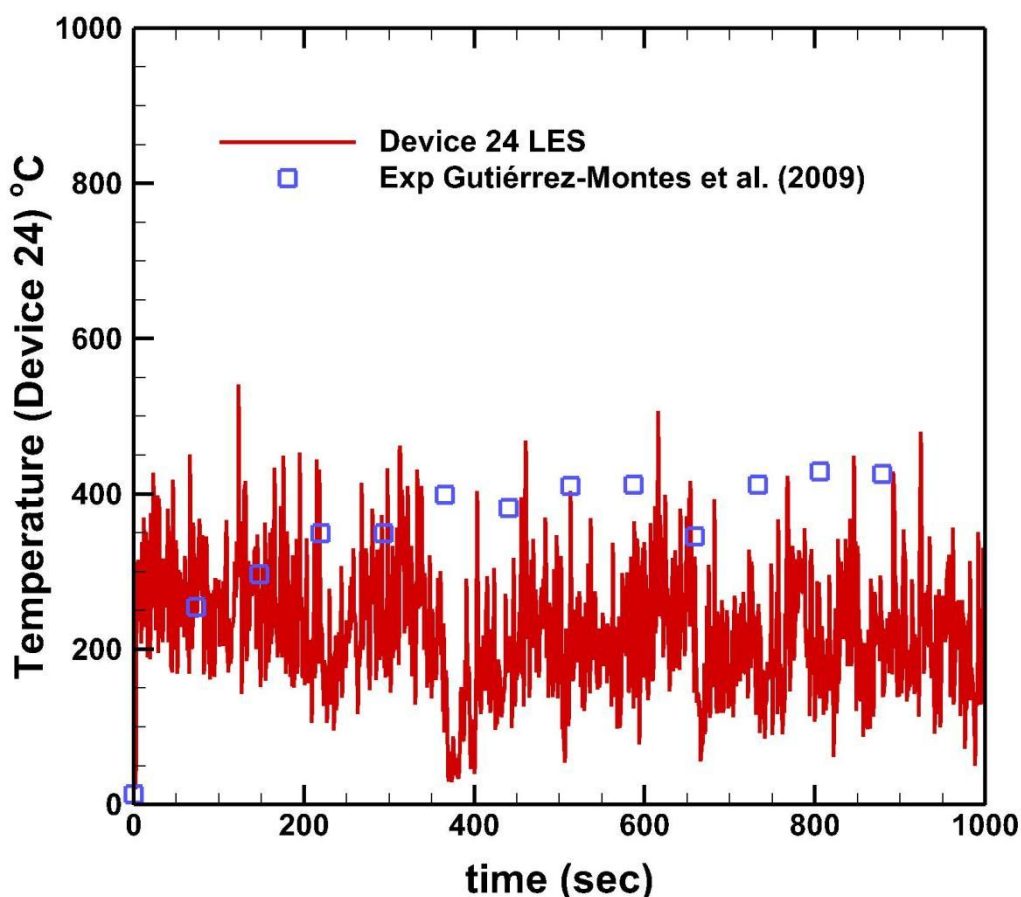


**Σχήμα 4-14** Ισοϋψές γράφημα προϊόντων καύσης ως ποσότητα της μάζας του αέρα για  $Y= 7,800$  και  $t= 1000s$

Στο Σχήμα 4-14 δίνεται το ισοϋψές γράφημα του για την χρονική στιγμή των 1000s, στο οποίο παρατηρείται ότι συνεχίζει να φαίνεται μειωμένη η παραγωγή προϊόντων καύσης στην τελευταία χρονική στιγμή.

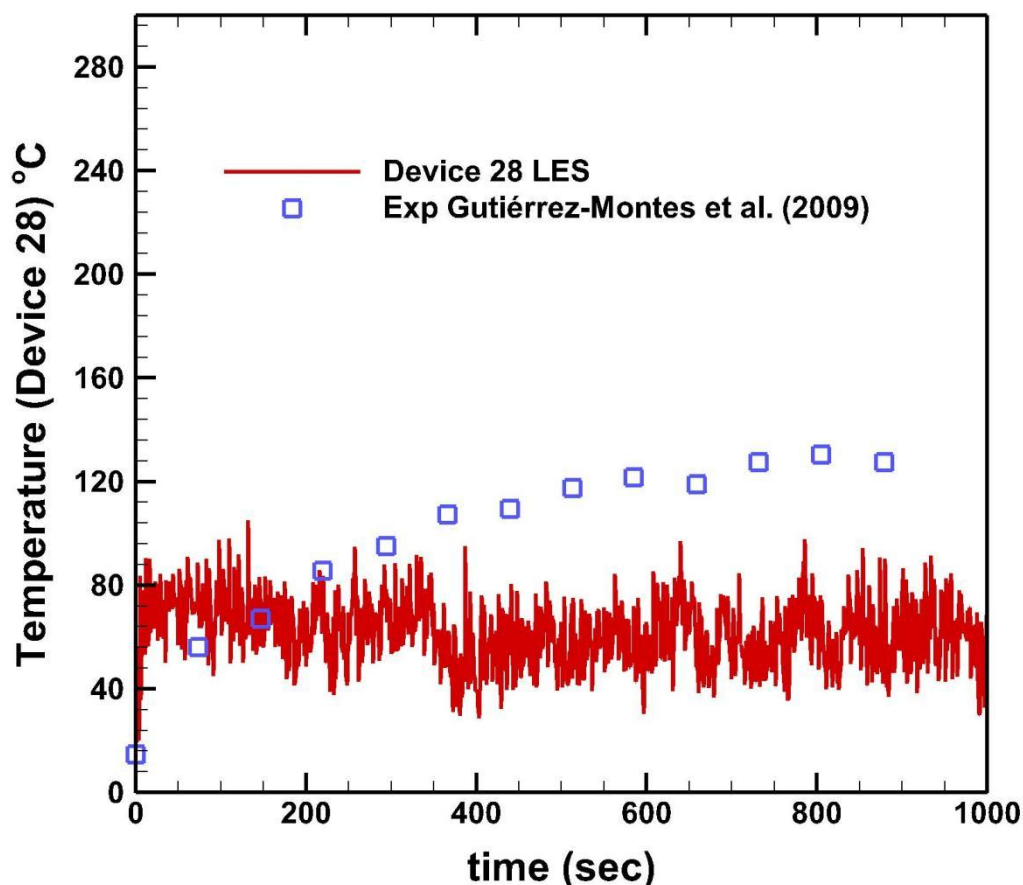
### 4.3.3 Χρονικά μεταβαλλόμενες τιμές της θερμοκρασίας

Στο Σχήμα 4-15 συγκρίνονται τα αποτελέσματα της υπολογιστικής προσομοίωσης όσο αναφορά την μέτρηση της θερμοκρασίας σε ένα συγκεκριμένο σημείο στο επίπεδο συμμετρίας, με τις πειραματικές μετρήσεις του Gutierrez-Montes et al. (2009) στο ίδιο σημείο. Το σημείο για το οποίο γίνεται η σύγκριση βρίσκεται κοντά στην λίμνη φωτιάς και έτσι οι τιμές της θερμοκρασίας φαίνονται αυξημένες. Παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα της υπολογιστικής προσομοίωσης αποκλίνουν ελάχιστα από τα πειραματικά, τα οποία έχουν πιο υψηλές τιμές θερμοκρασίας από τις υπολογιστικές.



Σχήμα 4-15 Διάγραμμα σύγκρισης των αποτελεσμάτων θερμοκρασίας της υπολογιστικής προσομοίωσης με των πειραματικών μετρήσεων του Gutiérrez-Montes, Sanmiguel-Rojas et al. (2009) στο σημείο 24

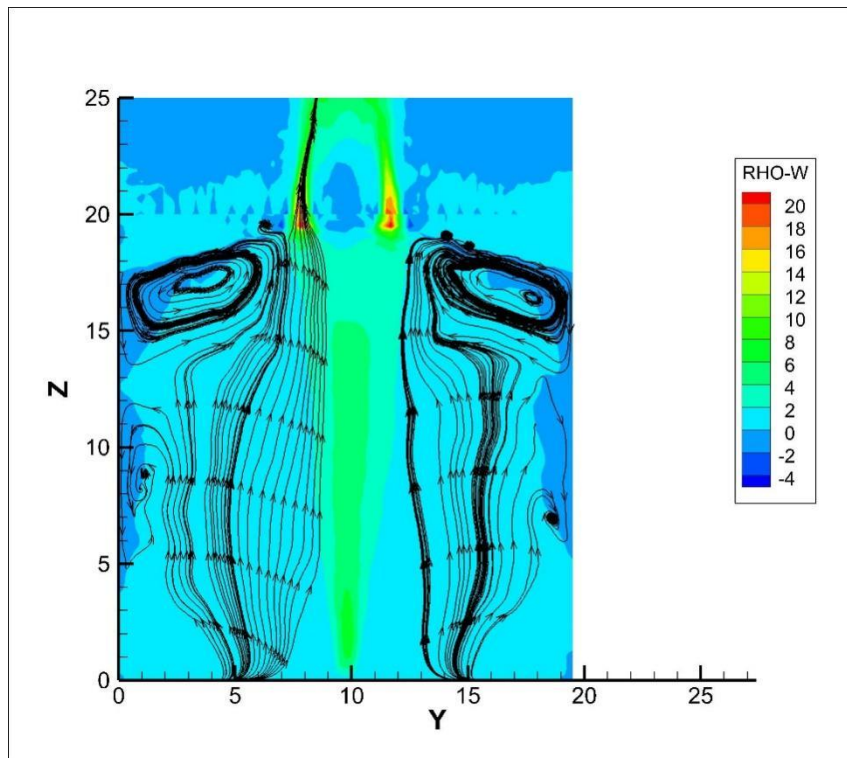
Η σύγκριση των υπολογιστικών με των πειραματικών τιμών όσο αναφορά την θερμοκρασία απεικονίζεται και στο παρακάτω Σχήμα για διαφορετικό σημείο στο επίπεδο συμμετρίας από το προηγούμενο. Το συγκεκριμένο σημείο βρίσκεται κοντά στην οροφή, επομένως οι θερμοκρασίες είναι πιο χαμηλές από αυτές που φάνηκαν στο παραπάνω σχήμα. Παρατηρείται ότι σε αυτό το σημείο οι τιμές μεταξύ των πειραματικών και των υπολογιστικών αποτελεσμάτων έχουν μεγαλύτερη απόκλιση μεταξύ τους. Επίσης φαίνεται ότι με το πέρασμα του χρόνου οι τιμές της θερμοκρασίας στα πειραματικά αποτελέσματα είναι πιο αυξημένες, ενώ στα υπολογιστικά ακολουθούν σχετικά μια σταθερή πορεία.



Σχήμα 4-16 Διάγραμμα σύγκρισης των αποτελεσμάτων θερμοκρασίας της υπολογιστικής προσομοίωσης με των πειραματικών μετρήσεων του Gutiérrez-Montes, Sanmiguel-Rojas et al. (2009) στο σημείο 28

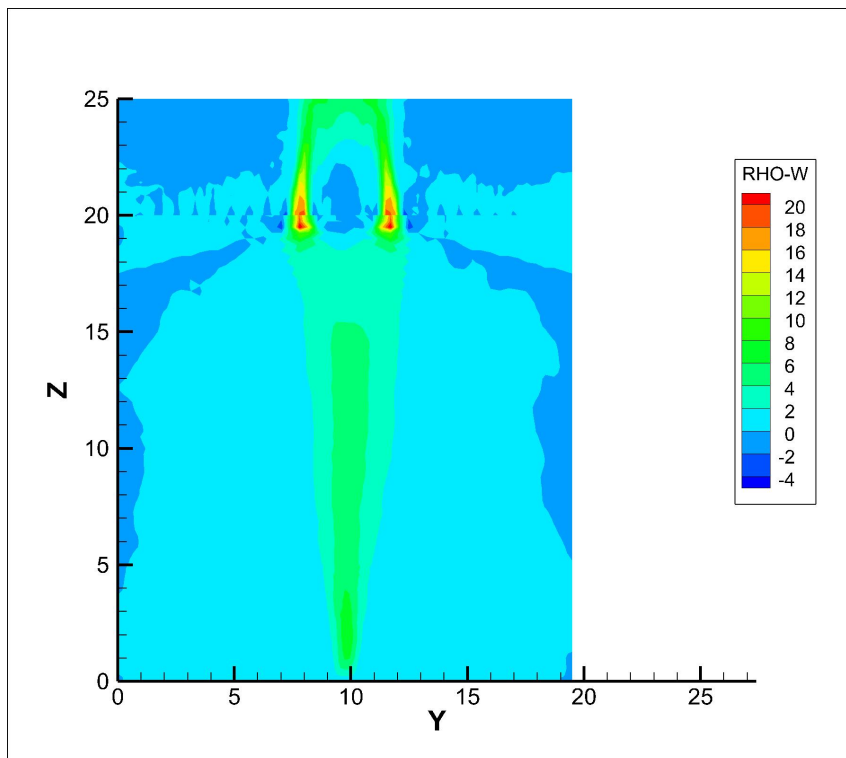
#### 4.3.4 Μέσες ροϊκές γραμμές, ταχύτητες και θερμοκρασίες

Για την μελέτη της ροής μέσα στο αίθριο χρησιμοποιήθηκε η Προσομοίωση Μεγάλων Δινών (LES). Η μελέτη του πεδίου ροής επικεντρώνεται στο σημείο όπου συναντάται η κύρια περιοχή ανακυκλοφορίας. Στο παρακάτω Σχήμα 4-17 με τα διάφορα χρώματα παρουσιάζονται οι μέσες τιμές ταχύτητας  $U_z$  σε διάφορα σημεία σε όλο το κτήριο και επίσης παρατηρείται διαχωρισμός των δινών στο πάνω μέρος του αίθριου όπου δημιουργείται το θερμό στρώμα καπνού. Στην οροφή παρατηρείται αποκόλληση της ροής η οποία προκύπτει από την ανακυκλοφορία, ενώ στα υπόλοιπα μέρη φαίνεται ότι η ροή είναι ομοιόμορφη.



Σχήμα 4- 17 Μέσες ροϊκές γραμμές στο επίπεδο συμμετρίας

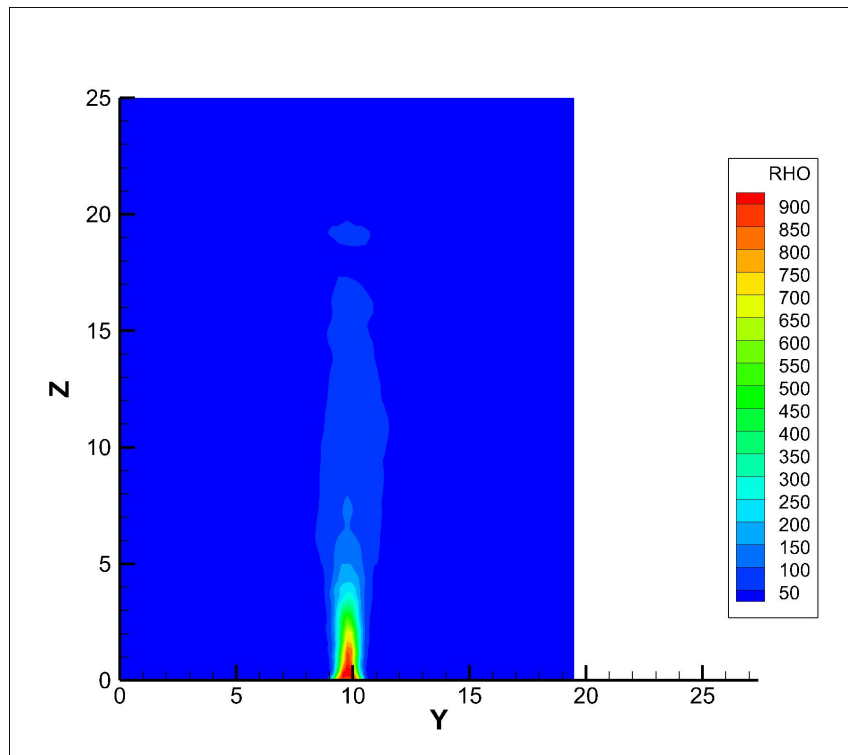
Στο Σχήμα 4-18 που παρουσιάζεται παρακάτω φαίνονται οι μέσες τιμές της ταχύτητας  $U_z$  στον άξονα z. Παρατηρείται ότι στο μεγαλύτερο μέρος του κτηρίου οι μέσες τιμές της ταχύτητας είναι θετικές και χαμηλές δηλαδή πολύ κοντά στο μηδέν. Στο σημείο όπου απεικονίζεται η φωτιά και στο άνοιγμα που υπάρχει στην οροφή από το οποίο απομακρύνεται το στρώμα καπνού που δημιουργείται φαίνεται ότι υπάρχει μια μικρή αύξηση της ταχύτητας και πτώση της πίεσης.



**Σχήμα 4- 18 Μέσες τιμές ταχύτητας  $U_z$  στο επίπεδο συμμετρίας**

Στο Σχήμα 4-19 που παρατίθεται παρακάτω παρουσιάζονται οι μέσες τιμές της θερμοκρασίας συναρτήσει του ύψους στο επίπεδο συμμετρίας. Παρατηρείται ότι οι τιμές της θερμοκρασίας είναι αρκετά υψηλές στο σημείο που είναι ακριβώς

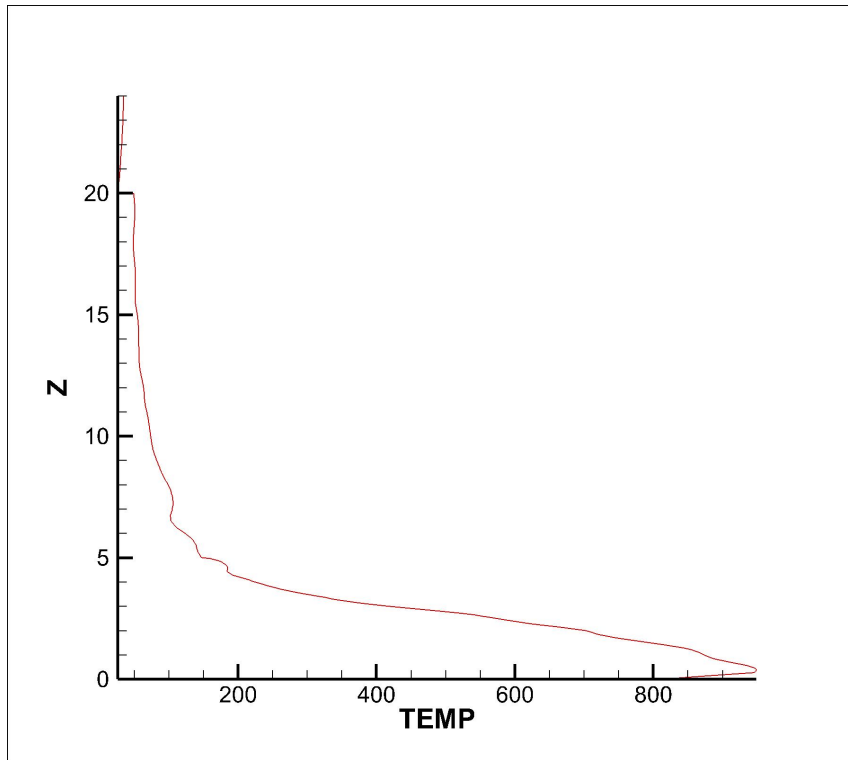
πάνω από την λίμνη φλόγας που έχει δημιουργηθεί με την υψηλότερη τιμή να φτάνει  $900^{\circ}\text{C}$  και χαμηλές σε όλο το υπόλοιπο μέρος του κτηρίου με την τιμή να είναι ίση με  $50^{\circ}\text{C}$  πράγμα το οποίο φαίνεται από την απεικόνιση των τιμών στην στήλη που βρίσκεται στα δεξιά οι οποίες αναπαρίστανται από τα διάφορα χρώματα.



**Σχήμα 4- 19 Μέσες τιμές της θερμοκρασίας στο επίπεδο συμμετρίας**

Στο Σχήμα 4-20 που φαίνεται παρακάτω απεικονίζονται γραφικά οι μέσες τιμές της θερμοκρασίας συναρτήσει του ύψους. Παρατηρείται ότι οι τιμές της θερμοκρασίας αρχικά είναι αρκετά αυξημένες και στο σημείο του δαπέδου από το οποίο ξεκινάει η φωτιά είναι κοντά στους  $900^{\circ}\text{C}$ . Καθώς φτάνουμε προς την οροφή η θερμοκρασία αρχικά μειώνεται απότομα στους  $200^{\circ}\text{C}$  και στη συνέχεια πλησιάζοντας στην οροφή σταθεροποιείται στους  $50^{\circ}\text{C}$  περίπου και μετά φτάνει στους  $0^{\circ}\text{C}$ .





Σχήμα 4-20 Γραφική παράσταση μέσω των τιμών θερμοκρασίας

## 5 Μελέτη της επίδρασης των ανοιγμάτων στην κατανομή των καπναερίων στο εσωτερικό κτηρίου

### 5.1 Πλήρωση με σταθερή φωτιά

Η παρακάτω πειραματική σχέση είναι η εξίσωση σταθερής πλήρωσης από την οδηγία NFPA 92B η οποία χρησιμοποιείται για να ορίσει την συσσώρευση του καπνού σε έναν κλειστό χώρο μετά την εκδήλωση φωτιάς :

$$\frac{z}{H} = C_{10} - 0.28 \ln \left[ \frac{t Q^{\frac{1}{3}} H^{-4/3}}{\frac{A}{H^2}} \right] \quad (5-1)$$

Όπου:

$z$  = το ύψος της πρώτης εμφάνισης καπνού πάνω από την φωτιά

$H$  = το ύψος της οροφής πάνω από την φωτιά

$t$  = ο χρόνος εκδήλωσης της φωτιάς

$Q$  = ρυθμός έκλυσης σταθεράς θερμότητας από σταθερή φωτιά

$A$  = εμβαδόν εγκάρσιας τομής του αιθρίου

$C_{10} = 1,11$

Η εξίσωση αυτή υπολογίζει μόνο το ύψος της πρώτης ένδειξης του καπνού πάνω από το σημείο που δημιουργείται η φωτιά και όχι το κομμάτι όπου γίνεται η μετάβαση και δημιουργείται το στρώμα καπνού. Στο μοντέλο ζώνης που θεωρείται ιδανικό η διεπαφή του καπνού θεωρείται ότι είναι ένα ύψος όπου υπάρχει καπνός πάνω από κάποιο όριο και καθόλου κάτω από αυτό. Στις

πραγματικές πυρκαγιές που δημιουργούνται όμως υπάρχει μια βαθμιαία περιοχή μετάβασης του χαμηλότερου ψυχρού στρώματος σε ανώτερο θερμό στρώμα. Το κάτω μέρος της μεταβατικής περιοχής μπορεί να χαρακτηριστεί ως η πρώτη ένδειξη καπνού. Η εξίσωση (5-1) αναφέρεται σε περιπτώσεις με μια σταθερή περιοχή διατομής σε σχέση με το ύψος και που το νέφος δεν έχει επαφή με τους τοίχους. Για σύνθετα σχήματα αίθριου μπορεί να χρησιμοποιηθεί φυσική μοντελοποίηση ή CFD. Εναλλακτικά για να οριστούν τα όρια στον χρόνο πλήρωσης με καπνό ενός αίθριου με σύνθετο σχήμα μπορεί να γίνει μια ανάλυση ευαισθησίας με την παραπάνω εξίσωση, η οποία είναι κατάλληλη για  $A/H^2$  από 0.9 έως 14 και για τιμές  $z$  μεγαλύτερες ή ίσες με το 20% του  $H$ . Εάν η τιμή  $z/H$  είναι μεγαλύτερη από την μονάδα σημαίνει ότι το στρώμα καπνού που βρίσκεται κάτω από την οροφή δεν έχει αρχίσει να κατεβαίνει.

Οι όροι αυτοί μπορούν να εκφραστούν ως:

$A =$  Σταθερό ως προς το  $H$

$$0.2 \leq \frac{z}{H} \leq 1.0 ,$$

και

$$0.9 \leq \frac{A}{H^2} \leq 14$$

Όταν η εξίσωση (5-1) λυθεί για  $z/H$ , τότε θα διαπιστωθεί ότι το  $z/H$  είναι εκτός του ορίου. Η σταθερή εξίσωση πλήρωσης μπορεί να λυθεί για χρόνο με την παρακάτω εξίσωση:

$$t = \frac{A}{H^2} \frac{H^{4/3}}{Q^{1/3}} \exp \left[ \frac{1}{0.28} \left( C_{10} - \frac{z}{H} \right) \right] \quad (5-2)$$

### 5.1.1 Μέθοδος Εξίσωσης για Σταθερή Εξάτμιση Καπνού

Για μια πυρκαγιά σε ένα αίθριο, το μεγαλύτερο μέρος της θερμότητας που δημιουργείται ρέει προς το νέφος καπναερίων που βρίσκεται προς τα πάνω και

η υπόλοιπη θερμότητα που απομένει αποκολλάται από την φωτιά με την ακτινοβολία. Θεωρούμε ότι η μεταφορά θερμότητας μέσω της αγωγής είναι αμελητέα. Ο συντελεστής συναλλακτικής έκλυσης θερμότητας εκφράζεται ως:

$$q_c = \chi_c q \quad (5-3)$$

Όπου

$\chi_c$  = ποσοστό θερμότητας που εκλύεται μέσω ακτινοβολίας, για την τιμή του χρησιμοποιούμε την τιμή 0,7

$q_c$  = Ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας με συναγωγή, kW

$q$  = συνολικός ρυθμός έκλυσης θερμότητας, kW

### 5.1.2 Πυρκαγιά σε Αίθριο

Για τον υπολογισμό του ρυθμού ροής μάζας των καπναερίων που δημιουργείται από μια πυρκαγιά σε ένα αίθριο συνήθως χρησιμοποιούνται εμπειρικές εξισώσεις. Θεωρητικά ένα συμμετρικό νέφος έχει κυκλική διατομή, αλλά τα νέφη πολλών φλεγόμενων αντικειμένων συμπεριφέρονται σαν αξονοσυμμετρικά νέφη σε κάποια απόσταση πάνω από την φωτιά. Για μια απόσταση πάνω από την βάση της φωτιάς με  $z$  ίσο ή μεγαλύτερο από το όριο ανύψωσης  $z_l$ , η ροή μάζας του πλούμιου είναι:

$$m = 0.071q_c^{1/3} z^{5/3} + 0.0018q_c \quad (5-4)$$

Για  $z < z_l$ , η ροή μάζας του πλούμιου είναι

$$m = 0.032q_c^{3/5} z \quad (5-5)$$

Όπου

$m$  = η ροή μάζας στο αξονοσυμμετρικό νέφος στο ύψος  $z$ , kg/s

$q_c$  = συναινετικός ρυθμός έκλυσης θερμότητας της πυρκαγιάς, kW

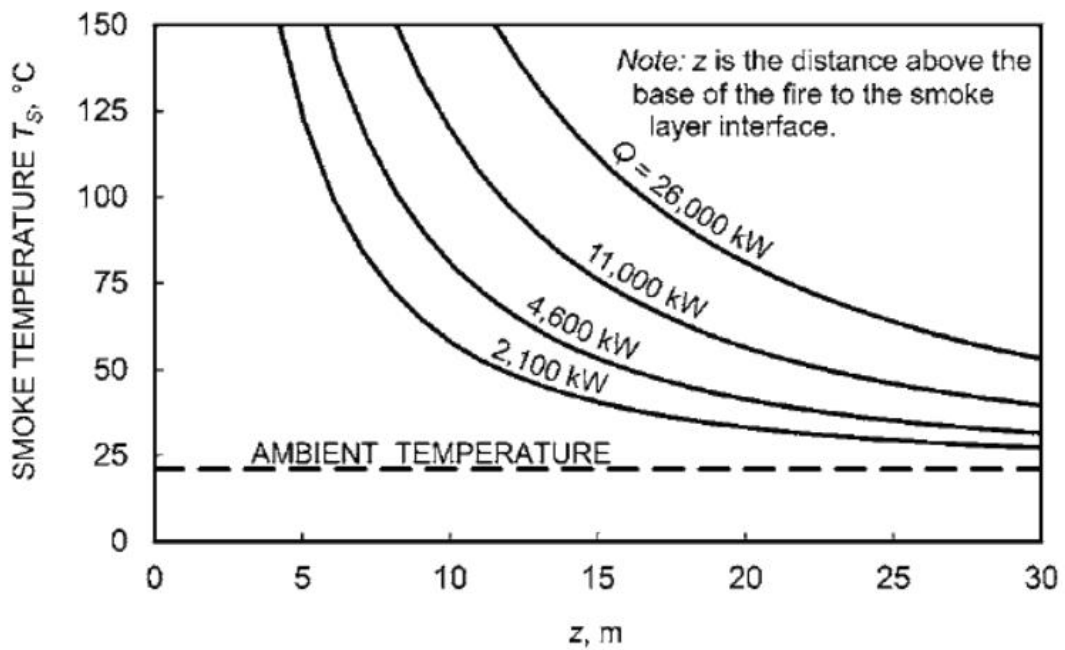
$z$  = απόσταση από τη βάση της φωτιάς έως τη διεπαφή του στρώματος καπνού,  
m

$z_l$  = όριο ανύψωσης, m

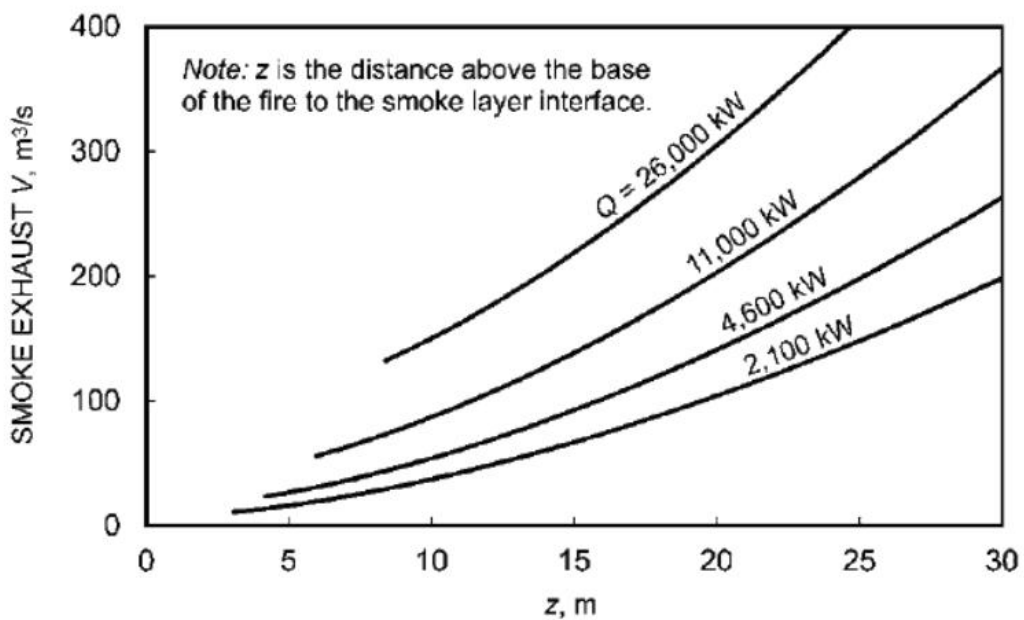
-Το όριο ανύψωσης είναι περίπου το μέσο ύψος της φλόγας, το οποίο είναι:

$$z_l = 0.166q_c^{2/5} \quad (5-6)$$

Στα παρακάτω Σχήματα 5-1 και 5-2 απεικονίζεται η θερμοκρασία του στρώματος καπνού και ο ρυθμός εξάτμισης του καπνού για πυρκαγιές σε ένα αίθριο με ένα αξονοσυμμετρικό νέφος. Η ροή μάζας υπολογίστηκε από τις προηγούμενες εξισώσεις, ενώ η θερμοκρασία του στρώματος καπνού και η ογκομετρική ροή υπολογίστηκαν από εξισώσεις που αναλύθηκαν στα ακόλουθα τμήματα. Όσο αυξάνεται το  $z$ , η θερμοκρασία του στρώματος καπνού μειώνεται ως συνέπεια της εξάτμισης του αέρα από το νέφος ( Σχήμα 5-1 ). Η ροή μάζας του πλουμίου αυξάνεται με το ύψος, ενώ η θερμοκρασία μειώνεται. Στο Σχήμα 5-2 φαίνεται ότι όσο αυξάνεται το  $z$ , αυξάνεται και ο ρυθμός εξάτμισης καπνού.



Σχήμα 5-1 Θερμοκρασία Στρώματος Καπνού για Σταθερά Συστήματα Εξάτμισης Καπνού



Σχήμα 5-2 Ρυθμός Εξάτμισης Καπνού για Σταθερά Συστήματα Εξάτμισης Καπνού

### 5.1.3 Θερμοκρασία στρώματος καπνού

Η θερμοκρασία των καπναερίων υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση

$$T_S = T_0 + \frac{Kq_c}{mC_p} \quad (5-7)$$

Όπου

$T_S$  = Θερμοκρασία του στρώματος καπνού, °C

$T_0$  = Θερμοκρασία περιβάλλοντος, °C

$K$  = κλάσμα της απελευθέρωσης θερμότητας μέσω συναγωγής που περιέχεται στο στρώμα καπνού

$q_c$  = ρυθμός έκλυσης θερμότητας με συναγωγή, kW

$C_p$  = ειδική θερμότητα πλουμικών αερίων, 1,0 kJ/(kg\*K)

$m$  = ρυθμός ροής μάζας του νέφους στο σημείο όπου εισέρχεται στο στρώμα καπνού, kg/s

Η εξίσωση (5-7) ισχύει για αξονικά γεωμετρικά νέφη και για τα νέφη υπερχειλίσης από κάποιο μπαλκόνι. Για τα συστήματα ελέγχου καπνού του αίθριου, η τιμή του  $K$  κυμαίνεται από 0,5 έως 1,0.

### 5.1.4 Ογκομετρική Ροή Καυσαερίων Καπνού

Η ογκομετρική ροή των καυσαερίων καπνού είναι:

$$V = \frac{m}{\rho} \quad (5-8)$$

Όπου

$V$  = ογκομετρική παροχή καυσαερίων,  $m^3/s$

$m$  = ρυθμός ροής μάζας καυσαερίων καπνού, kg/s

$\rho$  = πυκνότητα καπνού, kg/m<sup>3</sup>

Η πυκνότητα του καπνού μπορεί να υπολογιστεί από:

$$\rho = \frac{P_{atm}}{RT_s} \quad (5-9)$$

Όπου

$P$  = πυκνότητα καπνού, kg/m<sup>3</sup>

$P_{atm}$  = ατμοσφαιρική πίεση, Pa

$R$  = σταθερά αερίου, 287 J/(kg K)

$T$  = απόλυτη θερμοκρασία καπνού, K

### 5.1.5 Επιφάνεια ανοιγμάτων εξαγωγής των καυσαερίων

Η εξίσωση που συνδέει την μαζική παροχή καπναερίων που αποβάλλονται στο περιβάλλον, την επιφάνεια των ανοιγμάτων εξόδου του καπνού και την επιφάνεια εισόδου του νωπού αέρα είναι :

$$A_V C_V = \frac{M}{\rho_0} \left[ \frac{T_c^2 + (A_V C_V / A_i C_i)^2 T_0 T_c}{2 g d_b \theta_c T_0} \right]^{1/2} \quad (5-10)$$

Όπου:

$A_V C_V$  είναι η ελεύθερη επιφάνεια φυσικού αερισμού (m<sup>2</sup>)

$A_i$  είναι η συνολική επιφάνεια όλων των ανοιγμάτων εισόδου νωπού αέρα

$C_V$  ο συντελεστής για τα ανοίγματα εξόδου των καπναερίων (τιμές μεταξύ 0,5 και 0,7)



$C_i$  ο συντελεστής για τα ανοίγματα εισόδου νωπού αέρα (τιμή 0,6)

$m$  μαζική παροχή καπναερίων στα ανοίγματα εξόδου  $kg/sec$

$\rho_0$  πυκνότητα του αέρα στην ατμόσφαιρα

$d_b$  απόσταση του καπνού από το κατώτερο ύψος του ανοίγματος εξόδου (m)

$\theta_c$  Αύξηση της θερμοκρασίας του καπνού σε σχέση με την θερμοκρασία περιβάλλοντος (K)

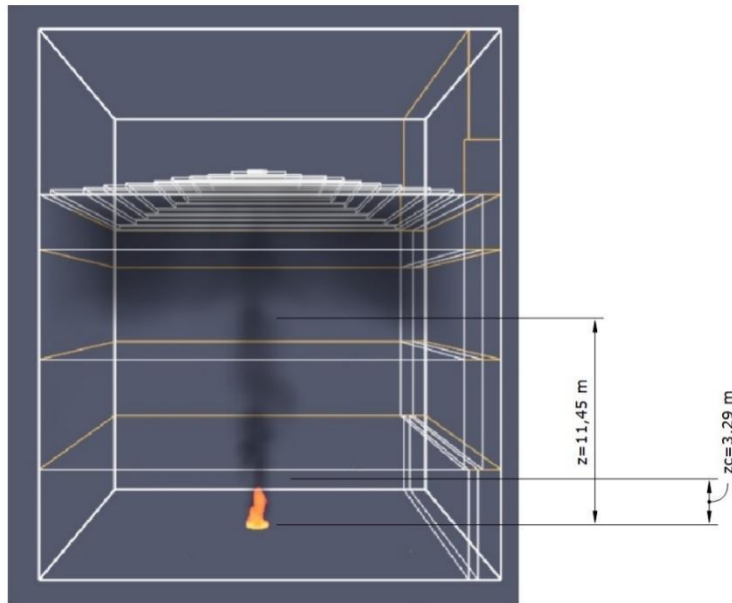
$T_c$  Απόλυτη θερμοκρασία των καπναερίων (K)

$T_0$  Απόλυτη θερμοκρασία του αέρα στον περιβάλλον (K)

## 5.2 Μελέτη περίπτωσης για φωτιά σε κλειστό χώρο

Η πρώτη περίπτωση που εξετάστηκε αφορά τα χαρακτηριστικά των καπναερίων μετά την εκδήλωση φωτιάς σε κλειστό χώρο. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του χώρου και το υπολογιστικό πεδίο περιγράφονται στο κεφάλαιο 4.1 και 4.2. Η εκλυόμενη θερμότητα ανά μονάδα επιφάνειας ορίστηκε ως  $2070 \text{ Kw/m}^2$ .

Σύμφωνα με την εξίσωση (5-2) ο καπνός έχει φτάσει τα 11 m μετά από 30  $^i$ sec, κάτι που συμφωνεί και με την υπολογιστική προσομοίωση Σχήμα 5-3.

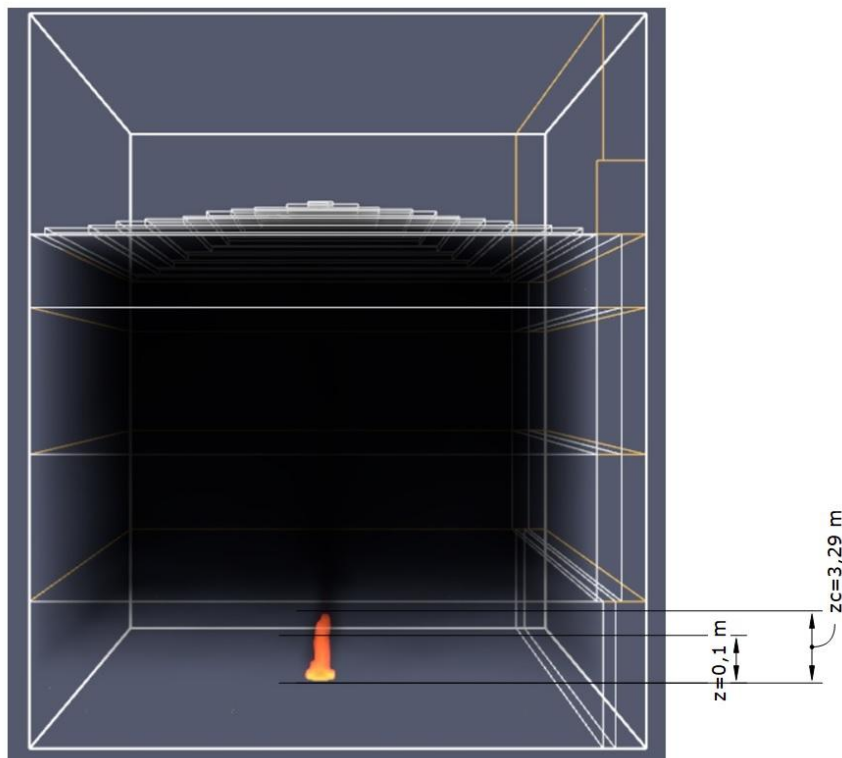


**Σχήμα 5-3 Κατανομή του καπνού στο εσωτερικό του χώρου**

Για την πλήρωση του χώρου με καπναέρια απαιτούνται περίπου 230 sec και το ύψος της φλόγας είναι 3,29 m (Σχήμα 5-4).

Το ύψος της φλόγας σύμφωνα με την εξίσωση (5-6) είναι  $z_l = 3,47 \text{ m}$ , που συμφωνεί και με την υπολογιστική προσομοίωση Σχήμα 5-3.

Η θερμοκρασία των καπναερίων σύμφωνα με την εξίσωση (5-7) είναι  $849 \text{ }^\circ\text{C}$ .



Σχήμα 5-4 Κατανομή του καπνού στο εσωτερικό του χώρου

### 5.3 Μελέτη περιπτώσεων για φωτιά σε χώρο με ανοίγματα εισόδου και εξόδου

Η προμελέτη των ανοιγμάτων γίνεται σύμφωνα με την εξίσωση (5-10). Θεωρούμε ότι για 150 sec μετά από την έναρξη της φωτιάς και για ανοίγματα εισόδου νωπού αέρα επιφάνειας  $5 \text{ m}^2$  απαιτείται επιφάνεια ανοιγμάτων εξόδου των καπναερίων ίση με  $3,5 \text{ m}^2$ . Για τον υπολογισμό έχουμε θεωρήσει τους συντελεστές  $C_v = 0,5$ ,  $C_i = 0,5$ ,  $d_b = 13 \text{ m}$ . Σύμφωνα με τα στοιχεία της προμελέτης για την μελέτη της επίδρασης των ανοιγμάτων στην κατανομή των καπναερίων ενός μεγάλου χώρου (αίθριο) εξετάζονται επτά διαφορετικές περιπτώσεις με τα παρακάτω χαρακτηριστικά του πίνακα Πίνακας 5-1.

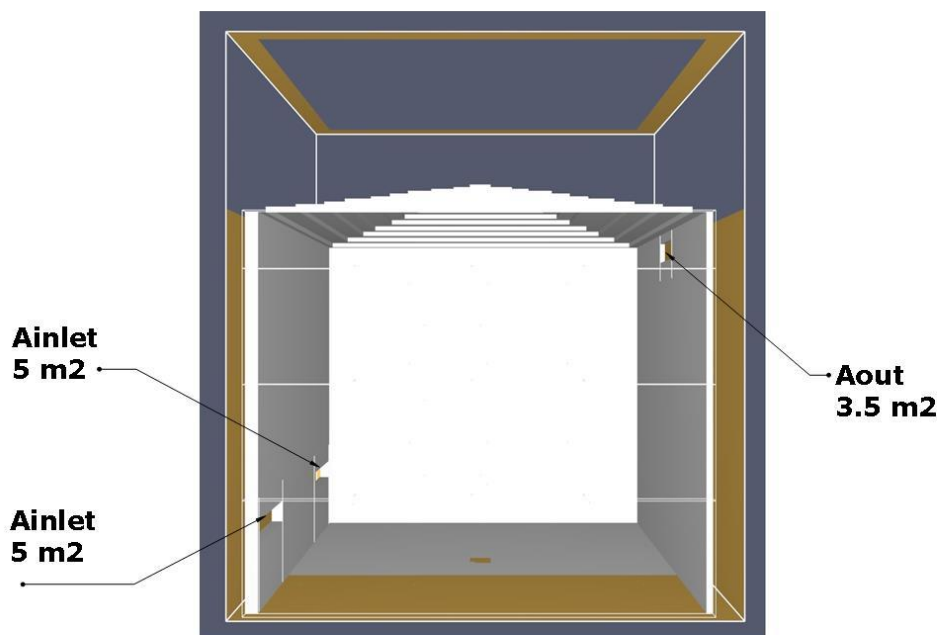
**Πίνακας 5-1 Περιπτώσεις που μελετήθηκαν με διαφορετικά ανοίγματα εισόδου, εξόδου στο κέλυφος κτηρίου καθώς και διαφορετικές συνθήκες ανέμου στο εξωτερικό του.**

Περίπτωση 1	Δύο ανοίγματα εισόδου του αέρα από το περιβάλλον με εμβαδόν $A_{inlet} = 5m^2$ και ένα άνοιγμα εξόδου του καπνού με εμβαδόν $A_{outlet} = 3,5 m^2$
Περίπτωση 2	Ένα άνοιγμα εισόδου του αέρα από το περιβάλλον με εμβαδόν $A_{inlet} = 5,35m^2$ και ένα άνοιγμα εξόδου με εμβαδόν $A_{outlet} = 5,35 m^2$
Περίπτωση 3	Ένα άνοιγμα εισόδου του αέρα από το περιβάλλον με εμβαδόν $A_{inlet} = 10,7m^2$ και ένα άνοιγμα εξόδου με εμβαδόν $A_{outlet} = 10,7 m^2$
Περίπτωση 4	Ένα άνοιγμα εισόδου του αέρα από το περιβάλλον με εμβαδόν $A_{inlet} = 10,7m^2$ και ένα άνοιγμα εξόδου με εμβαδόν $A_{outlet} = 10,7 m^2$ . Η είσοδος του αέρα από το περιβάλλον γίνεται με ταχύτητα 1 m/sec.
Περίπτωση 5	Ένα άνοιγμα εισόδου του αέρα από το περιβάλλον με εμβαδόν $A_{inlet} = 10,7m^2$ και ένα άνοιγμα εξόδου με εμβαδόν $A_{outlet} = 10,7 m^2$ . Η είσοδος του αέρα από το περιβάλλον γίνεται με ταχύτητα 2 m/sec.
Περίπτωση 6	Ένα άνοιγμα εισόδου του αέρα από το περιβάλλον με εμβαδόν $A_{inlet} = 10,7m^2$ και ένα άνοιγμα εξόδου με εμβαδόν $A_{outlet} = 10,7 m^2$ . Η είσοδος του αέρα από το περιβάλλον γίνεται με ταχύτητα 5 m/sec.
Περίπτωση 7	Ένα άνοιγμα εισόδου του αέρα από το περιβάλλον με εμβαδόν $A_{inlet} = 10,7m^2$ και ένα άνοιγμα εξόδου με εμβαδόν $A_{outlet} = 10,7 m^2$ . Η είσοδος του αέρα από το περιβάλλον γίνεται με ταχύτητα 8 m/sec.

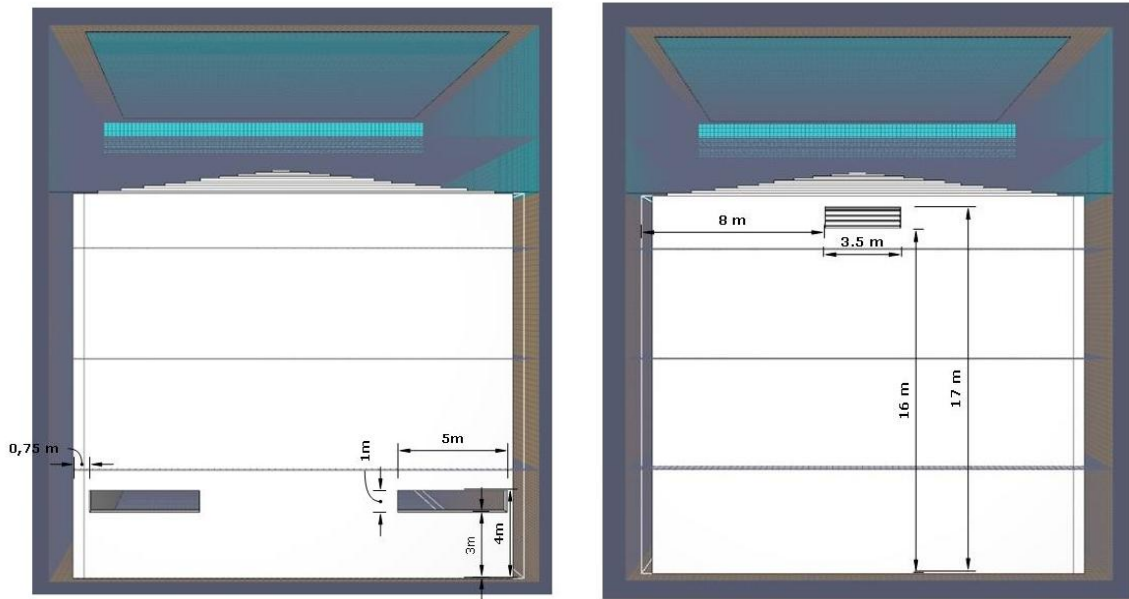
### 5.3.1 Περίπτωση 1

Η γεωμετρία της περίπτωσης 1 όπως εμφανίζεται στο Σχήμα 5-5 αποτελείται από δύο ανοίγματα εισόδου του αέρα από το περιβάλλον με εμβαδόν  $A_{inlet} = 5m^2$  και ένα άνοιγμα εξόδου του καπνού προς το περιβάλλον με εμβαδόν  $A_{outlet} = 3,5 m^2$ .

Οι διαστάσεις του κάθε ανοίγματος εισόδου  $A_{inlet}$  έχουν μήκος 5 m και ύψος 1 m. Το χαμηλότερο σημείο του ανοίγματος απέχει από το δάπεδο 3 m όπως εμφανίζεται στο Σχήμα 5-6. Οι διαστάσεις του ανοίγματος εξόδου  $A_{outlet}$  είναι μήκος 3,5 m και ύψος 1 m. Το χαμηλότερο σημείο του ανοίγματος απέχει από το δάπεδο 16 m όπως εμφανίζεται στο Σχήμα 5-6.



Σχήμα 5- 5 Εμβαδόν ανοιγμάτων  $A_{inlet}$  και  $A_{outlet}$  για την μελέτη περίπτωσης 1

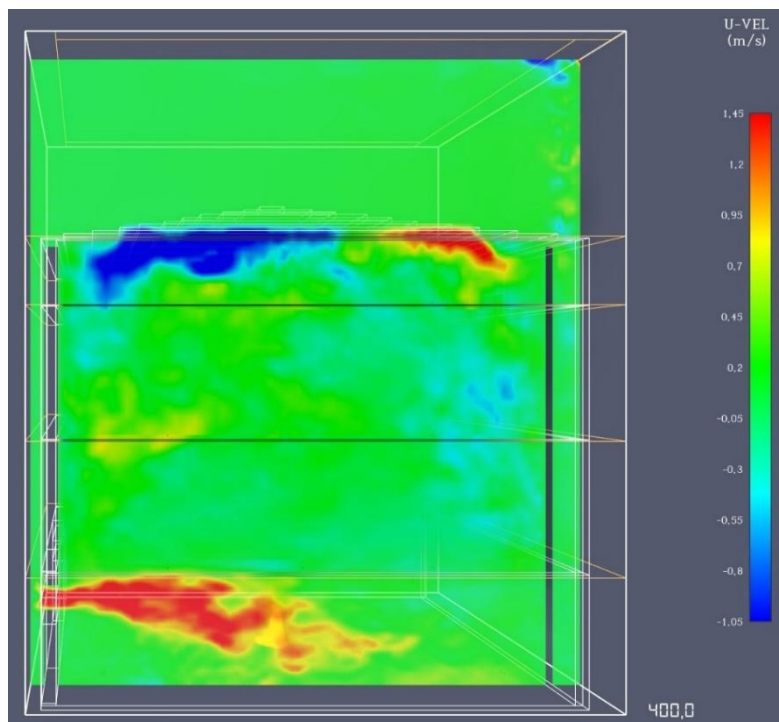


α)

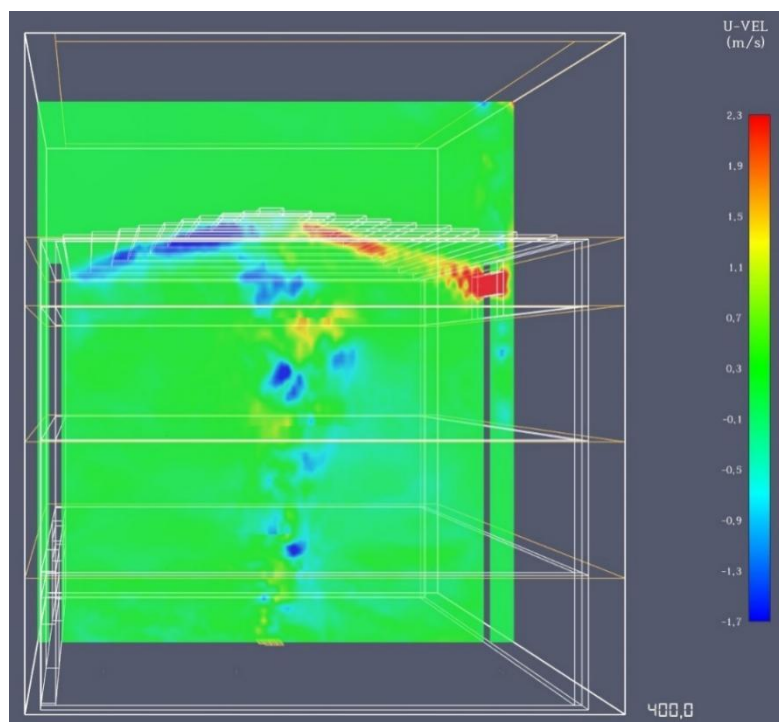
β)

**Σχήμα 5-6 Γεωμετρία των α) ανοιγμάτων εισόδου νωπού αέρα και β) ανοιγμάτων εξόδου των καπναερίων για την περίπτωση 1**

Η ταχύτητα του ανέμου στο εξωτερικό του κτηρίου είναι μηδενική και η ταχύτητα του νωπού αέρα για κάθε άνοιγμα εισόδου μετά από 400 sec από την έναρξη της φωτιάς είναι  $u_{x,inlet} = 1,78 \text{ m/sec}$ , ενώ η ταχύτητα των καπναερίων στα ανοίγματα εξόδου είναι  $u_{x,outlet} = 4,68 \text{ m/sec}$ , που αντιστοιχεί σε παροχή αέρα  $8,9 \text{ m}^3/\text{sec}$  στην είσοδο για το κάθε άνοιγμα  $A_{inlet}$  και  $16,38 \text{ m}^3/\text{sec}$  για την έξοδο  $A_{outlet}$  (Σχήμα 5-7).

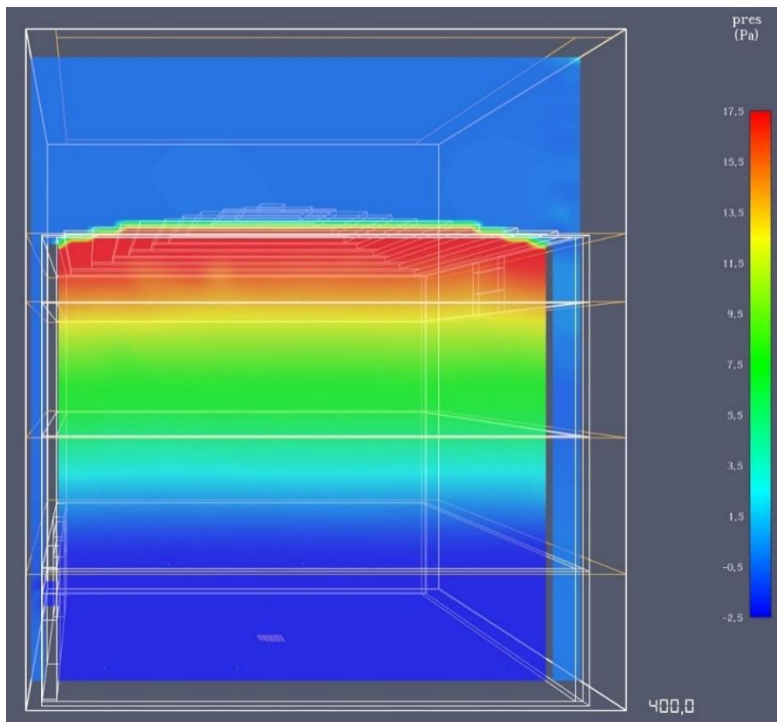


Σχήμα 5-7 Ισοϋψές γράφημα της ταχύτητας  $U_x$  (m/sec) στο επίπεδο  $Y= 2,750$  μετά από  $t= 400s$  από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 1



Σχήμα 5-8 Ισοϋψές γράφημα της ταχύτητας  $U_x$  (m/sec) στο επίπεδο  $Y= 9,750$  μετά από  $t= 400s$  από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 1

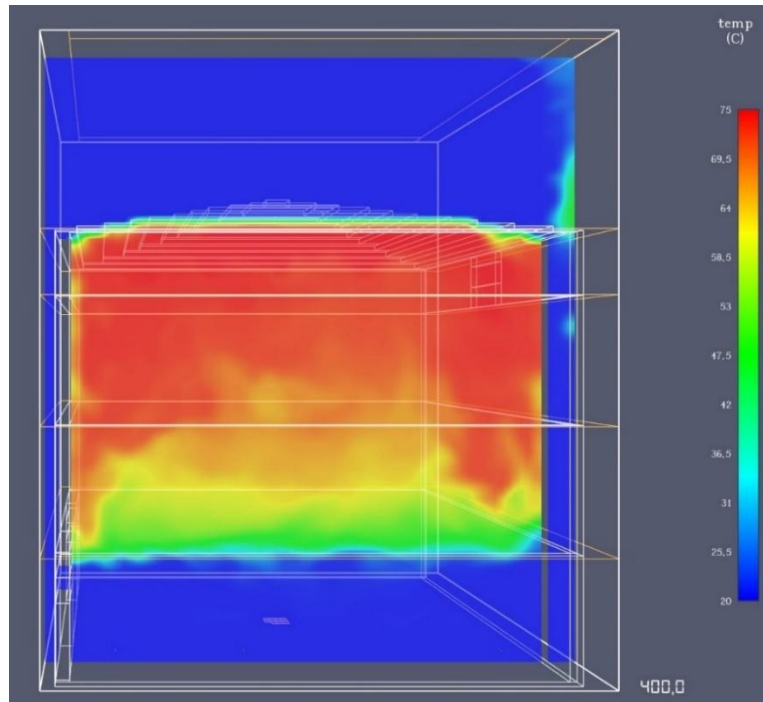
Στο Σχήμα 5-9 παρατηρείται ότι στα κατωτέρα στρώματά του κτηρίου εμφανίζονται υπό-πιέσεις ενώ στα ανωτέρα στρώματα του κτηρίου υπέρ-πιέσεις. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να ευνοείται η εισαγωγή αέρα στα ανοίγματα εισόδου που βρίσκονται κοντά στο δάπεδο του κτηρίου και την εξαγωγή του αέρα στα ανοίγματα εξόδου που βρίσκονται πλησιέστερα στην οροφή.



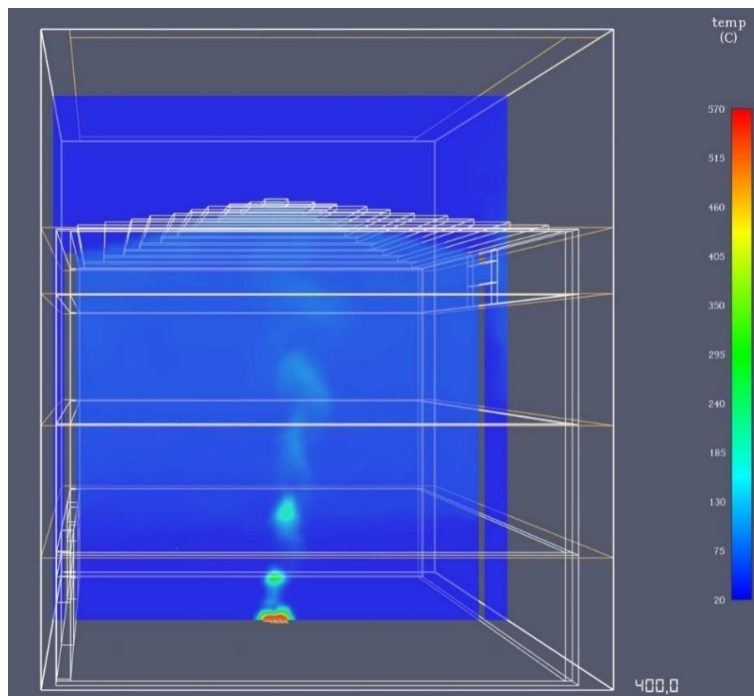
**Σχήμα 5-9** Ισοϋψές γράφημα κατανομής της πίεσης (Pa) στο επίπεδο  $Y= 9,750$  μετά από  $t= 400s$  από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 1

Στα Σχήμα 5-10 απεικονίζεται η θερμοκρασία του αέρα για το επίπεδο συμμετρίας ( $Y=9,750$ ) που βρίσκεται και το άνοιγμα εξόδου  $A_{outlet}$  και για το επίπεδο  $Y= 2,75$  που βρίσκεται το ένα από τα ανοίγματα εισόδου του αέρα  $A_{inlet}$ . Η μέση θερμοκρασία στο κάτω μέρος του κτηρίου παραμένει χαμηλή και ένα στρώμα θερμού καπνού συσσωρεύεται στην οροφή.



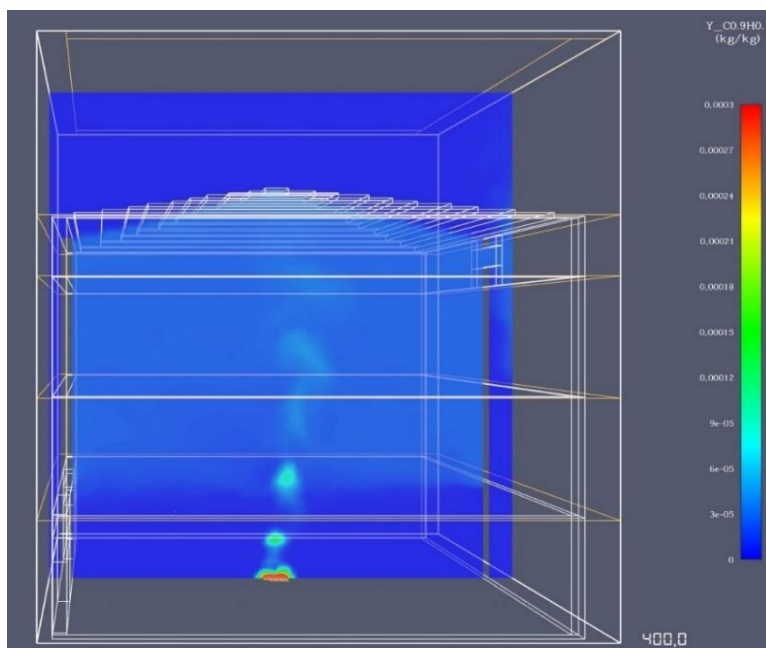


Σχήμα 5-10 Ισοϋψές γράφημα της θερμοκρασίας των καπναερίων (°C) στο επίπεδο  $Y= 2,750$  μετά από  $t= 400s$  από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 1

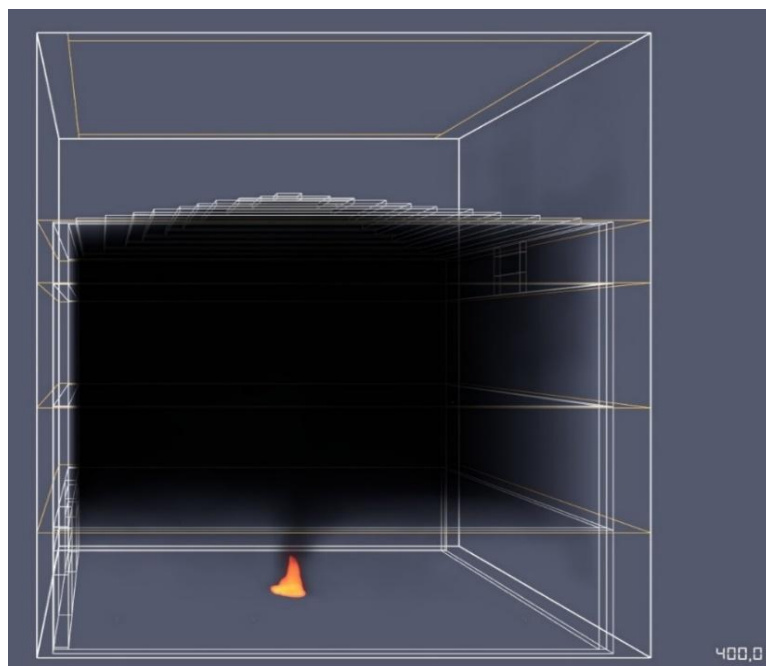


Σχήμα 5-11 Ισοϋψές γράφημα της θερμοκρασίας των καπναερίων (°C) στο επίπεδο  $Y= 9,750$  μετά από  $t= 400s$  από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 1

Η πλήρωση του κτηρίου με καπνό μετά από 400 sec από την έναρξη της φωτιάς είναι 6,7m από το δάπεδο του κτηρίου (Σχήμα 5- 13).



Σχήμα 5-12 Ισοψές γράφημα της συγκέντρωσης του καπνού (soot) (kg/kg) στο επίπεδο  $Y= 9,750$  μετά από  $t= 400s$  από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 1

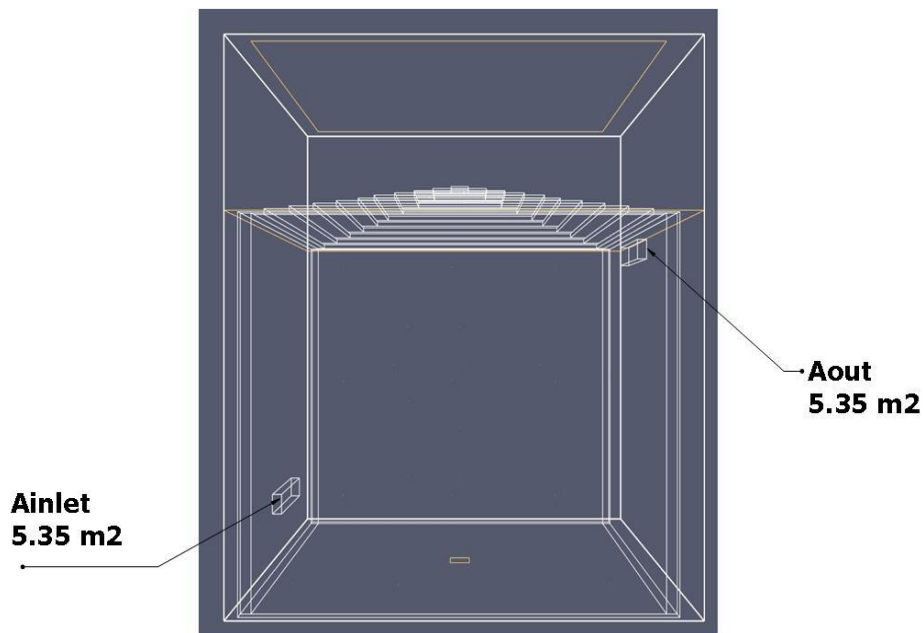


Σχήμα 5-13 Συγκέντρωση του καπνού στο χώρο μετά από  $t= 400s$  από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 1

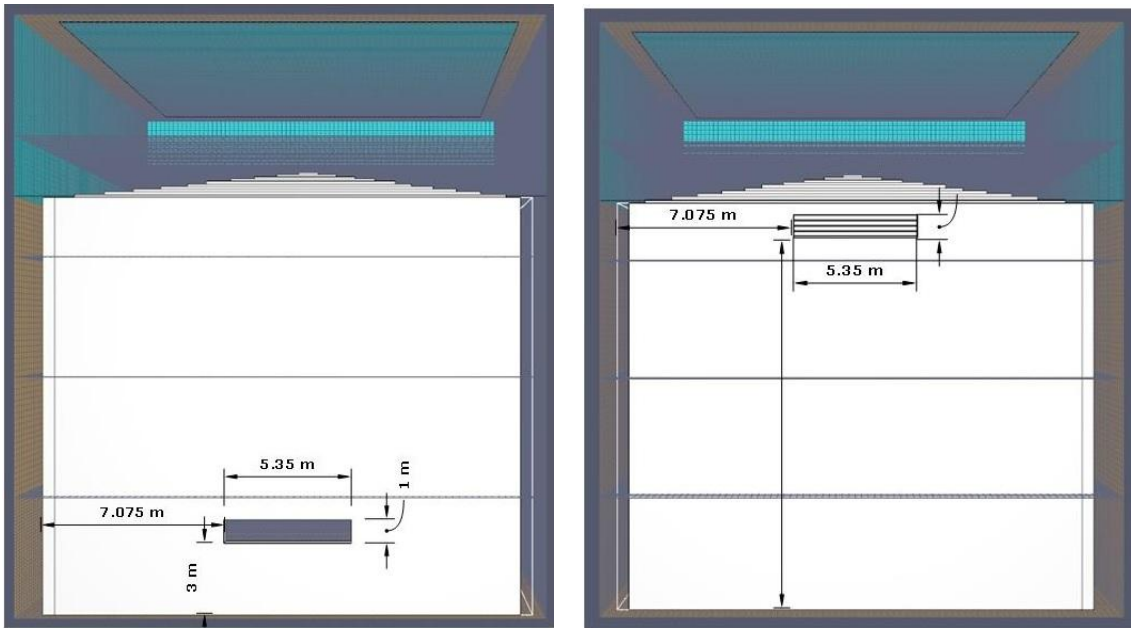
### 5.3.2 Περίπτωση 2

Η γεωμετρία της περίπτωσης 2 όπως εμφανίζεται στο Σχήμα 5- 14 αποτελείται από ένα άνοιγμα εισόδου του αέρα από το περιβάλλον με εμβαδόν  $A_{inlet} = 5,35 \text{ m}^2$  και ένα άνοιγμα εξόδου του καπνού προς το περιβάλλον με εμβαδόν  $A_{outlet} = 5,35 \text{ m}^2$ .

Οι διαστάσεις του ανοίγματος εισόδου  $A_{inlet}$  έχει μήκος 5,35 m και ύψος 1 m. Το χαμηλότερο σημείο του ανοίγματος απέχει από το δάπεδο 3,5 m όπως εμφανίζεται στο Σχήμα 5- 15α. Όμοια οι διαστάσεις του ανοίγματος εξόδου  $A_{outlet}$  έχει μήκος 5,35 m και ύψος 1 m και το χαμηλότερο σημείο του ανοίγματος απέχει από το δάπεδο 16 m όπως εμφανίζεται στο Σχήμα 5- 15β.



Σχήμα 5- 14 Εμβαδόν ανοιγμάτων  $A_{inlet}$  και  $A_{outlet}$  για την μελέτη περίπτωσης 2

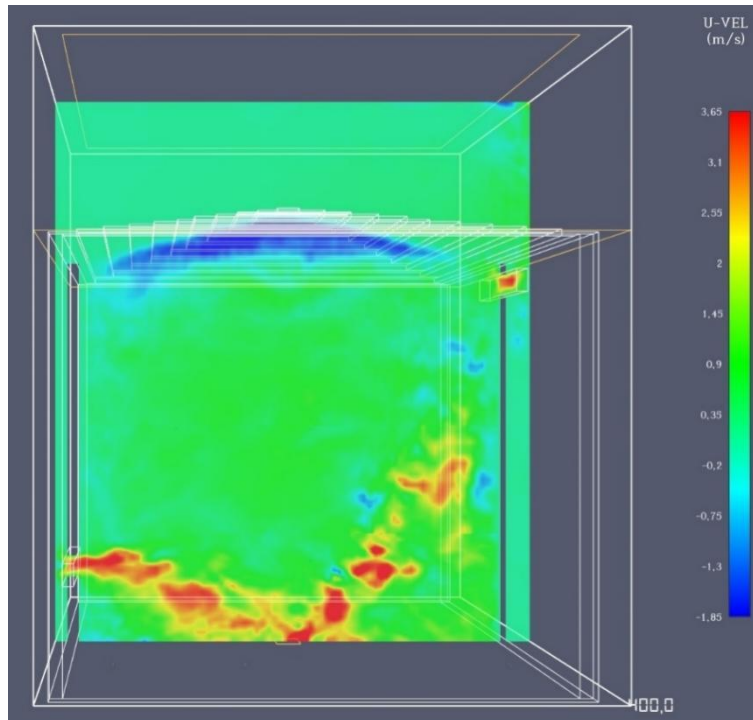


α)

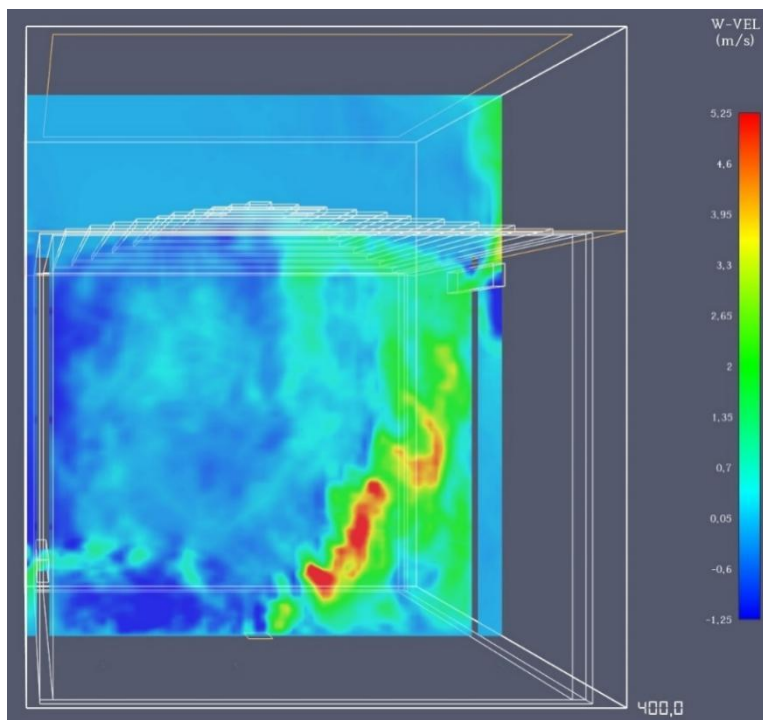
β)

**Σχήμα 5-15 Γεωμετρία των α) ανοιγμάτων εισόδου νωπού αέρα και β) ) ανοιγμάτων εξόδου των καπναερίων για την περίπτωση 2**

Η ταχύτητα του ανέμου στο εξωτερικό του κτηρίου είναι μηδενική και η ταχύτητα του νωπού αέρα στο άνοιγμα εισόδου μετά από 400 sec από την έναρξη της φωτιάς είναι  $u_{x,inlet} = 3,12 \text{ m/sec}$ , ενώ η ταχύτητα των καπναερίων στο άνοιγμα εξόδου είναι  $u_{x,outlet} = 2,9 \text{ m/sec}$ , που αντιστοιχεί σε παροχή του αέρα  $16,69 \text{ m}^3/\text{sec}$  στο άνοιγμα εισόδου νωπού αέρα  $A_{inlet}$  και  $15,72 \text{ m}^3/\text{sec}$  για την έξοδο  $A_{outlet}$  (Σχήμα 5-16).

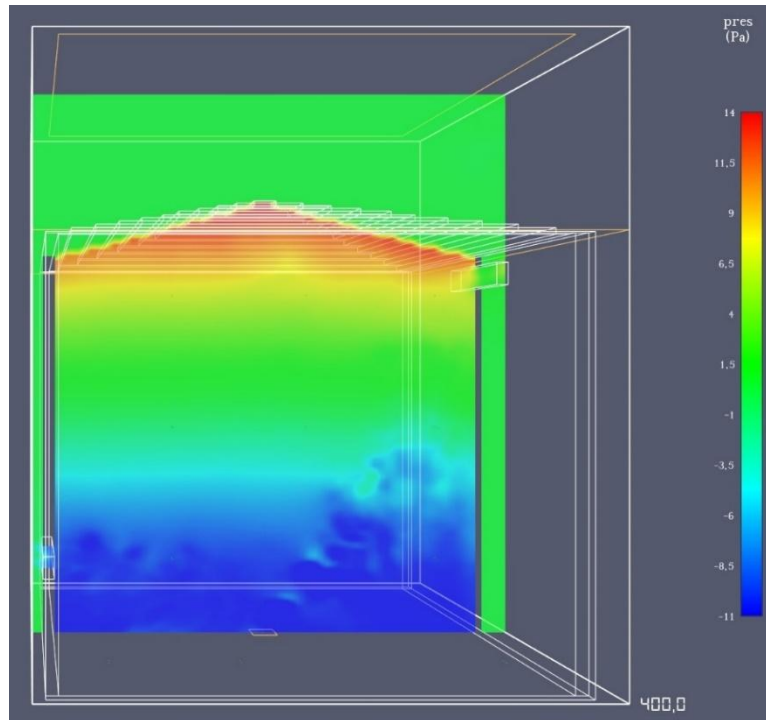


Σχήμα 5-16 Ισοψές γράφημα της ταχύτητας  $U_x$  (m/sec) στο επίπεδο  $Y= 9,750$  μετά από  $t= 400s$  από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 2



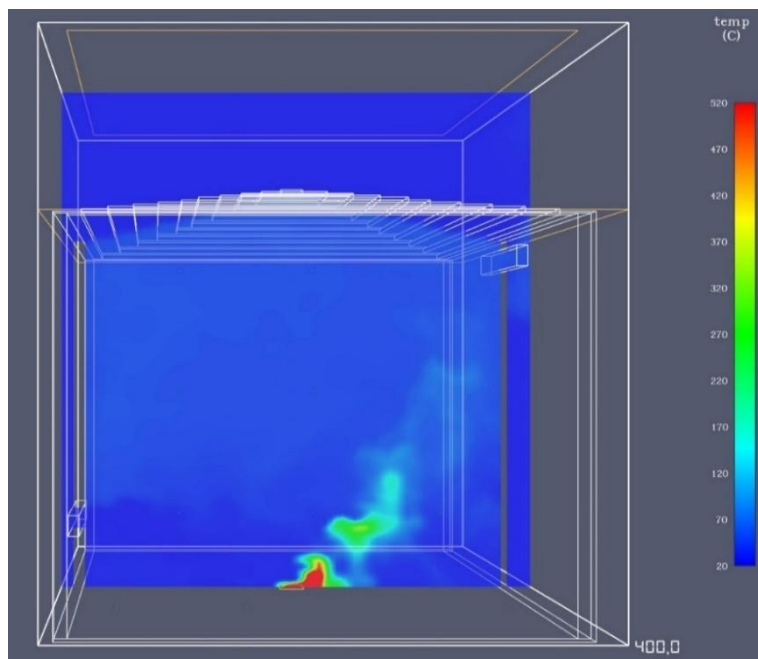
Σχήμα 5-17 Ισοψές γράφημα της ταχύτητας  $U_z$  (m/sec) στο επίπεδο  $Y= 9,750$  μετά από  $t= 400s$  από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 2

Στο Σχήμα 5-18 παρατηρείται ότι στα κατωτέρα στρώματά του κτηρίου εμφανίζονται υπό-πίεσεις ενώ στα ανωτέρα στρώματα του κτηρίου υπέρ-πίεσεις. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να ευνοείται η εισαγωγή αέρα στα ανοίγματα εισόδου που βρίσκονται κοντά στο δάπεδο του κτηρίου και η εξαγωγή του αέρα στα ανοίγματα εξόδου που βρίσκονται πλησιέστερα στην οροφή.



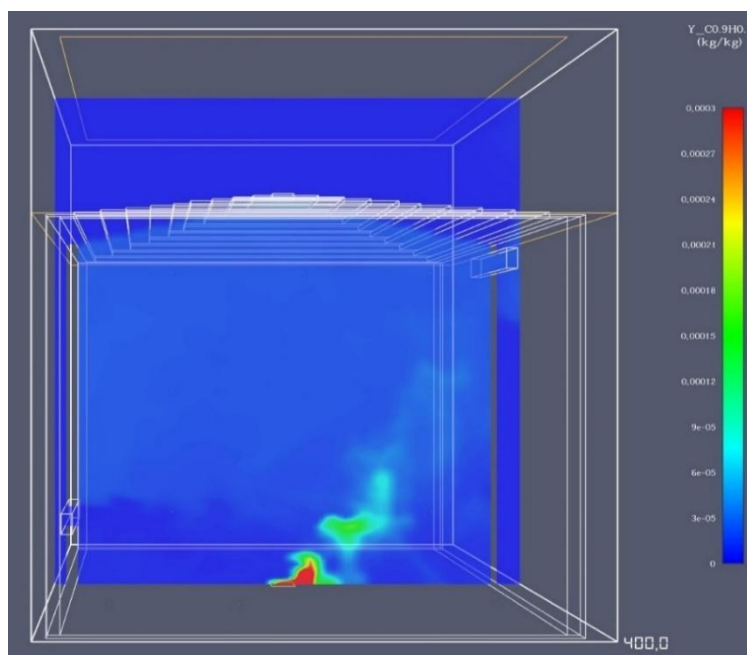
**Σχήμα 5-18 Ισοϋψές γράφημα κατανομής της πίεσης (Pa) στο επίπεδο  $Y= 9,750$  μετά από  $t= 400s$  από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 2**

Στα Σχήμα 5-19 απεικονίζεται η θερμοκρασία του αέρα για το επίπεδο συμμετρίας ( $Y=9,750$ ). Η μέση θερμοκρασία στο κάτω μέρος του κτηρίου παραμένει χαμηλή και ένα στρώμα θερμού καπνού συσσωρεύεται στην οροφή. Κοντά στην περιοχή της φωτιάς εμφανίζονται θερμοκρασίες με μέγιστη τιμή τους  $520\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

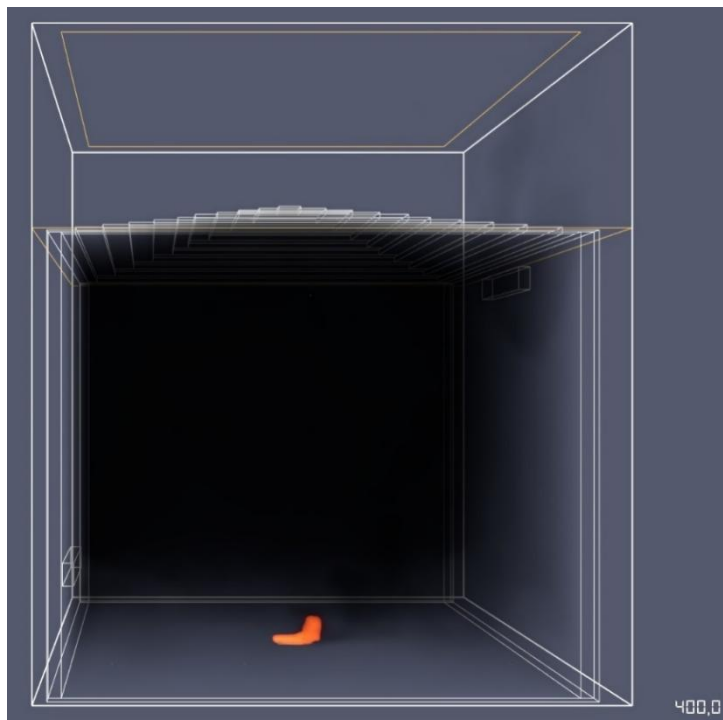


**Σχήμα 5-19** Ισοϋψές γράφημα της θερμοκρασίας των καπναερίων (°C) στο επίπεδο  $Y= 9,750$  μετά από  $t= 400s$  από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 2

Η πλήρωση του κτηρίου με καπνό μετά από 400 sec από την έναρξη της φωτιάς είναι 4,8m από το δάπεδο του κτηρίου (Σχήμα 5-21).



**Σχήμα 5-20** Ισοϋψές γράφημα της συγκέντρωσης του καπνού (soot) (kg/kg) στο επίπεδο  $Y= 9,750$  και  $t= 400s$  για την μελέτη περίπτωσης 2



**Σχήμα 5-21 Συγκέντρωση του καπνού στο χώρο μετά από  $t= 400s$  από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 2**

### **5.3.3 Περίπτωση 3**

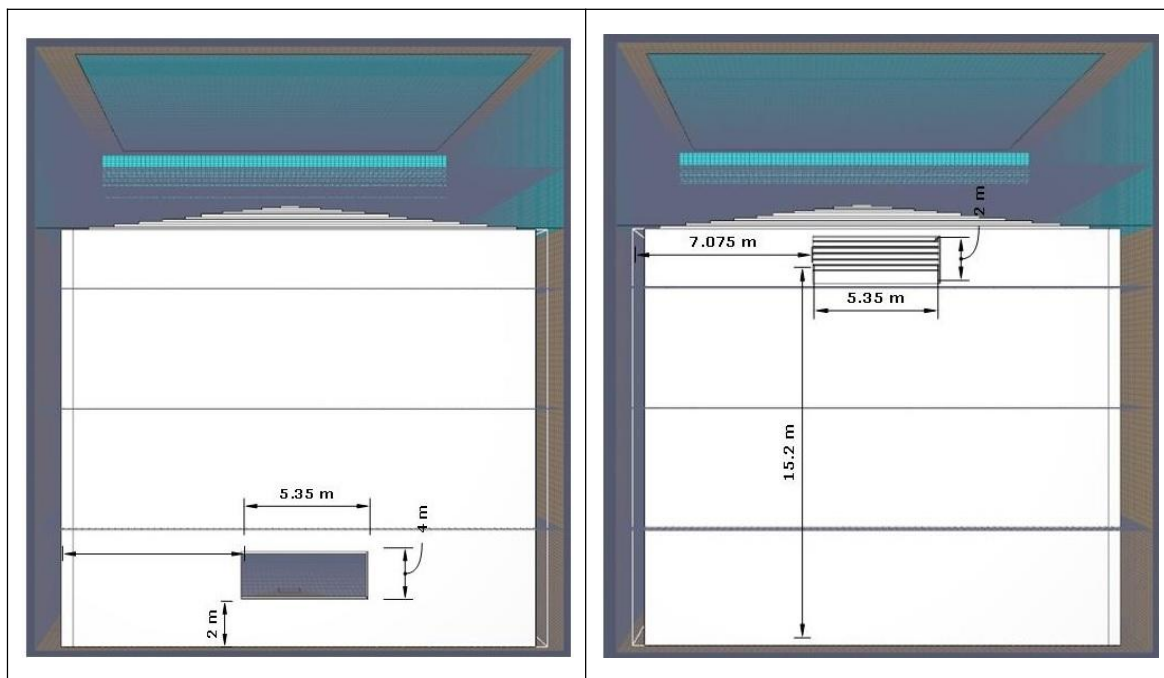
Η γεωμετρία της περίπτωσης 3 όπως εμφανίζεται στο Σχήμα 5-22 αποτελείται από ένα άνοιγμα εισόδου του αέρα από το περιβάλλον με εμβαδόν  $A_{inlet} = 10,7m^2$  και ένα άνοιγμα εξόδου του καπνού προς το περιβάλλον με εμβαδόν  $A_{outlet} = 10,7 m^2$ .

Οι διαστάσεις του ανοίγματος εισόδου  $A_{inlet}$  έχει μήκος 5,35 m και ύψος 2 m. Το χαμηλότερο σημείο του ανοίγματος απέχει από το δάπεδο 2 m όπως εμφανίζεται στο Σχήμα 5-23α. Όμοια οι διαστάσεις του ανοίγματος εξόδου  $A_{outlet}$  έχει μήκος 5,35 m και ύψος 2 m και το χαμηλότερο σημείο του ανοίγματος απέχει από το δάπεδο 15,2 m όπως εμφανίζεται στο Σχήμα 5-23β.





Σχήμα 5-22 Εμβαδόν ανοιγμάτων  $A_{inlet}$  και  $A_{outlet}$  για την μελέτη περίπτωσης 3

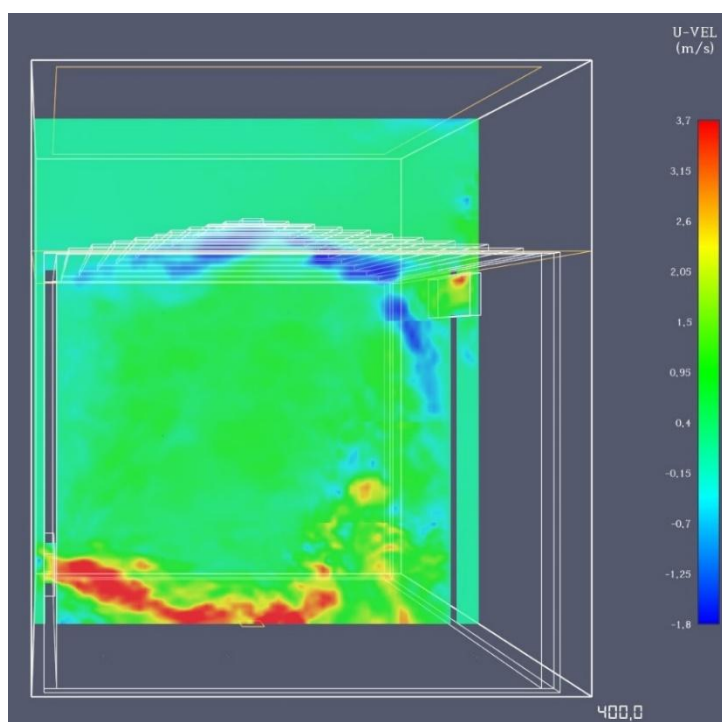


α)

β)

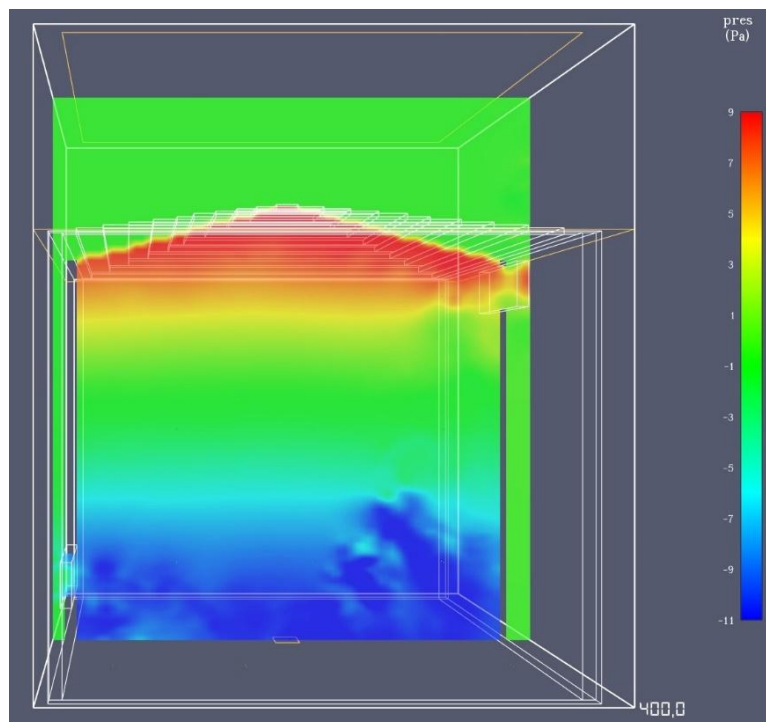
Σχήμα 5-23 Γεωμετρία των α) ανοιγμάτων εισόδου νωπού αέρα και β) ανοιγμάτων εξόδου των καπναερίων για την περίπτωση 3

Η ταχύτητα του ανέμου στο εξωτερικό του κτηρίου είναι μηδενική και η ταχύτητα του νωπού αέρα στο άνοιγμα εισόδου μετά από 400 sec από την έναρξη της φωτιάς είναι  $u_{x,inlet} = 3,65 \text{ m/sec}$ , ενώ η ταχύτητα των καπναερίων στα ανοίγματα εξόδου είναι  $u_{x,outlet} = 2,05 \text{ m/sec}$ , που αντιστοιχεί σε παροχή αέρα  $39,09 \text{ m}^3/\text{sec}$  στην είσοδο του νωπού αέρα  $A_{inlet}$  και  $21,93 \text{ m}^3/\text{sec}$  για την έξοδο  $A_{outlet}$  (Σχήμα 5-24).



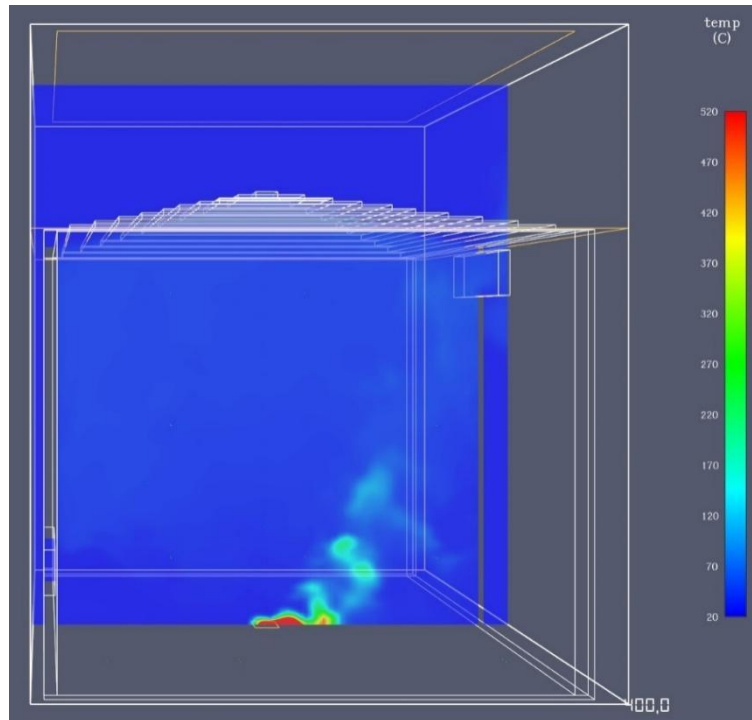
**Σχήμα 5-24** Ισοϋψές γράφημα της ταχύτητας  $U_x$  (m/sec) στο επίπεδο  $Y= 9,750$  μετά από  $t= 400s$  από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 3

Στο Σχήμα 5-25 παρατηρείται ότι στα κατωτέρα στρώματα του κτηρίου εμφανίζονται υπό-πιέσεις ενώ στα ανωτέρα στρώματα του κτηρίου υπέρ-πιέσεις. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να ευνοείται η εισαγωγή αέρα στα ανοίγματα εισόδου που βρίσκονται κοντά στο δάπεδο του κτηρίου και την εξαγωγή του αέρα στα ανοίγματα εξόδου που βρίσκονται πλησιέστερα στην οροφή.



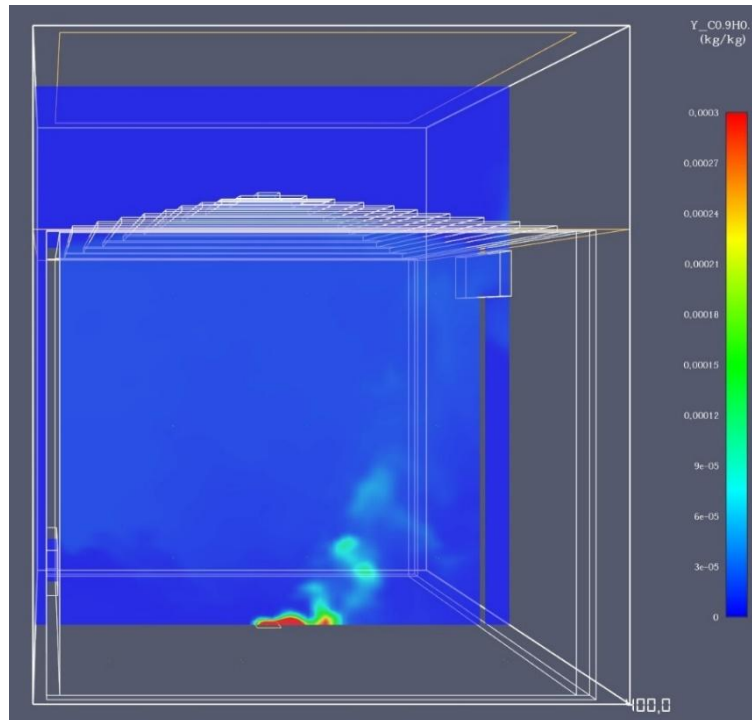
**Σχήμα 5-25** Ισοϋψές γράφημα κατανομής της πίεσης (Pa) στο επίπεδο  $Y= 9,750$  μετά από  $t= 400s$  από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 3

Στα Σχήμα 5-26 απεικονίζεται η θερμοκρασία του αέρα για το επίπεδο συμμετρίας ( $Y=9,750$ ). Η μέση θερμοκρασία στο κάτω μέρος του κτηρίου παραμένει χαμηλή και ένα στρώμα θερμού καπνού συσσωρεύεται στην οροφή. Κοντά στην περιοχή της φωτιάς εμφανίζονται θερμοκρασίες με μέγιστη τιμή τους  $520\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Παρατηρείται μεγάλη κλίση των καπναερίων που αποτυπώνεται από την κατανομή της θερμοκρασίας κοντά στην πηγή της φωτιάς.

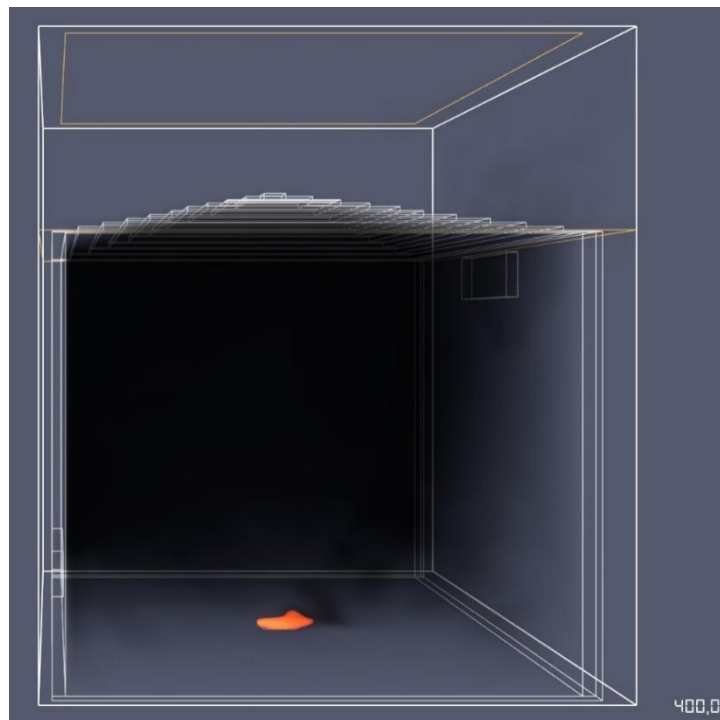


**Σχήμα 5-26** Ισοϋψές γράφημα της θερμοκρασίας των καπναερίων (°C) στο επίπεδο  $Y= 9,750$  μετά από  $t= 400s$  από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 3

Στο Σχήμα 5-27 και Σχήμα 5-28 απεικονίζεται η πλήρωση του κτηρίου με καπνό μετά από 400 sec από την έναρξη της φωτιάς. Παρατηρείται μεγάλη διασπορά του καπνού στο εσωτερικό του χώρου. Επίσης εμφανίζονται μεγαλύτερες συγκεντρώσεις κοντά στο άνοιγμα εισόδου του νωπού αέρα.



**Σχήμα 5-27** Ισοψές γράφημα της συγκέντρωσης του καπνού (soot) (kg/kg) στο επίπεδο  $Y= 9,750$  μετά από  $t= 400s$  από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 3

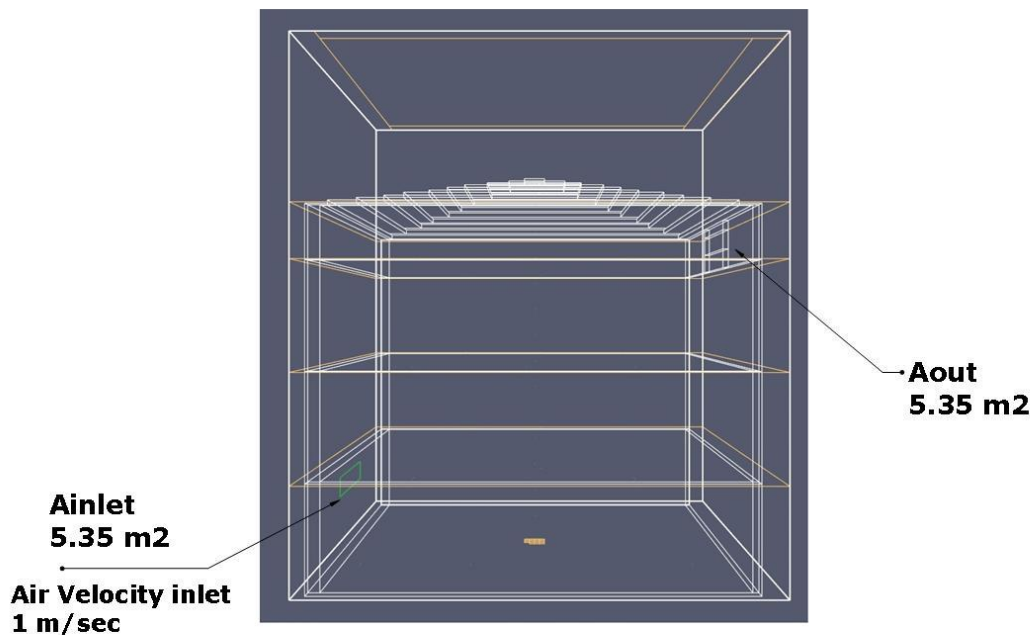


**Σχήμα 5-28** Συγκέντρωση του καπνού στο χώρο μετά από  $t= 400s$  από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 3

#### 5.3.4 Περίπτωση 4

Η γεωμετρία της περίπτωσης 4 όπως εμφανίζεται στο Σχήμα 5-29 αποτελείται από ένα άνοιγμα εισόδου νωπού αέρα από το περιβάλλον με εμβαδόν  $A_{inlet} = 5,35 \text{ m}^2$  και ένα άνοιγμα εξόδου του καπνού προς το περιβάλλον με εμβαδόν  $A_{outlet} = 5,35 \text{ m}^2$ . Η είσοδος του αέρα από το περιβάλλον γίνεται με ταχύτητα 1 m/sec.

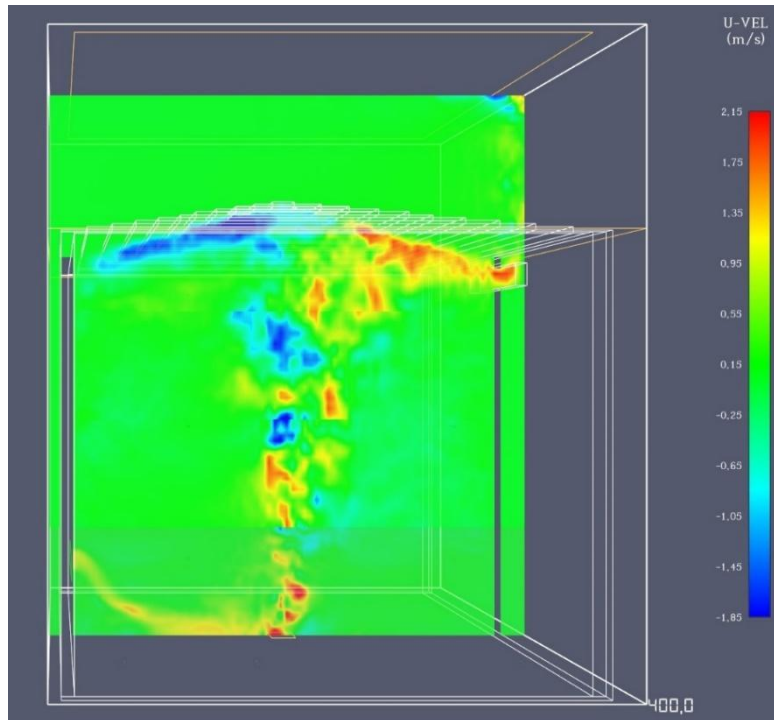
Οι διαστάσεις και η τοποθέτηση των ανοιγμάτων εισόδου  $A_{inlet}$  και εξόδου  $A_{outlet}$  είναι όμοιες με την περίπτωση 2 (Σχήμα 5-15α και Σχήμα 5-15β).



Σχήμα 5-29 Εμβαδόν ανοιγμάτων  $A_{inlet}$  και  $A_{outlet}$  για την μελέτη περίπτωσης 4

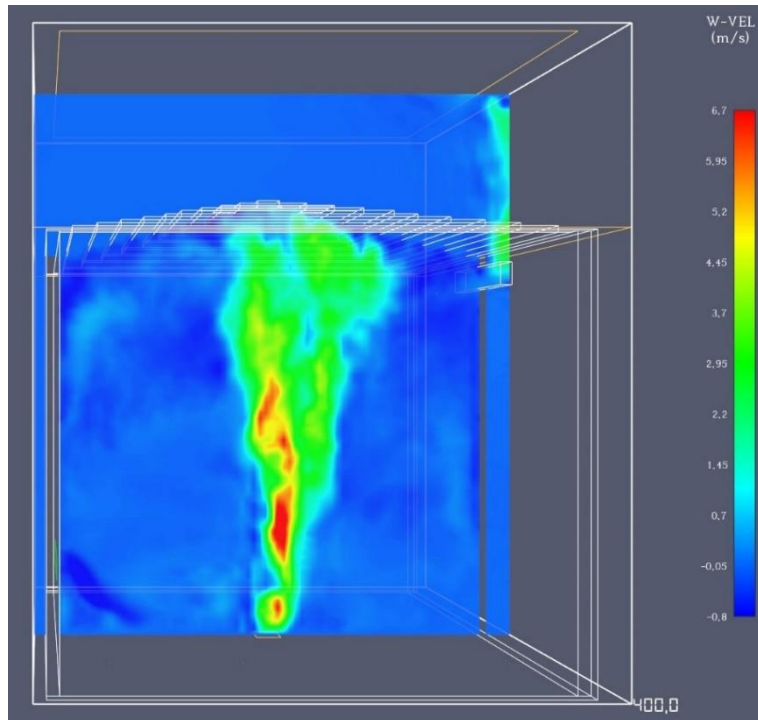
Η είσοδος του ανέμου στο κτήριο από το  $A_{inlet}$  είναι 1 m/sec και η ταχύτητα των καπναερίων στο άνοιγμα εισόδου μετά από 400 sec από την έναρξη της φωτιάς είναι  $u_{x,outlet} = 2,05 \text{ m/sec}$ , που αντιστοιχεί σε παροχή αέρα  $5,35 \text{ m}^3/\text{sec}$  στην

είσοδο του νωπού αέρα  $A_{inlet}$  και  $10,69 \text{ m}^3/\text{sec}$  για την έξοδο  $A_{outlet}$  (Σχήμα 5-30).



**Σχήμα 5-30** Ισοϋψές γράφημα της ταχύτητας  $U_x$  (m/sec) στο επίπεδο  $Y= 9,750$  μετά από  $t= 400s$  από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 4

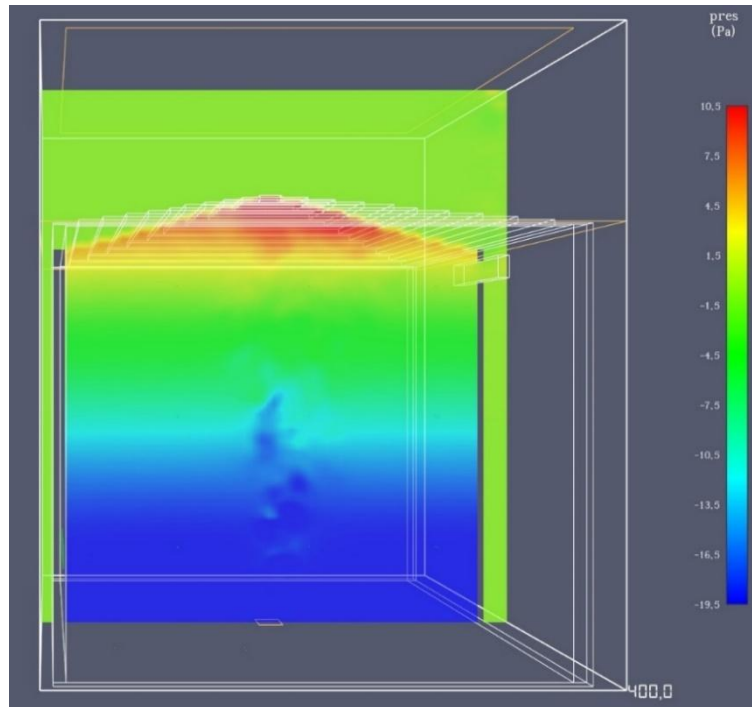
Η ταχύτητα του αέρα στην κατεύθυνση  $U_z$  εμφανίζει μέγιστη τιμή μέχρι και  $6,7 \text{ m/sec}$  που είναι πολύ μεγαλύτερη από τις ταχύτητες στην κατεύθυνση  $U_x$  (Σχήμα 5-31).



**Σχήμα 5-31** Ισοϋψές γράφημα της ταχύτητας  $U_z$  (m/sec) στο επίπεδο  $Y= 9,750$  μετά από  $t= 400s$  από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 4

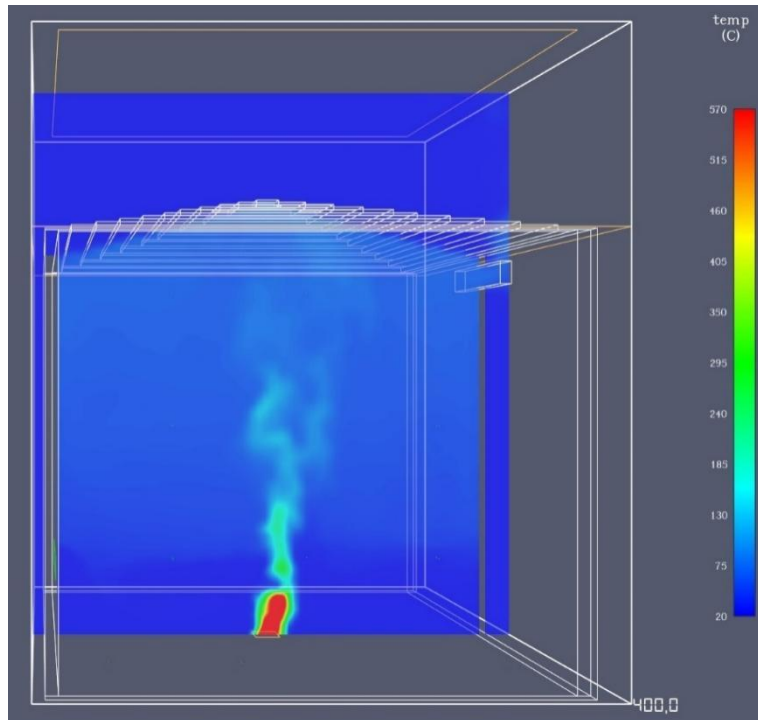
Στο Σχήμα 5-32 παρατηρείται ότι στα κατώτερα στρώματά του κτηρίου εμφανίζονται υπό-πιέσεις ενώ στα ανωτέρα στρώματα του κτηρίου υπέρ-πιέσεις. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να ευνοείται η εισαγωγή αέρα στα ανοίγματα εισόδου που βρίσκονται κοντά στο δάπεδο του κτηρίου και την εξαγωγή του αέρα στα ανοίγματα εξόδου που βρίσκονται πλησιέστερα στην οροφή.





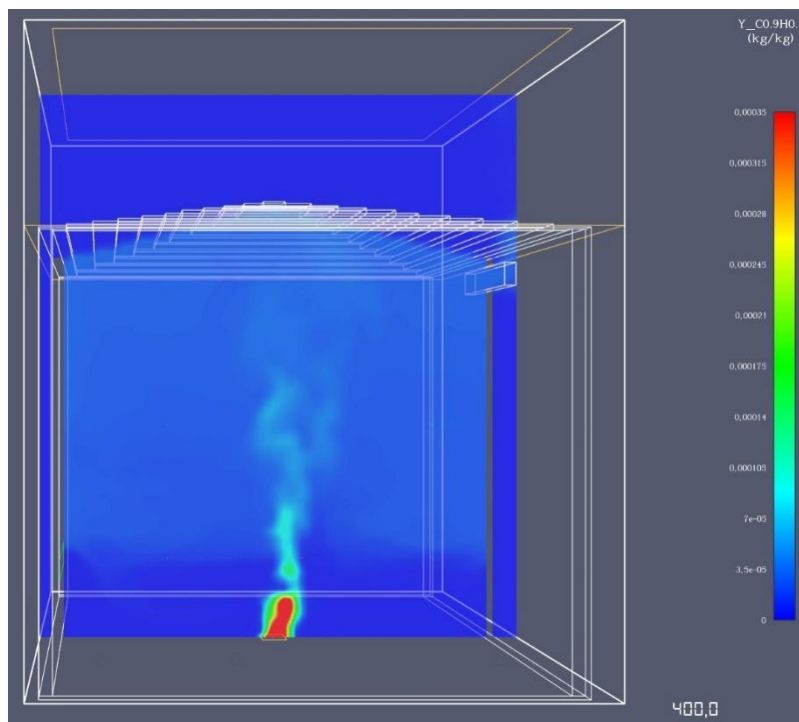
**Σχήμα 5-32** Ισοϋψές γράφημα κατανομής της πίεσης (Pa) στο επίπεδο  $Y= 9,750$  μετά από  $t= 400s$  από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 4

Στα Σχήμα 5-33 απεικονίζεται η θερμοκρασία του αέρα για το επίπεδο συμμετρίας ( $Y=9,750$ ). Η μέση θερμοκρασία στο κάτω μέρος του κτηρίου παραμένει χαμηλή και ένα στρώμα θερμού καπνού συσσωρεύεται στην οροφή. Κοντά στην περιοχή της φωτιάς εμφανίζονται θερμοκρασίες με μέγιστη τιμή τους  $570\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

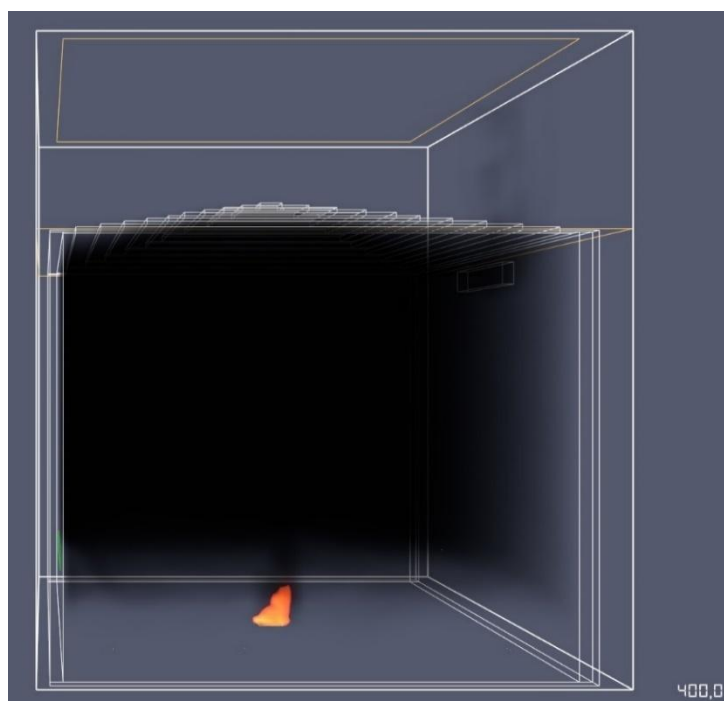


**Σχήμα 5-33** Ισοϋψές γράφημα της θερμοκρασίας των καπναερίων (°C) στο επίπεδο  $Y= 9,750$  μετά από  $t= 400s$  από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 4

Η πλήρωση του κτηρίου με καπνό μετά από 400 sec από την έναρξη της φωτιάς είναι 4,8m από το δάπεδο του κτηρίου (Σχήμα 5-34 και Σχήμα 5-35).



**Σχήμα 5-34** Ισοψές γράφημα της συγκέντρωσης του καπνού (soot) (kg/kg) στο επίπεδο  $Y= 9,750$  μετά από  $t= 400s$  από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 4

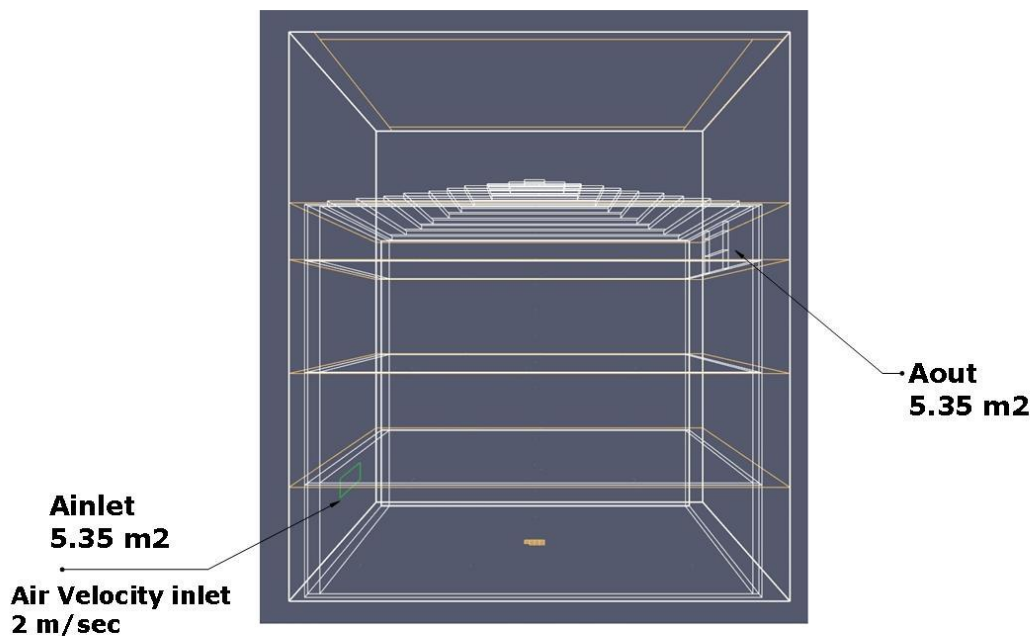


**Σχήμα 5-35** Συγκέντρωση του καπνού στο χώρο μετά από  $t= 400s$  από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 4

### 5.3.5 Περίπτωση 5

Η γεωμετρία της περίπτωσης 5 όπως εμφανίζεται στο Σχήμα 5-36 αποτελείται από ένα άνοιγμα εισόδου νωπού αέρα από το περιβάλλον με εμβαδόν  $A_{inlet} = 5,35 \text{ m}^2$  και ένα άνοιγμα εξόδου του καπνού προς το περιβάλλον με εμβαδόν  $A_{outlet} = 5,35 \text{ m}^2$ . Η είσοδος του αέρα από το περιβάλλον γίνεται με ταχύτητα 2 m/sec.

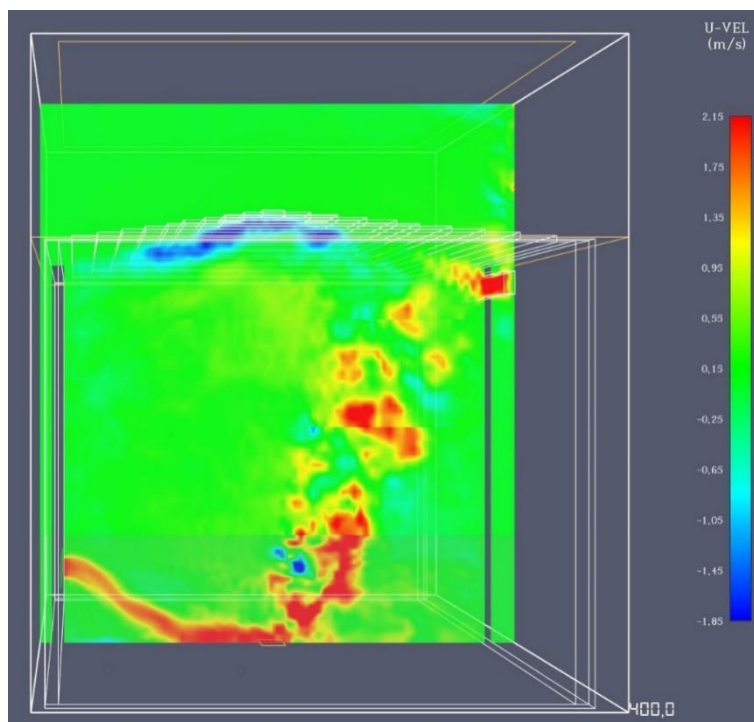
Οι διαστάσεις και η τοποθέτηση των ανοιγμάτων εισόδου  $A_{inlet}$  και εξόδου  $A_{outlet}$  είναι όμοιες με την περίπτωση 2 (Σχήμα 5-15α και Σχήμα 5-15β).



Σχήμα 5-36 Εμβαδόν ανοιγμάτων  $A_{inlet}$  και  $A_{outlet}$  για την μελέτη περίπτωσης 5

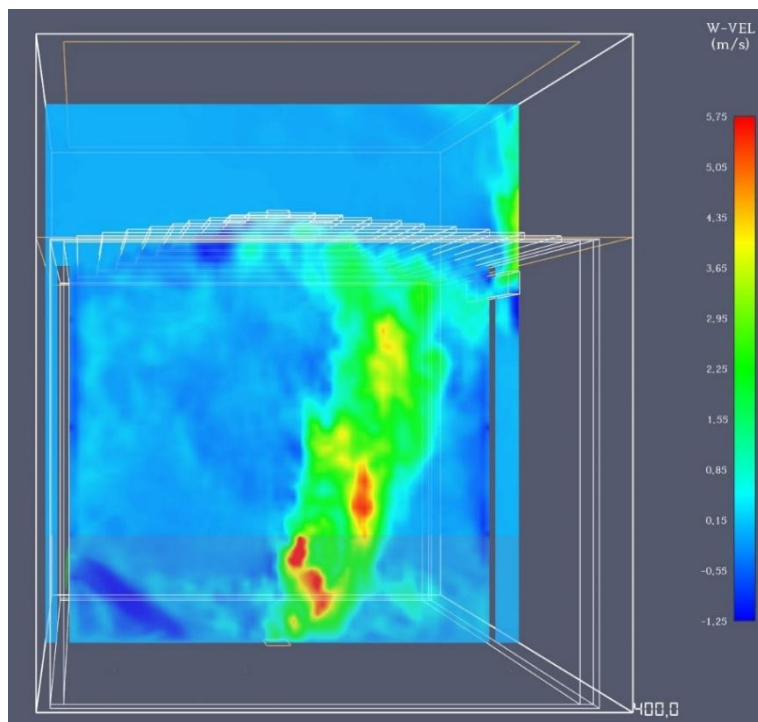
Η είσοδος του ανέμου στο κτήριο από το  $A_{inlet}$  είναι 2 m/sec και η ταχύτητα των καπναερίων στο άνοιγμα εξόδου μετά από 400 sec από την έναρξη της φωτιάς είναι  $u_{x,outlet} = 2,15 \text{ m/sec}$ , που αντιστοιχεί σε παροχή αέρα  $10,7 \text{ m}^3/\text{sec}$  στην

είσοδο του νωπού αέρα για το άνοιγμα  $A_{inlet}$  και  $11,5 \text{ m}^3/\text{sec}$  για την έξοδο  $A_{outlet}$  (Σχήμα 5-37).



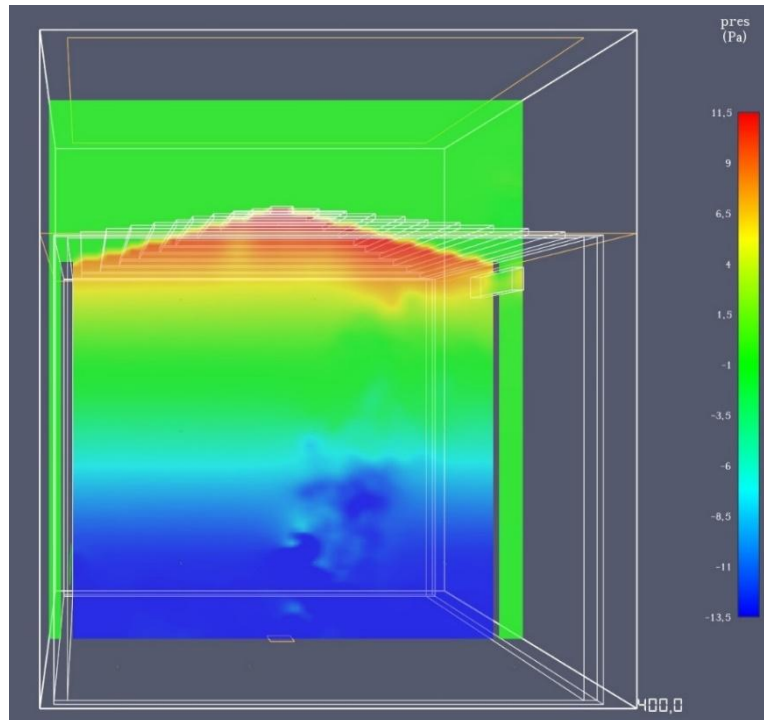
**Σχήμα 5-37** Ισοϋψές γράφημα της ταχύτητας  $U_x$  (m/sec) στο επίπεδο  $Y= 9,750$  μετά από  $t= 400s$  από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 5

Η ταχύτητα του αέρα στην κατεύθυνση  $U_z$  εμφανίζει μέγιστη τιμή μέχρι και  $5,75 \text{ m/sec}$  που είναι πολύ μεγαλύτερη από τις ταχύτητες στην κατεύθυνση  $U_x$  (Σχήμα 5-38).



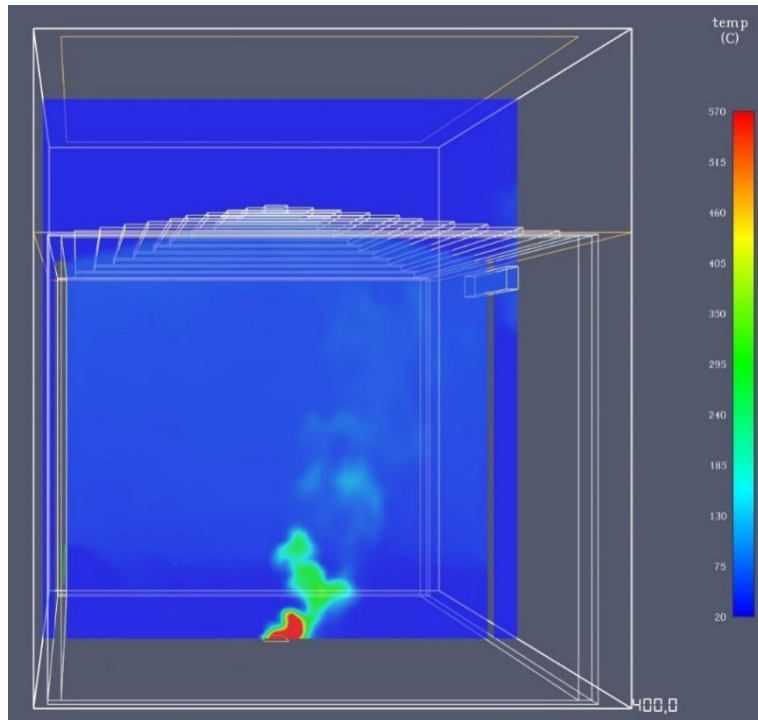
**Σχήμα 5-38** Ισοϋψές γράφημα της ταχύτητας  $U_z$  (m/sec) στο επίπεδο  $Y= 9,750$  μετά από  $t= 400s$  από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 5

Στο Σχήμα 5-39 παρατηρείται ότι στα κατώτερα στρώματα του κτηρίου εμφανίζονται υπό-πιέσεις ενώ στα ανώτερα στρώματα του κτηρίου υπέρ-πιέσεις. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να ευνοείται η εισαγωγή αέρα στα ανοίγματα εισόδου που βρίσκονται κοντά στο δάπεδο του κτηρίου και την εξαγωγή του αέρα στα ανοίγματα εξόδου που βρίσκονται πλησιέστερα στην οροφή.



**Σχήμα 5-39** Ισοϋψές γράφημα κατανομής της πίεσης (Pa) στο επίπεδο  $Y= 9,750$  μετά από  $t= 400s$  από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 5

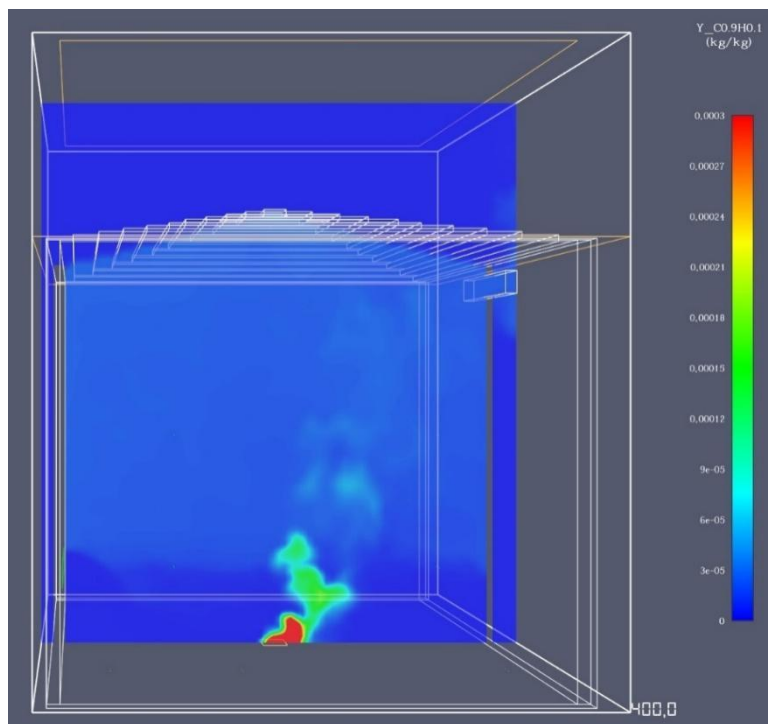
Στα Σχήμα 5-40 απεικονίζεται η θερμοκρασία του αέρα για το επίπεδο συμμετρίας ( $Y=9,750$ ). Η μέση θερμοκρασία στο κάτω μέρος του κτηρίου παραμένει χαμηλή και ένα στρώμα θερμού καπνού συσσωρεύεται στην οροφή. Κοντά στην περιοχή της φωτιάς εμφανίζονται θερμοκρασίες με μέγιστη τιμή τους  $780\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



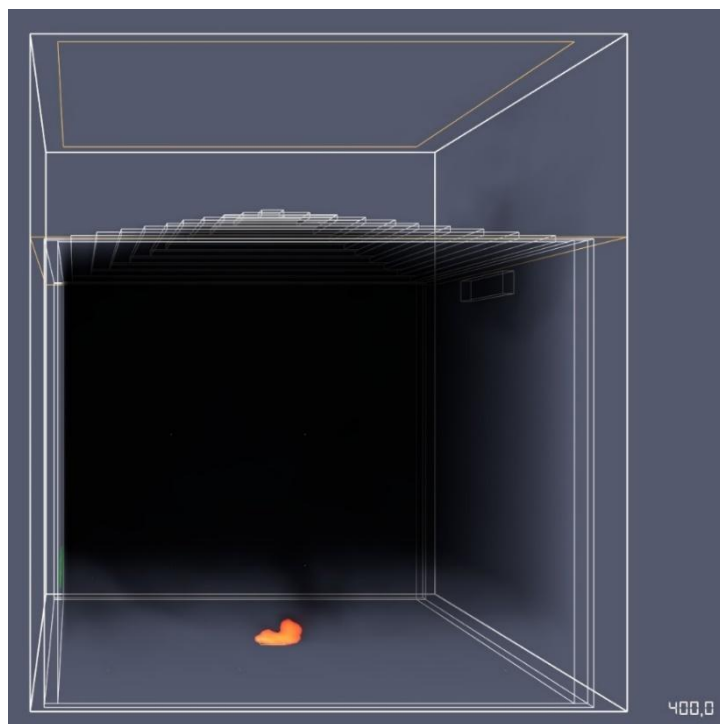
**Σχήμα 5-40** Ισοϋψές γράφημα της θερμοκρασίας των καπναερίων (°C) στο επίπεδο  $Y= 9,750$  μετά από  $t= 400s$  από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 5

Η πλήρωση του κτηρίου με καπνό μετά από 400 sec από την έναρξη της φωτιάς είναι 2,65 m από το δάπεδο του κτηρίου (Σχήμα 5-41 και Σχήμα 5-42).





**Σχήμα 5-41** Ισοψές γράφημα της συγκέντρωσης του καπνού (soot) (kg/kg) στο επίπεδο  $Y= 9,750$  μετά από  $t= 400s$  από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 5

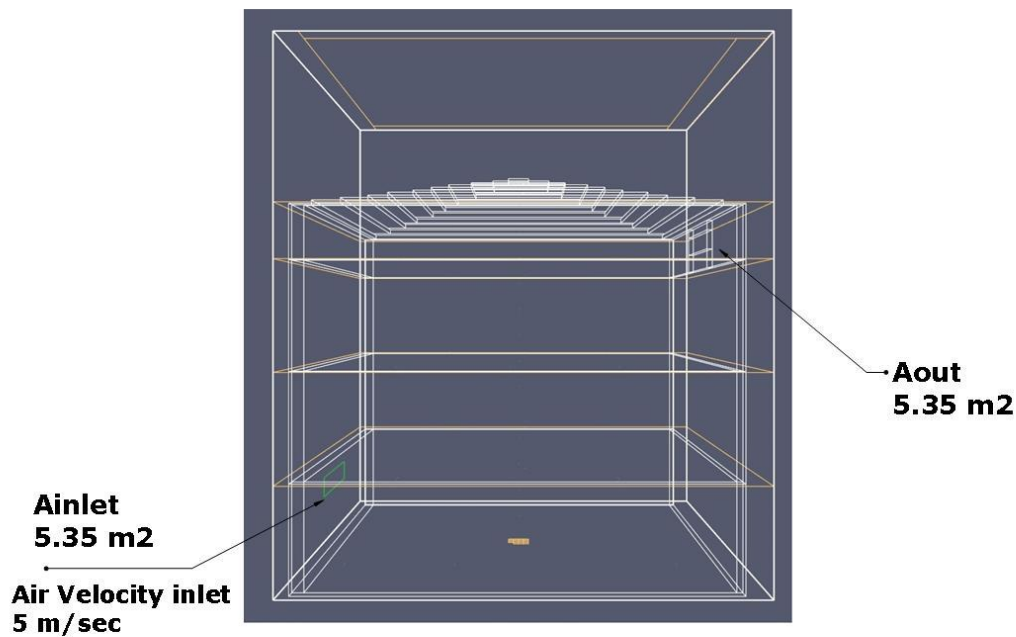


**Σχήμα 5-42** Συγκέντρωση του καπνού στο χώρο μετά από  $t= 400s$  από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 5

### 5.3.6 Περίπτωση 6

Η γεωμετρία της περίπτωσης 6 όπως εμφανίζεται στο Σχήμα 5-43 αποτελείται από ένα άνοιγμα εισόδου νωπού αέρα από το περιβάλλον με εμβαδόν  $A_{inlet} = 5,35 \text{ m}^2$  και ένα άνοιγμα εξόδου του καπνού προς το περιβάλλον με εμβαδόν  $A_{outlet} = 5,35 \text{ m}^2$ . Η είσοδος του αέρα από το περιβάλλον γίνεται με ταχύτητα 5 m/sec.

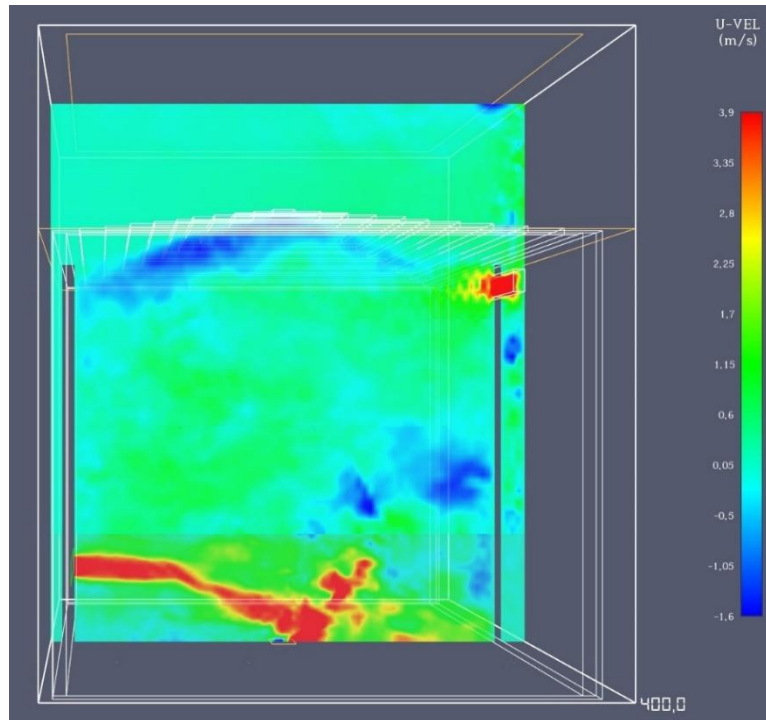
Οι διαστάσεις και η τοποθέτηση των ανοιγμάτων εισόδου  $A_{inlet}$  και εξόδου  $A_{outlet}$  είναι όμοιες με την περίπτωση 2 (Σχήμα 5-15α και Σχήμα 5-15β).



Σχήμα 5-43 Εμβαδόν ανοιγμάτων  $A_{inlet}$  και  $A_{outlet}$  για την μελέτη περίπτωσης 6

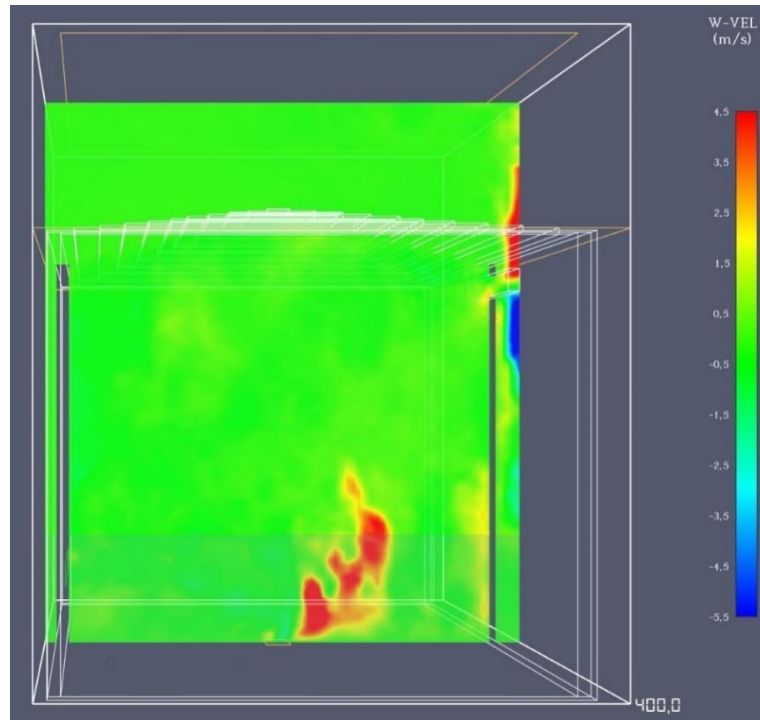
Η είσοδος του ανέμου στο κτήριο από το  $A_{inlet}$  είναι 5 m/sec και η ταχύτητα των καπναερίων στο άνοιγμα εισόδου μετά από 400 sec από την έναρξη της φωτιάς είναι  $u_{x,outlet} = 5,75 \text{ m/sec}$ , που αντιστοιχεί σε παροχή αέρα  $26,75 \text{ m}^3/\text{sec}$  στην

είσοδο του νωπού αέρα  $A_{inlet}$  και  $30,6 \text{ m}^3/\text{sec}$  για την έξοδο  $A_{outlet}$  (Σχήμα 5-44).



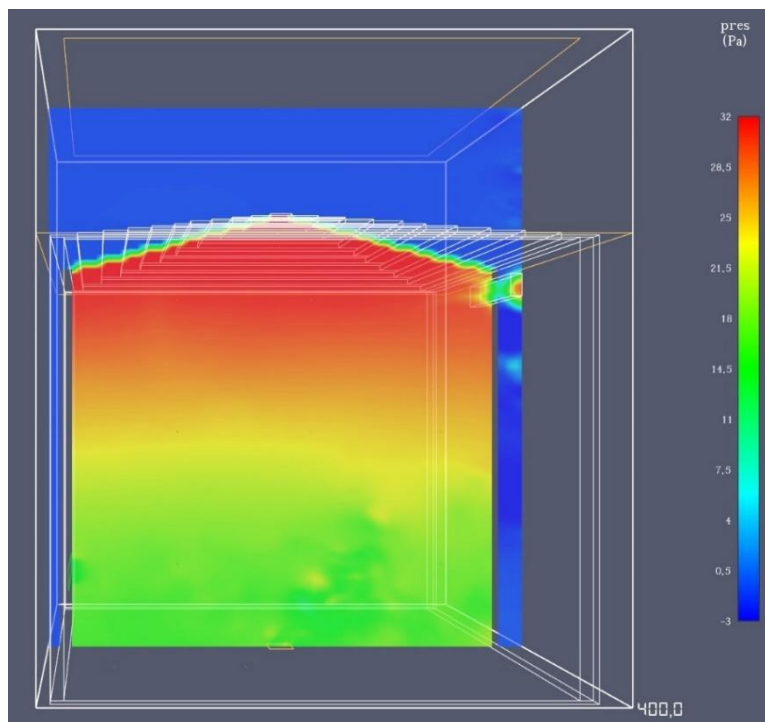
Σχήμα 5-44 Ισοϋφές γράφημα της ταχύτητας  $U_x$  (m/sec) στο επίπεδο  $Y= 9,750$  μετά από  $t= 400s$  από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 6

Η ταχύτητα του αέρα στην κατεύθυνση  $U_z$  εμφανίζει μέγιστη τιμή μέχρι και  $4,5 \text{ m/sec}$  που είναι πολύ μεγαλύτερη από τις ταχύτητες στην κατεύθυνση  $U_x$  (Σχήμα 5-45).

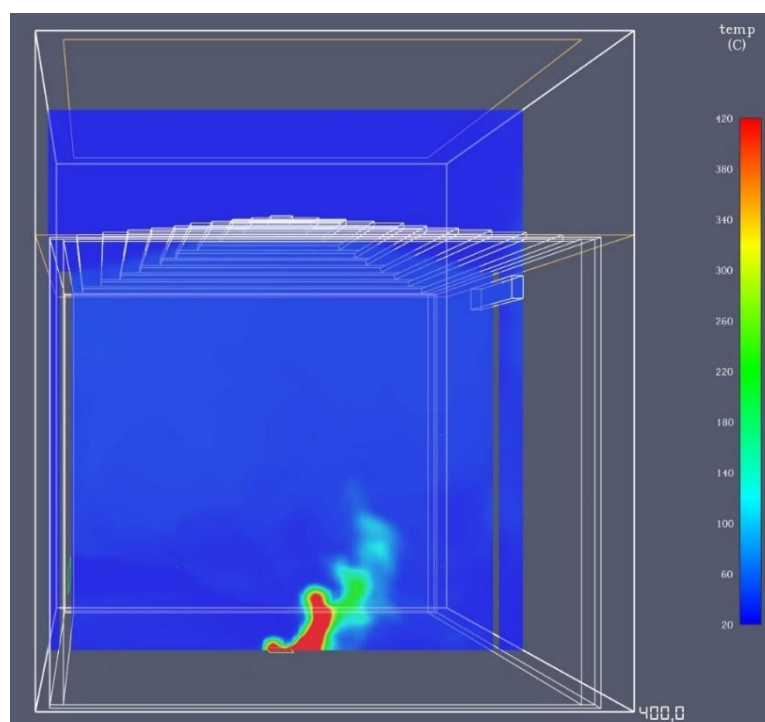


**Σχήμα 5-45** Ισοϋψές γράφημα της ταχύτητας  $U_z$  (m/sec) στο επίπεδο  $Y= 9,750$  μετά από  $t= 400s$  από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 6

Στο Σχήμα 5-46 παρατηρείται ότι στα κατώτερα στρωματά του κτηρίου δεν εμφανίζονται υπό-πίεσεις. Η εισαγωγή νωπού αέρα στο εσωτερικό του κτηρίου οφείλεται στην εξαναγκασμένη κίνηση αέρα στα ανοίγματα εισόδου.



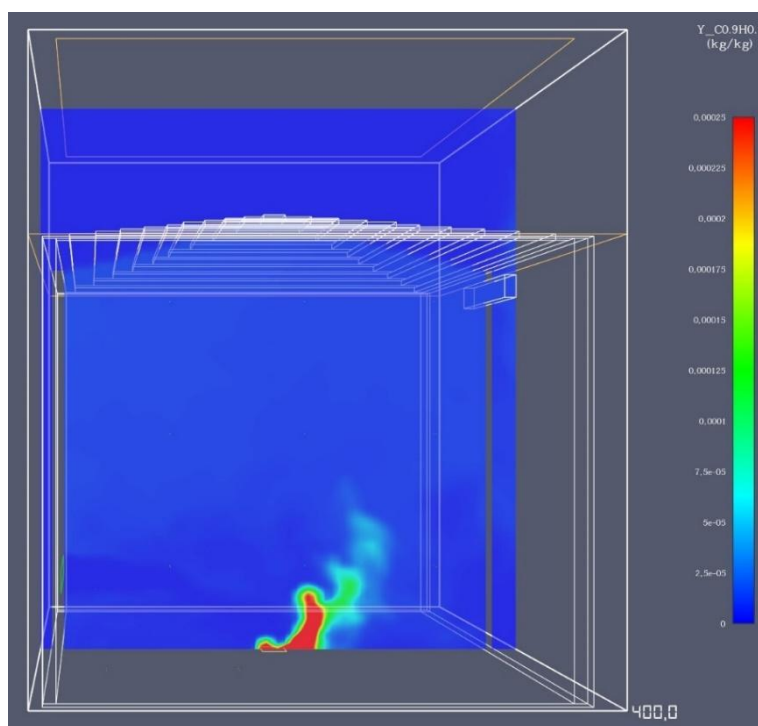
**Σχήμα 5-46** Ισοϋψές γράφημα κατανομής της πίεσης (Pa) στο επίπεδο  $Y= 9,750$  μετά από  $t= 400s$  από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 6



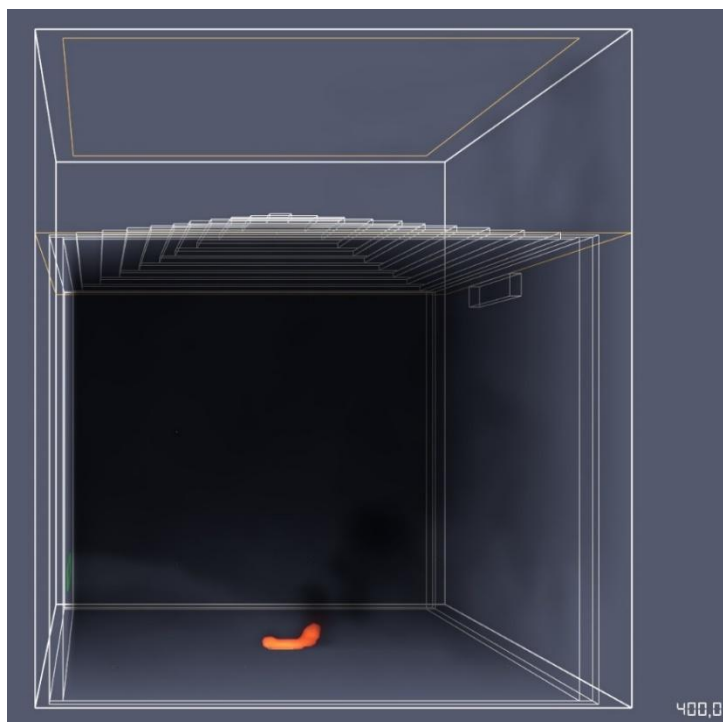
**Σχήμα 5-47** Ισοϋψές γράφημα της θερμοκρασίας των καπναερίων (°C) στο επίπεδο  $Y= 9,750$  μετά από  $t= 400s$  από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 6

Στο Σχήμα 5-47 απεικονίζεται η θερμοκρασία του αέρα για το επίπεδο συμμετρίας ( $Y=9,750$ ). Η μέση θερμοκρασία στο κάτω μέρος του κτηρίου παραμένει χαμηλή και ένα στρώμα θερμού καπνού συσσωρεύεται στην οροφή. Κοντά στην περιοχή της φωτιάς εμφανίζονται θερμοκρασίες με μέγιστη τιμή τους  $480\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Κατανομή του καπνού στο κτήριο μετά από  $400\text{ sec}$  έχει μια έντονη διάχυση στον χώρο χωρίς να δημιουργείται ένα ενιαίο στρώμα από το δάπεδο του κτηρίου (Σχήμα 5-48 και Σχήμα 5-49).



**Σχήμα 5-48** Ισοϋψές γράφημα της συγκέντρωσης του καπνού (soot) (kg/kg) στο επίπεδο  $Y= 9,750$  μετά από  $t= 400\text{s}$  από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 6

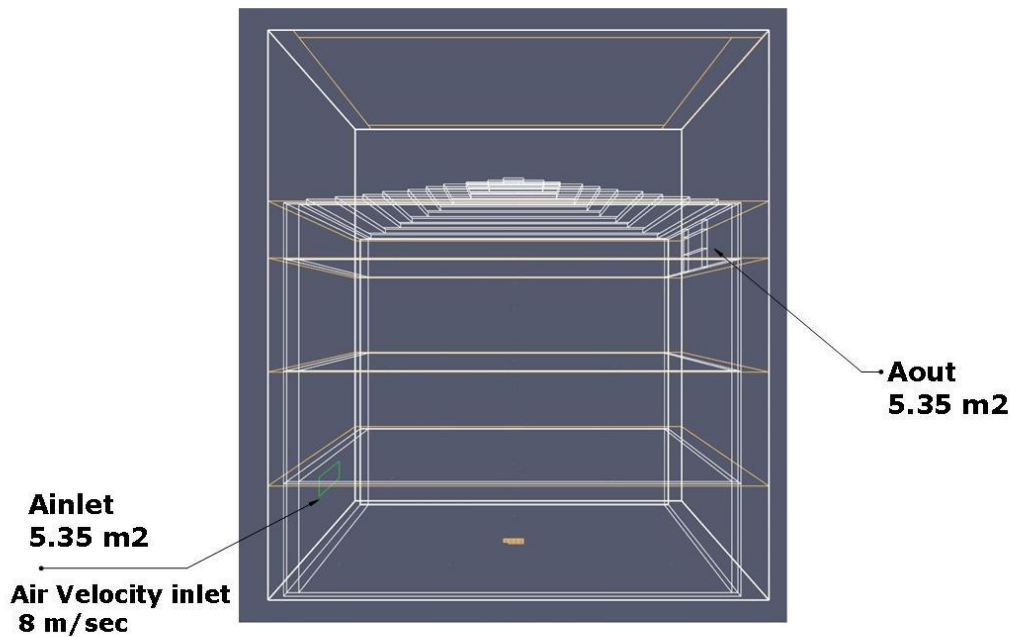


Σχήμα 5-49 Συγκέντρωση του καπνού στο χώρο μετά από  $t= 400s$  από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 6

### 5.3.7 Περίπτωση 7

Η γεωμετρία της περίπτωσης 7 όπως εμφανίζεται στο Σχήμα 5-50 αποτελείται από ένα άνοιγμα εισόδου νωπού αέρα από το περιβάλλον με εμβαδόν  $A_{inlet} = 5,35 m^2$  και ένα άνοιγμα εξόδου του καπνού προς το περιβάλλον με εμβαδόν  $A_{outlet} = 5,35 m^2$ . Η είσοδος του αέρα από το περιβάλλον γίνεται με ταχύτητα 8 m/sec.

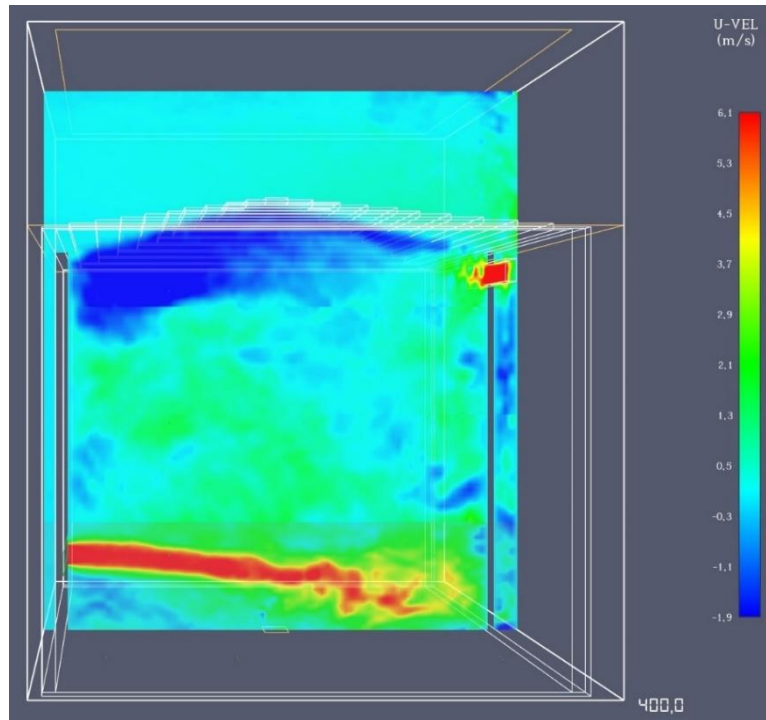
Οι διαστάσεις και η τοποθέτηση των ανοιγμάτων εισόδου  $A_{inlet}$  και εξόδου  $A_{outlet}$  είναι όμοιες με την περίπτωση 2 (Σχήμα 5- 15α και Σχήμα 5- 15β).



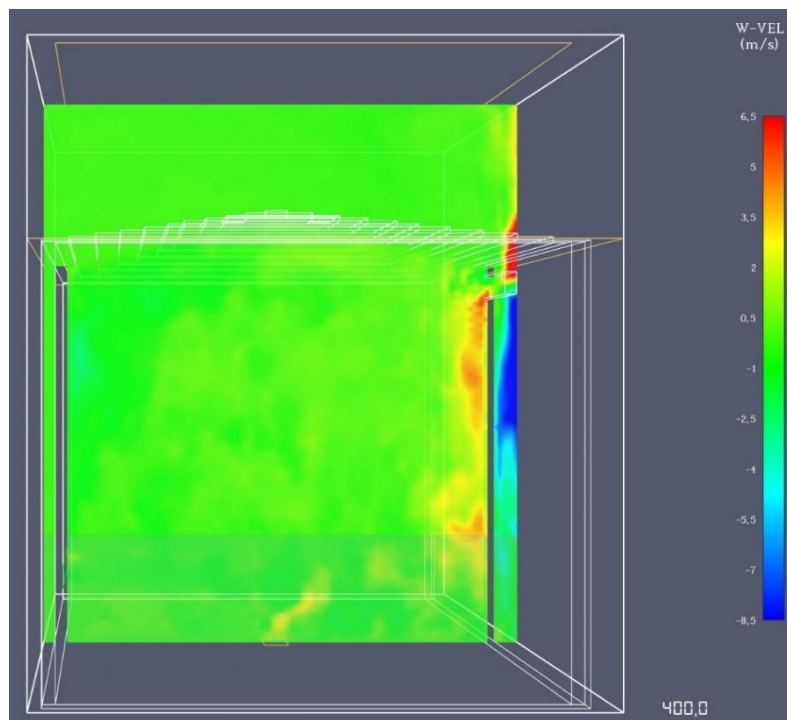
Σχήμα 5- 50 Εμβαδόν ανοιγμάτων  $A_{inlet}$  και  $A_{outlet}$  για την μελέτη περίπτωσης 7

Η ταχύτητα εισόδου του ανέμου στο κτήριο από το  $A_{inlet}$  είναι  $8\text{ m/sec}$  και η ταχύτητα των καπναερίων στο άνοιγμα εξόδου μετά από  $400\text{ sec}$  από την έναρξη της φωτιάς είναι  $u_{x,outlet} = 9,7\text{ m/sec}$ , που αντιστοιχεί σε παροχή αέρα  $42,8\text{ m}^3/\text{sec}$  στην είσοδο του νωπού αέρα  $A_{inlet}$  και  $51,89\text{ m}^3/\text{sec}$  για την έξοδο  $A_{outlet}$  (Σχήμα 5-51).





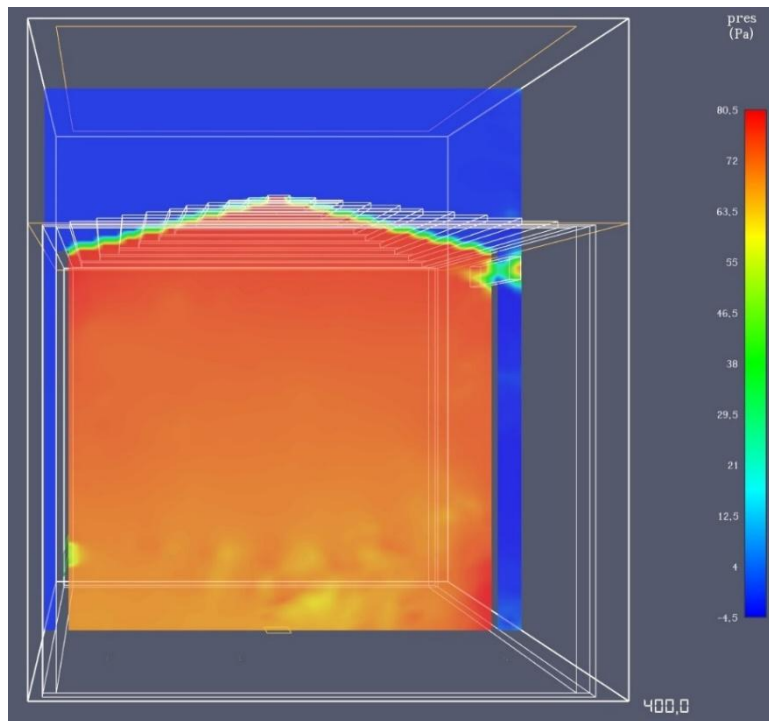
Σχήμα 5-51 Ισοϋψές γράφημα της ταχύτητας  $U_x$  (m/sec) στο επίπεδο  $Y= 9,750$  μετά από  $t= 400s$  από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 7



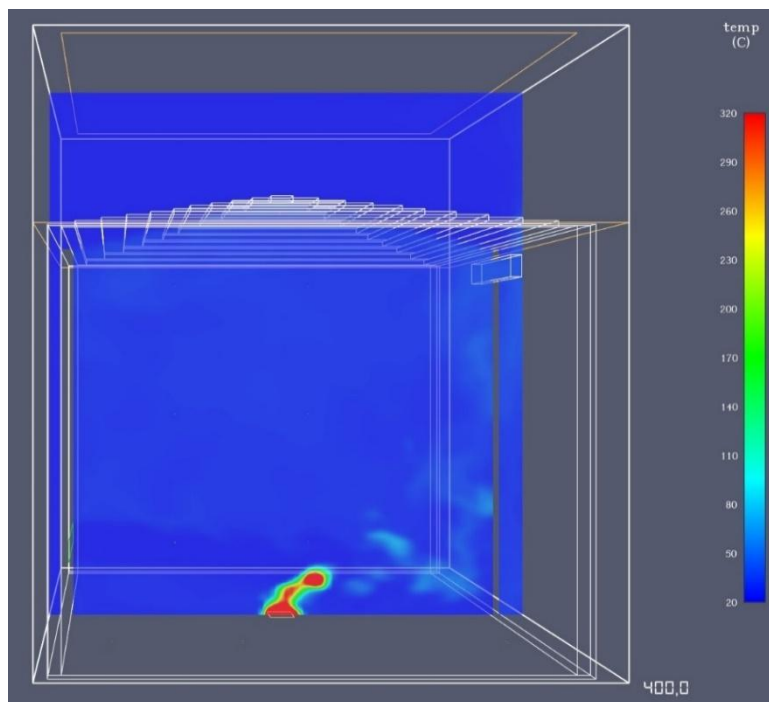
Σχήμα 5-52 Ισοϋψές γράφημα της ταχύτητας  $U_z$  (m/sec) στο επίπεδο  $Y= 9,750$  μετά από  $t= 400s$  από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 7

Η ταχύτητα του αέρα στην κατεύθυνση  $U_z$  εμφανίζει μέγιστη τιμή μέχρι και  $6,6 \text{ m/sec}$  που είναι πολύ μεγαλύτερη από τις ταχύτητες στην κατεύθυνση  $U_x$  (Σχήμα 5-52).

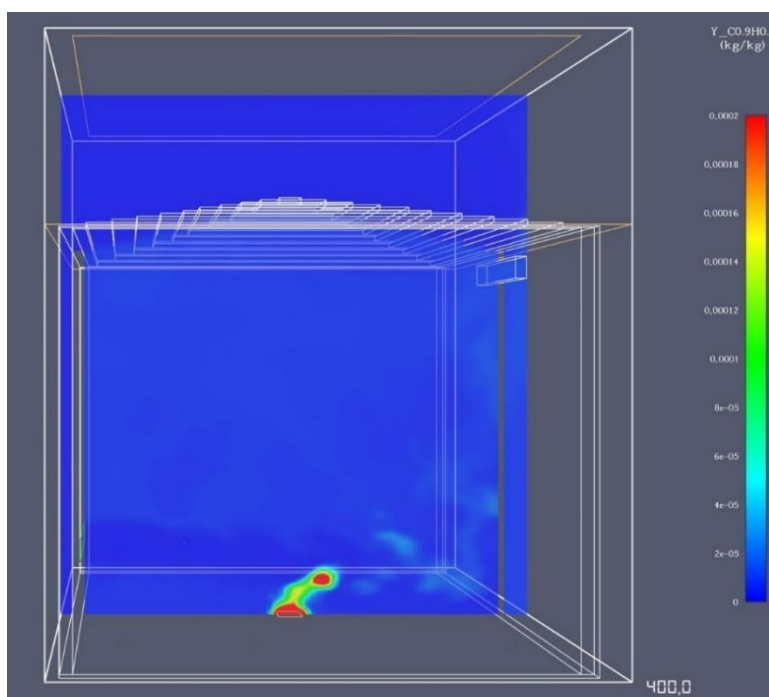
Στο Σχήμα 5-53 παρατηρείται ότι στο επίπεδο συμμετρίας του κτηρίου  $Y=9,750$  εμφανίζονται ομοιόμορφες υπέρ-πίεσεις που ευνοούν την εξαγωγή καπναερίων στο άνοιγμα εξόδου που βρίσκεται πλησιέστερα στην οροφή.



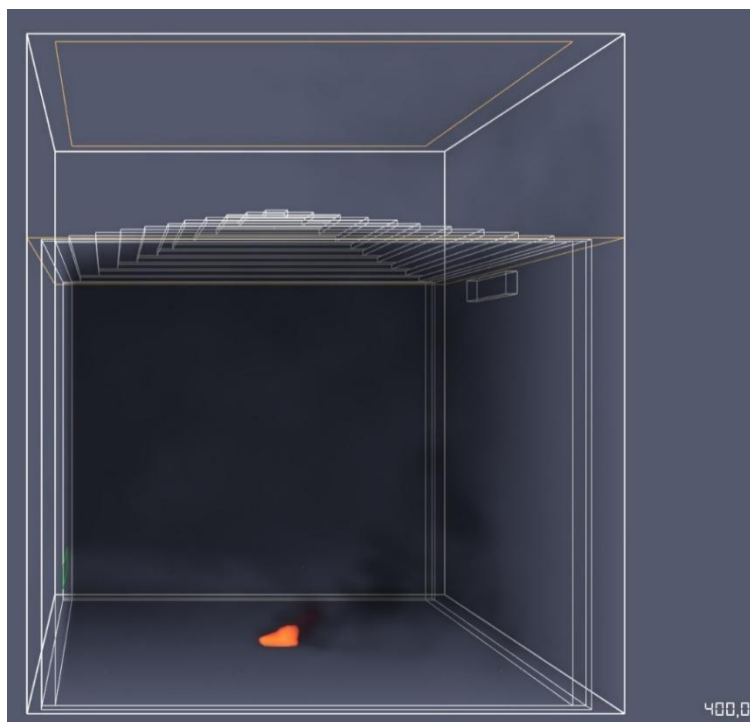
**Σχήμα 5-53** Ισοϋψές γράφημα κατανομής της πίεσης (Pa) στο επίπεδο  $Y= 9,750$  μετά από  $t= 400s$  από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 7



Σχήμα 5-54 Ισοϋψές γράφημα της θερμοκρασίας των καπναερίων (°C) στο επίπεδο  $Y= 9,750$  μετά από  $t= 400s$  από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 7



Σχήμα 5-55 Ισοϋψές γράφημα της συγκέντρωσης του καπνού (soot) (kg/kg) στο επίπεδο  $Y= 9,750$  μετά από  $t= 400s$  από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 7



**Σχήμα 5-56 Συγκέντρωση του καπνού στο χώρο μετά από  $t= 400s$  από την έναρξη της πυρκαγιάς για την μελέτη περίπτωσης 7**

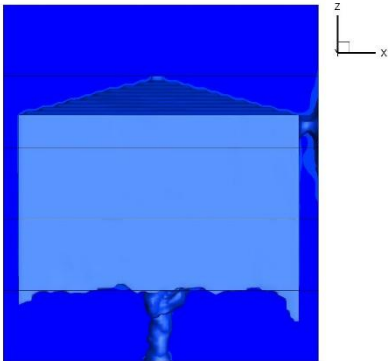
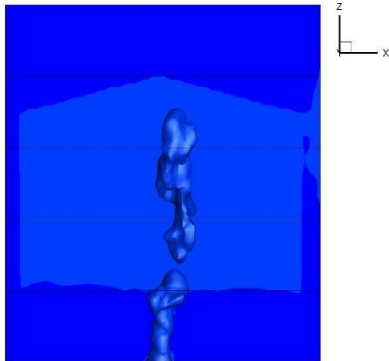
## **6 Συμπεράσματα**

### **6.1 Συμπεράσματα μελέτης αίθριου με ανοίγματα**

Στόχος της παρούσας εργασίας ήταν η μελέτη καπνού σε περίπτωση πυρκαγιάς σε ένα μεγάλο κτήριο. Για την πραγματοποίηση της μελέτης έγινε η προσομοίωση ενός πραγματικού πειράματος από την βιβλιογραφία έτσι ώστε να συγκριθούν και να επικυρωθούν τα υπολογιστικά αποτελέσματα με τα πειραματικά. Στην περίπτωση των μετρήσεων που υπολογίστηκαν για συγκεκριμένες χρονικές στιγμές παρατηρήθηκε ότι η ταχύτητα είναι ιδιαίτερα αυξημένη στο επάνω μέρος στο οποίο βρίσκεται ο φεγγίτης, το ίδιο ισχύει και για τις τιμές της θερμοκρασίας και πιο συγκεκριμένα όσο περνάει το χρονικό διάστημα που είναι σε εν ενεργεία η φωτιά υπάρχει και μεγαλύτερη αύξηση. Στην περίπτωση των προϊόντων καύσης παρατηρήθηκε ότι η παραγωγή του βρισκόταν ακριβώς πάνω από το σημείο της φωτιάς και δεν υπήρχε ιδιαίτερη διάδοση στο υπόλοιπο κτήριο. Ακόμα παρατηρήθηκε από την σύγκριση των αποτελεσμάτων της θερμοκρασίας με των πειραματικών τιμών της θερμοκρασίας που υπολογίστηκαν σε 2 σημεία, το ένα κοντά στην λίμνη φωτιάς ενώ το άλλο κοντά στην οροφή και στις δύο περιπτώσεις, ότι οι μετρήσεις βρίσκονται αρκετά κοντά η μια με την άλλη και η απόκλιση που υπάρχει είναι μικρή. Επίσης όσο αναφορά τις μέσες ροϊκές γραμμές φάνηκε ότι υπήρξε μια αποκόλληση της ροής στην οροφή η οποία οφείλεται στην ανακυκλοφορία. Εν συνεχεία παρατηρήθηκε από την γραφική παράσταση των μέσων τιμών της θερμοκρασίας που σχεδιάστηκε ότι η θερμοκρασία είναι ιδιαίτερα αυξημένη στο σημείο που βρίσκεται η λίμνη φωτιάς.

### **6.2 Συμπεράσματα μελέτης για διαφορετικές θέσεις των ανοιγμάτων στο κέλυφος του κτηρίου**

Για τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς των καπναερίων σε διαφορετικές θέσεις ανοιγμάτων στο κέλυφος του κτηρίου συνοψίζονται τα συμπεράσματα στον παρακάτω πίνακα:

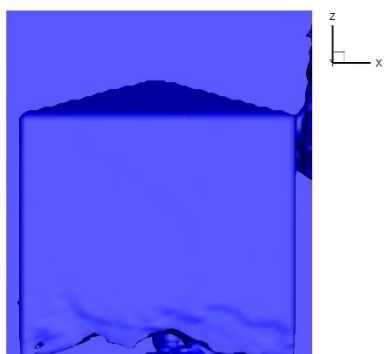
<p><b>Περίπτωση 1</b></p>	<p>Δύο ανοίγματα εισόδου του αέρα από το περιβάλλον με εμβαδόν <math>A_{inlet} = 5m^2</math> και ένα άνοιγμα εξόδου του καπνού με εμβαδόν <math>A_{outlet} = 3,5 m^2</math></p>
<p>Παροχή νωπού αέρα: <math>8,9 \frac{m^3}{sec}</math> είσοδο για το κάθε άνοιγμα <math>A_{inlet}</math>, συνολική παροχή <math>17,8 \frac{m^3}{sec}</math>.</p> <p>Παροχή καπναερίων εξόδου <math>16,38 \frac{m^3}{sec}</math>.</p> <p>Η μέγιστη θερμοκρασία κοντά στην περιοχή της φωτιάς είναι <math>850 \text{ } ^\circ C</math>.</p> <p>Η πλήρωση του κτηρίου με καπνό για συγκέντρωση <math>30 \text{ mg/kg}</math> μετά από <math>400 \text{ sec}</math> από την έναρξη της φωτιάς είναι <math>4,7 \text{ m}</math> από το δάπεδο του κτηρίου.</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div data-bbox="268 1099 657 1458">  </div> <div data-bbox="791 1099 1181 1458">  </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div data-bbox="236 1518 742 1675"> <p><b>Σχήμα 6-1</b> Συγκέντρωση του καπνού (soot) για <math>30 \text{ mg/kg}</math> μετά από <math>t = 400s</math> από την έναρξη της πυρκαγιάς, απόσταση από το δάπεδο <math>4,7 \text{ m}</math></p> </div> <div data-bbox="762 1518 1268 1637"> <p><b>Σχήμα 6-2</b> Συγκέντρωση του καπνού (soot) για <math>40 \text{ mg/kg}</math> μετά από <math>t = 400s</math> από την έναρξη της πυρκαγιάς</p> </div> </div>	
<p><b>Περίπτωση 2</b></p>	<p>Ένα άνοιγμα εισόδου του αέρα από το περιβάλλον με εμβαδόν <math>A_{inlet} = 5,35m^2</math> και ένα άνοιγμα εξόδου με εμβαδόν <math>A_{outlet} = 5,35 m^2</math></p>
<p>Παροχή εισόδου νωπού αέρα: <math>16,69 m^3/sec</math></p>	

Παροχή καπναερίων εξόδου  $15,72 \text{ m}^3/\text{sec}$

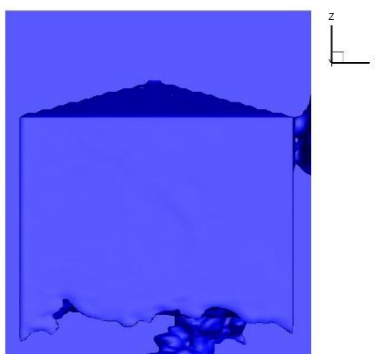
Η θερμοκρασία κοντά στην περιοχή της φωτιάς είναι  $520 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Η πλήρωση του κτηρίου με καπνό για συγκέντρωση  $10 \text{ mg/kg}$  μετά από  $400 \text{ sec}$  από την έναρξη της φωτιάς είναι  $0,5 \text{ m}$  από το δάπεδο του κτηρίου (Σχήμα 6-3), και  $2,7 \text{ m}$  για συγκέντρωση  $20 \text{ mg/kg}$  (Σχήμα 6-4).

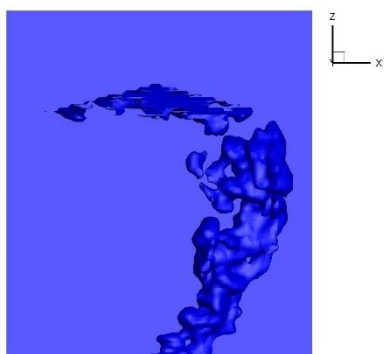
Για συγκεντρώσεις  $30 \text{ mg/kg}$ , ο καπνός εμφανίζει μια αριστερόστροφη κυκλική περιστροφή στο εσωτερικό του κτηρίου (Σχήμα 6-4).



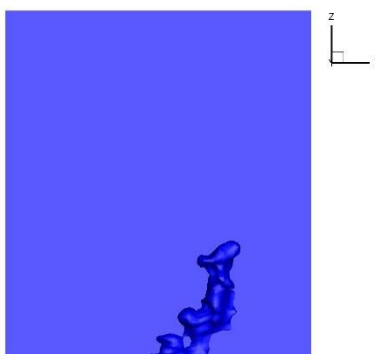
Σχήμα 6-3 Συγκέντρωση του καπνού (soot) για  $10 \text{ mg/kg}$  μετά από  $t = 400\text{s}$  από την έναρξη της πυρκαγιάς, απόσταση από το δάπεδο  $0,5\text{m}$



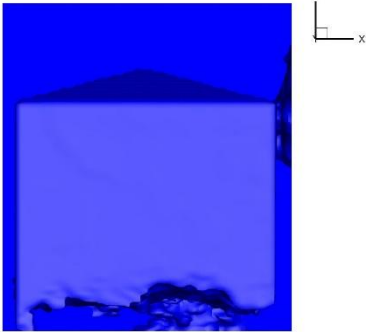
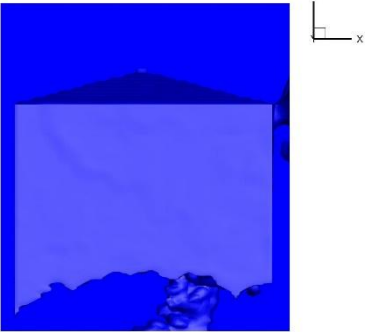
Σχήμα 6-4 Συγκέντρωση του καπνού (soot) για  $20 \text{ mg/kg}$  μετά από  $t = 400\text{s}$  από την έναρξη της πυρκαγιάς, απόσταση από το δάπεδο  $2,7\text{m}$



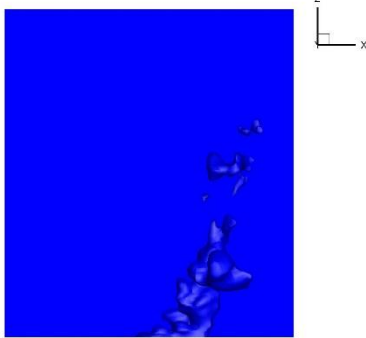
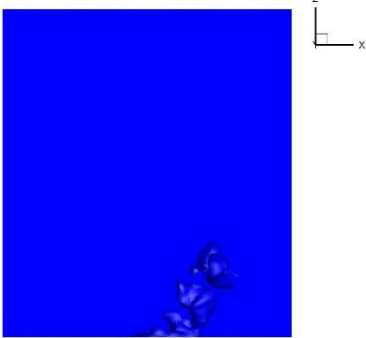
Σχήμα 6-5 Συγκέντρωση του καπνού (soot) για  $30 \text{ mg/kg}$  μετά από  $t = 400\text{s}$  από



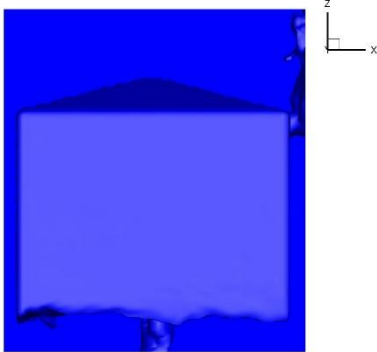
Σχήμα 6-6 Συγκέντρωση του καπνού (soot) για  $40 \text{ mg/kg}$  μετά από  $t = 400\text{s}$  από

την έναρξη της πυρκαγιάς	την έναρξη της πυρκαγιάς
<b>Περίπτωση 3</b>	Ένα άνοιγμα εισόδου του αέρα από το περιβάλλον με εμβαδόν $A_{inlet} = 10,7m^2$ και ένα άνοιγμα εξόδου με εμβαδόν $A_{outlet} = 10,7 m^2$
<p>Παροχή εισόδου νωπού αέρα: <math>39,09 m^3/sec</math></p> <p>Παροχή καπναερίων εξόδου <math>21,93m^3/sec</math></p> <p>Η θερμοκρασία κοντά στην περιοχή της φωτιάς είναι <math>520 \text{ }^\circ C</math>.</p> <p>Παρατηρείται μεγάλη κλίση των καπναερίων που αποτυπώνεται από την κατανομή της θερμοκρασίας κοντά στην πηγή της φωτιάς.</p> <p>Η πλήρωση του κτηρίου με καπνό για συγκέντρωση <math>10 \text{ mg/kg}</math> μετά από <math>400 \text{ sec}</math> από την έναρξη της φωτιάς είναι <math>1,7 \text{ m}</math> από το δάπεδο του κτηρίου (Σχήμα 6-7), και <math>3,6 \text{ m}</math> για συγκέντρωση <math>20 \text{ mg/kg}</math> (Σχήμα 6-4).</p> <p>Για συγκεντρώσεις μεγαλύτερες από <math>30 \text{ mg/kg}</math>, ο καπνός εμφανίζει μια κλίση προς τα δεξιά στο εσωτερικό του κτηρίου (Σχήμα 6-9 και Σχήμα 6-10).</p>	
	
<p><b>Σχήμα 6-7</b> Συγκέντρωση του καπνού (soot) για <math>10 \text{ mg/kg}</math> μετά από <math>t = 400s</math> από την έναρξη της πυρκαγιάς, απόσταση από το δάπεδο <math>1,7m</math></p>	<p><b>Σχήμα 6-8</b> Συγκέντρωση του καπνού (soot) για <math>20 \text{ mg/kg}</math> μετά από <math>t = 400s</math> από την έναρξη της πυρκαγιάς, απόσταση από το δάπεδο <math>3,6m</math></p>

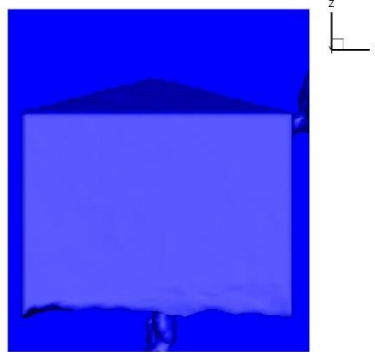


 <p>Σχήμα 6-9 Συγκέντρωση του καπνού (soot) για 30 mg/kg μετά από <math>t = 400s</math> από την έναρξη της πυρκαγιάς</p>	 <p>Σχήμα 6-10 Συγκέντρωση του καπνού (soot) για 40 mg/kg μετά από <math>t = 400s</math> από την έναρξη της πυρκαγιάς</p>
<p><b>Περίπτωση 4</b></p>	<p>Ένα άνοιγμα εισόδου του αέρα από το περιβάλλον με εμβαδόν <math>A_{inlet} = 5,35 \text{ m}^2</math> και ένα άνοιγμα εξόδου με εμβαδόν <math>A_{outlet} = 5,35 \text{ m}^2</math>. Η είσοδος του αέρα από το περιβάλλον γίνεται με ταχύτητα 1 m/sec.</p>
<p>Παροχή εισόδου νωπού αέρα: <math>5,35 \text{ m}^3/\text{sec}</math></p> <p>Παροχή καπναερίων εξόδου <math>10,69 \text{ m}^3/\text{sec}</math></p> <p>Η ταχύτητα του αέρα στην κατεύθυνση <math>U_z</math> εμφανίζει μέγιστη τιμή μέχρι και <math>6,7 \frac{\text{m}}{\text{sec}}</math>.</p> <p>Η μέγιστη θερμοκρασία κοντά στην περιοχή της φωτιάς είναι <math>570 \text{ }^\circ\text{C}</math>.</p> <p>Παρατηρείται μεγάλη κλίση των καπναερίων που αποτυπώνεται από την κατανομή της θερμοκρασίας κοντά στην πηγή της φωτιάς.</p> <p>Η πλήρωση του κτηρίου με καπνό για συγκέντρωση 10 mg/kg μετά από 400 sec από την έναρξη της φωτιάς είναι 2,78 m από το δάπεδο του κτηρίου (Σχήμα 6- 11),</p> <p>και 3,1 m για συγκέντρωση 20 mg/kg (Σχήμα 6- 12).</p> <p>Για συγκεντρώσεις μεγαλύτερες από 30 mg/kg, το πλούμιο του καπνού</p>	

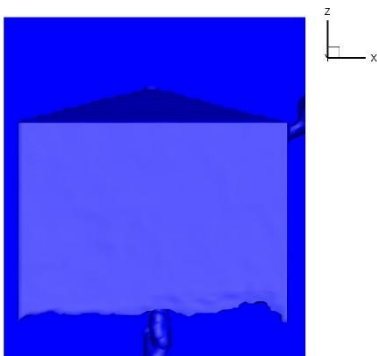
διαχέεται κατακόρυφα προς τα επάνω (Σχήμα 6- 14).



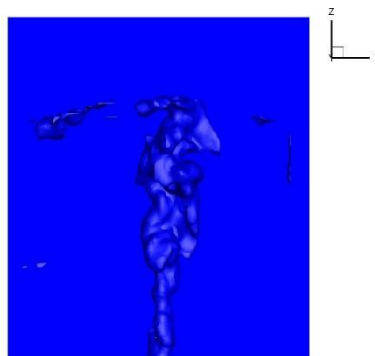
Σχήμα 6-11 Συγκέντρωση του καπνού (soot) για 10 mg/kg μετά από  $t = 400s$  από την έναρξη της πυρκαγιάς, απόσταση από το δάπεδο 2,78m



Σχήμα 6-12 Συγκέντρωση του καπνού (soot) για 20 mg/kg μετά από  $t = 400s$  από την έναρξη της πυρκαγιάς, απόσταση από το δάπεδο 3,1m



Σχήμα 6-13 Συγκέντρωση του καπνού (soot) για 30 mg/kg μετά από  $t = 400s$  από την έναρξη της πυρκαγιάς



Σχήμα 6-14 Συγκέντρωση του καπνού (soot) για 40 mg/kg μετά από  $t = 400s$  από την έναρξη της πυρκαγιάς

**Περίπτωση 5**

Ένα άνοιγμα εισόδου του αέρα από το περιβάλλον με εμβαδόν  $A_{inlet} = 5,35 m^2$  και ένα άνοιγμα εξόδου με εμβαδόν  $A_{outlet} = 5,35 m^2$ . Η είσοδος του αέρα από το περιβάλλον γίνεται με ταχύτητα 2 m/sec.

Παροχή εισόδου νωπού αέρα:  $10,7 m^3/sec$

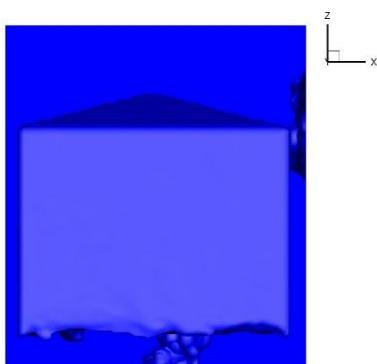
Παροχή καπναερίων εξόδου  $11,5 \text{ m}^3/\text{sec}$  Η ταχύτητα του αέρα στην κατεύθυνση  $U_z$  εμφανίζει μέγιστη τιμή μέχρι και  $5,75 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$ .

Η μέγιστη θερμοκρασία κοντά στην περιοχή της φωτιάς είναι  $780 \text{ }^\circ\text{C}$ .

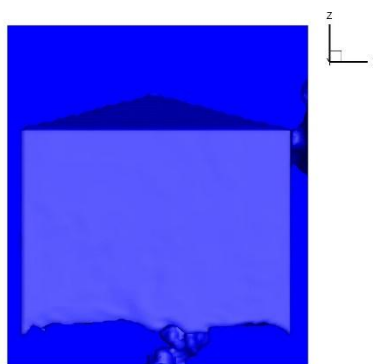
Παρατηρείται μεγάλη κλίση των καπναερίων που αποτυπώνεται από την κατανομή της θερμοκρασίας κοντά στην πηγή της φωτιάς.

Η πλήρωση του κτηρίου με καπνό για συγκέντρωση  $10 \text{ mg/kg}$  μετά από  $400 \text{ sec}$  από την έναρξη της φωτιάς είναι  $2,65 \text{ m}$  από το δάπεδο του κτηρίου (Σχήμα 6-15), και  $3,1 \text{ m}$  για συγκέντρωση  $20 \text{ mg/kg}$  (Σχήμα 6-16).

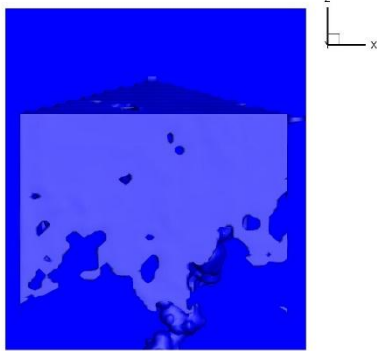
Για συγκεντρώσεις μεγαλύτερες από  $40 \text{ mg/kg}$ , ο καπνός εμφανίζει κλίση προς τα δεξιά στο εσωτερικό του κτηρίου (Σχήμα 6-18).



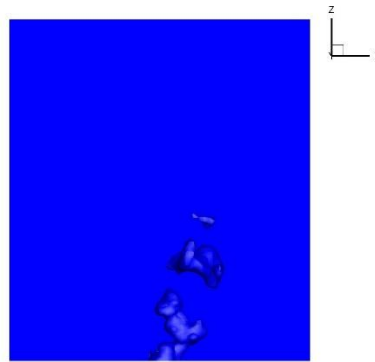
Σχήμα 6-15 Συγκέντρωση του καπνού (soot) για  $10 \text{ mg/kg}$  μετά από  $t = 400\text{s}$  από την έναρξη της πυρκαγιάς, απόσταση από το δάπεδο  $2,57\text{m}$



Σχήμα 6-16 Συγκέντρωση του καπνού (soot) για  $20 \text{ mg/kg}$  μετά από  $t = 400\text{s}$  από την έναρξη της πυρκαγιάς, απόσταση από το δάπεδο  $3,1\text{m}$



Σχήμα 6-17 Συγκέντρωση του καπνού (soot) για 30 mg/kg μετά από  $t = 400s$  από την έναρξη της πυρκαγιάς, απόσταση από το δάπεδο 5,7m



Σχήμα 6-18 Συγκέντρωση του καπνού (soot) για 40 mg/kg μετά από  $t = 400s$  από την έναρξη της πυρκαγιάς

#### Περίπτωση 6

Ένα άνοιγμα εισόδου του αέρα από το περιβάλλον με εμβαδόν  $A_{inlet} = 5,35 \text{ m}^2$  και ένα άνοιγμα εξόδου με εμβαδόν  $A_{outlet} = 5,35 \text{ m}^2$ . Η είσοδος του αέρα από το περιβάλλον γίνεται με ταχύτητα 5 m/sec.

Παροχή εισόδου νωπού αέρα:  $26,75 \text{ m}^3/\text{sec}$

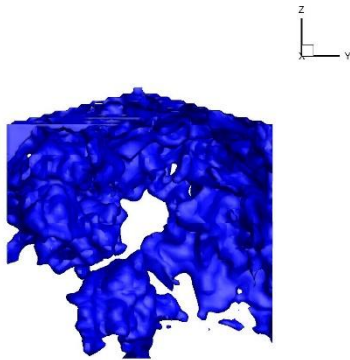
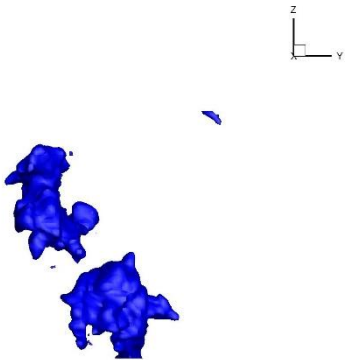
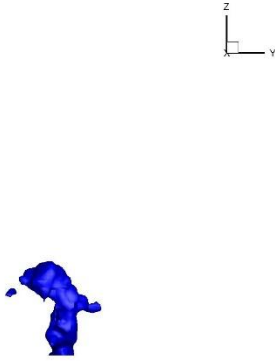
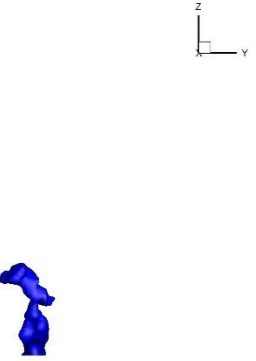
Παροχή καπναερίων εξόδου  $30,6 \text{ m}^3/\text{sec}$ .

Η ταχύτητα του αέρα στην κατεύθυνση  $U_z$  εμφανίζει μέγιστη τιμή μέχρι και  $4,5 \text{ m/sec}$ .

Η μέγιστη θερμοκρασία κοντά στην περιοχή της φωτιάς είναι  $420 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Για συγκεντρώσεις του καπνού 10 mg/kg μετά από 400 sec από την έναρξη της φωτιάς παρατηρείται μια σημαντική διάχυση στο εσωτερικό του κτηρίου που οφείλεται στην υψηλή ταχύτητα εισόδου του αέρα στο άνοιγμα εισόδου (Σχήμα 6- 19).

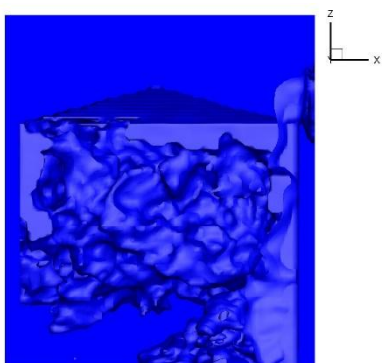
Για συγκεντρώσεις 20 mg/kg, ο καπνός εμφανίζει κλίση προς τα αριστερά στο εσωτερικό του κτηρίου (Σχήμα 6- 20).

 <p>Σχήμα 6-19 Συγκέντρωση του καπνού (soot) για 10 mg/kg μετά από <math>t= 400s</math> από την έναρξη της πυρκαγιάς</p>	 <p>Σχήμα 6-20 Συγκέντρωση του καπνού (soot) για 20 mg/kg μετά από <math>t= 400s</math> από την έναρξη της πυρκαγιάς</p>
 <p>Σχήμα 6-21 Συγκέντρωση του καπνού (soot) για 30 mg/kg μετά από <math>t= 400s</math> από την έναρξη της πυρκαγιάς</p>	 <p>Σχήμα 6-22 Συγκέντρωση του καπνού (soot) για 40 mg/kg μετά από <math>t= 400s</math> από την έναρξη της πυρκαγιάς</p>
<p><b>Περίπτωση 7</b></p>	<p>Ένα άνοιγμα εισόδου του αέρα από το περιβάλλον με εμβαδόν <math>A_{inlet} = 5,35 \text{ m}^2</math> και ένα άνοιγμα εξόδου με εμβαδόν <math>A_{outlet} = 5,35 \text{ m}^2</math>. Η είσοδος του αέρα από το περιβάλλον γίνεται με ταχύτητα 8 m/sec.</p> <p>Παροχή εισόδου νωπού αέρα: <math>42,8 \text{ m}^3/sec</math></p> <p>Παροχή καπναερίων εξόδου <math>51,89 \text{ m}^3/sec</math>.</p> <p>Η ταχύτητα του αέρα στην κατεύθυνση <math>U_z</math> εμφανίζει μέγιστη τιμή μέχρι και <math>6,6 \text{ m/sec}</math></p>

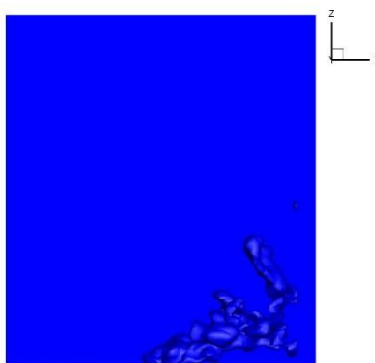
Η μέγιστη θερμοκρασία κοντά στην περιοχή της φωτιάς είναι  $420\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Για συγκεντρώσεις του καπνού  $10\text{ mg/kg}$  μετά από  $400\text{ sec}$  από την έναρξη της φωτιάς παρατηρείται μια σημαντική διάχυση στο εσωτερικό του κτηρίου που οφείλεται στην υψηλή ταχύτητα εισόδου του αέρα στο άνοιγμα εισόδου (Σχήμα 6-23).

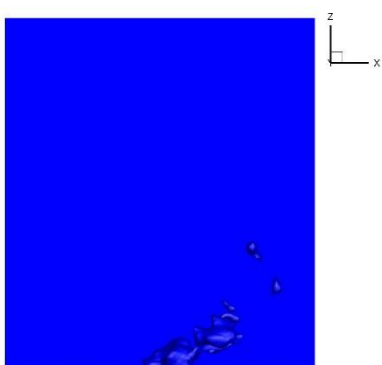
Για συγκεντρώσεις μεγαλύτερες από  $20\text{ mg/kg}$ , ο καπνός εμφανίζει κλίση προς τα δεξιά στο εσωτερικό του κτηρίου (Σχήμα 6-23, Σχήμα 6-24, Σχήμα 6-25).



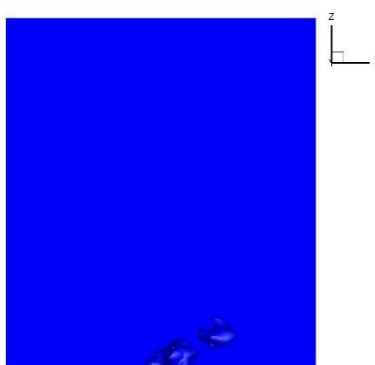
Σχήμα 6-23 Συγκέντρωση του καπνού (soot) για  $10\text{ mg/kg}$  μετά από  $t= 400\text{s}$  από την έναρξη της πυρκαγιάς



Σχήμα 6-24 Συγκέντρωση του καπνού (soot) για  $20\text{ mg/kg}$  μετά από  $t= 400\text{s}$  από την έναρξη της πυρκαγιάς



Σχήμα 6-25 Συγκέντρωση του καπνού (soot) για  $30\text{ mg/kg}$  μετά από  $t= 400\text{s}$  από την έναρξη της πυρκαγιάς



Σχήμα 6-26 Συγκέντρωση του καπνού (soot) για  $40\text{ mg/kg}$  μετά από  $t= 400\text{s}$  από την έναρξη της πυρκαγιάς

Στις περιπτώσεις 1 και 2 η παροχή εισόδου του νωπού αέρα και η παροχή εξόδου των καπναερίων είναι παρόμοια. Ενώ στην περίπτωση 3 παρουσιάζεται σχεδόν διπλάσια παροχή εισόδου νωπού αέρα από την παροχή εξόδου των καπναερίων. Συνεπώς η επιλογή της επιφάνειας των ανοιγμάτων εισόδου και εξόδου σε συνθήκες όπου δεν παρατηρείται επίδραση της ταχύτητας του αέρα από το εξωτερικό περιβάλλον είναι ιδιαίτερα σημαντική. Στην περίπτωση 1 το ύψος συσσώρευσης του καπνού πάνω από το δάπεδο του κτηρίου είναι 4,7 m, ενώ οι περιπτώσεις 2 και 3 εμφανίζουν παρόμοιο ύψος συσσώρευσης του καπνού πάνω από το δάπεδο.

Για χαμηλές ταχύτητες του ανέμου στο εξωτερικό του κτηρίου, 1 m/sec και 2 m/sec, περίπτωση 4 και 5 παρατηρείτε μια σταθερή συγκέντρωση του καπνού σε ύψος περίπου 3 m πάνω από το δάπεδο του κτηρίου, ενώ για υψηλές συγκεντρώσεις καπνού (mg/kg) το πλούμιο δεν παρουσιάζει σημαντική κλίση. Στις περιπτώσεις αυτές η ταχύτητα των καπναερίων στον άξονα του z,  $U_z$ , είναι μεγαλύτερη για υψηλότερη ταχύτητα του αέρα στο εξωτερικό περιβάλλον.

Για υψηλές ταχύτητες του ανέμου στο εξωτερικό του κτηρίου, 5 m/sec και 8 m/sec, περίπτωση 6 και 7 παρατηρείτε μια έντονη διασπορά της συγκέντρωσης του καπνού στο εσωτερικό του κτηρίου ενώ για υψηλές συγκεντρώσεις καπνού (mg/kg) το πλούμιο στην περίπτωση 6 παρουσιάζει κλίση προς τα αριστερά ενώ στην περίπτωση 7 προς τα δεξιά. Στις περιπτώσεις αυτές η ταχύτητα των καπναερίων στον άξονα του z,  $U_z$ , είναι μεγαλύτερη για υψηλότερη ταχύτητα του αέρα στο εξωτερικό περιβάλλον.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Association, N. F. P. (1981). Life safety code handbook, National Fire Protection Association.
- Bilger, R., et al. (2005). "Paradigms in turbulent combustion research." **30**(1): 21-42.
- BOCA, B. O. J. N. B. C. (1993). "Code Administration International Inc."
- Bryn, I. (1995). Atrium buildings from the perspective of function, indoor air quality, and energy use. Conference: Annual meeting of the American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc. (ASHRAE), San Diego, CA (United States), 24-28 Jun 1995; Other Information: PBD: 1995; Related Information: Is Part Of ASHRAE transactions 1995: Technical and symposium papers. Volume 101, Part 2; PB: 1497 p. United States, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, GA (United States): Medium: X; Size: pp. 829-840.
- Canadian Commission on, B. and C. Fire (2008). National Building Code of Canada: 2005, National Research Council of Canada.
- Cetegen, B. M., et al. (1984). "Entrainment in the Near and Far Field of Fire Plumes." Combustion Science and Technology **39**(1-6): 305-331.
- Chow, W. K., et al. (2005). "Evacuation with smoke control for atria in green and sustainable buildings." **40**(2): 195-200.
- Chow, W. K., et al. (1997). "Plume equations for studying smoke-filling process in atria with a zone model." **21**(5): 235-244.
- Chow, W. K. and W. J. J. o. f. s. Wong (1993). "Application of the zone model FIRST on the development of smoke layer and evaluation of smoke extraction design for atria in Hong Kong." **11**(4): 329-349.
- Chow, W. K. J. B. and Environment (1996). "Application of computational fluid dynamics in building services engineering." **31**(5): 425-436.
- Chow, W. K. J. F. S. J. (1995). "A comparison of the use of fire zone and field models for simulating atrium smoke-filling processes." **25**(4): 337-353.
- Chow, W. K. J. I. J. f. H. S. and I. Applications (1989). "Smoke movement and design of smoke control in atrium bldgs." **13**(4): 307-322.
- Code, S. B. J. B., AL (1994). "Southern Building Code Congress International." **35213**.
- Code, U. B. J. W., CA (1997). "International conference of building officials." **2**.
- Council, I. C. (2006). International Building Code 2006, International Code Council.



- Cox, G. (1995). Combustion fundamentals of fire / edited by G. Cox. London ;, Academic Press.
- Cox, G. J. C. f. o. f. (1995). "Compartment fire modelling." 329-404.
- Ewer, J., et al. (2008). "SMARTFIRE V4. 1: User Guide and Technical Manual- SMARTFIRE Tutorials."
- Gutiérrez-Montes, C., et al. (2009). "Experimental data and numerical modelling of 1.3 and 2.3MW fires in a 20m cubic atrium." Building and Environment **44**(9): 1827-1839.
- Gutiérrez Montes, C., et al. (2009). "Smoke and fire dynamics in atria and large enclosures: An overview."
- Hansell, G. and H. Morgan (1994). Design approaches for smoke control in atrium buildings, Fire Research Station Borehamwood.
- Health, A. P. H. A. J. A. J. o. P. (2001). "Public health role of the National Fire Protection Association in setting codes and standards for the built environment." **91**(3): 503.
- Heskestad, G. (1984). "Engineering relations for fire plumes." Fire Safety Journal **7**(1): 25-32.
- Heskestad, G. (2016). Fire Plumes, Flame Height, and Air Entrainment: 396-428.
- Institute, A. N. S., et al. (1999). Accessible and usable buildings and facilities, International Code Council.
- Jin, T. and T. Yamada (1985). "Irritating Effects of Fire Smoke on Visibility." Fire Science and Technology **5**(1): 79-90.
- Jin, T. J. T. J. o. f. and flammability (1978). "Visibility through fire smoke." **9**: 135-155.
- Jones, W. W., et al. (2005). "CFAST–Consolidated model of fire growth and smoke transport (Version 6)." **1026**.
- Klote, J. H. (1994). Method of predicting smoke movement in atria with application to smoke management, NIST Gaithersburg.
- Klote, J. H., et al. (2000). "Atrium smoke management,,," (7).
- Klote, J. H., et al. (1992). Design of Smoke Management Systems, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- Klote, J. H. M. J. A. A. S. o. H. R. and S. o. F. P. E. Air-Conditioning Engineers (2002). Principles of smoke management. Atlanta, Ga., American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- Lougheed, G. (2000). Considerations in the design of smoke management systems for atriums, Citeseer.

- McCaffrey, B. J. (1983). "Momentum implications for buoyant diffusion flames." Combustion and Flame **52**: 149-167.
- McGrattan, K., et al. (2008). "Fire Dynamics Simulator (Version 5)-Validation Guide."
- McGrattan, K. B., et al. (1998). "Large eddy simulations of smoke movement." **30**(2): 161-178.
- Milke, J. and F. J. F.-. Mowrer, University of Maryland (1993). "A Design Algorithm for Smoke Management Systems in Atria and Covered Malls, Department of Fire Protection Engineering, Report no."
- Milke, J. A. (1990). "Smoke management for covered malls and atria." Fire Technology **26**(3): 223-243.
- Milke, J. A. J. J. o. F. P. E. (2003). "Effectiveness of high-capacity smoke exhaust in large spaces." **13**(2): 111-128.
- Mitler, H. E. J. N.-. (1987). "Users' guide to FIRST, a comprehensive single-room fire model."
- Morgan, H., et al. (1975). Smoke hazards in covered, multi-level shopping malls: an experimentally-based theory for smoke production, Building Research Establishment.
- Morgan, H. J. I. J. o. E. P.-B. F. C. (2003). "A brief note on the history of 'acceptable clear heights' for smoke and heat exhaust ventilation systems in the UK." **5**(2): 43-44.
- Morgan, H. P. B. R. E. (1999). Design methodologies for smoke and heat exhaust ventilation. Garston, Construction Research Communications Ltd. by permission of Building Research Establishment Ltd.
- Morton, B. R., et al. (1956). "Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous sources." **234**: 1 - 23.
- National Fire Protection Association %J Batterymarch Park, Q., Ma (2005). "NFPA 92B: Standard for Smoke Management Systems in Malls, Atria, and Large Spaces."
- Officials, I. C. o. B. (1982). Uniform Building Security Code, International Conference of Building Officials.
- Peacock, R. D., et al. (2005). "CFAST–Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (Version 6) User's Guide." **1041**.
- Pope, S. (1991). Computations of turbulent combustion: progress and challenges. Symposium (International) on Combustion, Elsevier.
- Poreh, M. and G. J. F. S. J. Garrad (2000). "A study of wall and corner fire plumes." **34**: 81-98.

- Rho, J. and H.-S. J. F. S. J. Ryou (1999). "A numerical study of atrium fires using deterministic models." **33**(3): 213-229.
- Roaf, S. (2004). Adapting buildings and cities for climate change : a 21st century survival guide. Burlington, Burlington : Elsevier.
- Saxon, R. (1983). Atrium Buildings : Development and Design. New York ; Toronto : Van Nostrand Reinhold, 1983.
- Saxon, R. (1994). The atrium comes of age. Harlow, Essex, England, Longman.
- Tanaka, T., et al. (1985). "Smoke control in large scale spaces (Part 1: Analytic theories for simple smoke control problems)." **5**(1): 31-40.
- Williams, C., et al. (1999). Natural ventilation in atria for environment and smoke control: an introductory guide, Building Research Establishment.
- Xiong, H. J. H., Ventilating and A. Conditioning (1994). "Modes of smoke exhaust system and performances in atrium buildings." **24**(5): 25-27.