

ΓΡΑΜΜΑΤΕΙΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΑΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ



ΜΗΧ
628

Πτυχιακή Εργασία:

**Αριθμητική προσομοίωση πυρκαγιάς
σε βιομηχανικό κτίριο**

Υπεύθυνοι σπουδαστές:

Βασιλογιάννης Σταύρος Ιωάννης

Γερανάκης Λεωνίδα

Επιβλέπων καθηγητής:

Νικολόπουλος Νικόλαος

Περίληψη

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται την προσομοίωση του φαινομένου της πυρκαγιάς ξύλινης παλέτας εντός ενός βιομηχανικού κτιρίου και συγκεκριμένα μεταλλικής κατασκευής η οποία χρησιμοποιείται ως αποθήκη. Θα γίνει εξέταση πέντε περιπτώσεων με διαφοροποιήσεις στην ταχύτητα του αέρα, τη θέση της πηγής της πυρκαγιάς, τον αριθμό των πηγών και τη θέση των παραθύρων απ' όπου εισέρχεται ο αέρας. Για να επιτευχθούν τα ανωτέρω, προηγήθηκε μία πρώτη επαφή και εξοικείωση με την έννοια και τα χαρακτηριστικά της φωτιάς σε κλειστό χώρο, την Υπολογιστική Ρευστοδυναμική, το σχεδιαστικό πακέτο GAMBIT και το υπολογιστικό πακέτο Fluent. Στο τέλος της εργασίας παρουσιάζονται τα όλα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και γίνεται σύγκριση και ανάλυση αυτών.

Λέξεις κλειδιά: πυρκαγιά, πηγή, αέρας, ρευστό, Υπολογιστική Ρευστοδυναμική.

Abstract

This paper deals with the simulation of the phenomenon of wooden pallets on fire inside an industrial building and specifically a steel structure which is used as a warehouse. Five different cases will be examined with variations in wind speed, position of fire source, number of sources and position of the windows from which the air enters. To achieve the above, a first contact with the meaning and characteristics of fire in an enclosed space, Computational Fluid Dynamics, the GAMBIT design package and the computational package Fluent was preceded. At the end of the study, all the results from the simulations will be compared to each other and analyzed.

Key words: fire, source, wind, fluid, Computational Fluid Dynamics.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1: Υπολογιστική Ρευστοδυναμική (CFD)	5
1.1 Η εξέλιξη της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής.....	5
1.2 Ορισμός Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής.....	8
1.3 Εφαρμογές CFD.....	8
1.4 Πλεονεκτήματα CFD.....	10
1.5 Περιορισμοί CFD.....	11
1.6 Ανάλυση των βασικών βημάτων του CFD.....	12
1.7 Εισαγωγή στο GAMBIT.....	14
1.7.1 Εργαλεία χειρισμού.....	15
1.7.2 Γενικά περί πλέγματος.....	17
1.8 Εισαγωγή στο Fluent.....	17
1.8.1 Εισαγωγή και έλεγχος πλέγματος.....	18
1.8.2 Διαδικασία επίλυσης προβλήματος.....	18
1.8.3 Επεξεργασία αποτελεσμάτων.....	19
Κεφάλαιο 2: Φωτιά σε κλειστό χώρο	21
2.1 Περιγραφή του φαινομένου - κύρια χαρακτηριστικά.....	21
2.1.1 Φαινόμενα μεταφοράς.....	22
2.1.2 Μετάδοση θερμότητας.....	23
2.1.3 Διευκρινίσεις όρων.....	24
2.2 Στάδιο ανάπτυξης της φωτιάς και ορισμός της έκλαμψης.....	25
2.3 Παράγοντες που επηρεάζουν τον χρόνο εμφάνισης της έκλαμψης.....	27
2.4 Παράγοντες που επηρεάζουν την ανάπτυξη της φωτιάς.....	28
2.5 Διάδοση της φωτιάς.....	28
2.6 Πλήρως ανεπτυγμένη φωτιά.....	35
2.7 Παραγόμενος καπνός.....	36
2.7.1 Χημικές ενώσεις του καπνού.....	37
2.7.2 Κίνηση του καπνού.....	38
2.8 Πυροπροστασία.....	39
2.8.1 Ενεργητική πυροπροστασία.....	39
2.8.2 Παθητική πυροπροστασία.....	40
Κεφάλαιο 3: Σχεδιαστικό πακέτο GAMBIT	41
3.1 Γενικά.....	41
3.2 Επιφάνεια εργασίας γραφικών.....	41
3.3 Σχεδιασμός του γεωμετρικού μοντέλου του κτιρίου.....	44
3.4 Δημιουργία υπολογιστικού πλέγματος στο γεωμετρικό μοντέλο.....	49
Κεφάλαιο 4: Υπολογιστικό πακέτο Fluent	52
4.1 Γενικά.....	52
4.2 Βασικές λειτουργίες.....	52
4.3 Διαδικασία αντιμετώπισης και επίλυσης προβλημάτων.....	53
4.4 Έλεγχος κατά τη διάρκεια και μετά το πέρας της προσομοίωσης.....	70
Κεφάλαιο 5: Περιγραφή και αποτελέσματα προσομοιώσεων	73
5.1 Εισαγωγή.....	73

5.1.1 Παραδοχές.....	74
5.1.2 Εξεταζόμενες περιπτώσεις.....	75
5.2 Αποτελέσματα πρώτης προσομοίωσης.....	76
5.2.1 Χρονική στιγμή: 100 s.....	76
5.2.2 Χρονική στιγμή: 200 s.....	79
5.2.3 Χρονική στιγμή: 310 s (μέγιστη θερμοκρασία στην πηγή).....	82
5.2.4 Χρονική στιγμή: 400 s.....	84
5.2.5 Χρονική στιγμή: 500 s.....	87
5.3 Αποτελέσματα δεύτερης προσομοίωσης.....	89
5.3.1 Χρονική στιγμή: 100 s.....	90
5.3.2 Χρονική στιγμή: 200 s.....	92
5.3.3 Χρονική στιγμή: 300 s (μέγιστη θερμοκρασία στην πηγή).....	95
5.3.4 Χρονική στιγμή: 400 s.....	98
5.3.5 Χρονική στιγμή: 500 s.....	100
5.4 Αποτελέσματα τρίτης προσομοίωσης.....	103
5.4.1 Χρονική στιγμή: 100 s.....	103
5.4.2 Χρονική στιγμή: 200 s.....	106
5.4.3 Χρονική στιγμή: 345 s (μέγιστη θερμοκρασία στην πηγή).....	109
5.4.4 Χρονική στιγμή: 400 s.....	111
5.4.5 Χρονική στιγμή: 500 s.....	114
5.5 Αποτελέσματα τέταρτης προσομοίωσης.....	116
5.5.1 Χρονική στιγμή: 100 s.....	117
5.5.2 Χρονική στιγμή: 200 s.....	119
5.5.3 Χρονική στιγμή: 340 s (μέγιστη θερμοκρασία στην πηγή).....	122
5.5.4 Χρονική στιγμή: 400 s.....	125
5.5.5 Χρονική στιγμή: 500 s.....	127
5.6 Αποτελέσματα πέμπτης προσομοίωσης.....	130
5.6.1 Χρονική στιγμή: 100 s.....	130
5.6.2 Χρονική στιγμή: 200 s.....	133
5.6.3 Χρονική στιγμή: 347,5 s (μέγιστη θερμοκρασία στην πηγή).....	136
5.6.4 Χρονική στιγμή: 400 s.....	138
5.6.5 Χρονική στιγμή: 500 s.....	141
5.7 Αποτελέσματα έκτης προσομοίωσης.....	143
5.7.1 Χρονική στιγμή: 100 s.....	144
5.7.2 Χρονική στιγμή: 200 s.....	146
5.7.3 Χρονική στιγμή: 350 s (μέγιστη θερμοκρασία στην πηγή).....	149
5.7.4 Χρονική στιγμή: 400 s.....	152
5.7.5 Χρονική στιγμή: 500 s.....	154
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα.....	157
6.1 Σχολιασμός αποτελεσμάτων.....	157
6.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων.....	164
6.2.1 Σύγκριση χρονικού βήματος.....	164
6.2.2 Σύγκριση ως προς την ταχύτητα του αέρα.....	164
6.2.3 Σύγκριση ως προς τη θέση των παραθύρων.....	165
6.2.4 Σύγκριση ως προς τη θέση της πηγής.....	165
6.2.5 Σύγκριση ως προς τον αριθμό των πηγών.....	166
Βιβλιογραφία.....	167

Κεφάλαιο 1

Υπολογιστική Ρευστοδυναμική (CFD)

Στο παρακάτω κεφάλαιο γίνεται λόγος για την τεχνολογία CFD (Computational Fluid Dynamics) και πιο συγκεκριμένα, αναφέρεται η εξέλιξή της, ο σκοπός της, η χρήση της, οι εφαρμογές της, καθώς και ποιά είναι τα βασικά στάδια μίας ανάλυσης CFD κατά τη διαδικασία επίλυσης ενός ρευστομηχανικού προβλήματος.

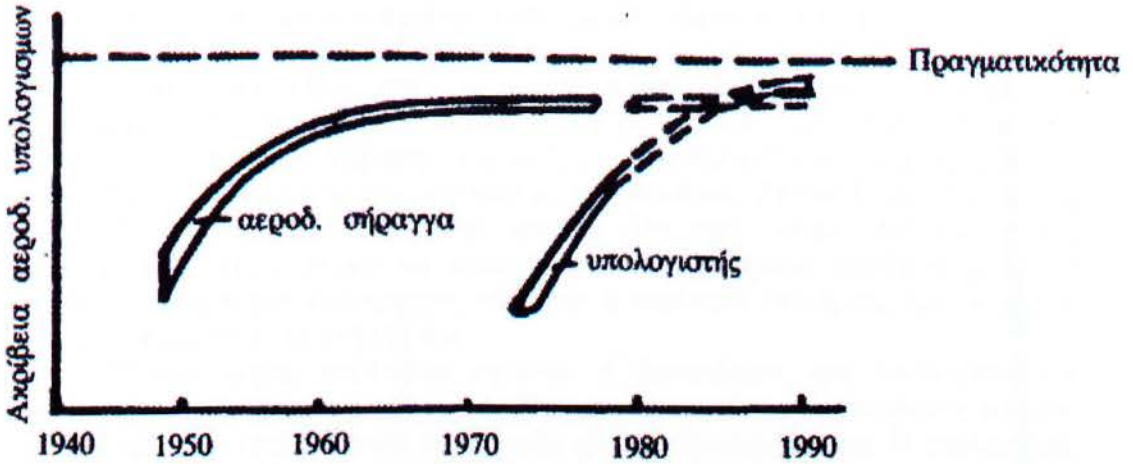
1.1 Η εξέλιξη της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής

Η ανάπτυξη και η εκτεταμένη χρήση των ηλεκτρονικών υπολογιστών τα τελευταία 30 χρόνια είχε μεγάλη επίδραση σχεδόν σε όλους τους τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας, τεχνικό, κοινωνικό, επιστημονικό. Η επίδραση των υπολογιστών στον τομέα της Μηχανικής των Ρευστών υπήρξε αρκετά σημαντική. Μέχρι το τέλος της δεκαετίας του 1960 οι λύσεις των προβλημάτων ρευστομηχανικής προέρχονταν είτε από πειραματική προσομοίωση των προβλημάτων σε αεροδυναμική σήραγγα, είτε από αναλυτικές λύσεις απλοποιημένων εξισώσεων με παραδοχές, των οποίων η αξιοπιστία ήταν αμφισβητήσιμη.

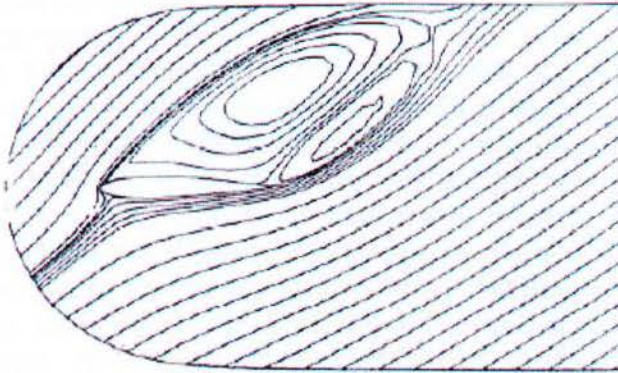
Η αεροδυναμική σήραγγα, η οποία έχει τόσο πλατιά χρήση στη μελέτη των αεροδυναμικών φαινομένων μπορεί να θεωρηθεί σαν μηχανισμός ολοκλήρωσης των διαφορικών εξισώσεων που εκφράζουν το πεδίο ροής. Συνήθως, τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από την αεροδυναμική σήραγγα αναφέρονται σε ολοκληρωτικά μεγέθη του πεδίου ροής, όπως ο συντελεστής άντωσης, C_L , και ο συντελεστής οπισθέλκουσας, C_D , σπανιότερα δε σε σημειακά μεγέθη του πεδίου ροής, όπως ταχύτητες και πιέσεις σε διάφορες θέσεις. Σήμερα, η συμμετοχή του ηλεκτρονικού υπολογιστή στη λύση των προβλημάτων της μηχανικής των ρευστών είναι σχεδόν πρωταρχική, ενώ σε αρκετές περιπτώσεις οι λύσεις που παρέχει ο ηλεκτρονικός υπολογιστής είναι αρκετά αξιόπιστες και δεν κρίνεται αναγκαίος ο έλεγχος των αριθμητικών αποτελεσμάτων με μετρήσεις.

Η εξέλιξη της υπολογιστικής ισχύος των μηχανών σε συνδυασμό με την ακρίβεια των μαθηματικών μοντέλων προσομοίωσης, σύντομα θα οδηγήσει σε μία κατάσταση, όπου η αξιοπιστία των ρευστομηχανικών υπολογισμών θα είναι μεγαλύτερη από την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της πειραματικής προσομοίωσης.

Σήμερα, χωρίς σοβαρές απλουστευτικές παραδοχές μπορούν να επιλυθούν αριθμητικά, δισδιάστατα τυρβώδη πεδία ροής, όπως αυτό που η λύση του παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.2.

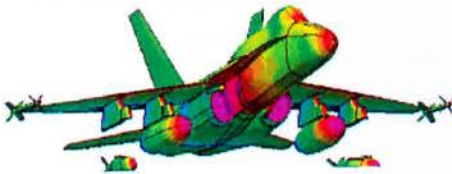


Σχήμα 1.1: Σύγκριση αξιοπιστίας Η/Υ και Αεροδυναμικής Σήραγγας

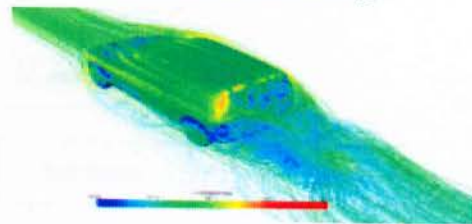


Σχήμα 1.2: Αεροτομή σε μεγάλη γωνία πρόσπτωσης με καθολική αποκόλληση.

Επίσης, επιχειρείται η επίλυση τρισδιάστατων πεδίων ροής, όπως της δυναμικής ροής γύρω από ολόκληρο αεροσκάφος ή της τρισδιάστατης ροής γύρω από ολόκληρο αυτοκίνητο, όπως φαίνεται στις εικόνες 1.1 και 1.2 αντίστοιχα.



Εικόνα 1.1: Προσομοίωση της Δυναμικής ροής γύρω από πλήρες αεροσκάφος.

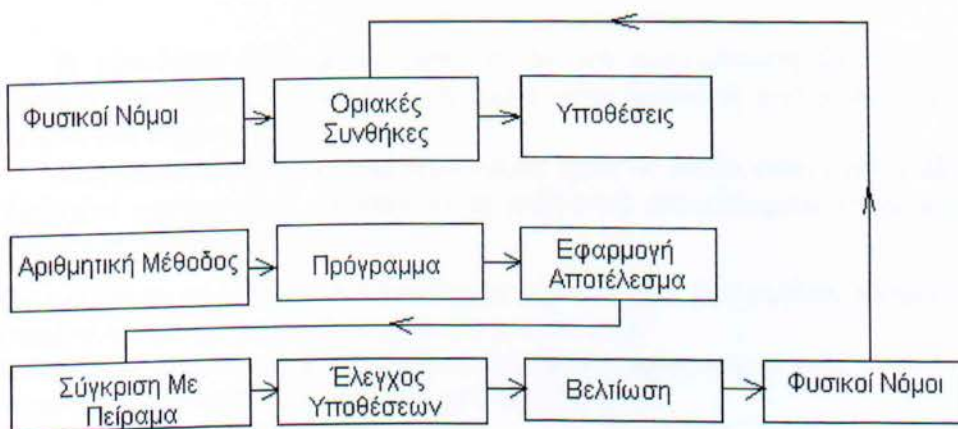


Εικόνα 1.2: Δυναμική ροή γύρω από αυτοκίνητο.

Ο ηλεκτρονικός υπολογιστής, όταν μπορεί αξιόπιστα να επιλύσει ένα πεδίο ροής, έχει πολύ μεγαλύτερες δυνατότητες από την εναλλακτική λύση της φυσικής προσομοίωσης του πεδίου αυτού σε αεροδυναμική σήραγγα, γιατί η πειραματική προσομοίωση του πεδίου ροής συνήθως δεν μπορεί να είναι πλήρης λόγω του φαινομένου της αλληλεπίδρασης της ροής με τα τοιχώματα της σήραγγας ή της αδυναμίας της σύγχρονης προσομοίωσης των αριθμών Reynolds και Mach της ροής. Ο υπολογιστής, όπως είναι φανερό δεν έχει τέτοιες δεσμεύσεις και περιορισμούς καθώς μπορεί να προσομοιώσει οποιοσδήποτε συνθήκες ροής. Ο μόνος προς το παρόν περιορισμός του είναι η ταχύτητα εκτέλεσης των πράξεων και η χωρητικότητα της μνήμης του.

Πολλές φορές συζητείται εκτενώς η δυνατότητα του υπολογιστή να αντικαταστήσει μελλοντικά πειράματα. Προς το παρόν τόσο ο υπολογιστής όσο και η πληθώρα των πειραματικών εφαρμογών αλληλοσυμπληρώνονται. Ο υπολογιστής όμως έχει πολύ μεγαλύτερο ρυθμό εξέλιξης αλλά και μείωσης του κόστους εκτέλεσης των αριθμητικών πράξεων. Στο μέλλον, όταν οι υπολογιστικές μέθοδοι θα έχουν βελτιωθεί και η ταχύτητα και η μνήμη των υπολογιστών θα έχει αυξηθεί, προβλέπεται ότι το μεγαλύτερο τμήμα της σχεδίασης των πειραματικών εφαρμογών θα γίνεται με τη βοήθεια του ηλεκτρονικού υπολογιστή και μόνο σε ορισμένες οριακές περιπτώσεις θα ελέγχονται πειραματικά.

Τέλος, ο ηλεκτρονικός υπολογιστής εκτός από τη χρησιμότητά του ως εργαλείο επίλυσης προβλημάτων πρακτικού ενδιαφέροντος συμβάλλει σημαντικά στον έλεγχο της ορθότητας των φυσικών υποθέσεων που συνυπάρχουν στις βασικές ρευστομηχανικές εξισώσεις ή σε απλουστευμένες μορφές τους. Ενδεικτικά η όλη μεθοδολογία επίλυσης προβλημάτων με υπολογιστή φαίνεται διαγραμματικά στο Σχήμα 1.3, όπου τα θεωρητικά αποτελέσματα που προκύπτουν από την αριθμητική λύση συγκρίνονται με πειραματικά. Η συμφωνία ή η διαφωνία της αριθμητικής και της πειραματικής λύσης οδηγεί στη βελτίωση των φυσικών υποθέσεων. Σήμερα, η μεγάλη ερευνητική προσπάθεια που καταβάλλεται διεθνώς εντοπίζεται στην ανάπτυξη μαθηματικών μοντέλων προσομοίωσης της τυρβώδους ροής.



Σχήμα 1.3: Διαδικασία ελέγχου φυσικών υποθέσεων.

1.2 Ορισμός Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής

Η Υπολογιστική Ρευστοδυναμική (CFD) ορίζεται ως μία τεχνική ανάλυσης βασιζόμενη σε υπολογιστές, η οποία χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη της ροής ρευστών, μετάδοσης θερμότητας, μεταφοράς μάζας, χημικών αντιδράσεων και άλλων σχετιζόμενων φυσικών και χημικών φαινομένων. Το CFD λύνει αριθμητικά τις μαθηματικές εξισώσεις που περιγράφουν τα φαινόμενα αυτά. Η Υπολογιστική Ρευστοδυναμική γίνεται κατανοητή με τους ακόλουθους ορισμούς.

Υπολογιστικός: Το υπολογιστικό κομμάτι της CFD σημαίνει πως χρησιμοποιούνται υπολογιστές για να λύσουν προβλήματα της ρευστοδυναμικής. Αυτό μπορεί να συγκριθεί με άλλες μεθόδους επίλυσης ανάλογων προβλημάτων τόσο θεωρητικών όσο και πειραματικών.

Ρευστό: Στον τεχνικό χώρο, παρά τη γενική αντίληψη, ένα ρευστό αναφέρεται σε κάτι που δεν είναι στερεό. Ένα ρευστό είναι μία μη στέρεα ουσία που δεν μπορεί να παραμείνει ακίνητη υπό διατμητική τάση. Για παράδειγμα, τόσο ο αέρας όσο και το νερό είναι ρευστά.

Δυναμική: Είναι η μελέτη των αντικειμένων σε κίνηση και οι δυνάμεις που εμπλέκονται. Η ρευστοδυναμική είναι η δυναμική των αντικειμένων που ρέουν.

Το CFD εξελίσσεται γρήγορα σε ένα ισχυρό εργαλείο που χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με συμβατικές σχεδιαστικές τεχνικές για την ανάλυση μηχανολογικών προβλημάτων.

1.3 Εφαρμογές της CFD

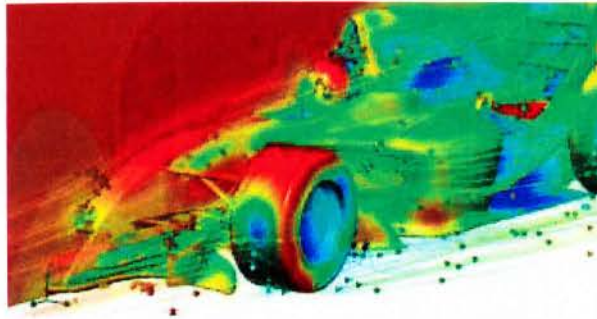
Η τεχνολογία CFD χρησιμοποιείται για την προσομοίωση βασισμένη στον σχεδιασμό, παρέχοντας ακριβή αποτελέσματα όσον αφορά τη ροή ρευστού μέσα ή γύρω από μια επιφάνεια.

Χρησιμοποιείται επίσης για περιπτώσεις κατά τις οποίες είναι σχεδόν αδύνατο να διεξαχθεί πείραμα ώστε να πάρουμε τα επιθυμητά αποτελέσματα, (προσομοίωση φυσικών φαινομένων) όπως:

- α) Προσομοίωση σε πραγματικές διαστάσεις και συνθήκες (αεροπλάνα, πλοία κτλ).
- β) Περιβαλλοντολογικές συνθήκες (αέρας, καιρός κτλ).
- γ) Επικίνδυνες δραστηριότητες (εκρήξεις, πυρκαγιές, ραδιενέργεια κτλ).
- δ) Φυσική (πλανητικές στοιβάδες, αστρική εξέλιξη κτλ).

Κάποιοι από τους βιομηχανικούς και μη τομείς, όπου χρησιμοποιείται η CFD αναφέρονται παρακάτω μαζί με κάποια παραδείγματα:

- **Αεροπορική βιομηχανία:** Προσομοίωση πλανητικής εισόδου διαστημοπλοίου, μοντελοποίηση αεροδυναμικής πυραύλων και συστήματα ώθησης.
- **Οικιακές συσκευές / Φωτισμός:** Προηγμένος σχεδιασμός οικιακών συσκευών όπως ψυγεία και ηλεκτρικές σκούπες.
- **Αυτοκίνηση:** Σχεδιασμός αγωνιστικών αυτοκινήτων Formula 1 (Εικόνα 1.6), προσομοίωση αεροδυναμικής, πακεταρίσματος και απαιτήσεων σχεδιασμού των οχημάτων.



Εικόνα 1.3: Ροή αέρα σε αγωνιστικό όχημα της F1.

- **Χημικά:** Εξοπλισμοί ροής, μετάδοσης θερμότητας και αντιδράσεων σε εξέλιξη όπως αντιδραστήρες και δοχεία πίεσης, διάσπαση όζοντος σε ρευστοποιημένο στρώμα.
- **Ηλεκτρονική και ημιαγωγοί:** Μοντελοποίηση ηλεκτρονικής ψύξης όπως αφαίρεση θερμότητας από αυξανόμενα μικρονόμια και πιο ισχυρά ηλεκτρονικά, προσομοίωση αύξησης κρυστάλλου.
- **Γυαλί και ίνες:** Εκβολή γυάλινων ινών και προσομοίωση χύτευσης σωλήνα ακτίνας καθόδου.
- **HVAC:** Προσομοίωση ενός συστήματος κλιματισμού, πρόγνωση της ροής του αέρα γύρω από τα κτίρια, πεδίο ροής σε έναν ανεμιστήρα (Εικόνα 1.4).



Εικόνα 1.4: Ροή σε έναν φυγοκεντρικό ανεμιστήρα.

- **Περιβαλλοντολογία:** Διερεύνηση φυσικών και μηχανικώς επαγόμενων ροών σε αεριζόμενες λιμνοθάλασσες, προσομοίωση του πεδίου ροής σε φυγοκεντρική αντλία κτλ.
- **Βιοϊατρική:** Σχεδιασμός και κατασκευή ιατρικών συσκευών όπως τεχνητές καρδιακές βαλβίδες (Εικόνα 1.5) και αντλίες αίματος.



Εικόνα 1.5: Κατανομή πίεσης σε βαλβίδα καρδιάς.

- **Ναυτιλία:** Σχεδιασμός πλωτού σκάφους, ανάλυση ροής σωληνώσεων.
- **Υλικά:** Εκβολή και σχεδιασμός καλουπιού, χύτευση υπό πίεση
- **Παραγωγή ισχύος:** Σχεδιασμός στροβιλομηχανής, σχεδιασμός καυστήρα.
- **Ωκεανογραφία:** Παλιρροιακές ροές, ωκεάνια ρεύματα.

1.4 Πλεονεκτήματα CFD

Η χρήση της τεχνολογίας CFD, πλέον υπερέρχει και προτιμάται από τη διεξαγωγή πειραμάτων σε διάφορες μηχανολογικές εφαρμογές για τους παρακάτω λόγους:

- **Καθιστά δυνατή την οπτικοποίηση του σχεδιασμού:** Υπάρχουν αρκετές συσκευές και συστήματα για τις οποίες είναι δύσκολο να κατασκευαστούν πρωτότυπα. Συχνά, η ανάλυση CFD δείχνει μέρη του συστήματος ή φαινόμενα που συμβαίνουν στο σύστημα που δε θα ήταν ορατά. Το CFD παρέχει έτσι ένα μέσο οπτικοποίησης και διευκολύνει την κατανόηση των σχεδίων.
- **Εξοικονόμηση χρόνου:** Η διεξαγωγή ενός πειράματος ταυτίζεται με μία χρονοβόρα διαδικασία μετρήσεων και υπολογισμών. Μία ανάλυση CFD είναι σαφώς πιο γρήγορη στη διεξαγωγή της, από τη συντέλεση ενός πραγματικού πειράματος, καθώς η προσομοίωσή του, αλλά και τα εκατομμύρια των υπολογισμών, πραγματοποιούνται

σε πολύ πιο σύντομο χρονικό διάστημα. Μικρός χρονικός κύκλος σημαίνει ότι χρήσιμα δεδομένα μπορεί να εισαχθούν νωρίτερα στο στάδιο της σχεδίασης.

- **Ασφαλής στη χρήση:** Χρησιμοποιώντας CFD, μπορεί κανείς να κατασκευάσει ένα υπολογιστικό μοντέλο που αναπαριστά ένα σύστημα ή μία συσκευή που θέλει να μελετήσει σε οποιοσδήποτε συνθήκες αφαιρώντας έτσι την παραμικρή πιθανότητα ατυχήματος που θα υπήρχε κατά την πειραματική διαδικασία.
- **Παρέχει μεγάλο όγκο πληροφοριών:** Το CFD είναι ένα εργαλείο για πρόγνωση του τι θα συμβεί υπό ορισμένες συνθήκες, μπορεί να αναλύσει αρκετές υποθετικές επιλογές πολύ γρήγορα. Δίνονται οι μεταβλητές και δίνει τα σχετικά αποτελέσματα. Έτσι, σε σύντομο χρονικό διάστημα μπορεί κανείς να ελέγξει πολλές παραλλαγές μέχρι να φτάσει στο βέλτιστο αποτέλεσμα.
- **Βελτιώνει τον σχεδιασμό:** Καλύτερος και γρηγορότερος σχεδιασμός ή ανάλυση οδηγούν σε μικρότερους κύκλους σχεδιασμού.
- **Εξοικονόμηση χρημάτων:** Η χρήση φυσικών πειραματισμών και ελέγχων για την απόκτηση ουσιαστικών μηχανολογικών δεδομένων για τον σχεδιασμό μπορεί να έχει υπερβολικά υψηλό κόστος. Οι υπολογιστικές προσομοιώσεις είναι σχετικά φθηνές σε σύγκριση με τη διεξαγωγή πειραμάτων.
- **Προσομοιώνει αληθινές συνθήκες:** Πολλές διαδικασίες ροής και μετάδοσης θερμότητας δεν μπορούν να ελεγχθούν (εύκολα). Το CFD παρέχει την ικανότητα της θεωρητικής προσομοίωσης οποιασδήποτε φυσικής κατάστασης.
- **Προσομοιώνει τις ιδανικές συνθήκες:** Το CFD επιτρέπει μεγάλο έλεγχο της φυσικής διαδικασίας και παρέχει την ικανότητα απομόνωσης ειδικών φαινομένων για μελέτη. Για παράδειγμα, μια διαδικασία μετάδοσης θερμότητας μπορεί να εξιδανικευτεί με αδιαβατικές, σταθερές ροές θερμότητας ή σταθερά θερμοκρασιακά όρια.

1.5 Περιορισμοί CFD

Η ορθότητα μιας ανάλυσης CFD εξαρτάται από την ακρίβεια της μοντελοποιημένης περιοχής και της ικανότητας και ταχύτητας του υπολογιστή. Μερικά λάθη, όπως λάθη στρωγυλοποίησης του υπολογιστή, είναι αναπόφευκτα. Άλλα λάθη μπορούν να διορθωθούν με πιο ακριβή μοντελοποίηση της περιοχής. Οι περιορισμοί της ανάλυσης CFD είναι οι παρακάτω.

- **Φυσικά μοντέλα:** Οι λύσεις της CFD βασίζονται σε φυσικά μοντέλα διαδικασιών του πραγματικού κόσμου (π.χ. στρωβιλισμός, συμπίεση, χημεία, πολυφασική ροή κτλ). Οι λύσεις που λαμβάνονται μέσω CFD μπορεί να είναι τόσο ακριβείς όσο ακριβή είναι τα μοντέλα στα οποία βασίζονται.

- **Οριακές συνθήκες:** Ακόμα έχουμε κάποια σφάλματα στις οριακές συνθήκες. Όπως με τα μαθηματικά μοντέλα, η ακρίβεια της λύσης είναι τόσο καλή όσο και οι αρχικές/οριακές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν (δηλαδή, πόσο ρεαλιστικές είναι).
- **Αριθμητικά λάθη:** Η επίλυση με τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή αναπόφευκτα μας οδηγεί και σε αριθμητικά σφάλματα. Σφάλματα στρογγυλοποίησης εξαιτίας της πεπερασμένης μνήμης αποθήκευσης των αριθμών και σφάλματα αποκοπής εξαιτίας της μετατροπής διαφορικών εξισώσεων σε αλγεβρικές. Τα σφάλματα στρογγυλοποίησης θα υπάρχουν πάντα (αν και συνήθως είναι μικρά) ενώ τα σφάλματα αποκοπής τείνουν στο μηδέν με την πύκνωση του πλέγματος ή με τη χρήση σχημάτων μεγαλύτερης ακρίβειας.

1.6 Ανάλυση των βασικών βημάτων του CFD

Για να λυθεί ένα πρόβλημα μέσω της CFD διαδικασίας πρέπει να ακολουθήσουμε μία μεθοδολογία ώστε να καταφέρουμε να έχουμε αξιόπιστα αποτελέσματα. Η μεθοδολογία αυτή περιγράφεται παρακάτω:

α) Καθορισμός Προβλήματος & Προεπεξεργασία

1. Καθορισμός στόχων μοντελοποίησης.
2. Καθορισμός πεδίου που θα επιλυθεί (χώρος & χρόνος).
3. Σχεδιασμός & κατασκευή του υπολογιστικού πλέγματος.

β) Εκτέλεση των Υπολογισμών

1. Δημιουργία ενός αριθμητικού, μαθηματικού μοντέλου.
2. Επίλυση και παρακολούθηση της λύσης.

γ) Επεξεργασία Αποτελεσμάτων

1. Έλεγχος των αποτελεσμάτων.
2. Θεώρηση μετατροπών στο μοντέλο.

ΑΝΑΛΥΤΙΚΑ

Καθορισμός Στόχων Μοντελοποίησης

- 1) Τι είδους αποτελέσματα ζητούμε και πως θα τα χρησιμοποιήσουμε;
- 2) Ποια μαθηματικά μοντέλα θα χρειαστεί να ενσωματώσουμε στην ανάλυση;
- 3) Πολυφασικά, τυρβώδους, χημικών αντιδράσεων;
- 4) Τι βαθμό ακρίβειας χρειαζόμαστε;
- 5) Πόσο γρήγορα χρειαζόμαστε τα αποτελέσματα;

Καθορισμός του πεδίου που θα επιλυθεί

- 1) Πώς θα απομονωθεί ένα κομμάτι του ολικού φυσικού συστήματος;

- 2) Που θα αρχίζει και θα τελειώνει το υπολογιστικό πεδίο;
- 3) Τι είδους οριακές συνθήκες θα χρειαστούν;
- 4) Μπορεί το πρόβλημα να απλοποιηθεί στις δύο διαστάσεις, υπάρχει ροϊκή και γεωμετρική συμμετρία;

Σχεδιασμός & Κατασκευή του Πλέγματος

- 1) Θα χρησιμοποιηθεί εξαεδρικό/ τετραπλευρικό ή τετραεδρικό/ τριγωνικό πλέγμα, υβριδικό, μη συμβατό πλέγμα;
- 2) Τι βαθμός ανάλυσης (resolution) πλέγματος απαιτείται σε κάθε τμήμα του πεδίου;
- 3) Θα χρησιμοποιηθεί προσαρμογή του πλέγματος για αύξηση της ανάλυσης;
- 4) Πόσα στοιχεία πλέγματος απαιτούνται για το πρόβλημα;
- 5) Διαθέτω επαρκή υπολογιστική ισχύ;

Επιλογή τύπου πλέγματος

- 1) Για απλές γεωμετρίες, τα Τετραπλευρικά - Εξαεδρικά πλέγματα δίνουν λύσεις υψηλής ακρίβειας με λιγότερα στοιχεία από ότι τα Τριγωνικά - Τετραεδρικά πλέγματα.
- 2) Για σύνθετες γεωμετρίες, τα Τετραπλευρικά - Εξαεδρικά πλέγματα δεν προσφέρουν κάποιο πλεονέκτημα, οπότε συνήθως χρησιμοποιούνται Τριγωνικά - Τετραεδρικά πλέγματα.
- 3) Για αλλαγή μερών σε μελέτες σχεδιασμού, για πλεγματοποίηση πολύπλοκων γεωμετριών ή όταν απαιτείται διαφορετική πυκνότητα πλέγματος στον χώρο χρησιμοποιείται ασύμμορφο πλέγμα.

Δημιουργία ενός αριθμητικού, μαθηματικού μοντέλου

Για κάθε συγκεκριμένο πρόβλημα πρέπει να:

- 1) Επιλέξουμε τα κατάλληλα μαθηματικά μοντέλα (τυρβώδους, καύσης, πολυφασικής ροής, κ.λπ.).
- 2) Να ορίσουμε τις ιδιότητες των υλικών (ρευστά, στερεά, μίγματα).
- 3) Να προδιαγράψουμε τις συνθήκες λειτουργίας (π.χ. βαρύτητα, πίεση λειτουργίας).
- 4) Να προδιαγράψουμε τις οριακές συνθήκες σε όλα τα όρια.
- 5) Να δώσουμε μία αρχική λύση.
- 6) Να ρυθμίσουμε τη διαδικασία της επίλυσης (solver controls).
- 7) Να ρυθμίσουμε την παρακολούθηση της λύσης.

Επίλυση και παρακολούθηση της λύσης

Οι διακριτοποιημένες (αλγεβρικές) εξισώσεις επιλύονται επαναληπτικά. Απαιτείται ένας αριθμός επαναλήψεων, έως ότου πάρουμε λύση με σύγκλιση. Η σύγκλιση επιτυγχάνεται όταν:

- 1) Οι αλλαγές μεταξύ λύσεων διαδοχικών επαναλήψεων είναι αμελητέες.
- 2) Τα υπόλοιπα είναι ένας καλός δείκτης για τη σύγκλιση.

Η ακρίβεια μιας λύσης που έχει συγκλίνει εξαρτάται από:

- 1) Την καταλληλότητα και την ακρίβεια των μαθηματικών μοντέλων.
- 2) Την πυκνότητα του πλέγματος (ανεξαρτησία).
- 3) Το «στήσιμο» του προβλήματος (Problem setup).

Έλεγχος των αποτελεσμάτων

Εξετάζουμε τα αποτελέσματα για να ελέγξουμε τη λύση για χρήσιμα συμπεράσματα. Η οπτικοποίηση μπορεί να δώσει πολύτιμες πληροφορίες για:

- 1) Το πώς είναι η βασική δομή της ροής.

- 2) Το αν υπάρχει αποκόλληση.
- 3) Το αν δημιουργούνται κρουστικά κύματα, διατμητικές στοιβάδες κτλ.
- 4) Το αν έχουν προβλεφθεί τα βασικά στοιχεία του προβλήματος.
- 5) Το αν τα μαθηματικά μοντέλα και οι οριακές συνθήκες είναι κατάλληλες.
- 5) Το αν υπάρχει τοπικό πρόβλημα σύγκλισης.

Τα εργαλεία για αριθμητική αναφορά των αποτελεσμάτων χρησιμοποιούνται για ποσοτικές απαντήσεις για:

- 1) Την άνωση και την οπισθέλκουσα (γενικά για δυνάμεις σε τοιχώματα).
- 2) Μέση τιμή συντ/στή μετάδοσης θερμότητας.
- 3) Μέσες τιμές σε επιλεγμένες επιφάνειες/όγκους.

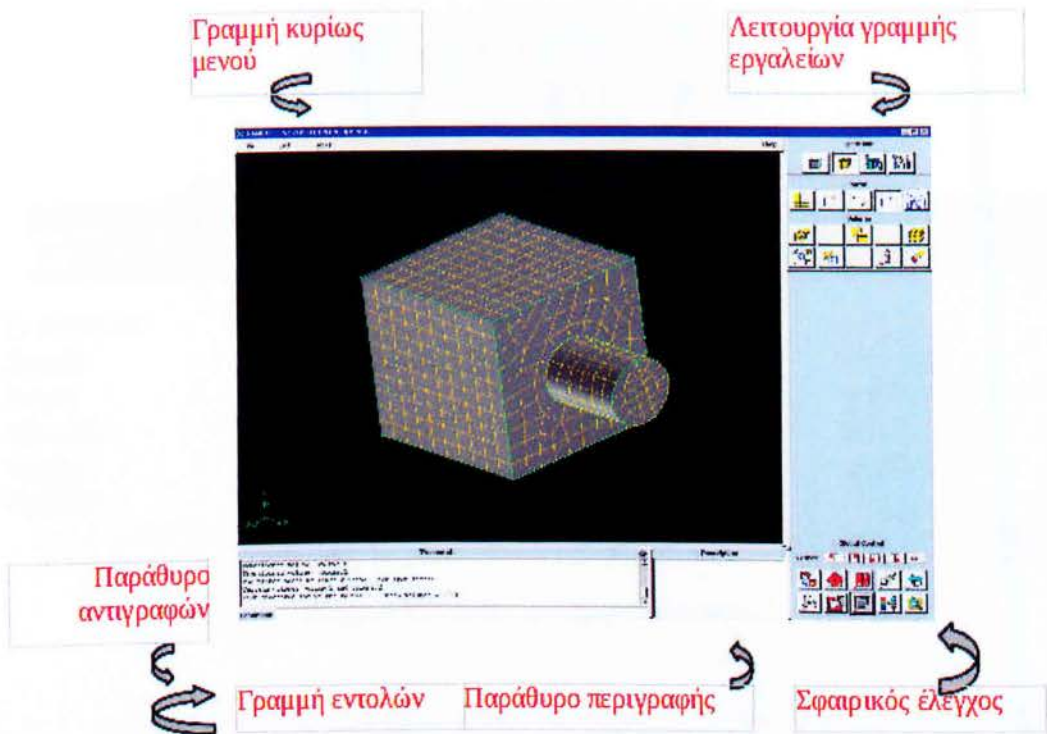
Θεώρηση μετατροπών στο μοντέλο

- 1) Είναι τα μαθηματικά μοντέλα τα κατάλληλα;
- 2) Είναι η ροή τυρβώδης;
- 3) Είναι η ροή μη μόνιμη;
- 4) Υπάρχουν φαινόμενα συμπεστότητας;
- 5) Υπάρχουν 3D φαινόμενα;
- 6) Είναι οι οριακές συνθήκες οι κατάλληλες;
- 7) Είναι αρκετά μεγάλο το υπολογιστικό πεδίο;
- 8) Είναι οι οριακές συνθήκες κατάλληλες & συμβατές;
- 9) Είναι οι οριακές συνθήκες λογικές/ρεαλιστικές;
- 10) Είναι κατάλληλο το πλέγμα;
- 11) Μπορεί να γίνει προσαρμογή για βελτίωση των αποτελεσμάτων;
- 12) Άλλαξε η λύση με την προσαρμογή, ή θεωρείται πλέον ανεξάρτητη του πλέγματος;
- 13) Υπάρχει σκοπιμότητα για πύκνωση του πλέγματος κοντά στα όρια;

1.7 Εισαγωγή στο GAMBIT

Το σχεδιαστικό πακέτο Gambit (**Geometry And Mesh Building Intelligent Toolkit**) είναι ένα λογισμικό, στο οποίο ο σχεδιαστής που θέλει να προσομοιώσει ένα μοντέλο για ένα φαινόμενο, μπορεί να σχεδιάσει το μοντέλο και να κατασκευάσει το πλέγμα του ώστε στη συνέχεια να είναι σε θέση να επιλύσει φαινόμενα ροής ρευστών, μεταφοράς θερμότητας και άλλες επιστημονικές εφαρμογές.

Το Gambit περιέχει όλα τα βοηθήματα για την κατασκευή και την εισαγωγή της γεωμετρίας, ενός είτε απλού είτε πολύπλοκου σχήματος. Μοντελοποιεί στερεά βάση συστήματος ACIS, μπορεί να εισαγάγει STEP, Parasolid, IGES κτλ, καθώς επίσης περιέχει δομημένα και μη εξάεδρα, τετράεδρα, πυραμίδες και πρίσματα. Επίσης, δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη να καθαρίσει και να τροποποιήσει τα εισαγόμενα στοιχεία.

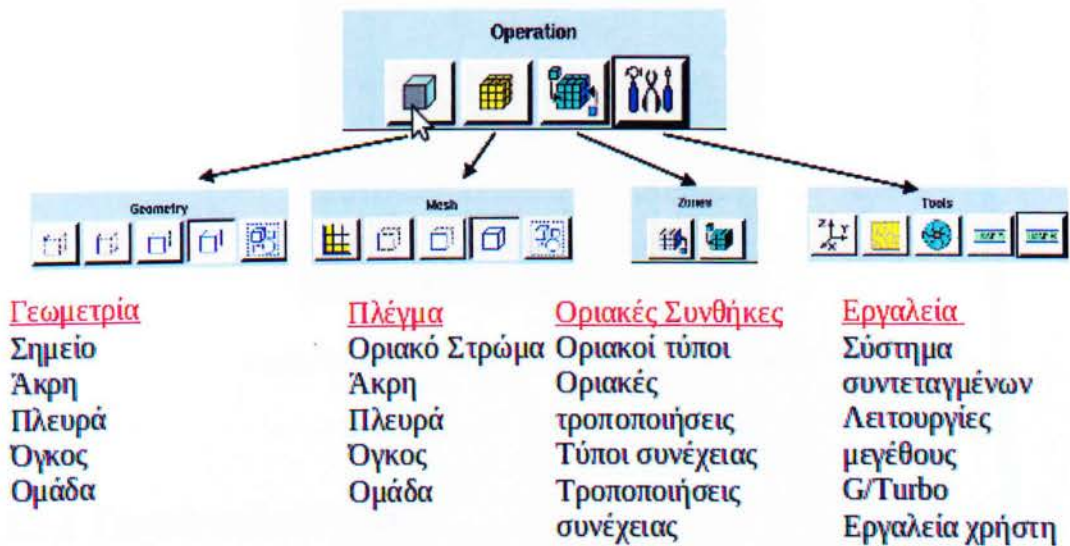


Εικόνα 1.6: Επιφάνεια εργασίας γραφικών (graphical user interface).

Το Gambit είναι ο εύκολος τρόπος για την παραγωγή πλέγματος για όλους τους λύτες του Fluent (συμπεριλαμβανομένων των FIDAP και POLYFLOW), όπου εξετάζει ποιοτικά το πλέγμα για την καλύτερη δυνατή κατασκευή του. Τέλος μπορεί να δημιουργήσει ζώνες οριακών συνθηκών. Είναι ένα από τα καλύτερα εργαλεία για όλες τις παραπάνω ενέργειες, πράγμα που το καθιστά ένα αναπόσπαστο κομμάτι για τη μοντελοποίηση FLUENT μηχανικών εφαρμογών.

1.7.1 Εργαλεία χειρισμού

Τα εργαλεία χειρισμού του Gambit, όπως φαίνονται στο παρακάτω σχήμα καλύπτουν σχεδόν όλους τους τρόπους κατασκευής γεωμετρίας, πλέγματος καθώς και εισαγωγής οριακών συνθηκών. Ύστερα από μικρή εξοικείωση, ο χρήστης μπορεί εύκολα να χρησιμοποιήσει όλες τις λειτουργίες του προγράμματος.



Εικόνα 1.7: Εργαλεία χειρισμού - σχεδίασης.

Δημιουργούμε και κατασκευάζουμε το πλέγμα της περιοχή του FLUENT για προβλήματα ροής και της περιοχής του στερεού για μετάδοση θερμότητας (και τη δομική ανάλυση για τους χρήστες FIDAP). Τυπικά το καταφέρνουμε κατασκευάζοντας και δουλεύοντας με απλά εισαγόμενα σχήματα.

Ορολογία:

Vertex: Σημείο.

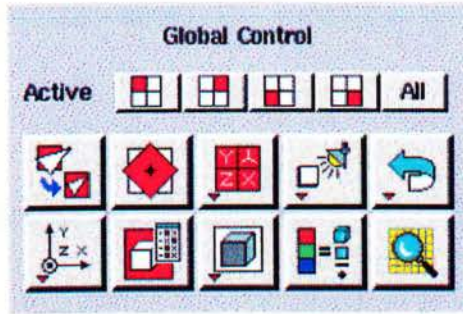
Edge: Καμπύλη η οποία ορίζεται από ένα τουλάχιστον σημείο (στην περίπτωση του ενός σημείου, η πλευρά σχηματίζει έναν βρόγχο).

Face: Επιφάνεια (όχι απαραίτητα επίπεδη) που ορίζεται από τουλάχιστον μία πλευρά (στην περίπτωση μίας πλευράς, η πλευρά σχηματίζει έναν βρόγχο).

Volume: Γεωμετρία στερεού που μπορεί να θεωρηθεί και σαν αεροστεγές σύνολο ενωμένων επιφανειών.

Το κάθε είδος από τα παραπάνω προσδιορίζεται από το χρώμα: Vertex (άσπρο), Edge (κίτρινο), Face (ανοιχτό μπλε), Volume (πράσινο), Group (σκούρο πράσινο). Όταν κάποιο από αυτά συνδέεται (διαστασιακά) παίρνει το πιο πάνω χρώμα.

Επίσης, υπάρχει και η γενική γραμμή εργαλείων ελέγχου λειτουργιών, όπου περιέχει 15 ενεργά κουμπιά εντολών. Η πάνω σειρά επιτρέπει την ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση ξεχωριστών τεταρτημορίων γραφικών παραθύρων ενώ η κάτω επιτρέπει τον έλεγχο της εμφάνισης των γραφικών παραθύρων ή του μοντέλου που φαίνεται στα παράθυρα αυτά, καθώς και τις επιλογές undo και redo.



Εικόνα 1.8: Γενική γραμμή εργαλείων ελέγχου λειτουργιών.

1.7.2 Γενικά περί πλέγματος

Για να περιορίσουμε το γενικό μέγεθος του πλέγματος, περιορίζουμε τα μικρά κελιά στις περιοχές που χρειάζεται (για παράδειγμα όπου περιμένουμε μεγάλες κλίσεις), έτσι ώστε τα αποτελέσματα να είναι πιο ακριβή. Ελέγχουμε τη διανομή του μεγέθους των κελιών στις ακμές, στις επιφάνειες και στους όγκους, όπου και μπορεί να γίνει απευθείας το πλέγμα. Με αυτό τον τρόπο παράγεται ένα ομοιόμορφο πλέγμα εκτός και αν χρησιμοποιείται ένα προεπιλεγμένο πλέγμα με λειτουργίες μεγέθους.

Μπορεί να γίνει προεπιλογή πλέγματος, όπου το πλέγμα των επιφανειών μπορεί να βαθμονομηθεί (ανάλογα με το μέγεθος του διαστήματος των ακμών). Η βαθμονομημένη ακμή χρησιμοποιείται για να ελεγχθεί η διανομή του μεγέθους των κελιών στο πλέγμα της επιφάνειας και έτσι ελέγχοντας το μέγεθος των κελιών στο πλέγμα της επιφάνειας, μας επιτρέπει να ελέγξουμε το μέγεθος των κελιών στο πλέγμα του όγκου.

1.8 Εισαγωγή στο Fluent

Με την πάροδο του χρόνου, τα διάφορα εμπορικά λογισμικά προγράμματα έχουν βοηθήσει και φυσικά εξακολουθούν να βοηθούν τις περισσότερες εταιρίες (βιομηχανικές, κατασκευαστικές, ιατρικές κτλ), καθώς αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της έρευνας και της μελέτης τους.

Ένας από τους κυριότερους εκπροσώπους των εμπορικών λογισμικών προγραμμάτων είναι το FLUENT, του οποίου οι δυνατότητες καθιστούν εφικτή τη λήψη χρήσιμων συμπερασμάτων και αποτελεσμάτων, σε αρκετές εφαρμογές

προσομοίωσης σε περιβάλλον κανονικών συνθηκών, σε ικανοποιητικό χρονικό διάστημα.

1.8.1 Εισαγωγή και έλεγχος πλέγματος

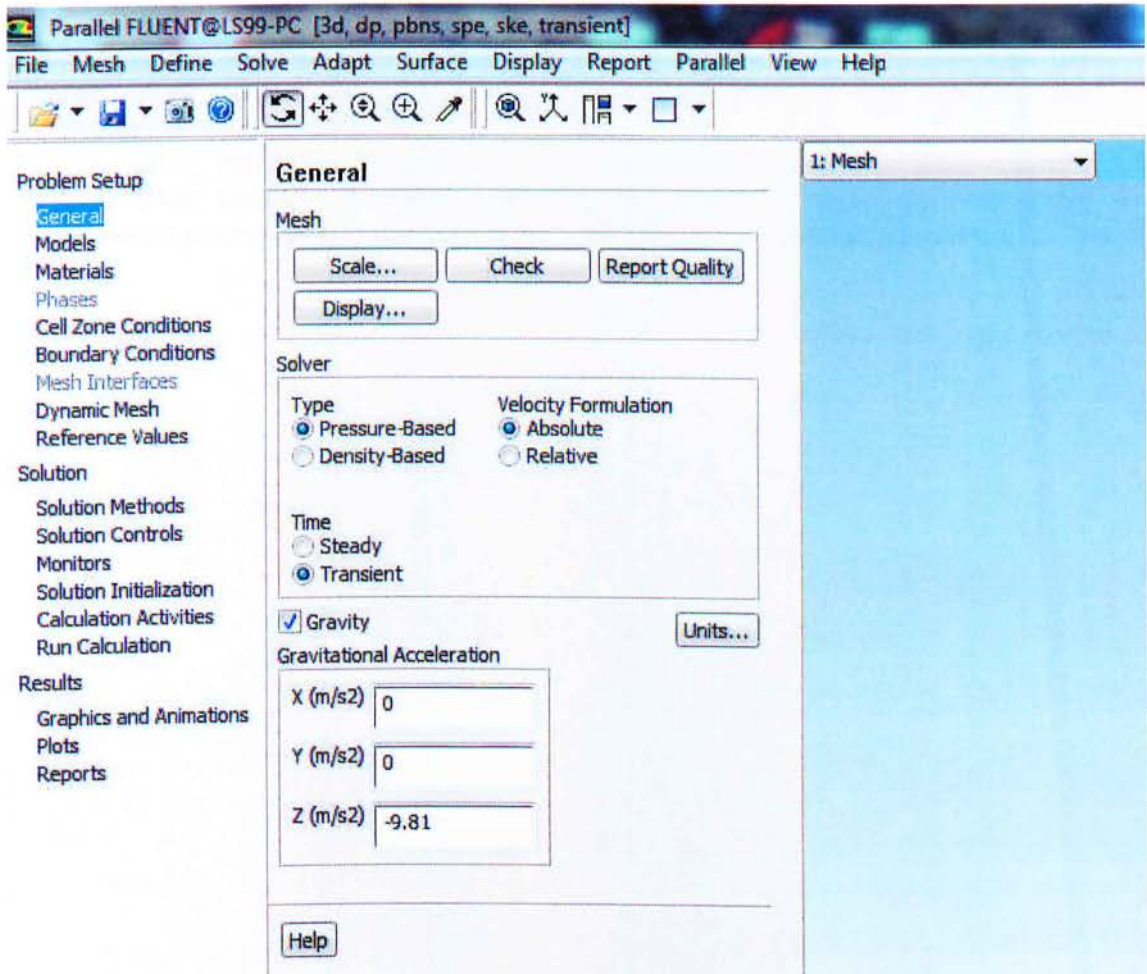
Όπως έχουμε αναφέρει, η δημιουργία του πλέγματος είναι μια λειτουργία η οποία πραγματοποιείται στο λογισμικό πρόγραμμα Gambit. Παρόλα αυτά, με την εισαγωγή του στο λογισμικό πρόγραμμα Fluent, ελέγχεται η λειτουργικότητα και η αξιοπιστία του καθώς το Fluent είναι αυτό το οποίο θα διαβάσει το πλέγμα και θα ελέγξει αν είναι το κατάλληλο για την εκάστοτε εφαρμογή ή αν πρέπει να γυρίσουμε πίσω στο Gambit για επιπλέον μορφοποίησή του.

1.8.2 Διαδικασία επίλυσης προβλήματος

Αφού κατασκευάσουμε τη γεωμετρία, δημιουργήσουμε το κατάλληλο πλέγμα και βάλουμε τις οριακές συνθήκες, επιλέγουμε τις κατάλληλες μεθόδους επίλυσης (solvers). Μία από αυτές είναι και το FLUENT.

Στο menu του FLUENT μπορούμε να επιλέξουμε τις ακόλουθες λειτουργίες μέσω των εντολών του GUI (Graphical Users Interface):

- 1) Εισαγωγή και scaling πλέγματος.
- 2) Έλεγχος πλέγματος.
- 3) Επιλογή φυσικών μοντέλων.
- 4) Καθορισμός ιδιοτήτων υλικών.
- 5) Καθορισμός συνθηκών λειτουργίας (operating conditions).
- 6) Καθορισμός οριακών συνθηκών (boundary conditions).
- 7) Καθορισμός solver controls.
- 8) Καθορισμός ελέγχου σύγκλισης.
- 9) Υπολογισμός και παρακολούθηση λύσης.
- 10) Επεξεργασία αποτελεσμάτων.



Σχήμα 1.9: Μενού Fluent - GUI (Graphical Users Interface).

1.8.3 Επεξεργασία Αποτελεσμάτων

Ένα ακόμη στοιχείο της ξεχωριστής δομής του FLUENT είναι οι διάφορες μέθοδοι με τις οποίες παρουσιάζει τα αποτελέσματα των υπολογισμών. Έχει τη δυνατότητα παρουσίασης γραφημάτων (γραφικών παραστάσεων), εικονικών προσομοιώσεων εκφράζοντας την ποσοτική αλλαγή μίας θερμοδυναμικής ιδιότητας ή ενός φυσικού μεγέθους (π.χ. θερμοκρασία, ταχύτητα) με διαφορετικό χρώμα, σε όλο το μήκος της προς εξέταση γεωμετρίας ή επιφάνειας. Επίσης έχει τη δυνατότητα απεικόνισης γραμμών ροής και διανυσμάτων, δείχνοντας με αυτόν τον τρόπο την κίνηση και γενικότερα τη συμπεριφορά του ρευστού μέσα, πάνω ή γύρω από μία επιφάνεια.

Οι δυνατότητες αυτές αναπαράστασης των αποτελεσμάτων σίγουρα αποτελούν για τον εκάστοτε μελετητή μηχανικό σημαντική βοήθεια καθώς με τον τρόπο αυτό μπορεί να έχει σαφή και πλήρη εικόνα του προβλήματος ελαχιστοποιώντας την πιθανότητα λάθους.

Τέλος, πρέπει να αναφερθεί ότι τα αποτελέσματα του Fluent είναι συμβατά και με άλλα προγράμματα αναπαράστασης (γραφημάτων, προσομοιώσεων κτλ), επομένως ο μελετητής έχει και την επιλογή χρήσης των προγραμμάτων αυτών.

Κεφάλαιο 2

Φωτιά σε κλειστό χώρο

Στο παρακάτω κεφάλαιο γίνεται λόγος για τα χαρακτηριστικά και την εξέλιξη μιας πυρκαγιάς σε έναν κλειστό χώρο, ώστε να κατανοήσουμε καλύτερα το εν λόγω φυσικό φαινόμενο.

2.1 Περιγραφή του φαινομένου - κύρια χαρακτηριστικά

Ο όρος «φωτιά σε κτίριο» χρησιμοποιείται για την περιγραφή της μη ελεγχόμενης καύσης σε κάποιον κλειστό χώρο. Στην περίπτωση αυτή, η φωτιά εξελίσσεται ελεύθερα και οι ρυθμοί πυρόλυσης και έκλυσης θερμότητας επηρεάζονται, αρχικά, μόνο από τα φαινόμενα της καύσης και όχι από τα όρια του δωματίου, τα οποία επηρεάζουν την φωτιά μόνο όταν αυτή αυξηθεί σε μέγεθος. Στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζεται η εξέλιξη του ρυθμού έκλυσης θερμότητας συναρτημένη του χρόνου. Στην περίπτωση που ο αερισμός είναι επαρκής, η φωτιά σε ένα κτίριο μπορεί να διαχωριστεί σε τρία βασικά στάδια:

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

β) Την πλήρως ανεπτυγμένη φωτιά (fully developed fire) ή φωτιά ύστερα από την πλήρη ανάφλεξη, κατά τη διάρκεια της οποίας όλα τα καύσιμα αντικείμενα μέσα στον χώρο έχουν αρχίσει να καίγονται και οι φλόγες καλύπτουν πλήρως τον χώρο.

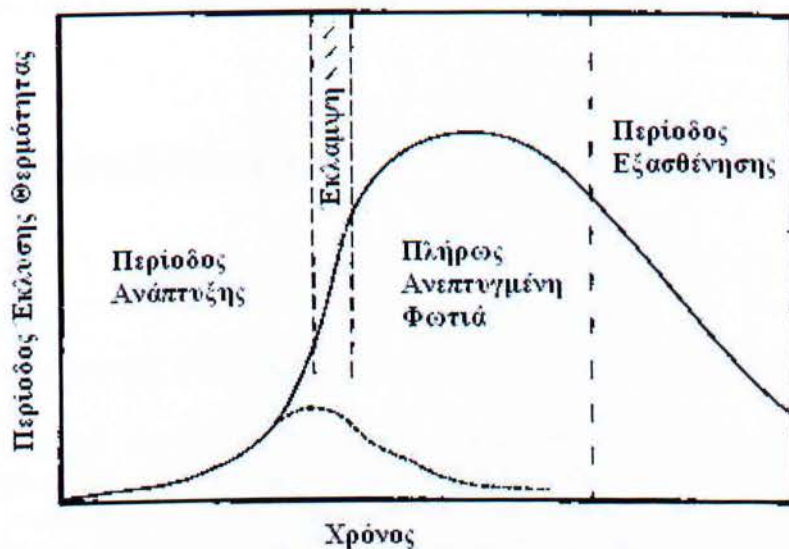
γ) Την περίοδο εξασθένησης (decay period), η οποία ορίζεται συνήθως ως η περίοδος κατά την οποία η μέση θερμοκρασία έχει πέσει στο 80% της μέγιστης τιμής της.

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

Οποιοσδήποτε δεν έχει καταφέρει να διαφύγει από ένα δωμάτιο πριν την «πλήρη ανάφλεξη» έχει λίγες πιθανότητες να επιβιώσει.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1, κατά τη διάρκεια της πλήρως αναπτυγμένης φωτιάς ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας φτάνει στο μέγιστο ενώ μεγιστοποιείται και η

απειλή προς γειτονικούς χώρους και πιθανώς γειτονικά κτίρια. Εάν το μέγεθος του κτιρίου το επιτρέπει, οι φλόγες, βγαίνοντας από τα όποια ανοίγματα, μεταδίδουν τη φωτιά είτε εσωτερικά (διαμέσου των ανοιχτών εσωτερικών θυρών) είτε εξωτερικά (διαμέσου των παραθύρων). Συνήθως κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου επέρχεται η μέγιστη δομική καταστροφή στο κτίριο λόγω της οποίας μπορεί να προκληθεί η μερική ή ολική κατάρρευσή του. Κατά τη διάρκεια του επόμενου σταδίου ο ρυθμός καύσης μειώνεται καθώς το καύσιμο σιγά - σιγά εξαντλείται.



Σχήμα 2.1: Η εξέλιξη μιας τυπικής φωτιάς σε ένα κτίριο συναρτήσει του χρόνου.

2.1.1 Φαινόμενα Μεταφοράς

Στις πυρκαγιές λόγω διαφόρων συνθηκών (καπνός, φλόγες κ.λπ.) έχουμε φαινόμενα μεταφοράς, δηλαδή μεταφορά μάζας, μεταφορά ορμής και μετάδοση θερμότητας.

1) Μεταφορά Μάζας

Με τον όρο «μεταφορά μάζας» εννοούμε τη διεργασία στην οποία έχουμε «διακίνηση» μάζας. Η διακίνηση αυτή οφείλεται στη διαφορά συγκέντρωσης των συστατικών του συστήματος που προκαλεί η καύση.

2) Μεταφορά Ορμής

Με τον όρο «μεταφορά ορμής» εννοούμε τη διεργασία στην οποία έχουμε «διακίνηση» ορμής.

Κατά τη διάρκεια μίας πυρκαγιάς, το φαινόμενο δικαιολογείται με τη μοριακή συμπεριφορά των αερίων: κάθε μόριο με μάζα m , όταν κινείται με ταχύτητα u , έχει

ορμή ίση με το γινόμενο $m \cdot v$. Η ορμή αυτή μεταβάλλεται (ανταλλάσσεται) όταν γίνονται διαμοριακές συγκρούσεις. Η, από μόριο σε μόριο, ανταλλαγή της ορμής ευνοείται με την αύξηση της θερμοκρασίας επειδή η θερμοκρασιακή ανύψωση έχει ως αποτέλεσμα να αυξάνεται η κίνηση των μορίων.

3) Μεταφορά Θερμότητας

Με τον όρο «μεταφορά θερμότητας» εννοούμε τη διακίνηση (διάδοση) της θερμότητας από ένα σώμα σε άλλο ή από μία θέση ενός σώματος σε γειτονική της θέση. Το εν λόγω φαινόμενο αναλύεται αναλυτικά παρακάτω.

2.1.2 Μετάδοση θερμότητας

1) Αγωγιμότητα

Η αγωγιμότητα (conduction) είναι ο μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας στα στερεά.

Στα υλικά τα οποία είναι καλοί αγωγοί της θερμότητας, η θερμότητα μεταφέρεται από τις αλληλεπιδράσεις των ελεύθερων ηλεκτρονίων και ως εκ τούτου τα υλικά που είναι καλοί ηλεκτρικοί αγωγοί είναι συνήθως και καλοί αγωγοί της θερμότητας. Σε άλλα υλικά που δεν είναι καλοί αγωγοί θερμότητας, η θερμότητα μεταφέρεται από τις μηχανικές δονήσεις του μοριακού δικτυωτού πλέγματος. Η αγωγιμότητα είναι ένας σημαντικός παράγοντας στην ανάφλεξη των στερεών επιφανειών και στην αντίσταση σε πυρκαγιά (πυραντίσταση) των δομικών μελών.

Για τον υπολογισμό μεταφοράς θερμότητας στα στερεά υλικά απαιτούνται συγκεκριμένες υλικές ιδιότητες. Αυτές είναι, η πυκνότητα ρ , η ειδική θερμότητα C_p και η θερμική αγωγιμότητα k . Πυκνότητα ρ είναι η μάζα του υλικού ανά μονάδα όγκου σε kg/m^3 . Η ειδική θερμότητα C_p είναι το ποσό θερμότητας που απαιτείται, για να αυξηθεί η θερμοκρασία της μοναδιαίας μάζας κατά 1 βαθμό σε $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$. Η θερμική αγωγιμότητα k αντιπροσωπεύει τον ρυθμό της θερμότητας που μεταφέρεται μέσω μοναδιαίου πάχους του υλικού ανά μονάδα θερμοκρασιακής διαφοράς σε $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$.

Η πυκνότητα δε μεταβάλλεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Η θερμική αγωγιμότητα και η ειδική θερμότητα μεταβάλλονται με τη θερμοκρασία αλλά σε πολλές περιπτώσεις μπορούν να θεωρηθούν σταθερές. Για κάθε υλικό καθορίζονται οι υλικές ιδιότητες.

Η μεταφορά θερμότητας στα στερεά μπορεί να είναι σταθερής κατάστασης μεταφορά θερμότητας (steady state heat flow) ή μεταβατικής κατάστασης μεταφορά θερμότητας (transient heat flow), ανάλογα με την ικανότητα του υλικού να αποθηκεύει θερμότητα.

2) Συναγωγή

Η συναγωγή (convection) αναφέρεται στη μεταφορά θερμότητας στην επιφάνεια αλληλεπίδρασης μεταξύ ενός στερεού και ενός ρευστού λόγω της κίνησης

του ρευστού, πάνω σε αυτή την επιφάνεια. Η κίνηση αυτή του ρευστού μπορεί να οφείλεται σε μία εξωτερική δύναμη και τότε η συναγωγή ονομάζεται εξαναγκασμένη συναγωγή. Από την άλλη πλευρά, όταν η κίνηση του ρευστού στην επιφάνεια του στερεού οφείλεται σε θερμοκρασιακή διαφορά, ονομάζεται φυσική συναγωγή. Η φυσική μεταγωγή είναι η αιτία μεταφοράς θερμότητας στην περίπτωση μιας φωτιάς.

Η μεταφορά θερμότητας δια μεταγωγής επηρεάζει ουσιαστικά την εξάπλωση της φωτιάς, αλλά και την ανοδική μεταφορά του καπνού και των καυτών αερίων μέχρι το ανώτατο όριο του κτιρίου.

Οι υπολογισμοί για τη μεταφορά θερμότητας με συναγωγή περιλαμβάνουν τη μεταφορά θερμότητας μεταξύ της επιφάνειας ενός στερεού και ενός ρευστού που περιβάλλει το στερεό και έχουν διαφορετικές θερμοκρασίες. Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως η ταχύτητα του ρευστού στην επιφάνεια.

3) Ακτινοβολία

Η ακτινοβολία (radiation) εμφανίζεται σε όλα τα σώματα και οφείλεται στη συνεχή εκπομπή ενέργειας λόγω της θερμοκρασίας τους. Η ακτινοβολία είναι η ανταλλαγή ενέργειας με ηλεκτρομαγνητικά κύματα τα οποία μπορούν να απορροφώνται, να αντανακλώνται ή να μεταφέρονται σε μια επιφάνεια. Είναι πολύ σημαντική στην περίπτωση της φωτιάς, γιατί είναι ο βασικός μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας από τις φλόγες στις καύσιμες επιφάνειες, από τον καπνό στα αντικείμενα του κτιρίου και από ένα κτίριο σε ένα άλλο γειτονικό.

2.1.3 Διευκρινίσεις όρων

Θερμική διαχυτότητα των υλικών

Είναι ο λόγος της θερμοαγωγιμότητας ενός υλικού προς το γινόμενο της ειδικής θερμότητας επί την πυκνότητά του. Θερμοαγωγιμότητα λέγεται η ικανότητα ενός υλικού να αφήνει τη θερμότητα να περνάει μέσα από τη μάζα του.

Καύσιμο σώμα

Με τον όρο αυτό αναφερόμαστε σε κάθε υλικό σώμα που μπορεί να καεί (οποιαδήποτε ύλη είναι δυνατό να υποστεί καύση).

Συνοπτικός οδηγός καύσης

Καύση είναι η, λόγω χημικής αλλοίωσης της ύλης, έκλυση θερμότητας, όπου σχεδόν πάντα παρατηρούνται πύρινες γλώσσες. Η εκλυόμενη θερμότητα εξαρτάται από την ποσότητα του καυσίμου, οπωσδήποτε από τη θερμαντική ικανότητά του για τυπικά καύσιμα και από την ταχύτητα χημικής αντίδρασης (καύσης).

Θερμαντική ικανότητα καυσίμου

Θερμαντική ικανότητα καυσίμου ή θερμογόνο δύναμη ονομάζεται το ποσό της θερμότητας που παράγεται από την τέλεια καύση της μονάδας καύσης της μάζας

του. Εάν το καύσιμο περιέχει υγρασία ή υδρογόνο τα προϊόντα της καύσης περιέχουν νερό και υδρατμούς και διακρίνουμε δύο θερμοκρασίες: ανώτερη και κατώτερη. Ανώτερη θερμοκρασία είναι το σύνολο των θερμίδων που δίνει το καύσιμο, όταν τα καυσαέρια περιέχουν όλο το νερό ως υγρό, ενώ κατώτερη θερμοκρασία είναι το σύνολο των θερμίδων που δίνει το καύσιμο όταν τα καυσαέρια περιέχουν όλο το νερό τους ως υδρατμό. Κατά συνέπεια, η κατώτερη θερμοκρασία προκύπτει από την ανώτερη όταν αφαιρεθούν οι θερμίδες που απαιτούνται για την εξάτμιση όλου του νερού που περιέχουν τα καυσαέρια. Η θερμοκρασία έχει μονάδα μέτρησης το J/kg ή BTU/lb.

Ταχύτητα καύσης

Στις καύσεις αν και μερικές αντιδράσεις μπορεί να διεξαχθούν πολύ γρήγορα άλλες απαιτούν κάποιο χρόνο μέχρι την τέλεια συμπλήρωσή τους. Τη μεταβολή των αντιδρώντων σωμάτων σε συγκεκριμένη καύση ως προς τον χρόνο που απαιτείται, την ονομάζουμε ταχύτητα ή ρυθμό καύσης. Η ταχύτητα αυξάνεται με την ανύψωση της θερμοκρασίας.

Φάσεις καύσης στερεών

Στις καύσεις στερεών διακρίνουμε 4 φάσεις: αποξήρανση, απόσταξη, καύση υδρογονανθράκων, καύση εξανθρακώματος.

Στους 100°C περίπου αρχίζει πρώτα η αποξήρανση του καυσίμου από την υγρασία και ακολουθεί η απόσταξη όπου το καύσιμο αποχωρίζεται όλα τα ελαφριά υλικά που έχουν χαμηλό σημείο βρασμού και λέγονται πτητικά. Μετά έχουμε την καύση των υδρογονανθράκων μεταξύ 400°C και 600°C όπου το εξανθράκωμα πυρακτώνεται και η καύση του συντελείται ακόμη και σε 1000°C.

Φάσεις καύσης υγρών

Στα υγρά μπορεί να θεωρηθεί ότι η καύση προετοιμάζεται σε μια φάση με χαρακτηριστικά προθέρμανσης. Μετά προκαλείται εξαέρωση, επακολουθεί διάσπαση των πιο σύνθετων συστατικών σε απλούστερα, τα οποία ενώνονται τελικά με το οξυγόνο και καίγονται.

Φάσεις καύσης αερίων

Στα αέρια καύσιμα η καύση διευκολύνεται από την ανάμιξη του αερίου καυσίμου με τον αέρα καύσης.

2.2 Στάδιο ανάπτυξης της φωτιάς και ορισμός της έκλαμψης

Η έκλαμψη σχετίζεται άμεσα με την πυρασφάλεια ενός κτιρίου, καθώς από τη στιγμή που θα λάβει χώρα κινδυνεύουν άμεσα όλοι οι παρευρισκόμενοι. Ο χρόνος μέχρι την εμφάνιση της έκλαμψης είναι ένας σημαντικός παράγοντας που καθορίζει το πόσο επικίνδυνη είναι μία φωτιά, γεγονός το οποίο απεικονίζεται και στην παρακάτω ανισότητα:

$$t_p + t_a + t_{rs} \leq t_u \quad (2.1)$$

όπου, t_p ο χρόνος που περνάει από την έναυση της φωτιάς μέχρι τη στιγμή εντοπισμού της, t_a ο χρόνος από τη στιγμή που εντοπίζεται η φωτιά μέχρι την έναρξη της εκκένωσης του χώρου, t_{rs} ο χρόνος που απαιτείται για να προσεγγιστεί ένα μέρος σχετικά ασφαλές και t_w ο χρόνος που περνάει από τη στιγμή της έναυσης της φωτιάς μέχρι τη στιγμή κατά την οποία οι συνθήκες διαβίωσης μέσα στο δωμάτιο είναι αφόρητες.

Ενώ οι χρόνοι t_p και t_a εξαρτώνται από την αντίληψη των ατόμων που βρίσκονται στον χώρο, ο χρόνος t_{rs} επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, όπως για παράδειγμα η ευκινησία του κάθε ατόμου, η γεωμετρία του κτιρίου και ο βαθμός στον οποίο επηρεάζεται κάθε άτομο από τα προϊόντα της φωτιάς.

Για να μπορέσει κάποιος να διαφύγει έγκαιρα από ένα κτίριο στο οποίο έχει εκδηλωθεί φωτιά θα πρέπει είτε να υπάρχουν μέσα ανίχνευσης της φωτιάς (μείωση του t_p), είτε να αποφεύγεται η χρήση υλικών που βοηθούν την γρήγορη εξάπλωση της πυρκαγιάς (αύξηση του t_w). Διαφορετικά, θα πρέπει να ληφθούν μέτρα για την μείωση των χρόνων t_a και t_{rs} , όπως η δημιουργία εύκολα προσβάσιμων και καλά σχεδιασμένων διαδρομών διαφυγής, οι οποίες θα παραμένουν ελεύθερες από καπνό για όσο χρόνο απαιτείται μέχρι την πλήρη εκκένωση του κτιρίου. Όπως γίνεται κατανοητό, όσο περισσότερο χρόνο διαρκεί η μετάβαση από το πρώτο στο δεύτερο στάδιο, τόσο περισσότερο αυξάνεται η πιθανότητα για ανίχνευση και κατάσβεση της πυρκαγιάς αλλά και για την ασφαλή εκκένωση του χώρου.

Όταν υπάρχει επαρκής ποσότητα καυσίμου και αέρα, η φωτιά μπορεί να εξαπλωθεί σε ολόκληρο τον χώρο και όλες οι εκτεθειμένες αναφλέξιμες επιφάνειες να καούν. Σε αυτήν την περίπτωση, η οποία είναι και η πλέον πιθανή κατά τη διάρκεια φωτιάς σε κτίριο, παίζουν σημαντικό ρόλο οι συνθήκες που επικρατούν στον χώρο κατά την έναρξη της έκλαμψης, αλλά κυρίως η χρονική διάρκεια του σταδίου ανάπτυξης της φωτιάς.

Όσον αφορά την έκλαμψη, η διάρκειά της εξαρτάται από ένα πλήθος παραγόντων, όπως για παράδειγμα το μέγεθος και το σχήμα του δωματίου ή οι φυσικές ιδιότητες και η χωρική κατανομή των αναφλέξιμων αντικειμένων. Σε ένα τυπικό δωμάτιο η έκλαμψη μπορεί να διαρκέσει μόλις 15 - 30s, ενώ σε έναν μεγαλύτερο χώρο, όπως μια αποθήκη, είναι πιθανόν να διαρκέσει περισσότερο.

Δεδομένου ότι η έκλαμψη σηματοδοτεί την έναρξη του σταδίου της πλήρους ανεπτυγμένης φωτιάς, είναι σημαντικό να οριστεί επ'ακριβώς η χρονική στιγμή εμφάνισής της ώστε να εξεταστούν οι παράγοντες που επηρεάζουν τη διάρκεια του σταδίου ανάπτυξης αυτής. Στη βιβλιογραφία είναι διαθέσιμοι διάφοροι ορισμοί, ένας εκ των οποίων είναι ο εξής (Thomas, 1981): Η έκλαμψη είναι η χρονική περίοδος μετάβασης μιας περιορισμένης φωτιάς σε εκτεταμένη πυρκαγιά στο εσωτερικό ενός χώρου, όπου καίγονται όλες οι αναφλέξιμες επιφάνειες.

Όταν αναπτύσσεται μια φωτιά μέσα σε έναν κλειστό χώρο, εκτός από τις φλόγες πάνω ακριβώς από τη φωτιά, εμφανίζονται και άλλες πηγές θερμικής ακτινοβολίας όπως:

- Οι θερμές επιφάνειες που βρίσκονται στο ανώτερο μέρος του χώρου.
- Οι φλόγες κάτω από την οροφή.
- Τα θερμά προϊόντα καύσης που παγιδεύονται κάτω από την οροφή.

Η επίδραση της κάθε πηγής μεταβάλλεται όσο αναπτύσσεται η φωτιά και η

αιτία εμφάνισης της έκλαμψης εξαρτάται από τη φύση του καυσίμου και τον αερισμό του δωματίου.

2.3 Παράγοντες που επηρεάζουν τον χρόνο εμφάνισης της έκλαμψης

Ο χρόνος που χρειάζεται για να εμφανιστεί η έκλαμψη είναι ουσιαστικά ο χρόνος που απαιτείται ώστε οι φλόγες να εξαπλωθούν σε όλες τις επιφάνειες του δωματίου. Έχει βρεθεί πειραματικά (Heselden και Melinek, 1975) ότι ο χρόνος αυτός δεν επηρεάζεται σημαντικά από το σχήμα του δωματίου και επηρεάζεται ελάχιστα από το μέγεθος του ανοίγματος αερισμού και τη συνεχή παρουσία του καυσίμου.

Αντιθέτως, εξαρτάται σε μεγαλύτερο βαθμό από τη θέση της πηγής έναυσης, την επιφάνεια που αυτή καταλαμβάνει, τη μέση πυκνότητα του καυσίμου και τη φύση του υλικού επένδυσης. Αναλυτικότερα:

- 1) Πηγή Έναυσης: Ο χρόνος μέχρι την εμφάνιση της έκλαμψης είναι μικρότερος όταν η πηγή έναυσης βρίσκεται στο κέντρο του δωματίου, διότι η περιοχή που καταλαμβάνει η αρχική φωτιά αυξάνεται με ταχύτερο ρυθμό. Ομοίως, όσο μεγαλύτερη επιφάνεια καταλαμβάνει η πηγή έναυσης, τόσο πιο γρήγορα συμβαίνει η έκλαμψη, διότι το καύσιμο βρίσκεται αρχικά σε μεγαλύτερη επιφάνεια.
- 2) Μέση Πυκνότητα: Τα αντικείμενα χαμηλής πυκνότητας έχουν την τάση να διαδίδουν την φωτιά γρηγορότερα, με αποτέλεσμα το μέγεθος της φωτιάς να αυξάνει με γρηγορότερο ρυθμό και η έκλαμψη να συμβαίνει νωρίτερα.
- 3) Υλικό Επένδυσης: Ένα εύφλεκτο υλικό επένδυσης μειώνει τον χρόνο για την εμφάνιση της έκλαμψης αλλά έχει παρατηρηθεί ότι οι εύφλεκτες επενδύσεις των τοίχων δεν εμπλέκονται στην διάδοση της φωτιάς παρά μόνο όταν αυτή έχει αναπτυχθεί αρκετά.

Αξίζει, πάντως, να σημειωθεί ότι ο σημαντικότερος παράγοντας που επηρεάζει τον χρόνο για την εμφάνιση της έκλαμψης είναι η αλληλεπίδραση της θέσης της πηγής έναυσης και του υλικού επένδυσης των τοίχων. Αν το υλικό αυτό είναι εύφλεκτο και εμπλέκεται στη διάδοση της φωτιάς άμεσα, διότι η πηγή είναι τοποθετημένη σε μία γωνία του δωματίου, τότε ο χρόνος για την εμφάνιση της έκλαμψης είναι κατά πολύ μειωμένος. Υπάρχουν και άλλοι παράγοντες που μπορεί να επηρεάζουν σημαντικά τον χρόνο αυτό, όπως για παράδειγμα το ποσοστό της υγρασίας του καυσίμου, η σχετική υγρασία και η κίνηση του αέρα μέσα στον χώρο.

Η εξέταση όλων των παραπάνω στοιχείων δείχνει ότι η ανάπτυξη της φωτιάς κατά τα πρώτα στάδια επηρεάζεται από αρκετούς παράγοντες, καθιστώντας δύσκολη την ακριβή πρόβλεψη των σχετικών φαινομένων στα αρχικά στάδια εκδήλωσης της φωτιάς.

2.4 Παράγοντες που επηρεάζουν την ανάπτυξη της φωτιάς

Εάν το αντικείμενο που αναφλέγεται αρχικά δεν είναι ικανό να παράγει την απαραίτητη θερμότητα για να συμβεί η έκλαμψη, τότε για να περάσουμε από τη φάση της ανάπτυξης της φωτιάς στην έκλαμψη θα πρέπει να ανάψουν και άλλα καύσιμα αντικείμενα.

Το αν θα ανάψει κάποιο άλλο αντικείμενο εξαρτάται από την απόστασή του από το αρχικό σημείο έναυσης. Ανάφλεξη ενός αντικειμένου παρατηρείται όταν αυτό βρίσκεται αρκετά κοντά στην πηγή έναυσης και έχει κατάλληλο σχήμα ώστε η φλόγα να έρχεται σε άμεση επαφή με αυτό. Αν αυτό δεν είναι δυνατό, τότε η φωτιά μπορεί να εξαπλωθεί μόνο μέσω της ακτινοβολούμενης θερμότητας.

Ο Babrauskas διαπίστωσε ότι η ροή της ακτινοβολούμενης θερμότητας σε κάποια απόσταση εξαρτάται άμεσα από τον ρυθμό καύσης. Έτσι, αντικείμενα που καίγονται γρήγορα είναι ικανά να προσδώσουν μια σημαντική ποσότητα ακτινοβολούμενης θερμότητας σε απόσταση μέχρι και 1m από την επιφάνειά τους. Στην πραγματικότητα, όλες οι επιφάνειες που βρίσκονται στο εσωτερικό ενός χώρου είναι πιθανό να οδηγήσουν στη γρήγορη ανάπτυξη της φλόγας για δύο λόγους:

- α) Λόγω του εγκλωβισμού ενός μεγάλου ποσού θερμότητας στην περιοχή των εύφλεκτων επιφανειών.
- β) Λόγω της δημιουργίας δυναμικής ροής που οδηγεί σε υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης θερμότητας.

Επομένως, η ανάπτυξη της φωτιάς σε έναν χώρο που η επένδυσή του αποτελείται από εύφλεκτο υλικό, ή που περιέχει εύφλεκτα υλικά (όπως για παράδειγμα καλώδια) θα είναι γρήγορη, από τη στιγμή που θα αναφλεγεί κάποιο αντικείμενο.

2.5 Διάδοση της φωτιάς

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

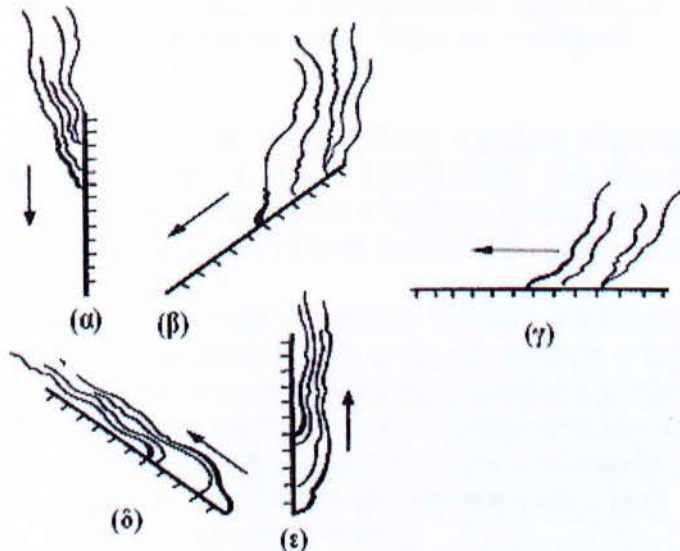
1) Προσανατολισμός της επιφάνειας και κατεύθυνση εξάπλωσης της φλόγας

Γενικά, οι στερεές επιφάνειες μπορούν να καούν σε κάθε προσανατολισμό, αλλά η εξάπλωση της φλόγας είναι ταχύτερη όταν κατευθύνεται προς τα πάνω σε μια κάθετη επιφάνεια. Όσο αυξάνει η γωνία που σχηματίζει μια επιφάνεια με το οριζόντιο επίπεδο, τόσο αυξάνει και ο αντίστοιχος ρυθμός διάδοσης της φλόγας (Magee και McAlevy, 1971) λόγω του διαφορετικού τρόπου αλληλεπίδρασης της φλόγας με το άκαυστο καύσιμο σε κάθε προσανατολισμό. Στην εικόνα 2.1 φαίνεται ο τρόπος διάδοσης της φλόγας για πέντε διαφορετικές κλίσεις της επιφάνειας του στερεού.

Όταν η διάδοση της φλόγας είναι προς τα κάτω (περίπτωση α), η ροή του αέρα είναι αντίθετη με αυτήν της φλόγας με αποτέλεσμα να εμποδίζει την εξάπλωσή της. Επομένως, τα θερμά αέρια ρέουν μακριά από το άκαυστο υλικό και έτσι η μεταφορά θερμότητας μέσω συναγωγής είναι αμελητέα. Η φλόγα σε αυτήν την περίπτωση εξαπλώνεται με αργό αλλά σταθερό ρυθμό.

Αντίθετα, όταν η διάδοση της φλόγας είναι ανοδική σε μια κάθετη επιφάνεια (περίπτωση ε), η άνωση που δημιουργείται από την ίδια τη φλόγα οδηγεί σε συμπίπτουσα πορεία του αέρα και της φλόγας, με αποτέλεσμα η φλόγα και τα θερμά αέρια να κινούνται προς την ίδια κατεύθυνση, αυξάνοντας έτσι τον ρυθμό μεταφοράς θερμότητας. Σε αυτήν την περίπτωση, η φλόγα διαδίδεται με αυξανόμενο ρυθμό.

Τέλος, όσον αφορά την οριζόντια διάδοση της φλόγας σε μία οροφή (περίπτωση γ), εάν δεν υπάρχει κάποιο άνοιγμα στον χώρο (π.χ. πόρτα, παράθυρο) που οδηγεί στην συνεχή εισαγωγή φρέσκου αέρα, δεν προκαλείται η γρήγορη εξάπλωσή της. Έτσι, τα θερμά αέρια παραμένουν αδρανοποιημένα κάτω από την οροφή, χωρίς να κινούνται προς κάποια κατεύθυνση. Εάν, όμως, αρχίσει η φλόγα να εξαπλώνεται, όχι μόνο θα δημιουργηθεί ροή των θερμών προϊόντων της καύσης, αλλά θα εξαπλώνεται και πάνω από άκαυστα αντικείμενα που βρίσκονται μακριά από την φωτιά.



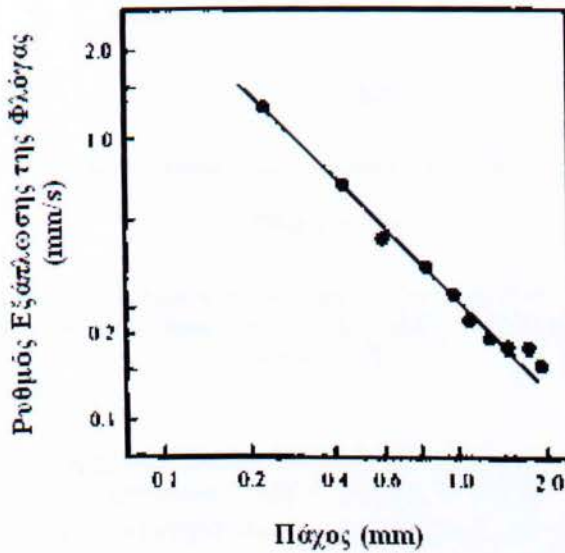
Εικόνα 2.1: Περιπτώσεις εξάπλωσης της φλόγας για πέντε διαφορετικές κλίσεις της αναφλέξιμης επιφάνειας. (Drysdale, 1999)

2) Πάχος του καυσίμου

Έχει βρεθεί ότι εάν το καύσιμο αντικείμενο είναι πολύ λεπτό και το δοκίμιο έχει σε όλα τα σημεία του την ίδια θερμοκρασία, τότε ο ρυθμός εξάπλωσης της φλόγας είναι αντιστρόφως ανάλογος με το πάχος του υλικού. Δηλαδή, ισχύει:

$$V \propto \tau^{-1} \quad (2.2)$$

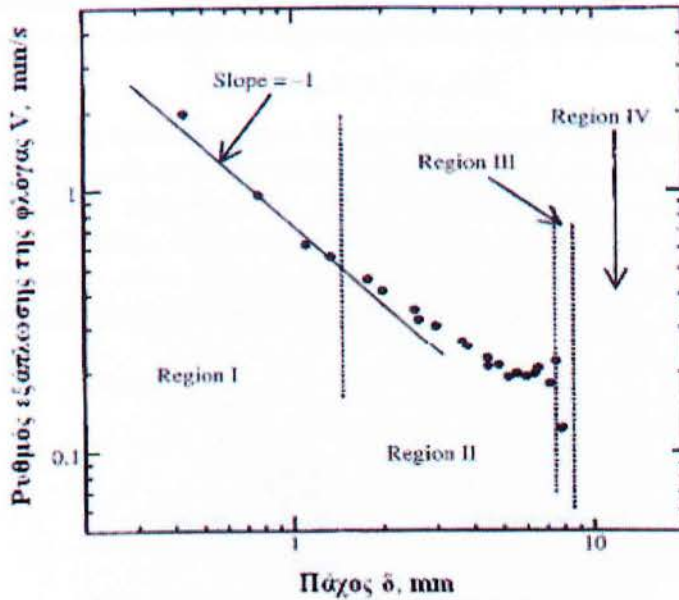
Αυτό το απέδειξαν οι Magee and McAlevy (1971), οι οποίοι χρησιμοποίησαν δεδομένα του Royal (1970) που αφορούσαν την καθοδική μετάδοση φλόγας σε κάθετα δοκίμια από «λεπτά» καύσιμα σελλιόζης με πάχη μικρότερα των 1,5 mm (Σχήμα 2.2).



Σχήμα 2.2: Εξάρτηση του ρυθμού εξάπλωσης καθοδικής φλόγας σε κάθετα δοκίμια από λεπτά καύσιμα σελλιόζης συναρτήσει του πάχους. (Magee και McAlevy, 1971)

Γενικά, όσο το πάχος του υλικού αυξάνει ο ρυθμός εξάπλωσης της φλόγας παύει να εξαρτάται από το πάχος. Ο Suzuki (1994) έδειξε ότι η εξάρτηση του ρυθμού μετάδοσης θερμότητας από το πάχος γίνεται λιγότερο αισθητή για πάχη μεγαλύτερα του 1,5 mm και ο ρυθμός καταλήγει να είναι σταθερός για πάχη που βρίσκονται στην περιοχή 5,0 - 7,5 mm (Σχήμα 2.3).

Μεταβαίνοντας από «λεπτά» σε «παχιά» καύσιμα αντικείμενα, παρατηρείται μια σημαντική αλλαγή στον τρόπο με τον οποίο μεταφέρεται η θερμότητα μακριά από τη φλόγα. Στα «λεπτά» καύσιμα αντικείμενα εμφανίζεται μεταφορά θερμότητας λόγω αγωγής μέσω της αέριας φάσης, ενώ στα «παχιά» καύσιμα αντικείμενα μέσω της στερεάς φάσης (Drysdale, 1999). Σημειώνεται ότι όσα αναφέρθηκαν παραπάνω αφορούν υλικά τα οποία δεν αλλάζουν τη φυσική τους μορφή κατά τη διάρκεια της καύσης τους (π.χ. λιώσιμο του καυσίμου υλικού).



Σχήμα 2.3: Εξάρτηση του ρυθμού εξάπλωσης φλόγας συναρτήσει του πάχους του υλικού. (Περιοχές I, II: σταθερή εξάπλωση, Περιοχή III: ασταθής εξάπλωση, Περιοχή IV: καθόλου εξάπλωση) (Suzuki, 1994)

3) Πυκνότητα, θερμοχωρητικότητα και θερμική αγωγιμότητα

Σύμφωνα με τον Drysdale (1999), για ένα «λεπτό» καύσιμο αντικείμενο, συμβολίζοντας με ρ την πυκνότητά του, με c τη θερμοχωρητικότητά του και με τ το πάχος του, ισχύει ότι:

$$V \propto (\rho * c * \tau)^{-1} \quad (2.3)$$

δηλαδή, ο ρυθμός με τον οποίο διαδίδεται η φλόγα είναι αντιστρόφως ανάλογος με το γινόμενο των τριών παραπάνω μεγεθών.

Η εξάρτηση του ρυθμού διάδοσης της φλόγας σε ένα «παχύ» καύσιμο αντικείμενο από τις θερμικές ιδιότητές του, φαίνεται αν το πάχος τ αντικατασταθεί με την παρακάτω έκφραση του βάρους στο οποίο φτάνει η επίδραση των θερμικών φαινομένων στην επιφάνεια του υλικού δ :

$$\delta = (\alpha * l / V)^{0.5} \quad (2.4)$$

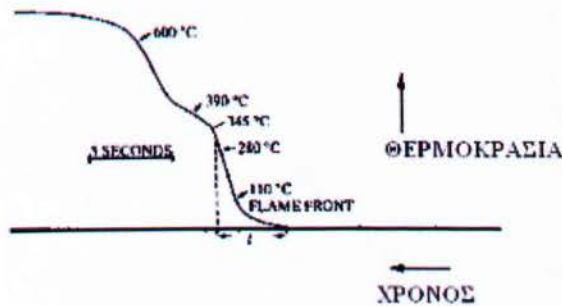
όπου το α ισούται με $k/(\rho*c)$, ενώ l είναι το «μήκος θέρμανσης». Ουσιαστικά, είναι το μήκος ενός δοκιμίου τοποθετημένου κάθετα στο μέτωπο της φλόγας από το οποίο και μετά η θερμοκρασία αυξάνεται από την θερμοκρασία περιβάλλοντος μέχρι την θερμοκρασία έναρξης της πυρόλυσης του συγκεκριμένου αντικειμένου.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το μοντέλο που χρησιμοποίησε ο Parker (1972), ο οποίος χρησιμοποίησε ένα δοκίμιο από «λεπτό» καύσιμο σελλιόζης του οποίου η θερμοκρασία έναρξης της πυρόλυσης είναι οι 280°C. Το «μήκος θέρμανσης» για το συγκεκριμένο παράδειγμα απεικονίζεται στο Σχήμα 2.4.

Σημειώνεται ότι με k συμβολίζεται η θερμική αγωγιμότητα του υλικού, με ρ η πυκνότητά του και με c η ειδική του θερμοχωρητικότητα. Επομένως, προκύπτει:

$$V \propto 1 / (k * \rho * c) \quad (2.5)$$

δεδομένου ότι το l παραμένει σταθερό. Όπως είναι γνωστό, η θερμική αγωγιμότητα k ενός στερεού είναι ανάλογη της πυκνότητάς του, άρα προκύπτει ότι ο ρυθμός διάδοσης της φλόγας εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από την πυκνότητα του καυσίμου ($V \propto \rho^{-2}$). Έτσι εξηγείται το γεγονός ότι τα εύφλεκτα υλικά με χαμηλή πυκνότητα συντελούν στην γρήγορη ανάπτυξη της φωτιάς, διότι αρκεί μια πολύ μικρή ποσότητά τους για να επιτραπεί στην φλόγα να εξαπλωθεί.



Σχήμα 2.4: Το «μήκος θέρμανσης» για ένα δοκίμιο από «λεπτό» καύσιμο σελιλόζης. (Parker, 1972)

4) Γεωμετρία του αντικειμένου

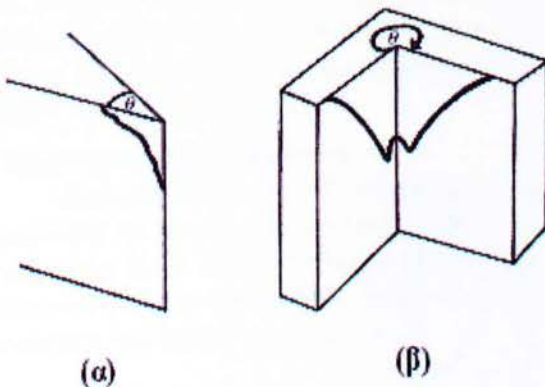
α) Πλάτος:

Το πλάτος του αντικειμένου επηρεάζει ελάχιστα ή καθόλου τον ρυθμό εξαπλώσεως μιας κάθετης φλόγας με φορά προς τα κάτω. Αντίθετα, για μια φλόγα που εξαπλώνεται κάθετα και με φορά προς τα πάνω, ισχύει (Thomas, 1981):

$$V \propto (\text{πλάτος})^{0.5} \quad (2.6)$$

β) Παρουσία ακμών - γωνιών:

Η φλόγα διαδίδεται γρηγορότερα κατά μήκος μιας ακμής ή σε μία γωνία από ότι πάνω σε μία επίπεδη επιφάνεια. Βρέθηκε (Markstein και de Ris, 1972) ότι ο ρυθμός εξαπλώσεως της φλόγας εξαρτάται από τη γωνία θ , η οποία σε μία ακμή και σε μία γωνία ορίζεται όπως φαίνεται στην εικόνα 2.2.

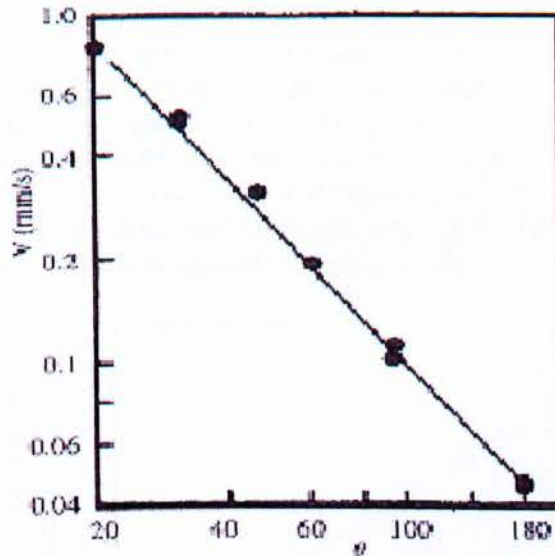


Εικόνα 2.2: Ορισμός της γωνίας θ σε μία ακμή (α) και μια γωνία (β), αντίστοιχα. (Markstein και de Ris, 1972)

Από τις πειραματικές μετρήσεις των Markstein και de Ris (1972) για διάφορες γωνίες μεταξύ των 20° και 180° βρέθηκε ότι ισχύει:

$$V \propto (\theta)^{4/3} \quad (2.7)$$

Όσο μικρότερη είναι η γωνία θ σε μία μεταξύ δύο ακμών, τόσο περισσότερο το στερεό αυτό πλησιάζει τη συμπεριφορά του «λεπτού» καυσίμου. Μάλιστα όταν η γωνία θ ισούται με 180°, ο ρυθμός με τον οποίο εξαπλώνεται η φλόγα γίνεται ελάχιστος (Σχήμα 2.5).



Σχήμα 2.5: Εξάρτηση του ρυθμού εξαπλώσεως της φλόγας από τη γωνία θ . (Markstein και de Ris, 1972)

5) Περιβαλλοντικοί παράγοντες

α) Σύνθεση της ατμόσφαιρας:

Τα εύφλεκτα υλικά ανφλέγονται πιο εύκολα και η φλόγα εξαπλώνεται γρηγορότερα αν η συγκέντρωση του οξυγόνου είναι υψηλή, όπως για παράδειγμα περιοχές όπου μπορούν να παραχθούν μεγάλες ποσότητες οξυγόνου τυχαία ή περοχές που μπορεί να είναι σκόπιμα πλούσιες σε οξυγόνο. Για να θεωρηθεί ότι μια περιοχή είναι πλούσια σε οξυγόνο πρέπει η μερική πίεση του οξυγόνου στην περιοχή αυτή να είναι μεγαλύτερη από αυτήν της κανονικής ατμόσφαιρας, δηλαδή μεγαλύτερη από 160mmHg (National Fire Protection Association, 1994). Γενικότερα, οποιαδήποτε αύξηση της συγκέντρωσης του οξυγόνου στον αέρα συνοδεύεται από αύξηση του ρυθμού εξαπλώσεως της φλόγας.

β) Θερμοκρασία του καυσίμου:

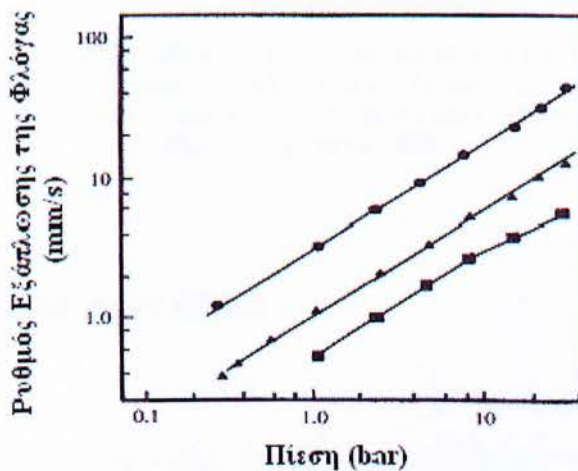
Αυξανόμενη της θερμοκρασίας του καυσίμου, αυξάνεται ο ρυθμός εξαπλώσεως της φλόγας (Drysdale, 1999). Αυτό βέβαια είναι αναμενόμενο διότι όσο μεγαλύτερη είναι η αρχική θερμοκρασία του καυσίμου, τόσο λιγότερη θερμότητα απαιτείται ώστε το άκαυστο καύσιμο που βρίσκεται μακριά από το σημείο έναυσης της φωτιάς να αρχίσει να καίγεται.

γ) Μετάδοση θερμότητας μέσω ακτινοβολίας:

Η μετάδοση θερμότητας μέσω ακτινοβολίας προκαλεί αύξηση στον ρυθμό εξάπλωσης της φλόγας, διότι με αυτόν τον τρόπο προθερμαίνεται το καύσιμο μακριά και από το μέτωπο της φλόγας. Όμως, ο αυξημένος ρυθμός καύσης πίσω από το μέτωπο της φλόγας οδηγεί στην εμφάνιση ισχυρότερων φλογών, οι οποίες αυξάνουν την μετάδοση θερμότητας μέσω ακτινοβολίας, ενισχύοντας έτσι την εξάπλωση της πυρκαγιάς (Drysdale, 1999).

δ) Ατμοσφαιρική πίεση:

Έχει παρατηρηθεί ότι όταν η ατμοσφαιρική πίεση είναι αυξημένη, τότε ο ρυθμός εξάπλωσης της φλόγας είναι γρηγορότερος και αυτό οφείλεται στον εμπλουτισμό με οξυγόνο, το οποίο ενισχύει την σταθερότητα της φλόγας σε μια επιφάνεια. Το παραπάνω συμπέρασμα απεικονίζεται στο Σχήμα 2.6, στο οποίο παρουσιάζεται ο ρυθμός εξάπλωσης της φλόγας συναρτήσει της ατμοσφαιρικής πίεσης για τρεις διαφορετικές τιμές της συγκέντρωσης του οξυγόνου. Να σημειωθεί ότι τα αποτελέσματα προέκυψαν από πειράματα των McAlevy και Magee (1969) σε οριζόντια δοκίμια από PMMA (Polymethyl methacrylate).

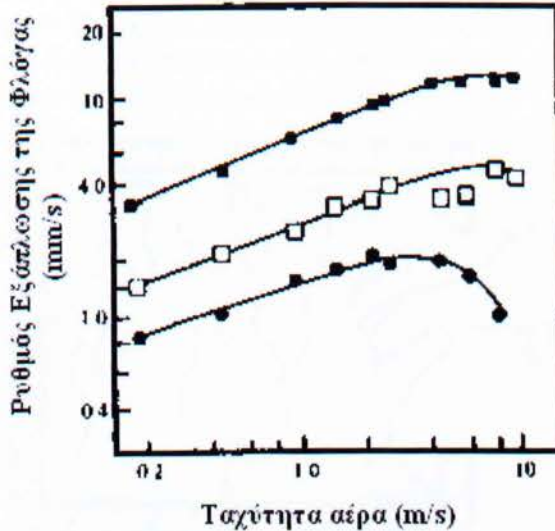


Σχήμα 2.6: Εξάρτηση του ρυθμού εξάπλωσης της φλόγας από την πίεση σε μείγματα οξυγόνου-αζώτου. Τα τετράγωνα αντιστοιχούν σε μείγμα με περιεκτικότητα 46% οξυγόνο, τα τρίγωνα σε 62% οξυγόνο και οι κύκλοι σε 100% οξυγόνο. (Magee και McAlevy, 1969)

ε) Κίνηση του αέρα:

Γενικά, όταν η κίνηση του αέρα έχει την ίδια κατεύθυνση με αυτήν της φλόγας, ενισχύεται ο ρυθμός με τον οποίο αυτή εξαπλώνεται σε μια εύφλεκτη επιφάνεια. Αν όμως η κίνηση του αέρα αντιτίθεται στην εξάπλωση της φλόγας, τότε το πώς θα επηρεάσει την φλόγα εξαρτάται από την ταχύτητα του αέρα. Όταν ο αέρας κινείται με μεγάλη ταχύτητα, ο ρυθμός με τον οποίο εξαπλώνεται η φλόγα μειώνεται. Εάν όμως η ταχύτητα του αέρα είναι σχετικά μικρή, η εξάπλωση της φλόγας ενισχύεται (Drysdale, 1999). Στο Σχήμα 2.7 φαίνεται το πώς μεταβάλεται ο ρυθμός εξάπλωσης της φλόγας συναρτήσει της ταχύτητας του αέρα για ροή αέρα αντίθετη από αυτή της φλόγας, για τρεις διαφορετικές συγκεντρώσεις οξυγόνου. Να σημειωθεί

ότι τα αποτελέσματα προέκυψαν από πειράματα των McAlevy και Magee (1969) σε οριζόντια δοκίμια από PMMA.



Σχήμα 2.7: Εξάρτηση του ρυθμού εξάπλωσης της φλόγας από την ταχύτητα του αέρα, για ροή αέρα αντίθετη από αυτή της φλόγας, σε μείγματα οξυγόνου-αζώτου. Τα τετράγωνα αντιστοιχούν σε μείγμα με περιεκτικότητα 46% οξυγόνο, τα τρίγωνα σε 62% οξυγόνο και οι κύκλοι σε 100% οξυγόνο. (Magee και McAlevy, 1969)

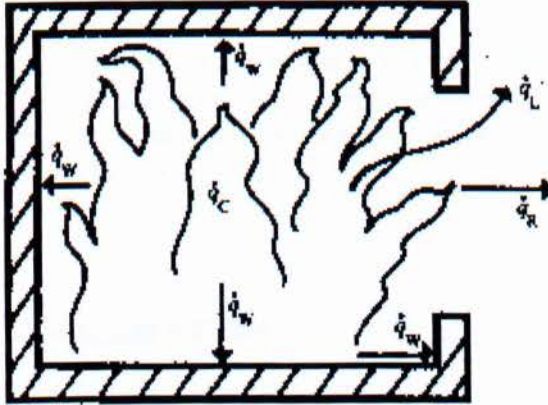
2.6 Πλήρως ανεπτυγμένη φωτιά

Μόλις η φωτιά αναπτυχθεί πλήρως, οι εκτεθειμένες επιφάνειες όλων των εύφλεκτων αντικειμένων που βρίσκονται κοντά σε αυτήν αρχίζουν να καίγονται και ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας αυξάνεται μέχρι μια μέγιστη τιμή, ενώ παράλληλα αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες. Συνήθως, αυτές οι θερμοκρασίες είναι κοντά στους 1100°C αλλά μπορεί να είναι και υψηλότερες υπό ορισμένες συνθήκες. Η θερμοκρασία διατηρείται σε αυτά τα επίπεδα μέχρι να μειωθεί ο ρυθμός έκλυσης εύφλεκτων πτητικών ως αποτέλεσμα της κατανάλωσης του καυσίμου.

Κατά την περίοδο της πλήρως ανεπτυγμένης φωτιάς, τα οικοδομικά υλικά προσεγγίζουν τις θερμοκρασίες οι οποίες μπορεί να προκαλέσουν τη μείωση της αντοχής τους. Η μείωση της αντοχής κάποιου υλικού, με τη σειρά της, μπορεί να προκαλέσει τοπική ή ολική κατάρρευση του κτιρίου (Drysdale, 1999). Συνήθως, είναι γνωστό σε ποιά θερμοκρασία ένα υλικό χάνει μέρος της αντοχής του, όμως, το πόσο γρήγορα θα καταρρεύσει εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως το φορτίο που δέχεται, η υποστήριξη που δέχεται από άλλα υλικά καθώς και η εξάρτηση των ιδιοτήτων του από τη θερμοκρασία. Μια καλή μέθοδος για την προστασία αυτών των υλικών είναι η χρήση κατάλληλου μονωτικού υλικού, το οποίο φέρει κάποια αντίσταση ενάντια στη φωτιά. Για παράδειγμα, ο οπλισμός που περιέχεται στο

οπλισμένο σκυρόδεμα περιβάλλεται από το τσιμέντο, αν και το τσιμέντο εξασθενεί όταν υπόκειται σε υψηλές θερμοκρασίες (π.χ. αφυδάτωση ή απώλεια του κρυσταλλικού νερού).

Όσον αφορά την θερμότητα που εκλύεται λόγω της καύσης, οι Petterson et al. (1976) θεώρησαν ένα δωμάτιο απλής γεωμετρίας, όπως αυτό της Εικόνας 2.3, στο οποίο παρουσιάζονται οι διάφορες μορφές ροής θερμότητας.



Εικόνα 2.3: Απώλειες θερμότητας κατά τη διάρκεια μιας πλήρως ανεπτυγμένης φωτιάς σε ένα δωμάτιο. (Petterson et al., 1976).

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η περίοδος κατά την οποία μπορεί να εμφανιστεί μείωση της αντοχής των δομικών υλικών του κτιρίου και επομένως, το στάδιο πριν την έκλαμψη μπορεί να αμεληθεί, λόγω των σχετικά χαμηλών θερμοκρασιών. Στο δωμάτιο η θερμική ισορροπία εκφράζεται ως εξής:

$$q_c = q_L + q_w + q_r + q_b \quad (2.8)$$

όπου, q_c ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας λόγω της καύσης, q_L ο ρυθμός απώλειας θερμότητας λόγω της αντικατάστασης των θερμών αερίων με ψυχρά, q_w ο ρυθμός απώλειας θερμότητας μέσω των τοίχων, της οροφής και του πατώματος, q_r ο ρυθμός απώλειας θερμότητας με ακτινοβολία από τα ανοίγματα και q_b ο ρυθμός αποθήκευσης θερμότητας στον όγκο που καταλαμβάνει το αέριο (συνήθως αμελείται).

2.7 Παραγόμενος καπνός

Ο καπνός ουσιαστικά είναι διάφορα σωματίδια άκαυστου άνθρακα που οφείλονται σε ατελή καύση. Εκτός από πολύ λίγες εξαιρέσεις, σε όλες τις φωτιές παρατηρείται παραγωγή καπνού. Ο καπνός προκαλεί μείωση της ορατότητας, με

αποτέλεσμα να δυσκολεύεται η εκκένωση ενός κτιρίου, προκαλώντας επιμήκυνση του χρόνου κατά τον οποίο οι ένοικοι είναι εκτεθειμένοι στα προϊόντα της καύσης.

Υπάρχουν δύο ξεχωριστά στάδια όσον αφορά τον καπνό που παράγεται (Drysdale, 1999):

- 1) Τα πρώτα στάδια της φωτιάς, όπου η φωτιά είναι μικρή σε μέγεθος και καίγεται μόνο ένα αντικείμενο.
- 2) Η πλήρως ανεπτυγμένη φωτιά (αφού έχει παρατηρηθεί έκλαμψη), όπου καίγονται όλα τα αντικείμενα σε ένα δωμάτιο.

Όσον αφορά το πρώτο στάδιο, αυτό σχετίζεται με την ανίχνευση του καπνού σε ένα δωμάτιο. Στο δεύτερο στάδιο, παράγονται μεγάλες ποσότητες καπνού που είναι ικανές να μετατρέψουν σε μη προσβάσιμα, ακόμα και σημεία τα οποία βρίσκονται μακριά από την φωτιά.

2.7.1 Χημικές ενώσεις του καπνού

Τα προϊόντα της καύσης αποτελούν πολλές φορές ένα εξαιρετικά σύνθετο μείγμα χημικών ενώσεων, μερικές από τις οποίες είναι ικανές να προκαλέσουν ακόμα και τον θάνατο, είτε λόγω μικρής χρονικής έκθεσης σε υψηλής συγκέντρωσης δηλητηριώδη αέρια, όπως για παράδειγμα το μονοξείδιο του άνθρακα, είτε λόγω μεγάλης χρονικής έκθεσης σε χαμηλότερες συγκεντρώσεις. Αυτό που είναι σημαντικό είναι η δόση του αερίου που εισπνέεται, δηλαδή η συγκέντρωση των προϊόντων κάθε χρονική στιγμή. Αν η συγκέντρωση αυτή ξεπερνά κάποια συγκεκριμένη τιμή (Purser, 1995), τότε η εκκένωση ενός χώρου χωρίς εξωτερική βοήθεια είναι αδύνατη. Η διάρκεια της έκθεσης μεγαλώνει εάν η ορατότητα είναι περιορισμένη ή αν τα προϊόντα της καύσης προκαλούν ερεθισμούς στα μάτια και την αναπνοή.

Τα σημαντικότερα καυσαέρια που εκλύονται κατά την καύση είναι:

α) Μονοξείδιο του άνθρακα (CO): Παράγεται κατά την ατελή καύση του άνθρακα. Εισπνοή μονοξειδίου του άνθρακα σχηματίζει με την αιμογλοβίνη του ανθρώπινου αίματος, την καρβοξυαιμογλοβίνη, μειώνοντας έτσι την ικανότητα μεταφοράς οξυγόνου από το αίμα και προκαλώντας ασφυξία. Ο θάνατος μπορεί να προέλθει από έκθεση του ατόμου για λίγα λεπτά της ώρας σε ατμόσφαιρα με περιεκτικότητα μονοξειδίου του άνθρακα 1-1,3 % κατά όγκο ή σε τέσσερα λεπτά με περιεκτικότητα 0,2%.

β) Διοξείδιο του άνθρακα (CO₂): Εμφανίζεται σε άφθονη ποσότητα στις πυρκαγιές και έχει σαν κύρια συνέπεια την αύξηση του αναπνευστικού ρυθμού καθώς, όντας βαρύτερο από το οξυγόνο συσσωρεύεται στους πνεύμονες προκαλώντας ασφυξία με κλινικό σύμπτωμα την ταχύτερη αναπνοή. Συγκεντρώσεις του αερίου σε ποσοστό μέχρι 5% κατά όγκο δημιουργούν έντονα αναπνευστικά προβλήματα, ενώ πάνω από 10%, όταν υπάρχει σύγχρονη έλλειψη οξυγόνου, μπορούν να αποβούν θανατηφόρες. Αν η συγκέντρωση υπερβεί το 14%, το πιθανότερο είναι η κατάσβεση της πυρκαγιάς.

γ) Ενώσεις του θείου, όπως το υδρόθειο (H_2S) και το διοξείδιο του θείου (SO_2): Παρουσιάζουν τοξικότητα και συναντώνται στις πυρκαγιές μαλλιού, ελαστικών κ.ά. Σε συγκεντρώσεις μεγαλύτερες από 500 ppm (parts per million) γίνονται θανατηφόρες.

δ) Αμμωνία (NH_3): Παράγεται από καύσεις μαλλιού, μεταξιού, νάιλον, μελαμίνης κ.τ.λ, είναι καυσαέριο εξαιρετικά δραστικό όσον αφορά τη μείωση της ορατότητας, αν και γενικά παρουσιάζει μικρές συγκεντρώσεις σε πυρκαγιές κτιρίων.

ε) Υδροκυάνιο (HCN): Εμφανίζεται σε μικρές ποσότητες κατά την καύση μαλλιού, μεταξιού, ξύλου, χαρπιού, πολυουρεθάνης κ.τ.λ. Έχει γρήγορη ασφυξιογόνο δράση που γίνεται θανατηφόρα σε μικρές συγκεντρώσεις γύρω στα 350 ppm.

στ) Το διοξείδιο του αζώτου (NO_2): Παράγεται σε μικρές ποσότητες από την καύση υφασμάτων, ενώ σε μεγαλύτερες, από την πυρόλυση των ανόργανων αλάτων νιτρικής κελουλόζης, αμμωνίου κ.ά. Προκαλεί αναίσθησία και θάνατο σε 10 λεπτά για μια συγκέντρωση γύρω στα 200 ppm.

ζ) Ακρυλική αλδεύδη (ακρολεΐνη): Προϊόν καύσης πετρελαιοειδών, είναι τοξικότατο καυσαέριο σε μικρές συγκεντρώσεις από 50 μέχρι 500 ppm.

η) Υδροχλώριο (HCl): Αέριο με πολύ δυσάρεστη οσμή, που γίνεται επικίνδυνο σε συγκεντρώσεις μεγαλύτερες από 500 ppm (Quintiere, 2000).

2.7.2 Κίνηση του καπνού

Αυτό που έχει ιδιαίτερη σημασία κατά την εξάπλωση μιας πυρκαγιάς σε ένα κτίριο είναι οι λόγοι κίνησης του καπνού και ο τρόπος κίνησής του από τη στιγμή που αρχίζει να παράγεται. Ο καπνός, όπως συμβαίνει και με κάθε ρευστό, κινείται λόγω της επίδρασης δυνάμεων που ασκούνται σε ολόκληρο τον όγκο του. Τέτοιες δυνάμεις δημιουργούνται από (Drysdale, 1999):

- α) την άνωση που δημιουργείται άμεσα από την φωτιά,
- β) την άνωση που προκύπτει από διαφορές ανάμεσα στην εσωτερική και την εξωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος,
- γ) την επίδραση εξωτερικών ανέμων και την κίνηση του αέρα,
- δ) το σύστημα διακίνησης του αέρα μέσα στο κτίριο.

Σχετικά με τον τρόπο κίνησης του καπνού, παρατηρούνται τα εξής (Drysdale, 1999):

Κατά τα πρώτα στάδια μιας φωτιάς, τα προϊόντα της καύσης αρχίζουν να αραιώνουν καθώς κινούνται κάθετα με φορά προς τα πάνω ώσπου να φτάσουν στην οροφή. Ο θερμός καπνός κινείται στη συνέχεια οριζόντια ώσπου να συναντήσει κάποιο άνοιγμα και να συνεχίσει την ανοδική του πορεία ή, όπως είναι πιο πιθανό, ώσπου να συναντήσει κάποιο εμπόδιο, όπως για παράδειγμα έναν τοίχο, το οποίο θα τον αναγκάσει να σταματήσει την πορεία του. Έτσι, το στρώμα καπνού που είχε δημιουργηθεί αρχίζει να γίνεται πιο πυκνό και να εκτείνεται πιο χαμηλά, ενώ ο όγκος που καταλαμβάνει ο καπνός περιορίζεται από την οροφή και τους τοίχους του

δωματίου. Ο ρυθμός με τον οποίο πυκνώνει αυτό το στρώμα καπνού εξαρτάται εν μέρει από τον ρυθμό της καύσης, αλλά κυρίως εξαρτάται από την ποσότητα αέρα που εισάγεται στο πλούμιο της φωτιάς (fire plume).

2.8 Πυροπροστασία

Μία ανεπιθύμητη φωτιά σε ένα κτίριο αποτελούσε ανέκαθεν μια σημαντική απειλή για την ασφάλεια των ανθρώπων που ζουν και εργάζονται σε αυτά. Η απειλή γίνεται ιδιαίτερα σημαντική στα πολυώροφα κτίρια, όπου η δυσκολία μετακίνησης και διαφυγής είναι μεγαλύτερη με δυσμενείς συνέπειες στην ασφάλεια της ζωής των ανθρώπων που έχουν τυχόν παγιδευτεί.

Καθώς όλο και περισσότεροι άνθρωποι ζουν και εργάζονται σε μεγάλα και υψηλά κτίρια ο ενδεχόμενος κίνδυνος μιας πυρκαγιάς σε ένα κτίριο, εισήγαγε την ανάγκη να κριθούν τα κτίρια κατά τον σχεδιασμό τους και σε επίπεδο ασφάλειας σε πυρκαγιά. Η πυροπροστασία επιβάλλεται επίσης σε χώρους με αντικείμενα μεγάλης αξίας, όπως μουσεία και νοσοκομεία αλλά και σε χώρους με εύφλεκτα υλικά.

2.8.1 Ενεργητική Πυροπροστασία

Η ενεργητική πυροπροστασία αφορά την ανίχνευση της φωτιάς αλλά και την άμεση επέμβαση είτε από τους ίδιους τους ανθρώπους, είτε από ειδικές αυτόματες συσκευές. Η καλύτερη αποδεδειγμένα τεχνολογία ενεργητικής πυροπροστασίας είναι ο εφοδιασμός του κτιρίου με αυτόματους καταιωνητήρες, επειδή η εφαρμογή τους δίνει πολύ μεγάλες πιθανότητες ελέγχου αλλά και πλήρους κατάσβεσης της πυρκαγιάς.

Η ανίχνευση γίνεται κυρίως από ανιχνευτές καπνού ή θερμότητας. Αυτές οι συσκευές είναι αναμφισβήτητα πολύ αποτελεσματικές, εάν λειτουργήσουν άμεσα. Επειδή όμως τοποθετούνται σε συγκεκριμένα σημεία ενός κτιρίου, η πιθανότητα βλαβών δε μπορεί να αποκλεισθεί. Πιο συγκεκριμένα, οποιαδήποτε καταστροφή στο μηχανισμό παροχής νερού των καταιωνητήρων αλλά και βλάβης των βαλβίδων μπορούν να καταστήσουν το σύστημα ανενεργό. Δεδομένου ότι η επιθεώρηση και η συντήρηση των ψεκαστήρων είναι σπάνια υποχρεωτικές στα κτίρια, το ενδεχόμενο ποσοστό αποτυχίας είναι ανησυχητικό. Επίσης, επειδή η ποσότητα νερού που διαθέτουν είναι συγκεκριμένη, εάν οι καταιωνητήρες δεν λειτουργήσουν πριν η φωτιά πάρει μεγάλες διαστάσεις, ενδεχομένως δε θα μπορέσουν να την ελέγξουν.



Εικόνα 2.4: Σύστημα αυτόματων καταιωνητήρων.

Η ενεργητική πυροπροστασία περιλαμβάνει τη δράση των ανθρώπων που θα αντιληφθούν την ύπαρξη καπνού και θα σπεύσουν να σβήσουν τη φωτιά στα αρχικά στάδια, αλλά και τη δράση των πυροσβεστών. Στην περίπτωση που οι αυτόματες συσκευές δε λειτουργήσουν άμεσα και δεν υπάρξει άμεση επέμβαση για την κατάσβεση στα αρχικά στάδια της εξέλιξης μιας φωτιάς, τότε μπορεί να πάρει καταστροφικές διαστάσεις. Σε αυτή τη φάση πρέπει να εξασφαλιστεί ο απαιτούμενος χρόνος (δηλαδή η απαιτούμενη δομική πυραντίσταση), για τον οποίο η κατασκευή θα επιτελέσει με ασφάλεια το έργο της, ώστε να προλάβουν οι άνθρωποι που βρίσκονται στο κτίριο να διαφύγουν, αλλά και οι πυροσβέστες να πραγματοποιήσουν την κατάσβεση.

2.8.2 Παθητική Πυροπροστασία

Η δομική πυραντίσταση συχνά περιγράφεται ως σύστημα παθητικής πυροπροστασίας και αναφέρεται α) σε υλικά που χρησιμοποιούνται στο σκελετό του κτιρίου και β) σε κατασκευαστικές λεπτομέρειες, που έχουν σκοπό να εμποδίσουν την εξάπλωση της φωτιάς, αλλά και να αυξήσουν τον χρόνο της ασφαλούς λειτουργίας μέχρι την κατάρρευση. Έτσι αν σε ένα υψηλό κτίριο αναπτυχθεί φωτιά στους χαμηλούς ορόφους, πρέπει να παρέχεται το απαιτούμενο χρονικό διάστημα για την ασφαλή μετακίνηση αυτών που βρίσκονται στους υψηλούς ορόφους.

Η παθητική και η ενεργητική πυροπροστασία λειτουργούν συμπληρωματικά και μάλιστα όταν προβλέπεται ενεργητική πυροπροστασία επιτρέπεται περιορισμός της παθητικής.

Κεφάλαιο 3

Σχεδιαστικό πακέτο GAMBIT

Στο παρακάτω κεφάλαιο αναλύεται η χρήση του σχεδιαστικού πακέτου GAMBIT και τα εργαλεία χειρισμού αυτού καθώς και τα βήματα για τον σχεδιασμό της γεωμετρίας και του πλέγματος του κτιρίου που μελετάται.

3.1 Γενικά

Το σχεδιαστικό πακέτο Gambit, είναι ένα λογισμικό, στο οποίο ο σχεδιαστής όπου θέλει να προσομοιώσει ένα μοντέλο για ένα φαινόμενο, μπορεί να σχεδιάσει το μοντέλο, να κατασκευάσει το πλέγμα του ώστε στη συνέχεια να είναι σε θέση να επιλύσει φαινόμενα ροής ρευστών, μεταφοράς θερμότητας και άλλες επιστημονικές εφαρμογές.

Το αντικείμενο κατασκευής της πτυχιακής εργασίας είναι ένα κτίριο με τοιχώματα μηδενικού πάχους. Σε πρώτη φάση δημιουργείται ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο και πάνω σε αυτό τοποθετείται η τριγωνική στέγη. Τα όρια της γεωμετρίας είναι αδιαβατικά τοιχώματα ενώ στο εσωτερικό της υπάρχει ρευστό και συγκεκριμένα, αέρας. Επομένως, το σχεδιαστικό τμήμα στο Gambit είναι αρκετά απλό. Έπειτα ακολουθεί η δημιουργία του πλέγματος στο εσωτερικό του κτιρίου.

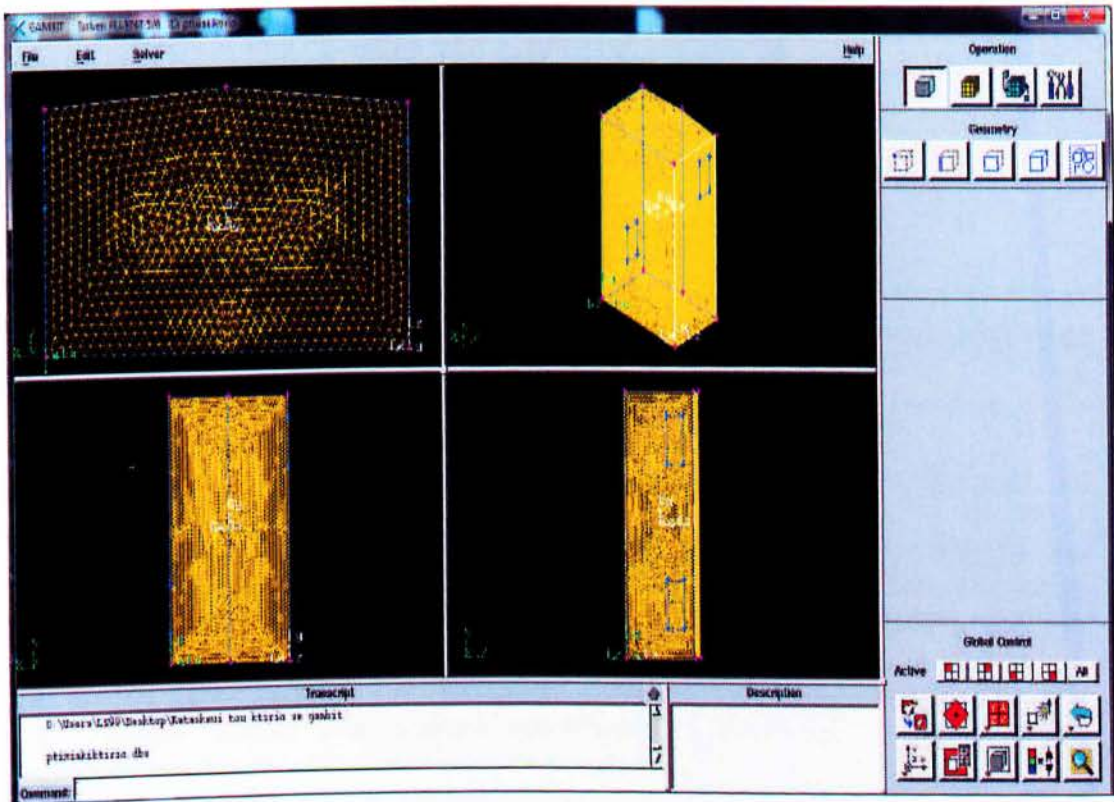
Στις παραγράφους που ακολουθούν δίνεται μια εποπτική άποψη για τη χρήση του προγράμματος και περιγράφονται αναλυτικά τα βήματα που πραγματοποιήθηκαν για την κατασκευή του μοντέλου του κτιρίου. Οι βασικές λειτουργίες (operations) του προγράμματος οι οποίες θα αναλυθούν είναι οι εξής:

- Εντολές που αφορούν τη γεωμετρία (Geometry command button).
- Εντολές που αφορούν το πλέγμα (Mesh command button).
- Εντολές που αφορούν τις οριακές συνθήκες (Zone command button).

3.2 Επιφάνεια εργασίας γραφικών

Η αρχική εικόνα που παρουσιάζεται κατά τη έναρξη του προγράμματος είναι η επιφάνεια εργασίας γραφικών (graphical user interface). Ο σχεδιασμός του υπό κατασκευή αντικειμένου, η δημιουργία πλέγματος καθώς και ο προσδιορισμός

οριακών συνθηκών πραγματοποιείται στην επιφάνεια εργασίας γραφικών. Στην Εικόνα 3.1 φαίνεται η επιφάνεια εργασίας του Gambit, για το κτίριο στο οποίο έχει γίνει η επιλογή πλέγματος.

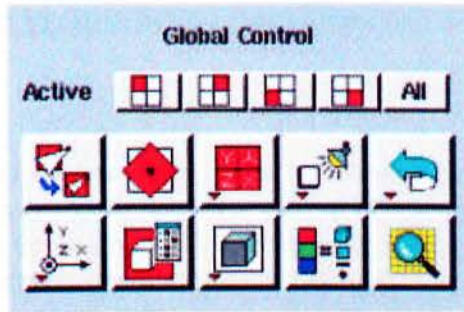


Εικόνα 3.1: Επιφάνεια εργασίας Gambit.

Η γραμμή εργαλείων και λειτουργιών (operation tool pad) αποτελείται από τα εξής επιμέρους τμήματα:

- Γεωμετρία (Geometry): Με το πλήκτρο αυτό, ενεργοποιούνται τα εργαλεία με τα οποία κατασκευάζεται ένα γεωμετρικό σχήμα, στην προκειμένη περίπτωση το μοντέλο που μελετάμε.
- Πλέγμα (Mesh): Με το πλήκτρο αυτό, ενεργοποιούνται τα εργαλεία με τα οποία κατασκευάζουμε και επιλέγουμε το πλέγμα το οποίο θα χρησιμοποιήσουμε στην υπάρχουσα γεωμετρία.
- Ζώνες (Zones): Με το πλήκτρο αυτό, ενεργοποιούνται τα εργαλεία με τα οποία προσδιορίζουμε τις οριακές συνθήκες του μοντέλου.
- Εργαλεία (Tools): Με το πλήκτρο αυτό, ενεργοποιείται η γραμμή εργαλείων από την οποία είναι δυνατόν να δημιουργήσουμε ή να μετατρέψουμε συστήματα συντεταγμένων καθώς και πλέγματα.

Επιπλέον στην αρχική επιφάνεια εργασίας του Gambit, βλέπουμε και τη γραμμή εργαλείων κεντρικού ελέγχου (global control toolbar), η οποία φαίνεται στην Εικόνα 3.2 που ακολουθεί.



Εικόνα 3.2: Η γραμμή εργαλείων κεντρικού ελέγχου του Gambit.

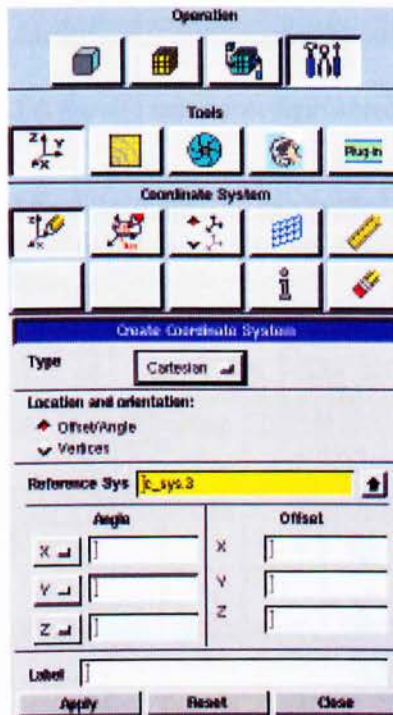
Η γραμμή εργαλείων κεντρικού ελέγχου αποτελείται από τις εξής επιμέρους λειτουργίες:

1. Fit to window: Προσαρμόζει το μοντέλο που έχουμε κατασκευάσει ώστε να καταλαμβάνει όλη την επιφάνεια εργασίας γραφικών.
2. Select pivot: Καθορίζει ένα σημείο, γύρω από το οποίο μπορούμε να περιστρέψουμε το γεωμετρικό μοντέλο.
3. Select preset configuration: Χωρίζει την επιφάνεια εργασίας σε τέσσερα ίσα τμήματα στα οποία το μοντέλο έχει διαφορετικό προσανατολισμό. Υπάρχει η επιλογή να διαλέξουμε ένα από τα τέσσερα μοντέλα και αυτό να καταλαμβάνει όλη την επιφάνεια εργασίας γραφικών.
4. Modify lights: Ρυθμίζει την ένταση του φωτισμού προς το γεωμετρικό μοντέλο.
5. Annotate: Δίνεται η δυνατότητα τοποθέτησης σχολίων στο σχέδιο με χρήση γραμμών και βελών.
6. Undo - Redo: Αναίρεση της τελευταίας εντολής - Επαναφορά της τελευταίας εντολής.
7. Orient model: Προσανατολίζει τη γεωμετρία σύμφωνα με το σύστημα συντεταγμένων που ορίζουμε εμείς.
8. Specify display attributes: Μας επιτρέπει να ορίσουμε ποιά χαρακτηριστικά της γεωμετρίας θα παρουσιάζονται στην οθόνη γραφικών, όπως για παράδειγμα, κόμβοι, ακμές, επιφάνειες.
9. Render model: Ορίζει αν στο μοντέλο θα φαίνεται το πλέγμα ή όχι, αν θα είναι σκιασμένο, ή αν θα φαίνονται ακμές.
10. Specify colour mode: Καθορίζει τον χρωματισμό των διαφόρων συνιστωσών της γεωμετρικής μας κατασκευής.
11. Examine mesh: Επιτρέπει τον έλεγχο του πλέγματος.

3.3 Σχεδιασμός του γεωμετρικού μοντέλου του κτιρίου

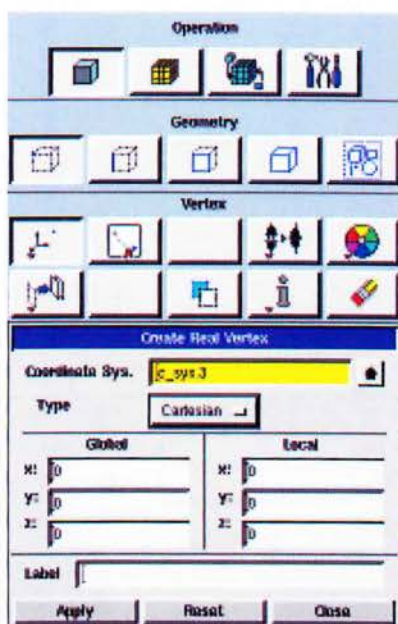
Παρακάτω παρατίθενται τα βήματα τα οποία πραγματοποιήθηκαν για να σχεδιασθεί το κτίριο για τις προσομοιώσεις του φαινομένου που μελετάμε. Πρόκειται για ένα κτίριο το οποίο θα δημιουργηθεί με τη χρησιμοποίηση δύο γεωμετριών. Ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο μήκους 27,4 m, πλάτους 14,6 m και ύψους 8,35 m και πάνω σε αυτό μία τριγωνική στέγη ύψους 1,2 m. Πρέπει να σημειωθεί ότι στο GAMBIT δεν προσδιορίζονται οι μονάδες. Αυτό θα γίνει στο υπολογιστικό πακέτο Fluent. Η διαδικασία κατασκευής είναι η ακόλουθη:

Βήμα 1: Στη γραμμή εργαλείων λειτουργιών ακολουθούμε την πορεία Εργαλεία - Σύστημα συντεταγμένων - Δημιουργία συστήματος συντεταγμένων (Εικόνα 3.3), για να κατασκευάσουμε δύο βοηθητικά συστήματα συντεταγμένων στις θέσεις (7,3,-13,7,-4,175) και (-7,3,-13,7, -4,175).



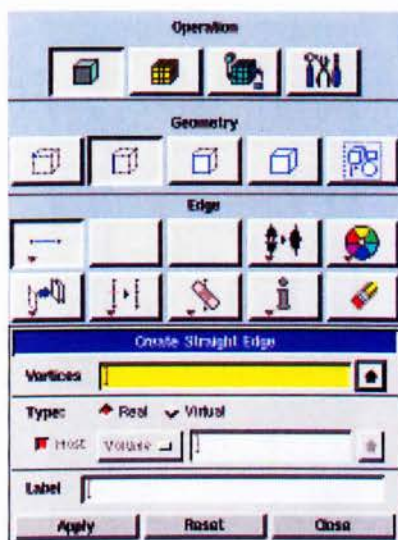
Εικόνα 3.3: Καρτέλα κατασκευής βοηθητικών συντεταγμένων.

Βήμα 2: Στη γραμμή εργαλείων λειτουργιών ακολουθούμε την πορεία Γεωμετρία - Σημείο - Δημιουργία σημείου (Εικόνα 3.4), για να κατασκευάσουμε τα σημεία (κορυφές) των δύο γεωμετριών και των παραθύρων. Τα παράθυρα έχουν μήκος 5 m και ύψος 2 m. Πρέπει να σημειωθεί ότι το κτίριο έχει σχεδιαστεί δύο φορές καθώς οι θέσεις των παραθύρων αλλάζουν ανάλογα με την περίπτωση που εξετάζεται.



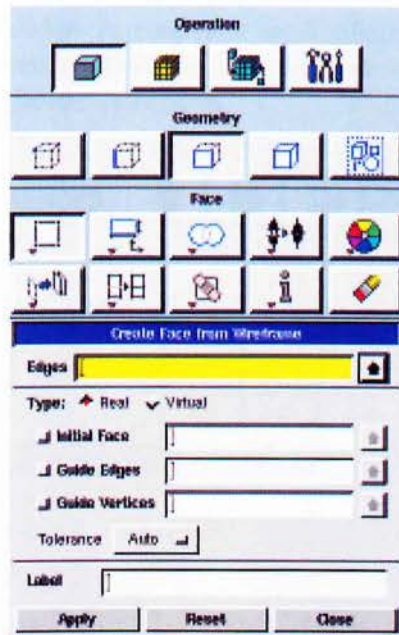
Εικόνα 3.4: Καρτέλα κατασκευής σημείων (κορυφών).

Βήμα 3: Στη γραμμή εργαλείων λειτουργιών ακολουθούμε την πορεία Γεωμετρία - Ακμή - Δημιουργία ακμής (Εικόνα 3.5), για να ενώσουμε τα σημεία των δύο γεωμετριών και των παραθύρων.



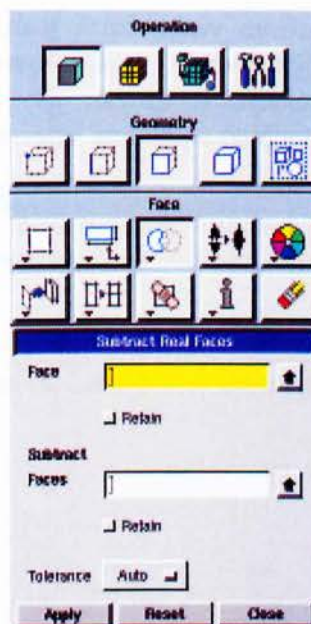
Εικόνα 3.5: Καρτέλα κατασκευής ακμών.

Βήμα 4: Στη γραμμή εργαλείων λειτουργιών ακολουθούμε την πορεία Γεωμετρία - Πλευρά - Δημιουργία πλευράς (Εικόνα 3.6), για να ενοποιήσουμε τις ακμές των δύο γεωμετριών και των παραθύρων.



Εικόνα 3.6: Καρτέλα κατασκευής πλευρών.

Βήμα 5: Στη γραμμή εργαλείων λειτουργιών ακολουθούμε την πορεία Γεωμετρία - Πλευρά - Αφαίρεση πλευράς (Εικόνα 3.7) και διαχωρίζουμε τους τοίχους από τα παράθυρα, καθώς αργότερα θα τοποθετηθούν σε αυτά διαφορετικές ιδιότητες.



Εικόνα 3.7: Καρτέλα αφαίρεσης πλευρών.

Βήμα 6: Στη γραμμή εργαλείων λειτουργιών ακολουθούμε την πορεία Γεωμετρία - Όγκος - Ενοποίηση πλευρών (Εικόνα 3.8), για να ενοποιήσουμε τις πλευρές δημιουργώντας εσωτερικά αυτών έναν όγκο.

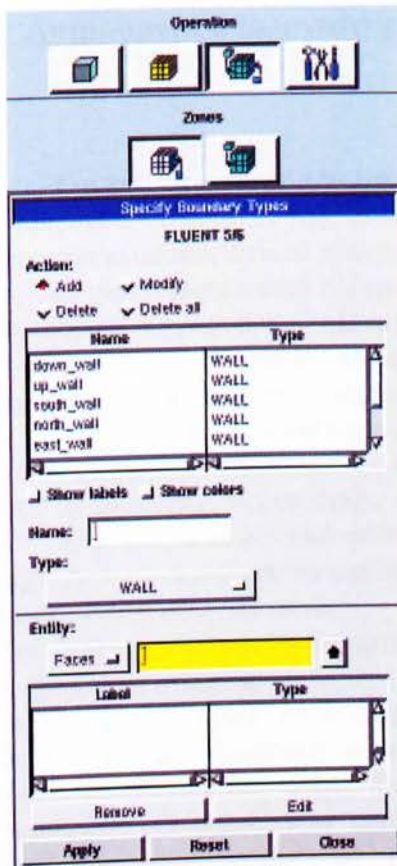


Εικόνα 3.8: Καρτέλα ενοποίησης πλευρών - δημιουργίας όγκου.

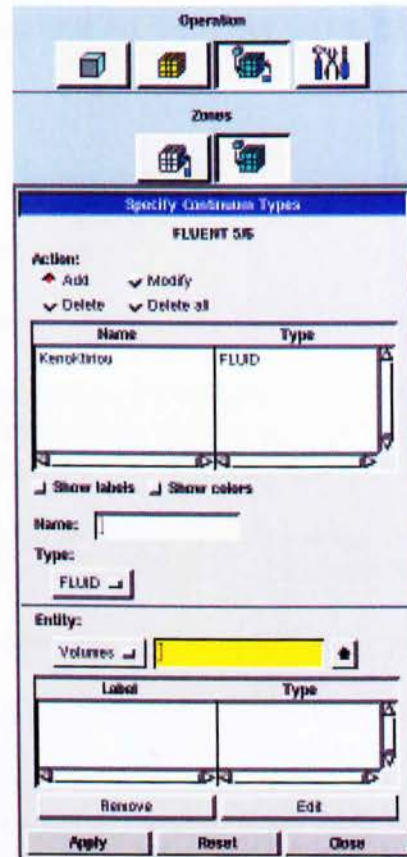
Βήμα 7: Στη γραμμή εργαλείων λειτουργιών ακολουθούμε την πορεία Οριακές συνθήκες - Προσδιορισμός τύπου ορίων (Εικόνα 3.9), για να προσδιορίσουμε τον τύπο των ορίων του κτιρίου. Οι τοίχοι, το πάτωμα και η στέγη ορίζονται ως αδιαβατικά τοιχώματα (wall), ενώ τα παράθυρα ορίζονται ως inlet και outlet.

Βήμα 8: Στη γραμμή εργαλείων λειτουργιών ακολουθούμε την πορεία Οριακές συνθήκες - Προσδιορισμός τύπου συνέχειας (Εικόνα 3.10), για να προσδιορίσουμε τον τύπο της συνέχειας στο εσωτερικό του κτιρίου, όπου στην περίπτωση μας είναι ρευστό (fluid).

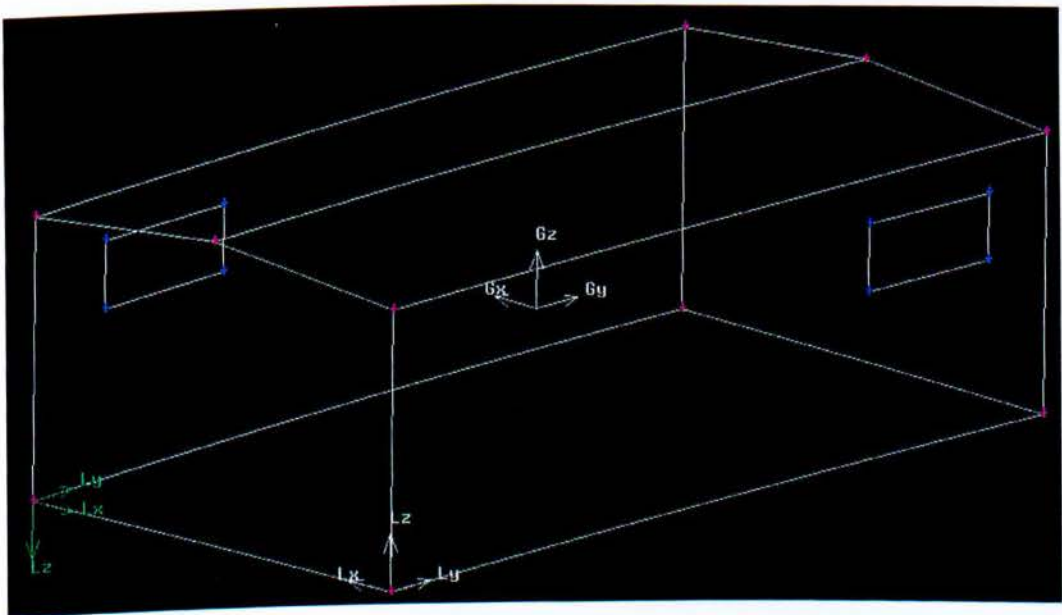
Με την ολοκλήρωση του 8ου βήματος, το κτίριο έχει πάρει την τελική του μορφή (Εικόνα 3.11) και μπορεί να ξεκινήσει η κατασκευή του πλέγματος.



Εικόνα 3.9: Καρτέλα προσδιορισμού τύπου ορίων.



Εικόνα 3.10: Καρτέλα προσδιορισμού τύπου συνέχειας.



Εικόνα 3.11: Τελική μορφή κτιρίου.

3.4 Δημιουργία υπολογιστικού πλέγματος στο γεωμετρικό μοντέλο

Για την κατασκευή του υπολογιστικού πλέγματος στη γεωμετρία που έχουμε κατασκευάσει δίνονται οι εξής δυνατότητες από το πρόγραμμα:

- Δημιουργία υπολογιστικού πλέγματος σε οριακό στρώμα.
- Δημιουργία υπολογιστικού πλέγματος σε ακμή.
- Δημιουργία υπολογιστικού πλέγματος σε επιφάνεια.
- Δημιουργία υπολογιστικού πλέγματος σε όγκο.
- Δημιουργία υπολογιστικού πλέγματος σε ομάδα ακμών, επιφανειών και όγκων.

Για τις ανάγκες κατασκευής του υπολογιστικού πλέγματος της γεωμετρίας του κτιρίου, θα χρησιμοποιήσουμε τις επιλογές δημιουργίας υπολογιστικού πλέγματος σε ακμές, σε επιφάνειες και σε όγκο.

Ένα ακόμη σημαντικό στοιχείο, είναι η επιλογή του σχήματος των επιμέρους στοιχείων που αποτελούν το υπολογιστικό πλέγμα. Το GAMBIT δίνει τις εξής τρεις επιλογές για τα στοιχεία αυτά:

- *Hex*: Ο όγκος στον οποίο θα κατασκευάσουμε υπολογιστικό πλέγμα θα αποτελείται από εξαεδρικά στοιχεία.
- *Hex/Wedge*: Ο όγκος στον οποίο θα κατασκευάσουμε υπολογιστικό πλέγμα θα αποτελείται από εξαεδρικά στοιχεία και όπου αυτό κρίνεται απαραίτητο από σφηνοειδή στοιχεία (σαν τμήματα από κομμένη πίτα).
- *Tet/Hybrid*: Ο όγκος στον οποίο θα κατασκευάσουμε υπολογιστικό πλέγμα θα αποτελείται από τετραεδρικά στοιχεία αλλά όπου κρίνεται απαραίτητο θα συμπεριλαμβάνονται και εξαεδρικά, πυραμιδοειδή και σφηνοειδή στοιχεία.

Το είδος στοιχείου που έχει επιλεγεί για την κατασκευή του πλέγματος στη γεωμετρία μας είναι τα τετραεδρικά υβριδικά καθώς τα τετράεδρα δεν αρκούν για τις λεπτομέρειες στις υπό κλίση πλευρές και ακμές της στέγης.

Η διαδικασία κατασκευής του πλέγματος είναι η ακόλουθη:

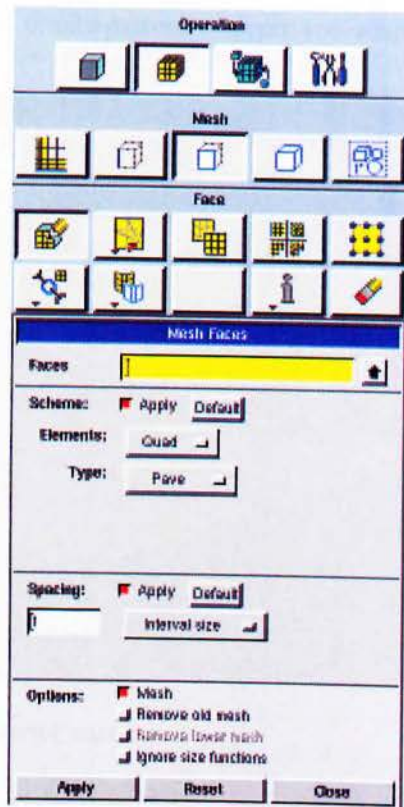
Βήμα 1: Στη γραμμή εργαλείων λειτουργιών ακολουθούμε την πορεία Πλέγμα - Ακμή (Εικόνα 3.12), για τη δημιουργία πλέγματος στις ακμές. Η απόσταση μεταξύ των κόμβων των στοιχείων (spacing) είναι 400.

Βήμα 2: Στη γραμμή εργαλείων λειτουργιών ακολουθούμε την πορεία Πλέγμα - Πλευρά (Εικόνα 3.13), για την ένωση του πλέγματος των ακμών, ώστε το πλέγμα να επεκταθεί στις πλευρές.

Βήμα 3: Στη γραμμή εργαλείων λειτουργιών ακολουθούμε την πορεία Πλέγμα - Όγκος (Εικόνα 3.14), για την ένωση του πλέγματος των πλευρών, ώστε το πλέγμα να επεκταθεί στο εσωτερικό του κτιρίου.



Εικόνα 3.12: Καρτέλα δημιουργίας πλέγματος σε ακμή.

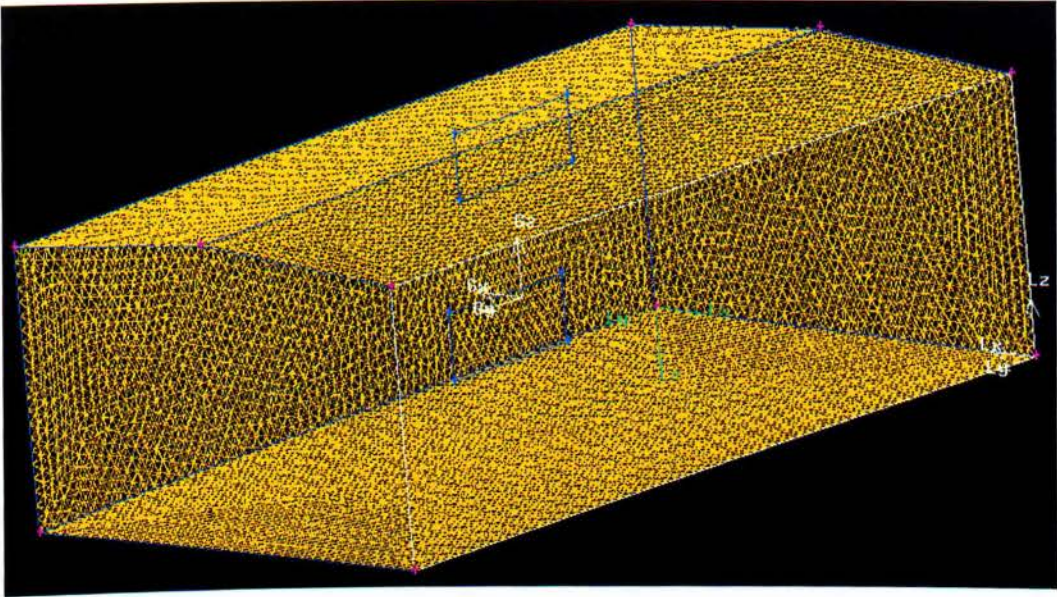


Εικόνα 3.13: Καρτέλα δημιουργίας πλέγματος σε πλευρά.



Εικόνα 3.14: Καρτέλα δημιουργίας πλέγματος σε όγκο.

Με την ολοκλήρωση του 3ου βήματος το υπολογιστικό πλέγμα του κτιρίου έχει πάρει την τελική του μορφή (Εικόνα 3.15).



Εικόνα 3.15: Τελική μορφή πλέγματος κτιρίου.

Κεφάλαιο 4

Υπολογιστικό πακέτο Fluent

Στο εν λόγω κεφάλαιο γίνεται εκτενής αναφορά στο εμπορικό λογισμικό πρόγραμμα *Fluent*, στην προετοιμασία των προσομοιώσεων, τη διεκπεραίωσή τους και τη λήψη των αποτελεσμάτων.

4.1 Γενικά

Το υπολογιστικό πακέτο *Fluent*, είναι ένα λογισμικό, στο οποίο ο μελετητής χρησιμοποιεί αριθμητικές μεθόδους για την επίλυση φαινομένων μετάδοσης θερμότητας, ροής και στερεοποίησης - τήξης. Η χρήση του λογισμικού απαιτεί την ύπαρξη ενός σχεδιαστικού πακέτου, εν προκειμένω το *Gambit*, από το οποίο κατασκευάζεται το γεωμετρικό μοντέλο και το υπολογιστικό πλέγμα, τα οποία στη συνέχεια εισάγονται σα δεδομένα στο *Fluent* και γίνονται οι απαραίτητοι υπολογισμοί.

Το υπολογιστικό πακέτο *Fluent*, μπορεί να επιλύσει φαινόμενα τα οποία εξελίσσονται σε 2 ή 3 διαστάσεις. Αντικείμενο της πτυχιακής εργασίας είναι η προσομοίωση 5 διαφορετικών περιπτώσεων πυρκαγιάς ξύλινης παλέττας στο εσωτερικό ενός βιομηχανικού κτηρίου (μεταλλική κατασκευή που χρησιμοποιείται ως αποθήκη). Επομένως το φαινόμενο είναι τρισδιάστατο και ο στόχος της χρησιμοποίησης του *Fluent* είναι να ελέγξουμε αρχικά το υπολογιστικό πλέγμα που κατασκευάσαμε στο *Gambit*, για πιθανές ατέλειες και κατόπιν να προσομοιώσουμε το φαινόμενο της πυρκαγιάς.

4.2 Βασικές λειτουργίες

Οι βασικές λειτουργίες (operations) του προγράμματος, που είναι απαραίτητες για κάθε στάδιο εκτέλεσης του πειράματος, είναι οι εξής:

- Εντολές που αφορούν την εισαγωγή του αρχείου από το σχεδιαστικό στο υπολογιστικό πακέτο.
- Εντολές που αφορούν το υπολογιστικό πλέγμα, το οποίο κατασκευάστηκε στο σχεδιαστικό πακέτο και πλέον χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό χαρακτηριστικών μεγεθών, όπως η θερμοκρασία, τα ποσοστά CO₂ κτλ.

- Εντολές που αφορούν τις οριακές συνθήκες. Σε αυτήν την ενότητα ορίζονται και οι εξισώσεις που διέπουν τον ρυθμό έκλυσης ενέργειας της πηγής καθώς και το μέγεθος και τη θέση αυτής.
- Εντολές που αφορούν την αριθμητική επίλυση του προβλήματος καθώς και τον προσδιορισμό του χρονικού και χωρικού βήματος κάτω από το οποίο θα πραγματοποιηθεί η επαναληπτική διαδικασία για τη σύγκλιση της λύσης.
- Εντολές που αφορούν την απεικόνιση των αποτελεσμάτων σε περιβάλλον με γραφικά καθώς και επίσης απεικόνιση των αποτελεσμάτων σε γραφικές παραστάσεις.

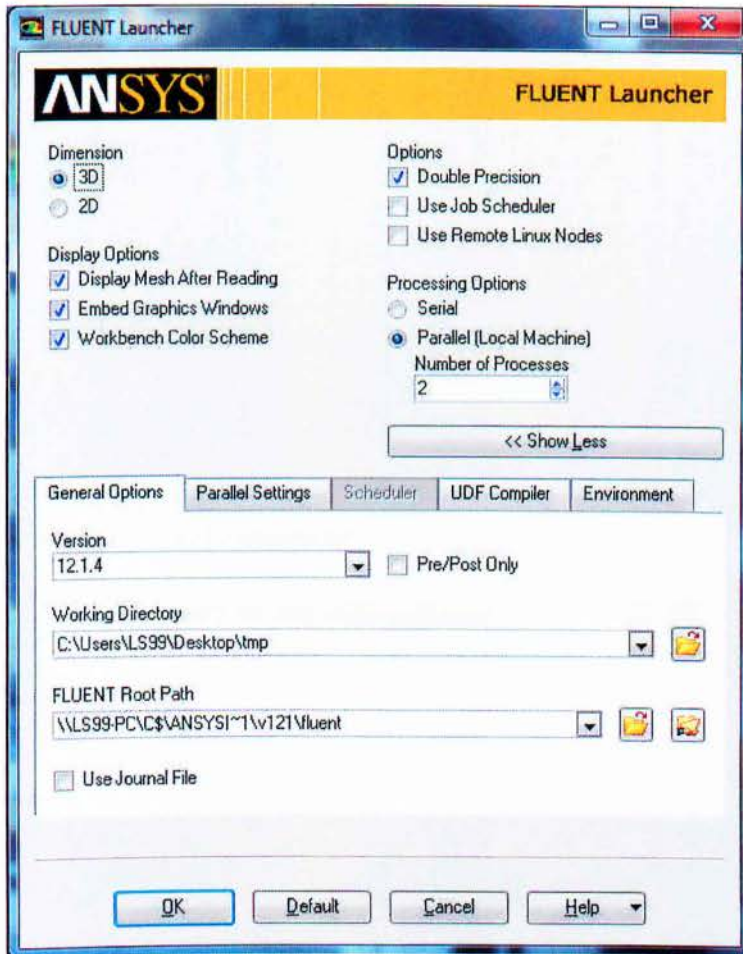
Η ανάλυση κάθε φαινομένου απαιτεί ειδικές γνώσεις για τη μοντελοποίηση της και την αριθμητική επίλυση των σχετικών προς το φαινόμενο διαφορικών εξισώσεων. Το κείμενο που ακολουθεί είναι μια εισαγωγή στις βασικές λειτουργίες του Fluent, και γίνεται εκτενής αναφορά στη μοντελοποίηση και επίλυση φαινομένων στερεοποίησης και τήξης. Η αναφορά σε φαινόμενα μεταφοράς ή ροής ρευστών δεν αφορά την παρούσα διπλωματική εργασία και παραλείπεται.

4.3 Διαδικασία αντιμετώπισης και επίλυσης προβλημάτων

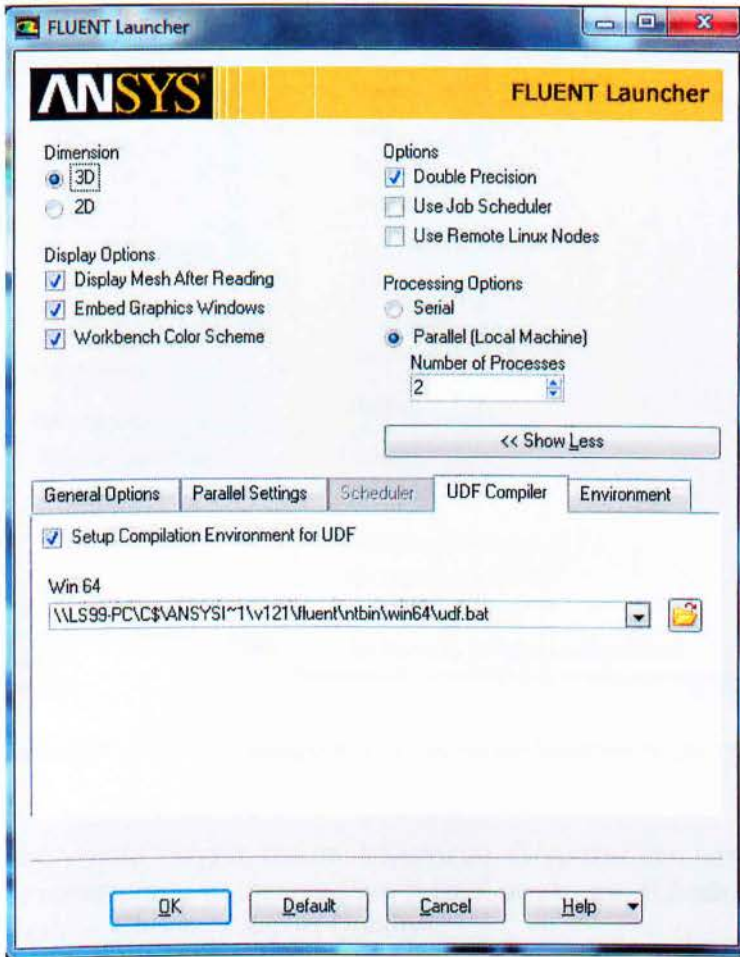
Η αναλυτική προσέγγιση για τον τρόπο εισαγωγής και επεξεργασίας των δεδομένων για την προσομοίωση των επιθυμητών περιπτώσεων, γίνεται στα επόμενα βήματα. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η ακόλουθη:

Βήμα 1: Κατά την έναρξη του Fluent, μας ζητείται να επιλέξουμε σε πόσες διαστάσεις εξελίσσεται το φαινόμενό μας (**2-D**, **3-D**) και επιπλέον αν θέλουμε απλής ή διπλής ακρίβειας αποτελέσματα (**2-ddp**, **3-ddp**). Επίσης ορίζεται η χρησιμοποίηση ενός ή περισσότερων πυρήνων και είναι δυνατή η εισαγωγή **udf**.

Τα **udf** που χρησιμοποιήθηκαν, είναι **modules** που εισάγονται στον εμπορικό κώδικα και περιγράφουν τους όρους πηγής ενέργειας και των προϊόντων καύσης. Οι περιπτώσεις που προσομοιώθηκαν, αντιμετωπίστηκαν ως προβλήματα 3 διαστάσεων, ενώ τα αποτελέσματα ήταν διπλής ακρίβειας.

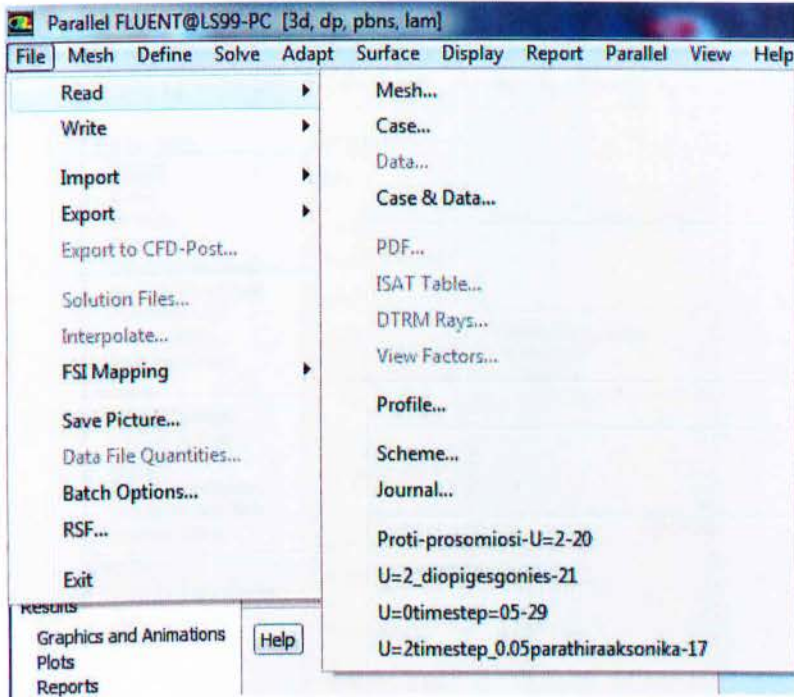


Εικόνα 4.1: Παράθυρο εκκίνησης - επιλογής διαστάσεων και ακρίβειας.



Εικόνα 4.2: Παράθυρο εισαγωγής *udf*.

Βήμα 2: Γίνεται η εισαγωγή του γεωμετρικού μοντέλου και του υπολογιστικού πλέγματος. Το αρχείο το οποίο αναγνωρίζει το Fluent έχει την κατάληξη *.msh*. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής: **File** → **Read** → **Case... / Data... / Case & Data...**

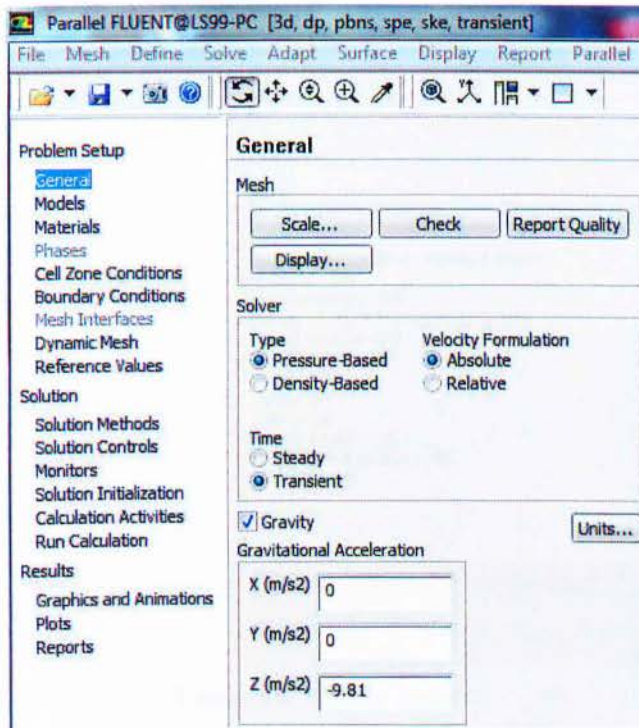


Εικόνα 4.3: Εισαγωγή γεωμετρικού μοντέλου και υπολογιστικού πλέγματος.

Βήμα 3: Αρχικά γίνεται έλεγχος του υπολογιστικού πλέγματος που κατασκευάστηκε στο GAMBIT, προκειμένου να αποφευχθούν πιθανά σφάλματα. Η διαδικασία είναι: **General** → **Mesh** → **Check... / Report Quality...**

Επίσης, μέσω της καρτέλας General, στην περιοχή Time επιλέγεται το Steady για να προσομοιωθούν οι αρχικές ροές αέρα στο εσωτερικό του κτιρίου για κάθε περίπτωση. Το Transient επιλέγεται όταν υπόλοιπα όλων των εξισώσεων που επιλύονται, πέσουν κάτω από 10^{-3} .

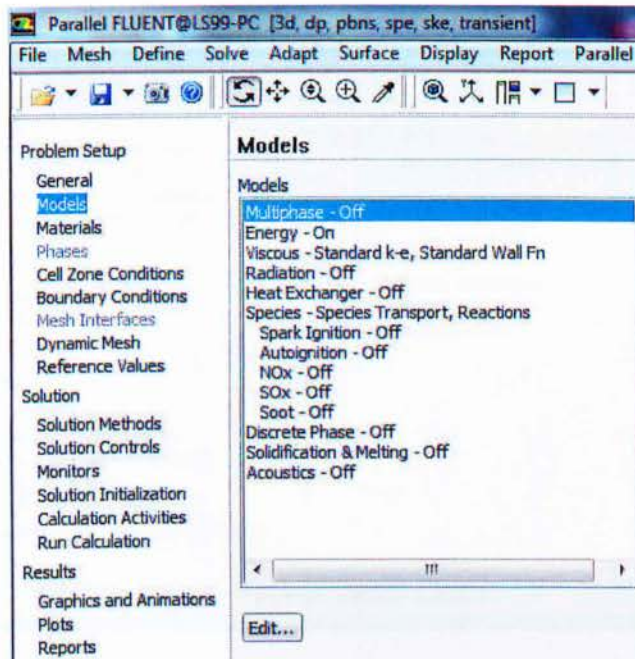
Τέλος, ορίζεται η επιτάχυνση της βαρύτητας στον κάθετο άξονα. Στην περίπτωσή μας ο άξονας αυτός είναι ο z και έχει φορά αρνητική σε σχέση με τη βαρύτητα, εξού και το -9,81.



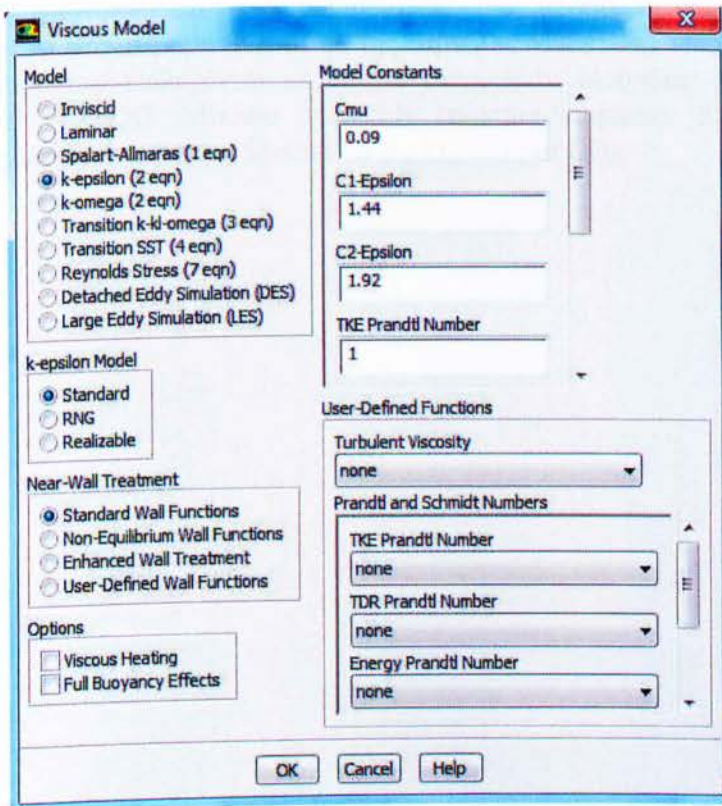
Εικόνα 4.4: Καρτέλα General.

Βήμα 4: Γίνεται η επιλογή της αριθμητικής μεθόδου επίλυσης του φαινομένου μέσω της καρτέλας Models.

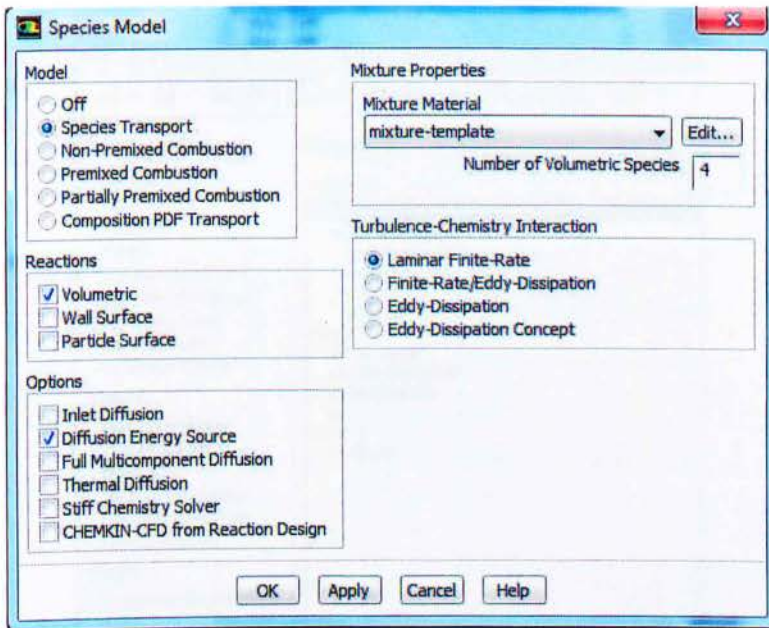
Συγκεκριμένα, επιλέγονται: Energy (On), Viscous (Standard k-e) και Species (Species Transport, mixture-template, Number of Volumetric Species = 4).



Εικόνα 4.5: Καρτέλα Models.



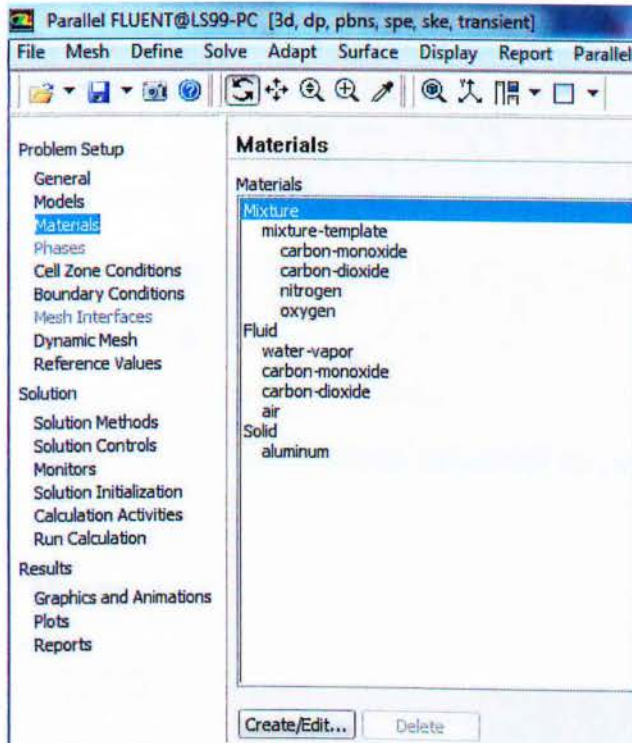
Εικόνα 4.6: Παράθυρο επιλογής Viscous Model.



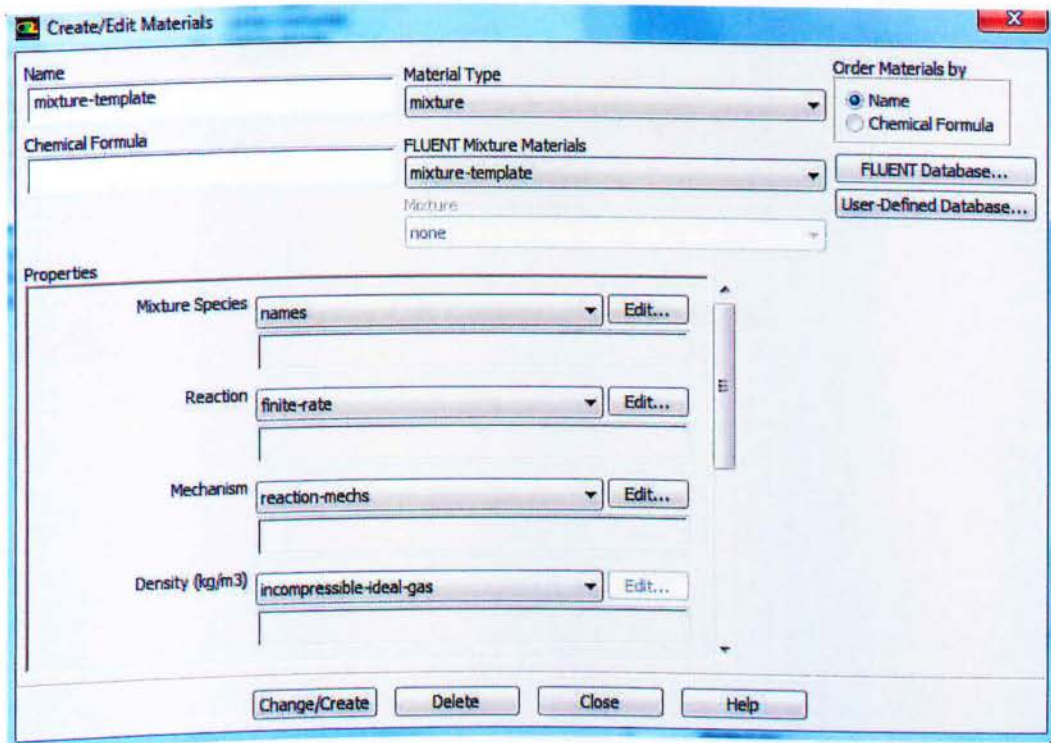
Εικόνα 4.7: Παράθυρο επιλογής Species Model.

Βήμα 5: Πραγματοποιείται ο προσδιορισμός του μέσου ή του υλικού που επεξεργαζόμαστε στο πείραμα μας, μέσω της καρτέλας Materials.

Συγκεκριμένα επιλέγονται μέσω του Create/Edit Materials: Material Type (mixture) και FLUENT Mixture Materials (mixture-template). Επιλέγοντας το mixture-template εισάγονται ως Species τα N_2 , O_2 , CO και CO_2 .



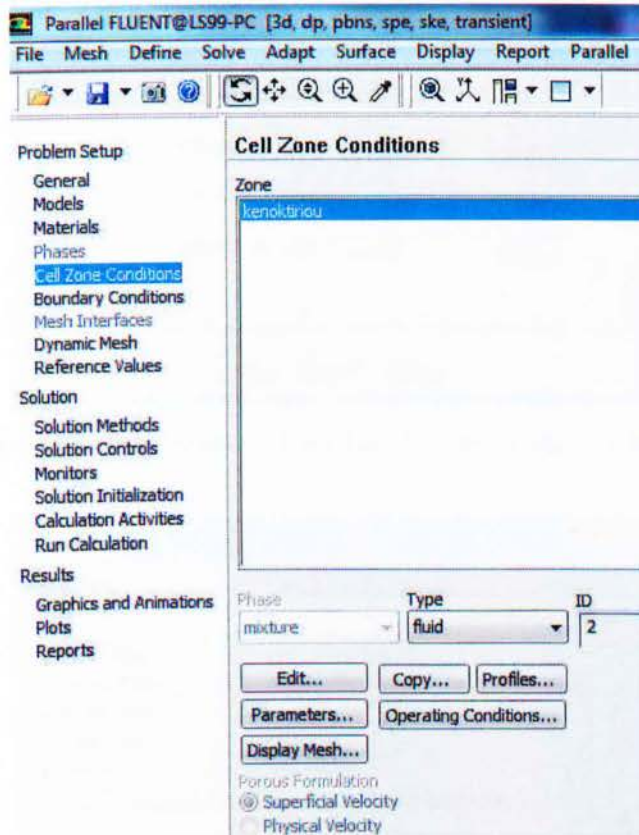
Εικόνα 4.8: Καρτέλα Materials.



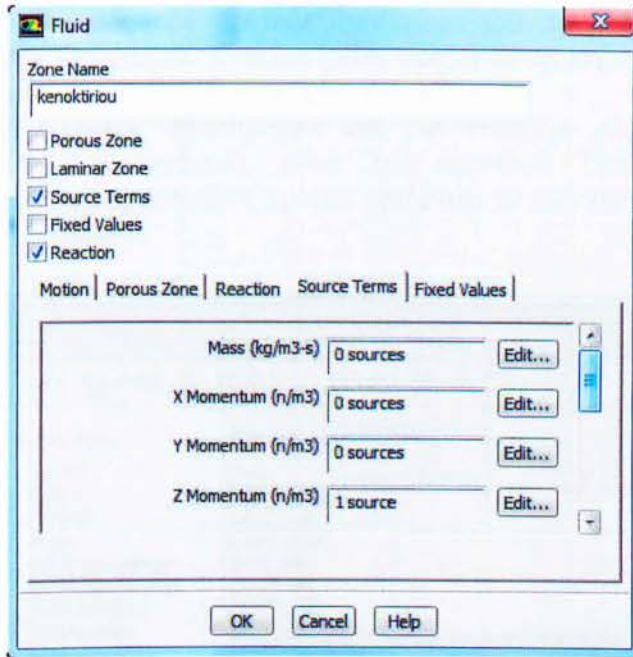
Εικόνα 4.9: Παράθυρο διαμόρφωσης Materials.

Βήμα 6: Γίνεται προσδιορισμός των συνθηκών του πλέγματος, μέσω της καρτέλας Cell Zone Conditions.

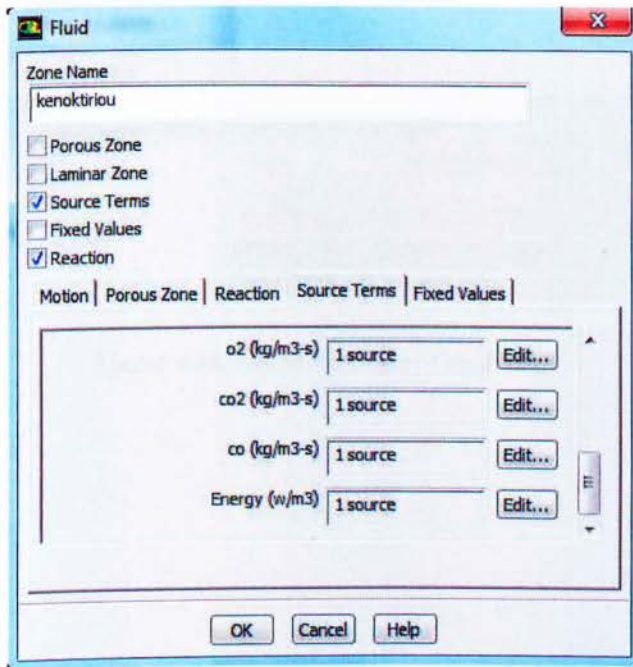
Αρχικά, ορίζεται το πλέγμα ως Fluid. Στη συνέχεια, μέσω του παραθύρου της επιλογής Fluid, επιλέγονται: Source Terms και Reaction. Στην καρτέλα του Source Terms ορίζονται ως 1 source όλα τα species (N_2 , O_2 , CO , CO_2) και το Z Momentum. Τέλος, ορίζεται η πηγή στην επιλογή Energy με την εισαγωγή του udf.



Εικόνα 4.10: Καρτέλα Cell Zone Conditions.



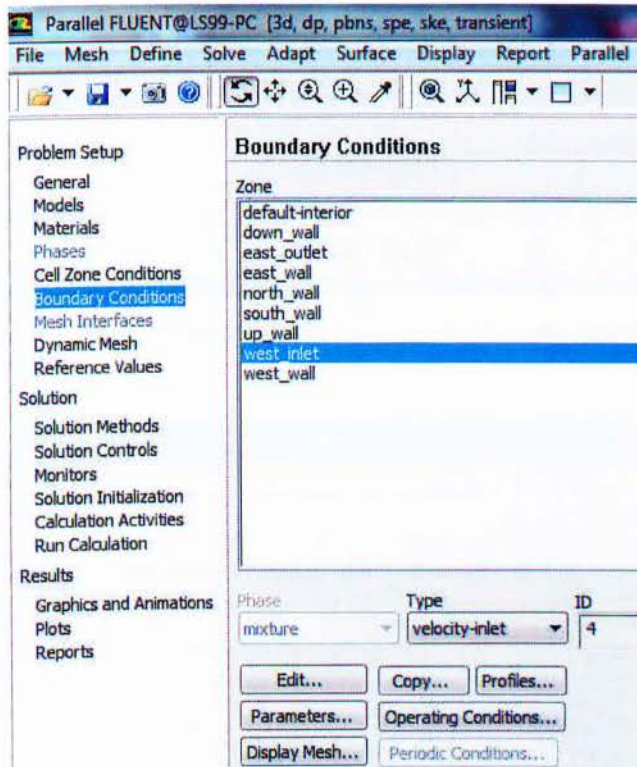
Εικόνα 4.11: Παράθυρο ρυθμίσεων Fluid. Προσδιορισμός πηγής για Z Momentum.



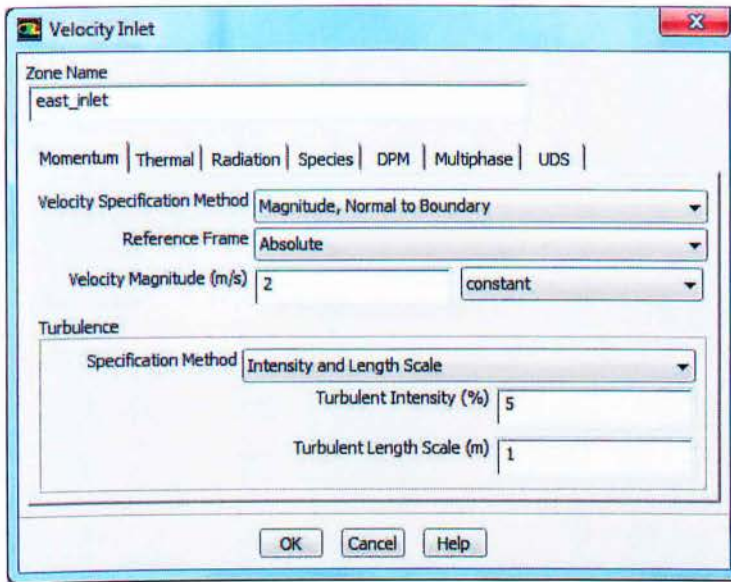
Εικόνα 4.12: Παράθυρο ρυθμίσεων Fluid. Προσδιορισμός πηγής για Species και Energy.

Βήμα 7: Γίνεται ορισμός των οριακών συνθηκών του προβλήματος μέσω της καρτέλας Boundary Conditions. Συγκεκριμένα, ορίζονται τα σημεία εισαγωγής και εξαγωγής αέρα και οι ιδιότητες του εισερχόμενου ρευστού.

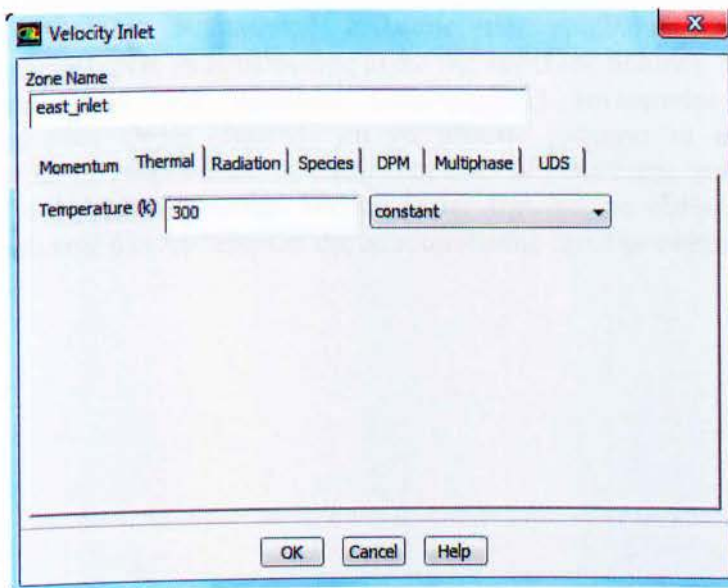
Επιλέγεται ο τύπος velocity-inlet και στη συνέχεια μέσω της καρτέλας Momentum ορίζεται η ταχύτητα, μέσω της καρτέλας Thermal ορίζεται η θερμοκρασία και μέσω της καρτέλας Species ορίζονται τα ποσοστά των N_2 , O_2 , CO και CO_2 .



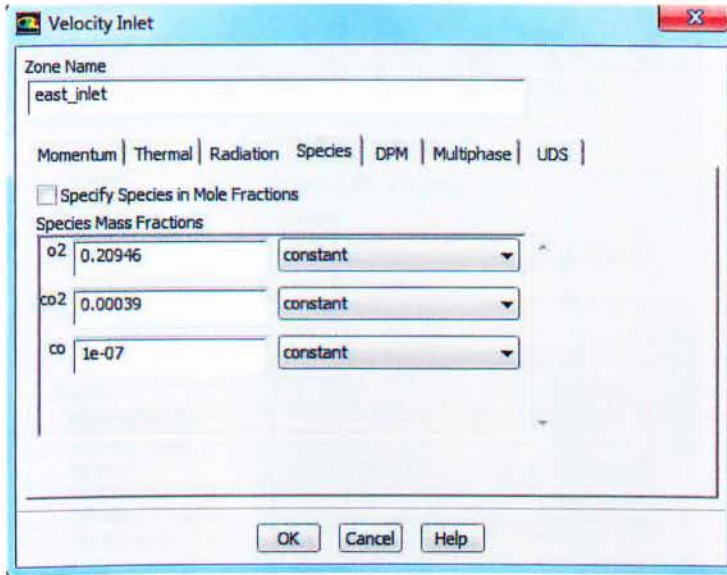
Εικόνα 4.13: Καρτέλα Boundary Conditions.



Εικόνα 4.14: Παράθυρο ρυθμίσεων Velocity Inlet. Καρτέλα Momentum.



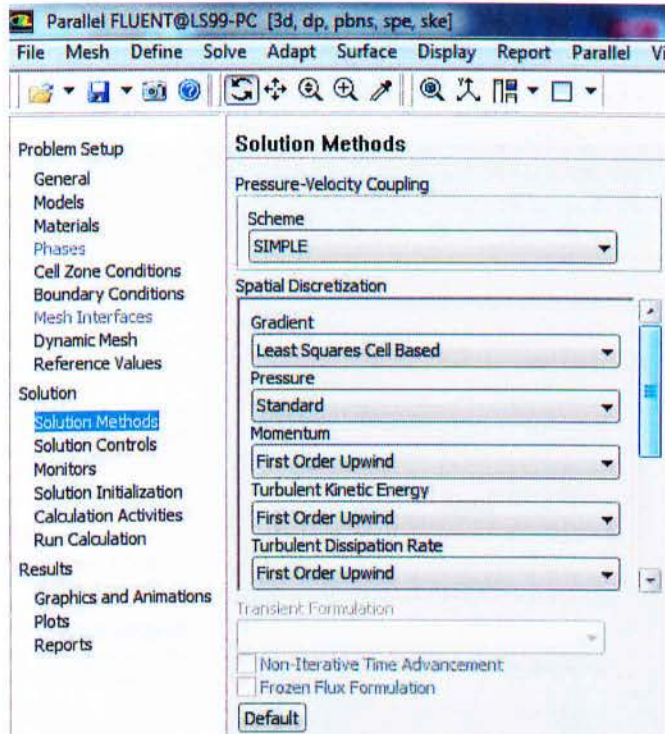
Εικόνα 4.15: Παράθυρο ρυθμίσεων Velocity Inlet. Καρτέλα Thermal.



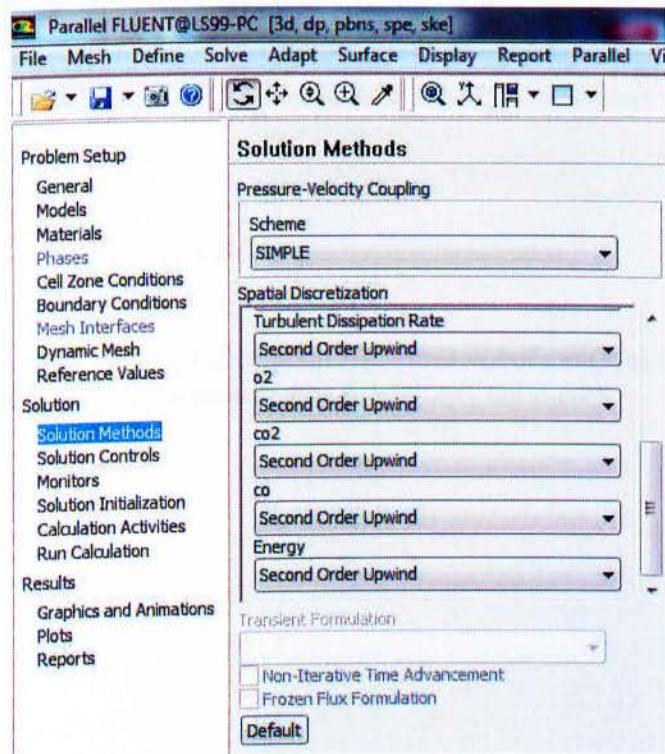
Εικόνα 4.16: Παράθυρο ρυθμίσεων Velocity Inlet. Καρτέλα Species.

Βήμα 8: Έναρξη της διαδικασίας επίλυσης του προβλήματος, επιλέγοντας κατάλληλους συντελεστές υποχαλάρωσης μέσω της καρτέλας Solution Methods.

Για τα πρώτα 100 iterations (επαναλήψεις) επιλέγονται συντελεστές υποχαλάρωσης First Order Upwind, για να πέσουν γρήγορα τα υπόλοιπα των εξισώσεων χωρίς να επηρεάσουν τα αποτελέσματα. Στη συνέχεια, για το υπόλοιπο της προσομοίωσης χρησιμοποιείται Second Order Upwind, με εξαίρεση την πίεση (Pressure), όπου καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης έχει την επιλογή Standard.

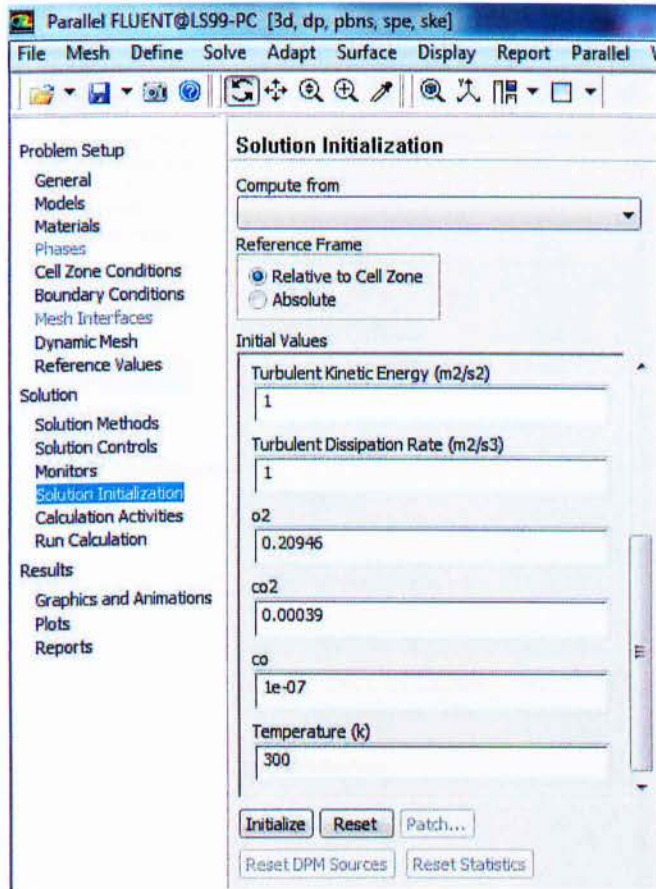


Εικόνα 4.17: Καρτέλα Solution Methods (First Order Upwind).



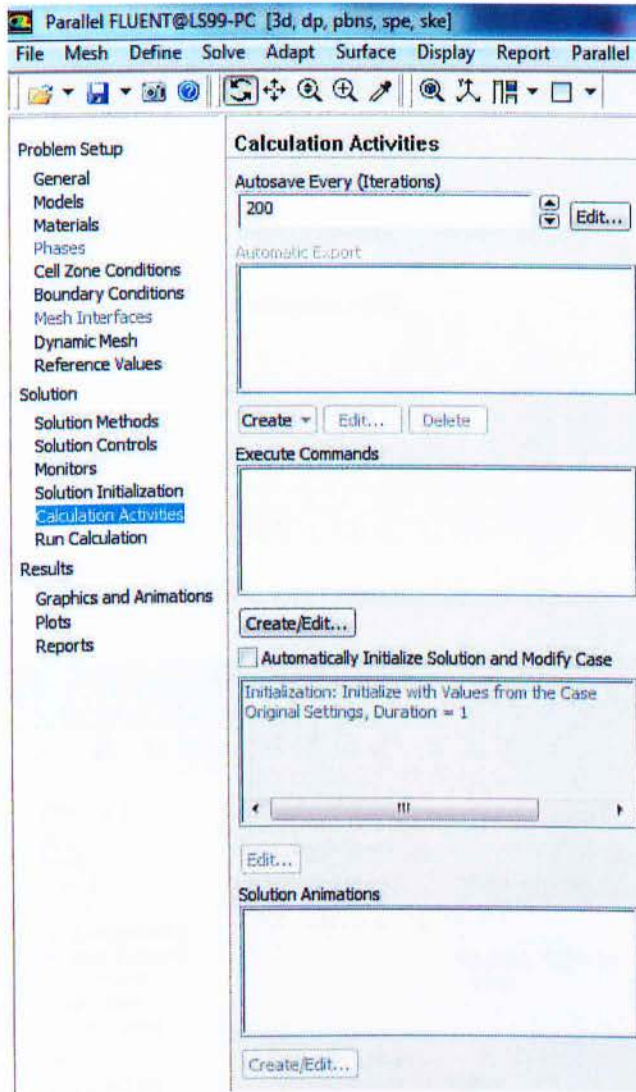
Εικόνα 4.18: Καρτέλα Solution Methods (Second Order Upwind).

Βήμα 9: Γίνεται ο ορισμός των αρχικών συνθηκών στο εσωτερικό του κτιρίου μέσω της καρτέλας Solution Initialization. Το βήμα αυτό πραγματοποιείται πριν ξεκινήσει η προσομοίωση.



Εικόνα 4.19: Καρτέλα Solution Initialization.

Βήμα 10: Μέσω της καρτέλας Calculation Activities προσδιορίζεται η συχνότητα που θα γίνεται αποθήκευση της προσομοίωσης (iterations / autosave).

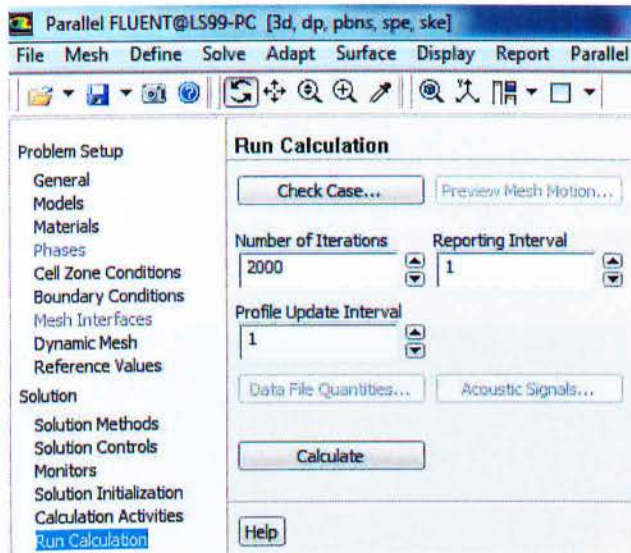


Εικόνα 4.20: Καρτέλα Calculation Activities.

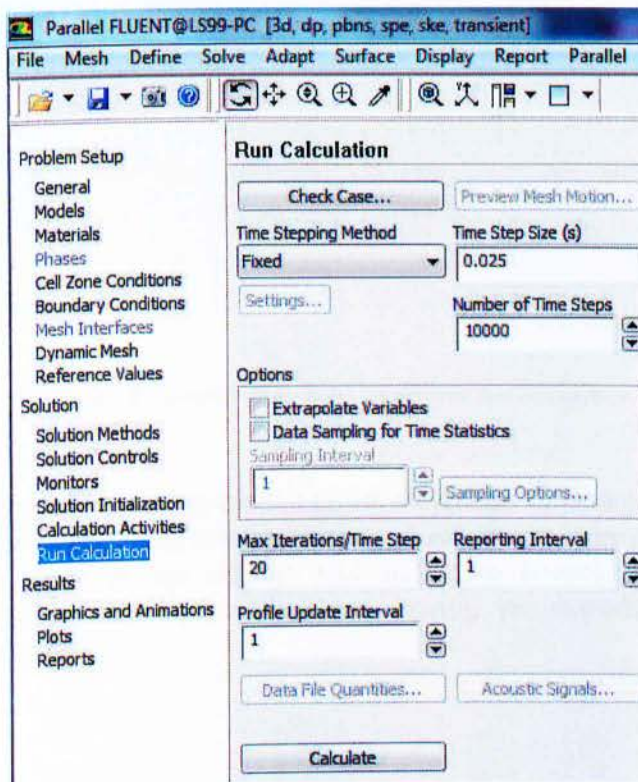
Βήμα 11: Μέσω της καρτέλας Run Calculation, γίνεται η έναρξη της προσομοίωσης. Αρχικά, όταν ο χρόνος βρίσκεται στην επιλογή steady, ορίζεται ο αριθμός των επαναλήψεων (iteration). Όταν το μέρος αυτό τελειώσει και ο χρόνος γίνει transient ορίζονται τα Time Step Size και Max Iterations / Time Step.

Το Time Step είναι το χρονικό βήμα της επίλυσης της προσομοίωσης, δηλαδή το χρονικό σημείο που ξεκινά κάθε φορά η επίλυση των εξισώσεων. Όσο μικρότερο είναι το Time Step, τόσο πιο ακριβή και ασφαλή είναι τα αποτελέσματα.

Πρέπει να σημειωθεί ότι έχουν γίνει προσομοιώσεις με Time Step 0,025 και 0,050 για να συγκριθεί η ακρίβεια των αποτελεσμάτων.



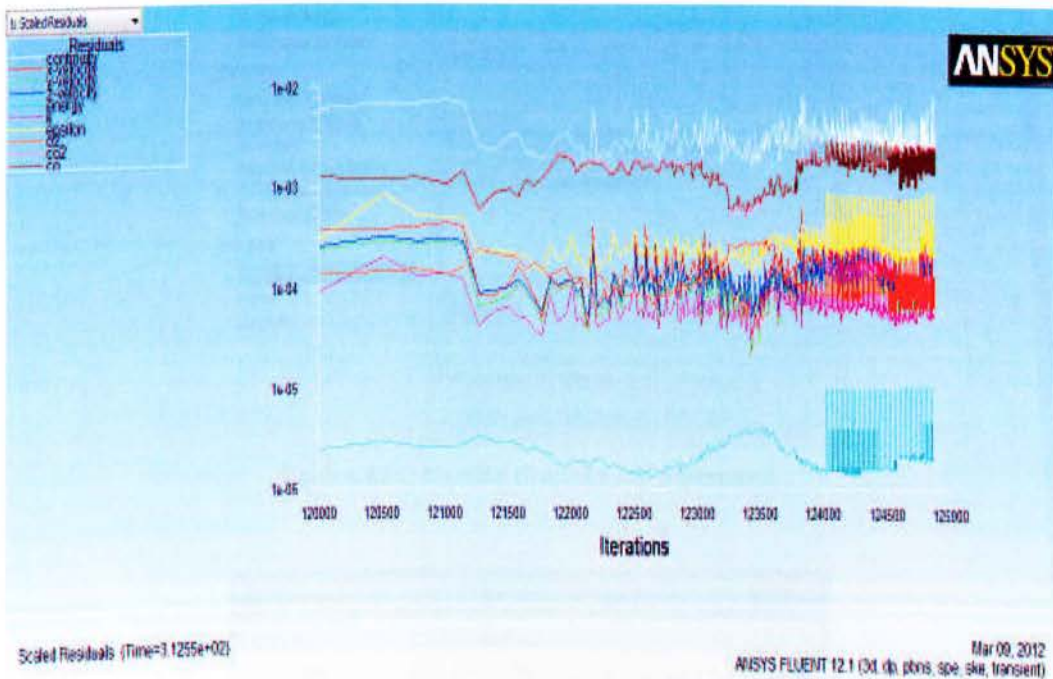
Εικόνα 4.21: Καρτέλα Run Calculation για χρόνο steady.



Εικόνα 4.22: Καρτέλα Run Calculation για χρόνο transient.

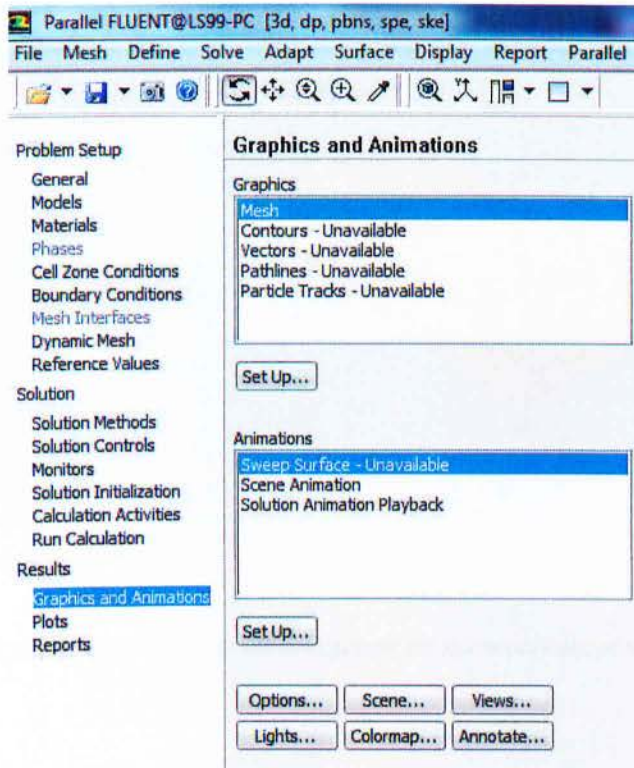
4.4 Έλεγχος κατά τη διάρκεια και μετά το πέρας της προσομοίωσης

Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης είναι δυνατός και απαιτητός ο έλεγχος της πορείας επίλυσης των εξισώσεων και των αποτελεσμάτων τους. Πρώτη εκτίμηση γίνεται από την κεντρική οθόνη του Fluent, όπου παρουάζονται γραφικά τα υπόλοιπα των εξισώσεων.

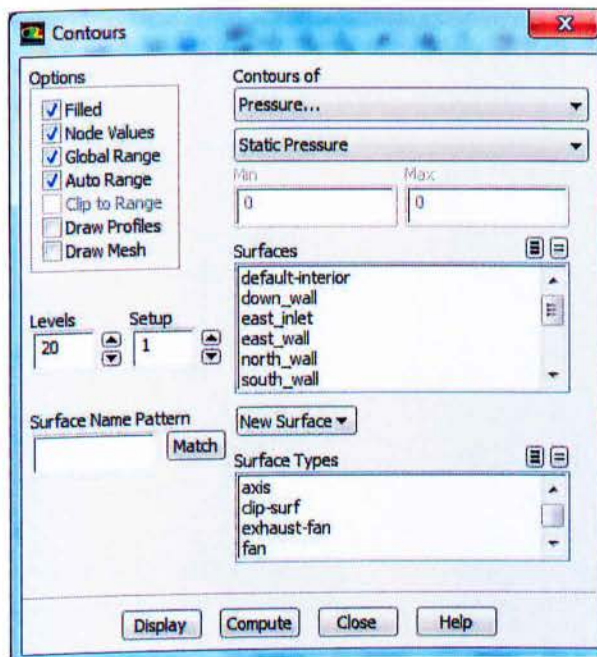


Εικόνα 4.23: Γραφική απεικόνιση υπολοίπων των εξισώσεων.

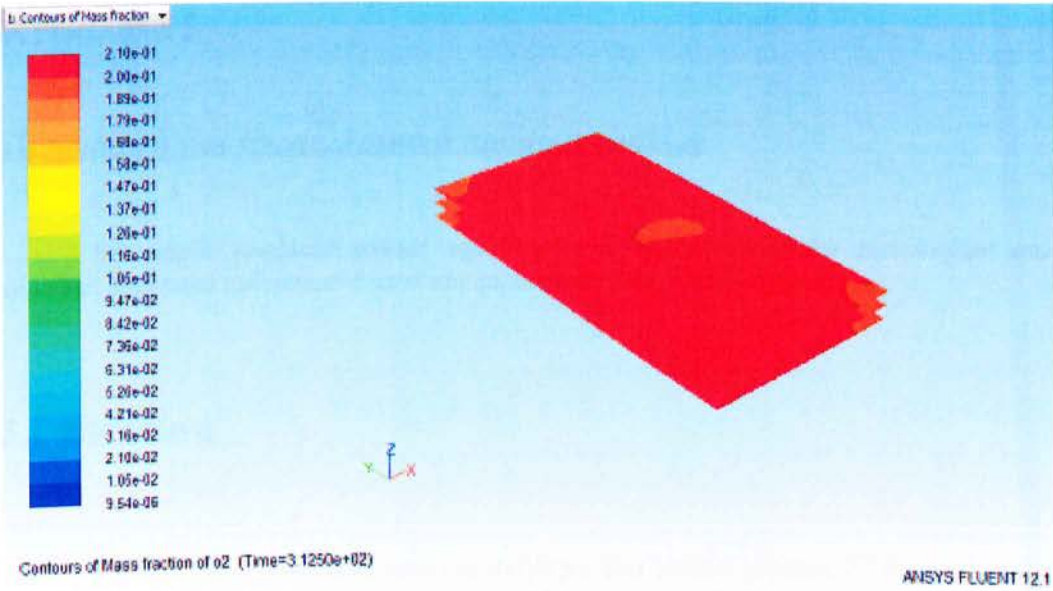
Με διακοπή της επίλυσης μπορούμε να ελέγξουμε τα επιθυμητά στοιχεία της προσομοίωσης μέσω γραφικής αναπαράστασης. Αυτό γίνεται στην καρτέλα Graphics and Animations, όπου με την επιλογή Contours είναι δυνατόν να ελεγχθούν τα αποτελέσματα για τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή, για οποιοδήποτε σημείο στο εσωτερικό του κτιρίου.



Εικόνα 4.24: Καρτέλα Graphics and Animations.



Εικόνα 4.25: Παράθυρο επιλογής Contours.



Εικόνα 4.26: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης μέσω των *Contours*.

Κεφάλαιο 5

Περιγραφή και αποτελέσματα προσομοιώσεων

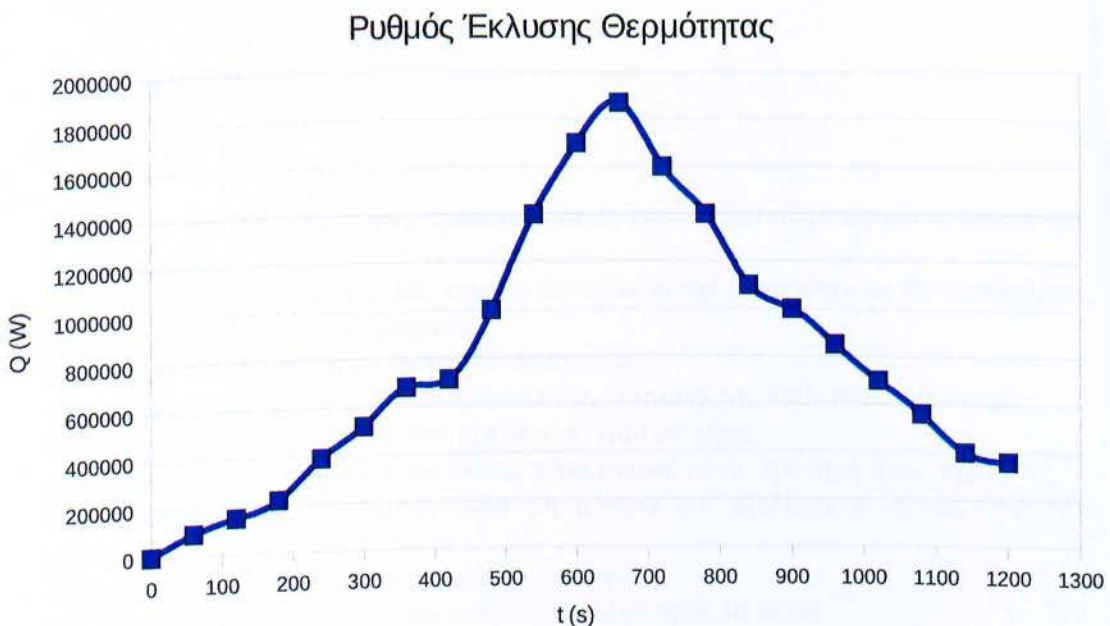
Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται περιγραφή των περιπτώσεων που εξετάστηκαν στο εμπορικό λογισμικό πρόγραμμα *Fluent* και παρουσίαση των αποτελεσμάτων τους.

5.1 Εισαγωγή

Για τη μοντελοποίηση χρησιμοποιήθηκε ένα κτίριο μήκους 27,4 m, πλάτους 14,6 m και ύψους 8,35 m. Η τριγωνική σκεπή έχει ύψος 1,2 m και κλίση 9,34°.

Σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν έχουν προσομοιωθεί οι αρχικές συνθήκες στο εσωτερικό του κτιρίου πριν την έναρξη της φωτιάς. Η προσομοίωση των αρχικών συνθηκών έχει γίνει σε σταθερό χρόνο, ενώ η επίλυση των περιπτώσεων σε μεταβαλλόμενο.

Για τη δημιουργία του *udf* και τον προσδιορισμό του ρυθμού έκλυσης θερμότητας της πηγής χρησιμοποιήθηκε το ακόλουθο διάγραμμα:



Σχήμα 5.1: Ρυθμός έκλυσης θερμότητας της πηγής.

Οι συναρτήσεις που εισήχθησαν στο udf κι εκφράζουν το ανωτέρω διάγραμμα είναι οι εξής:

$$\text{Από } 0 \text{ s έως } 420 \text{ s: } 10^{-7} * x^4 + 8 * 10^{-5} * x^3 - 0,0158 * x^2 + 2,1164 * x$$

$$\text{Από } 420 \text{ s έως } 720 \text{ s: } -5 * 10^{-5} * x^3 + 0,0682 * x^2 - 25,439 * x + 3282,257$$

$$\text{Από } 720 \text{ s έως } 1200 \text{ s: } -3 * 10^{-6} * x^3 + 0,0107 * x^2 - 14,8 * x + 7890$$

Θεωρώντας ότι το ξύλο είναι 100% C έχουμε $C + O_2 = CO_2$. Γνωρίζοντας όμως ότι για κάθε 1 kg ξύλου που καίγεται παράγονται 1,9 kg CO_2 , έχοντας τα μοριακά βάρη των ανωτέρω στοιχείων (12 για C, 32 για O_2 και 44 για CO_2) και όντας η καύση ατελής, παράγεται και CO. Αφού από 1 kg ξύλου παράγονται 1,9 kg CO_2 , σε 12 kg ξύλου παράγονται 22,8 kg CO_2 που αποτελεί το 52% των συνολικών 44 kg. Άρα οι συναρτήσεις που εισήχθησαν στο udf κι εκφράζουν τα ποσοστά CO και CO_2 είναι:

$$m_{CO_2} = m_{\xi\acute{\upsilon}\lambda\omicron\upsilon} * 0,52 * (44/12)$$

$$m_{CO} = m_{\xi\acute{\upsilon}\lambda\omicron\upsilon} * 0,48 * (28/12)$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι ο πολλαπλασιασμός με τα κλάσματα 44/12 και 28/12 αντίστοιχα, γίνεται για μετατραπούν τα mol σε kg.

5.1.1 Παραδοχές

Για την υλοποίηση των προσομοιώσεων έχουν γίνει συγκεκριμένες παραδοχές οι οποίες είναι:

- Η περιφερειακή επιφάνεια του κτιρίου δε συναλλάσει θερμότητα με το περιβάλλον, δηλαδή έχει αδιαβατικά τοιχώματα.
- Το πάχος των τοιχωμάτων θεωρείται αμελητέο.
- Η ταχύτητα του αέρα είναι σταθερή κατά τη διάρκεια της κάθε προσομοίωσης.
- Υπάρχουν μόνο μία είσοδος και μία έξοδος για τον αέρα.
- Το εσωτερικό του κτιρίου είναι άδειο, περιέχοντας μόνο την πηγή ή τις πηγές.
- Θεωρούμε ότι το φαινόμενο είναι μη μόνιμο και εξελίσσεται συναρτήσει του χρόνου.
- Η μετάδοση της θερμότητας γίνεται με συναγωγή.
- Η ανάπτυξη της φωτιάς γίνεται κατά κύριο λόγο προς τα πάνω.

5.1.2 Εξεταζόμενες περιπτώσεις

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία έχουν εξετασθεί 5 διαφορετικές περιπτώσεις πυρκαγιάς ξύλινης παλέττας μέσα στο προαναφερόμενο κτίριο. Μία εκ των περιπτώσεων έχει προσομοιωθεί δύο φορές, αλλάζοντας το χρονικό βήμα των υπολογισμών, ώστε να επιλεγεί το βέλτιστο.

Οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν είναι οι εξής:

α/α	1	2	3	4	5	6
T (K)	300	300	300	300	300	300
N ₂ (%)	78,084	78,084	78,084	78,084	78,084	78,084
O ₂ (%)	20,946	20,946	20,946	20,946	20,946	20,946
CO (%)	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001
CO ₂ (%)	0,039	0,039	0,039	0,039	0,039	0,039
Αριθμός πηγών	1	1	1	1	1	2
Όγκος πηγής (m ³)	3	3	3	3	3	3
Τοποθεσία πηγών	Κέντρο κτιρίου	Κέντρο κτιρίου	Κέντρο κτιρίου	Κέντρο κτιρίου	Γωνία	Απέναντι γωνίες
Τοποθεσία παραθύρων	Διαγώνια	Διαγώνια	Στον ίδιο άξονα	Διαγώνια	Διαγώνια	Διαγώνια
Ταχύτητα αέρα (m/s)	2	2	2	0	2	2
Χρονικό βήμα (s)	0,025	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

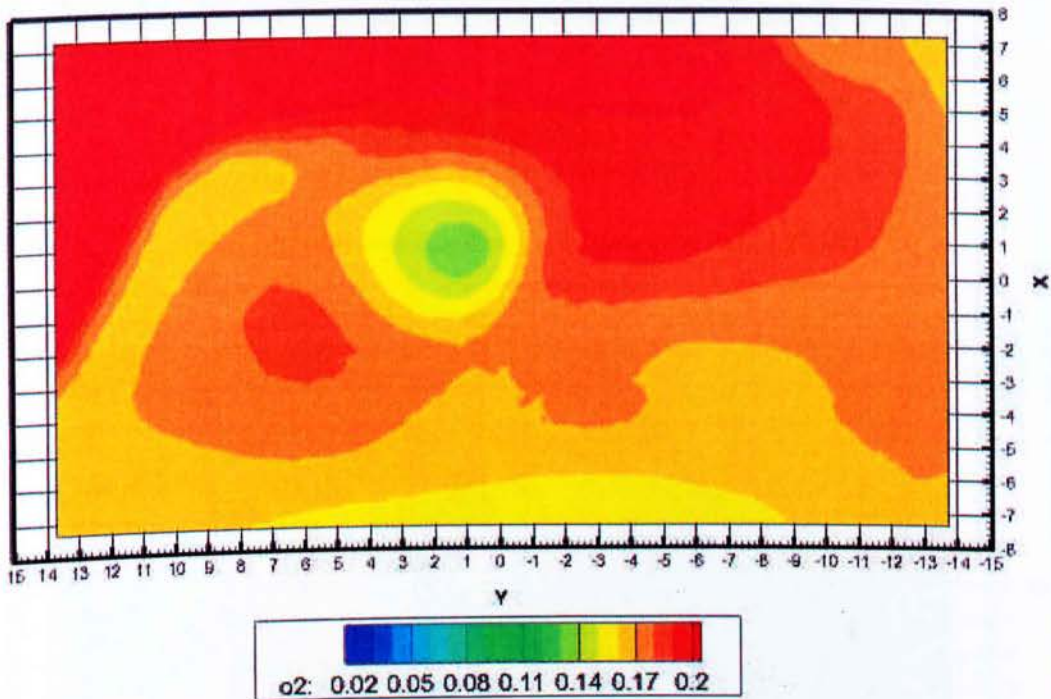
Πίνακας 5.1: Περιγραφή περιπτώσεων που προσομοιώθηκαν.

Τα παράθυρα έχουν ύψος 2 m και μήκος 5 m. Όταν τα παράθυρα είναι διαγώνια μεταξύ τους η θέση τους είναι 5 m από το έδαφος και 3 m από την εκάστοτε γωνία. Όταν βρίσκονται στο κέντρο του κτιρίου απέχουν 5 m από το έδαφος και το ένα βρίσκεται σε απόσταση 10 m από τη γωνία ενώ το άλλο 12 m (δε βρίσκονται στην ίδια θέση ώστε να δημιουργούνται τύρβες στο εσωτερικό του κτιρίου).

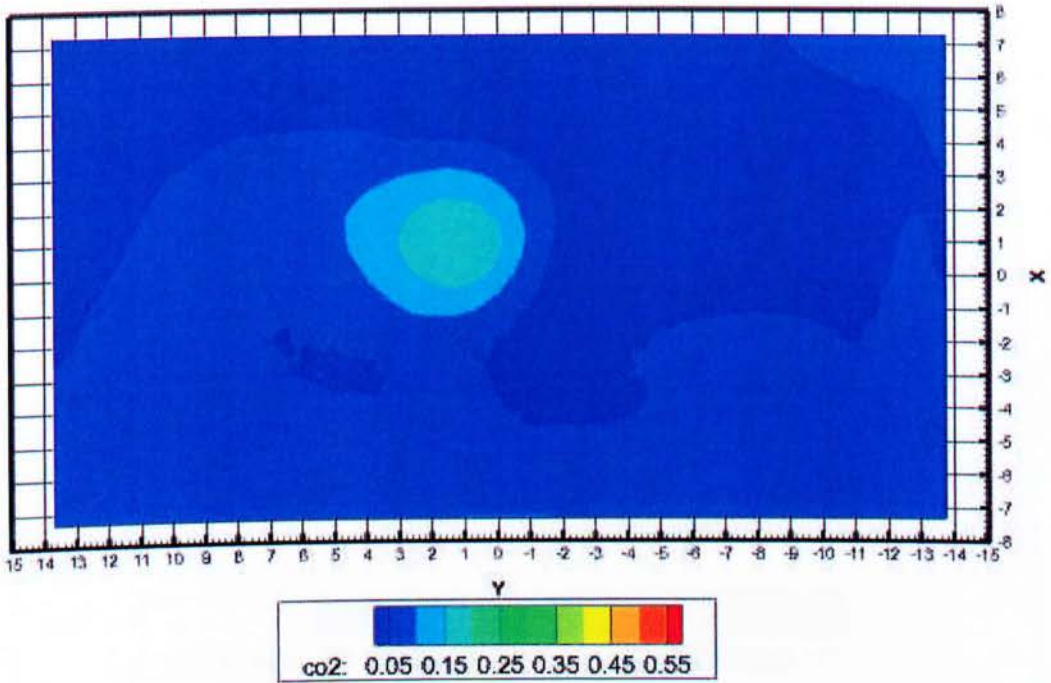
5.2 Αποτελέσματα πρώτης προσομοίωσης

Στη συγκεκριμένη προσομοίωση έχει χρησιμοποιηθεί χρονικό βήμα 0,025 s, ταχύτητα ανέμου 2 m/s, τα παράθυρα βρίσκονται σε διαγώνια θέση και η πηγή βρίσκεται στο κέντρο του κτιρίου.

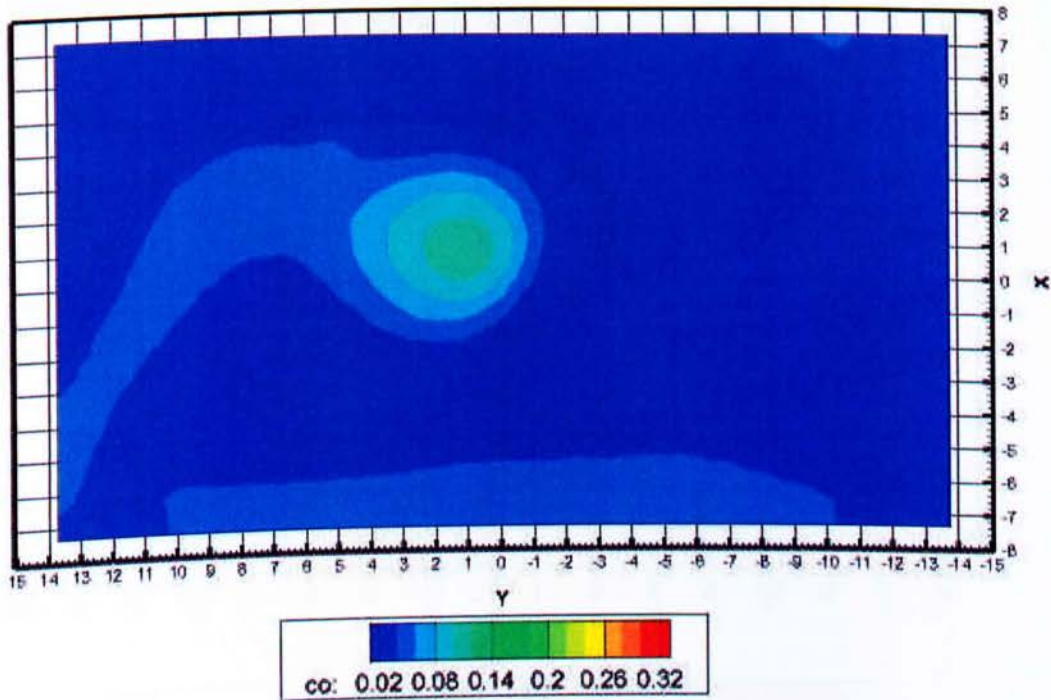
5.2.1 Χρονική στιγμή: 100 s



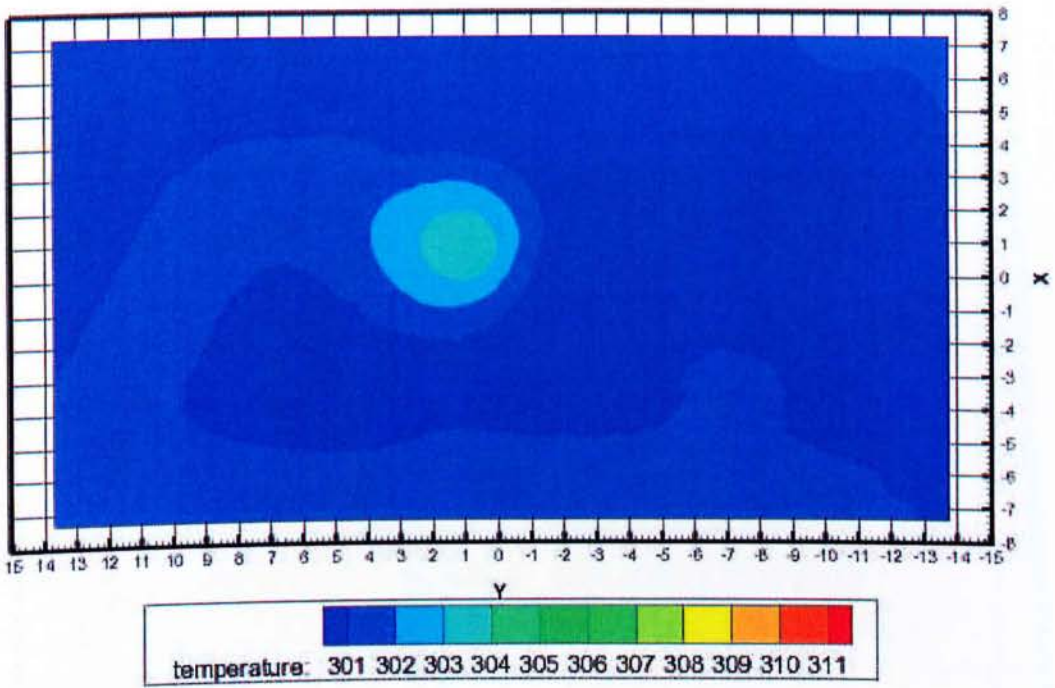
Εικόνα 5.1: Ποσοστά O_2 κατά y - x , σε ύψος 1,7 m από το έδαφος.



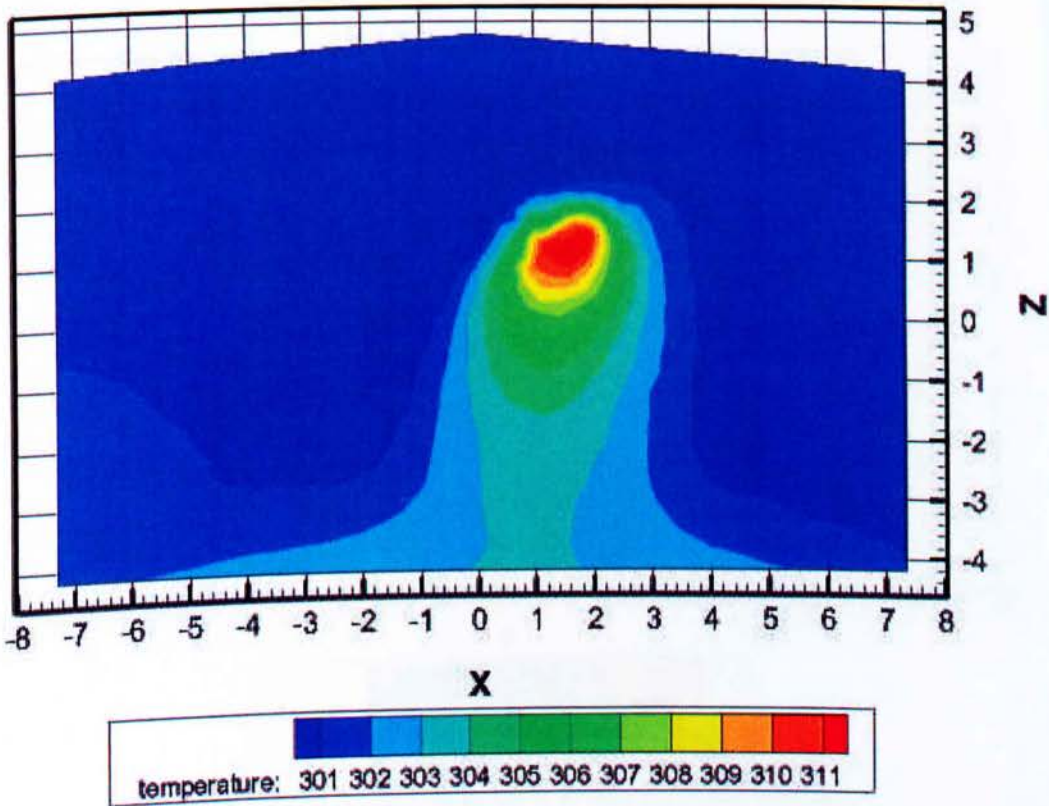
Εικόνα 5.2: Ποσοστά CO_2 κατά $y-x$, σε ύψος 1,7 m από το έδαφος.



Εικόνα 5.3: Ποσοστά CO κατά $y-x$, σε ύψος 1,7 m από το έδαφος.

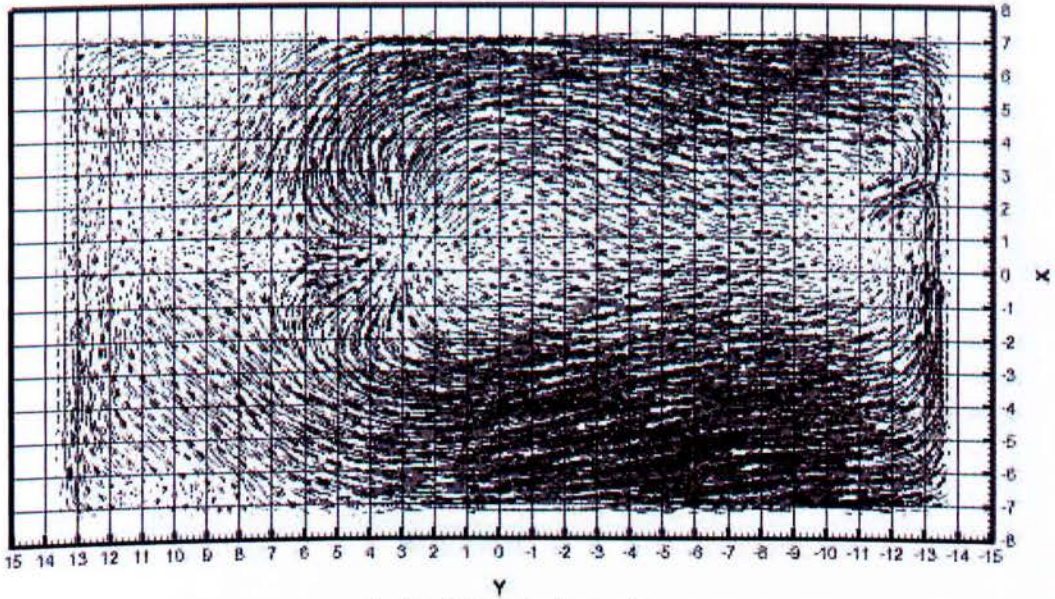


Εικόνα 5.4: Κατανομή θερμοκρασίας κατά $y-x$, σε ύψος 1,7 m από το έδαφος.

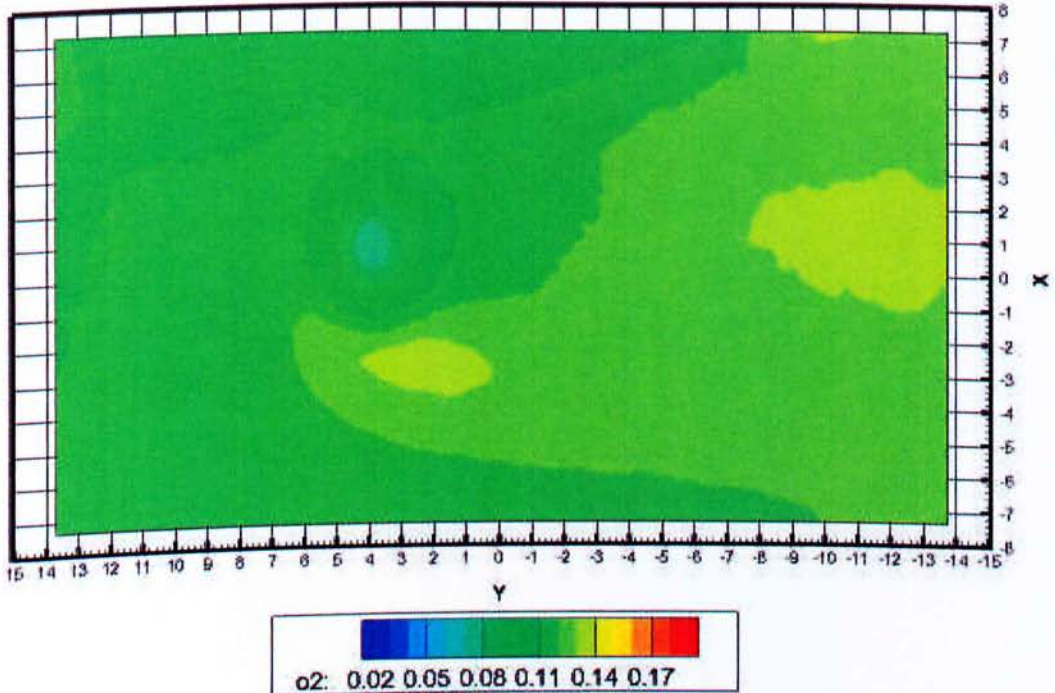


Εικόνα 5.5: Κατανομή θερμοκρασίας κατά $x-z$, στο κέντρο της πηγής.

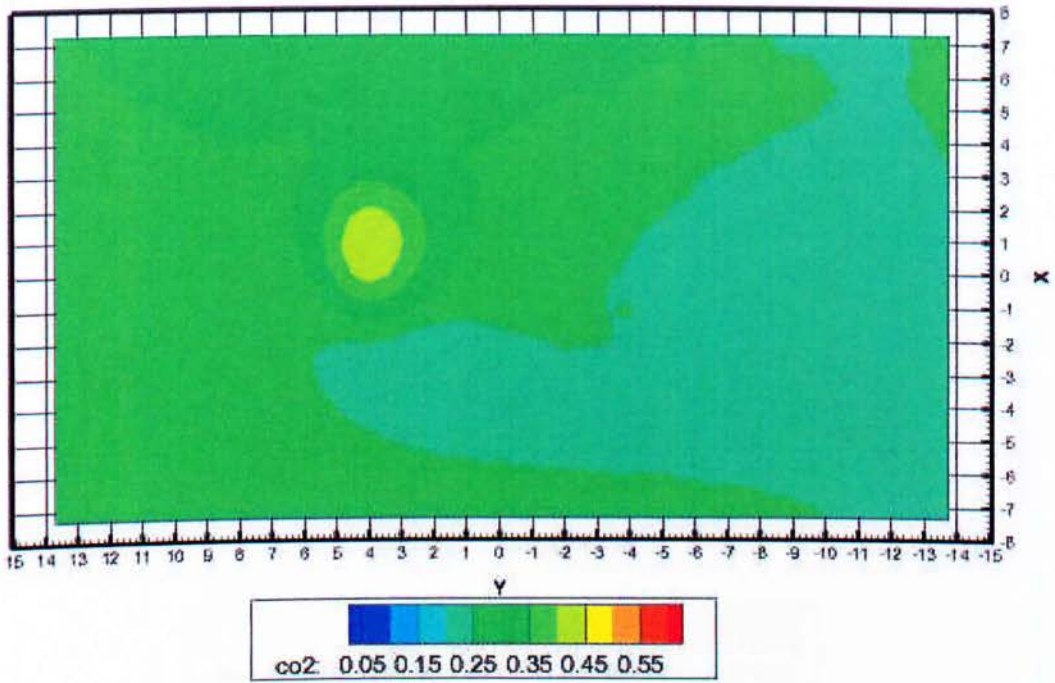
5.2.2 Χρονική στιγμή: 200 s



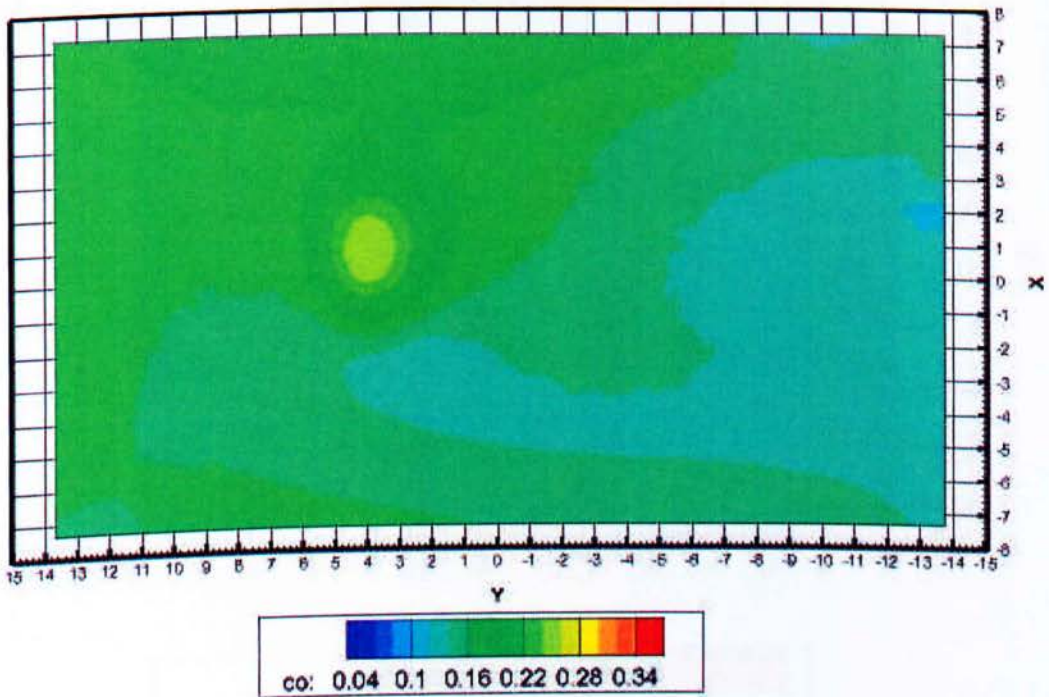
Εικόνα 5.6: Ροή αέρα κατά y-x.



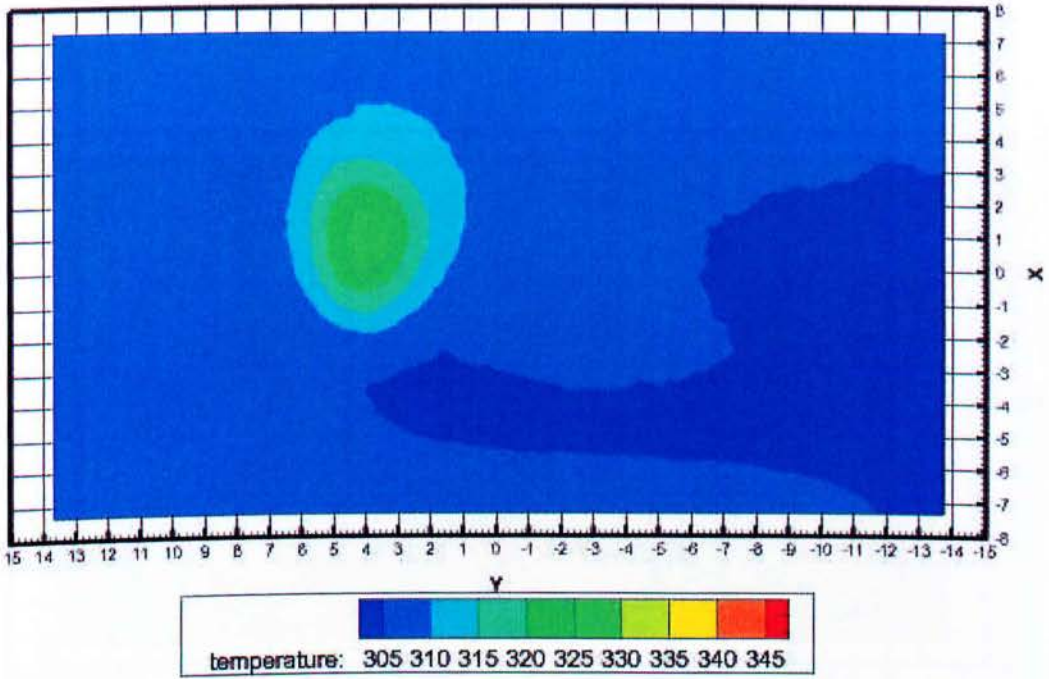
Εικόνα 5.7: Ποσοστά O_2 κατά y-x, σε ύψος 1,7 m από το έδαφος.



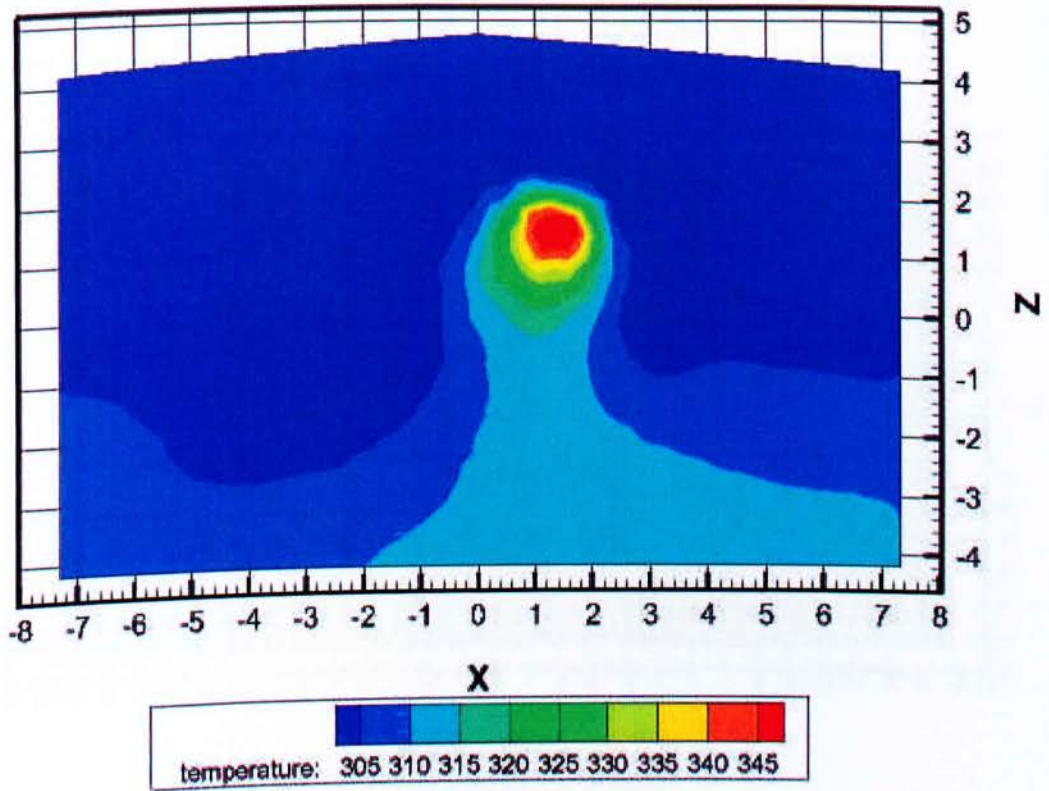
Εικόνα 5.8: Ποσοστά CO₂ κατά y-x, σε ύψος 1,7 m από το έδαφος.



Εικόνα 5.9: Ποσοστά CO κατά y-x, σε ύψος 1,7 m από το έδαφος.

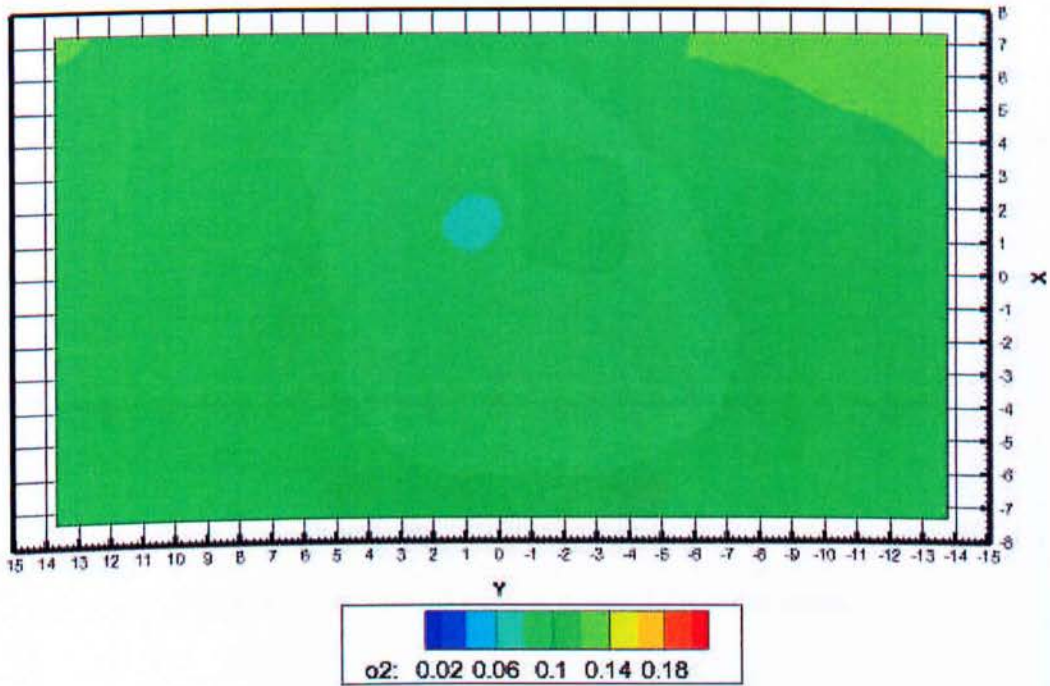


Εικόνα 5.10: Κατανομή θερμοκρασίας κατά $y-x$, σε ύψος 1,7 m από το έδαφος.

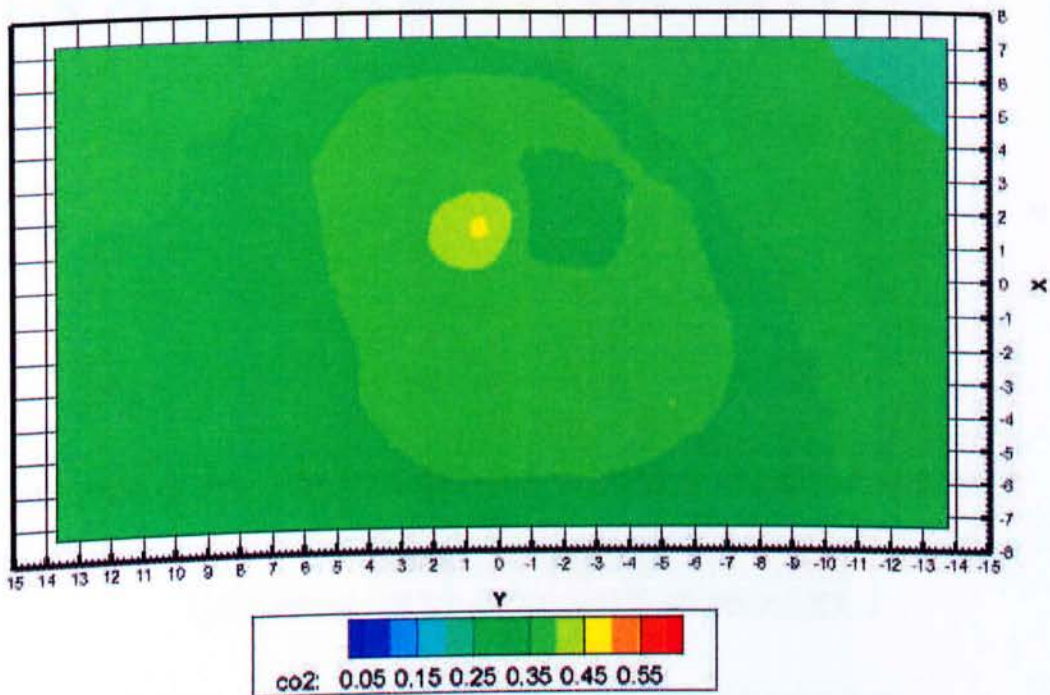


Εικόνα 5.11: Κατανομή θερμοκρασίας κατά $x-z$, στο κέντρο της πηγής.

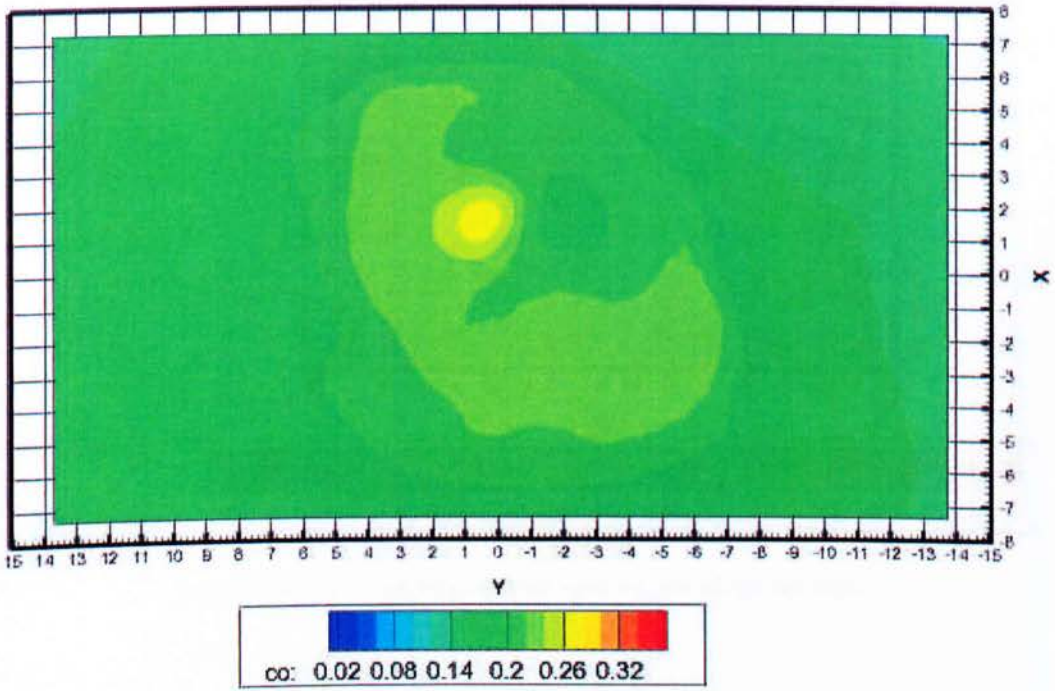
5.2.3 Χρονική στιγμή: 310 s (μέγιστη θερμοκρασία στην πηγή)



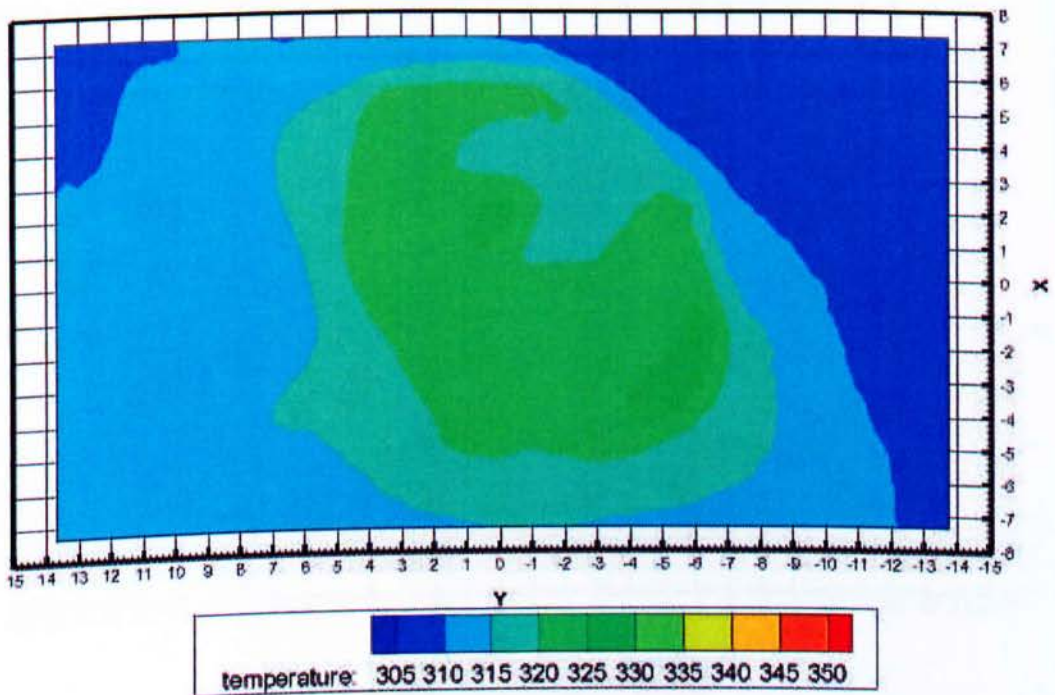
Εικόνα 5.12: Ποσοστά O_2 κατά γ - x , σε ύψος 1,7 m από το έδαφος.



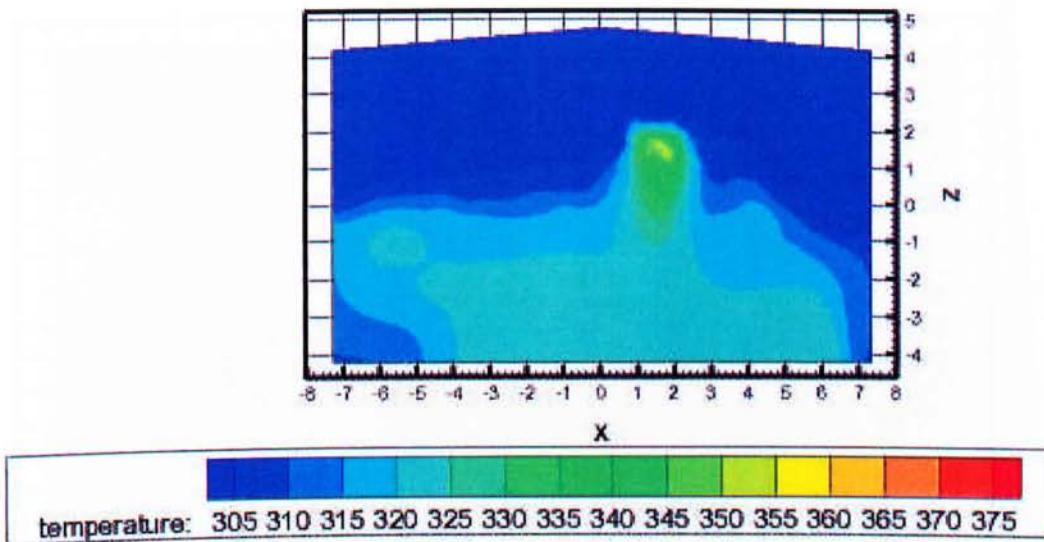
Εικόνα 5.13: Ποσοστά CO_2 κατά γ - x , σε ύψος 1,7 m από το έδαφος.



Εικόνα 5.14: Ποσοστά CO κατά $y-x$, σε ύψος 1,7 m από το έδαφος.

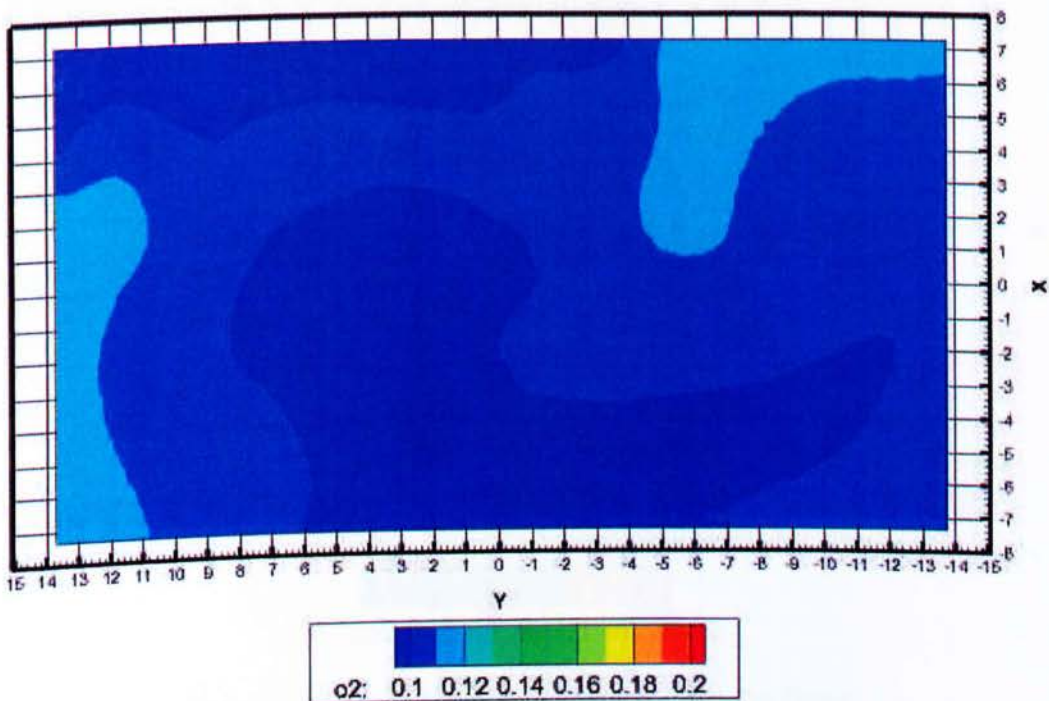


Εικόνα 5.15: Κατανομή θερμοκρασίας κατά $y-x$, σε ύψος 1,7 m από το έδαφος.

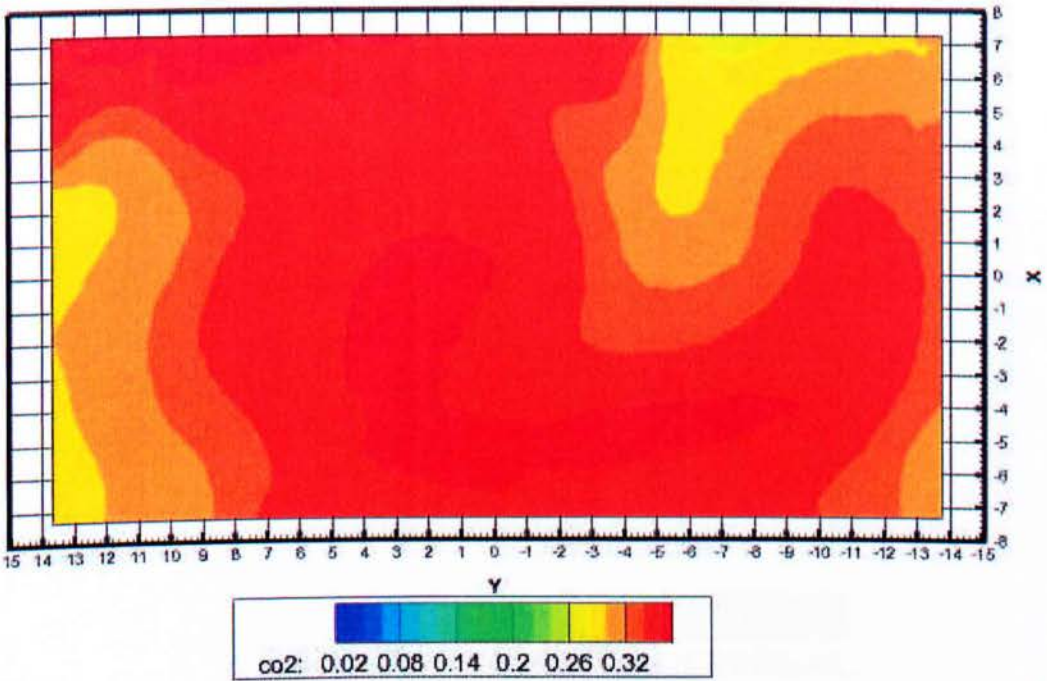


Εικόνα 5.16: Κατανομή θερμοκρασίας κατά x - z , στο κέντρο της πηγής.

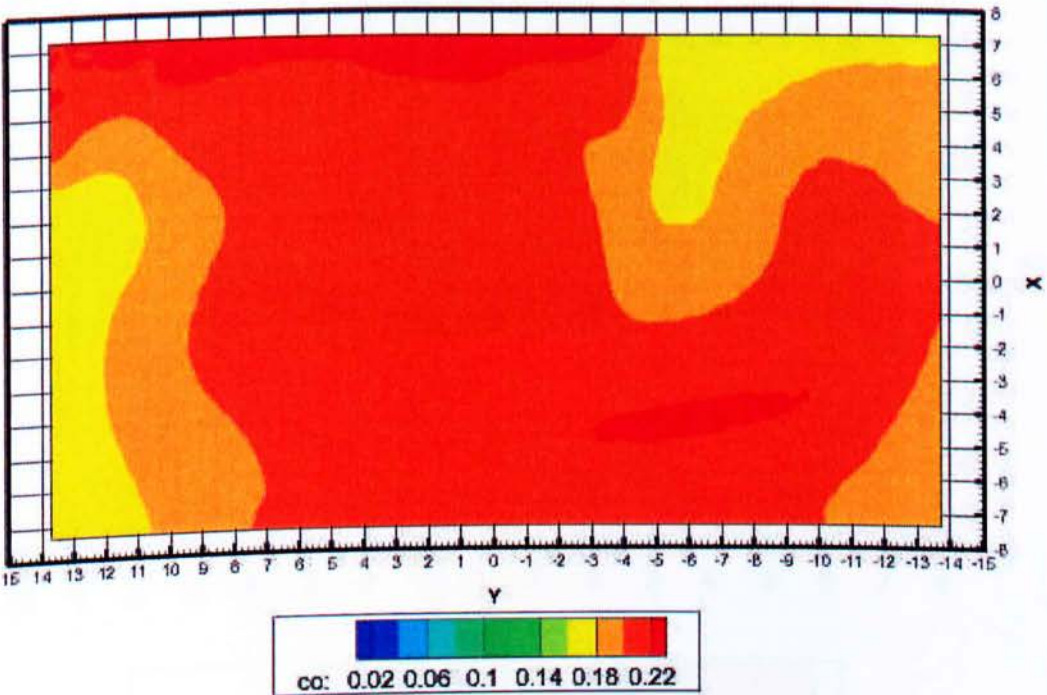
5.2.4 Χρονική στιγμή: 400 s



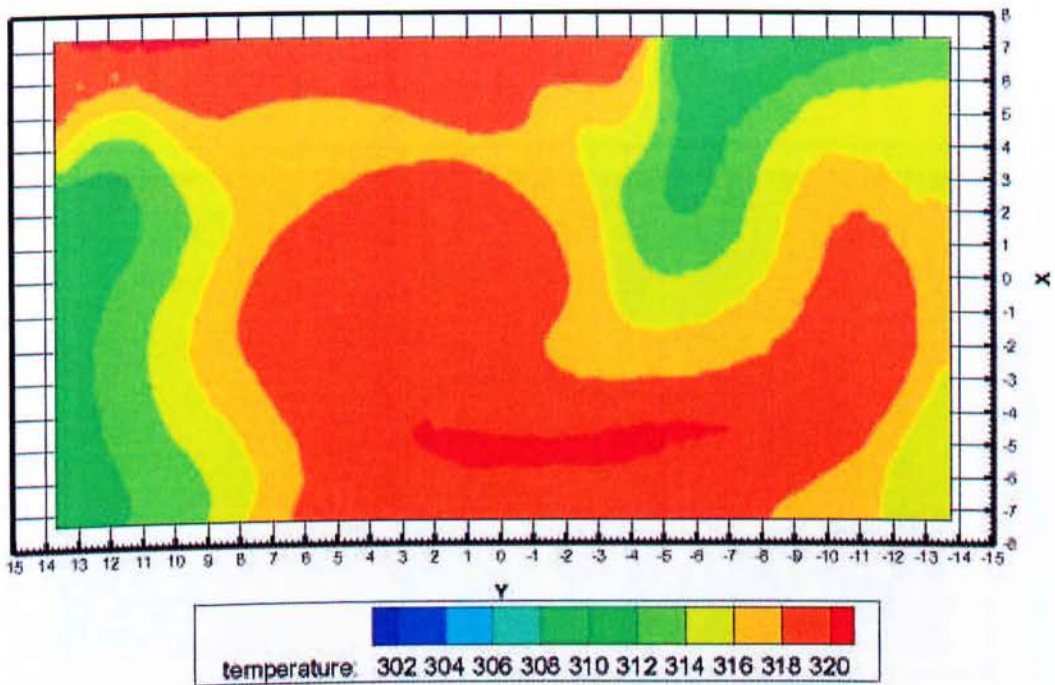
Εικόνα 5.17: Ποσοστά O_2 κατά y - x , σε ύψος 1,7 m από το έδαφος.



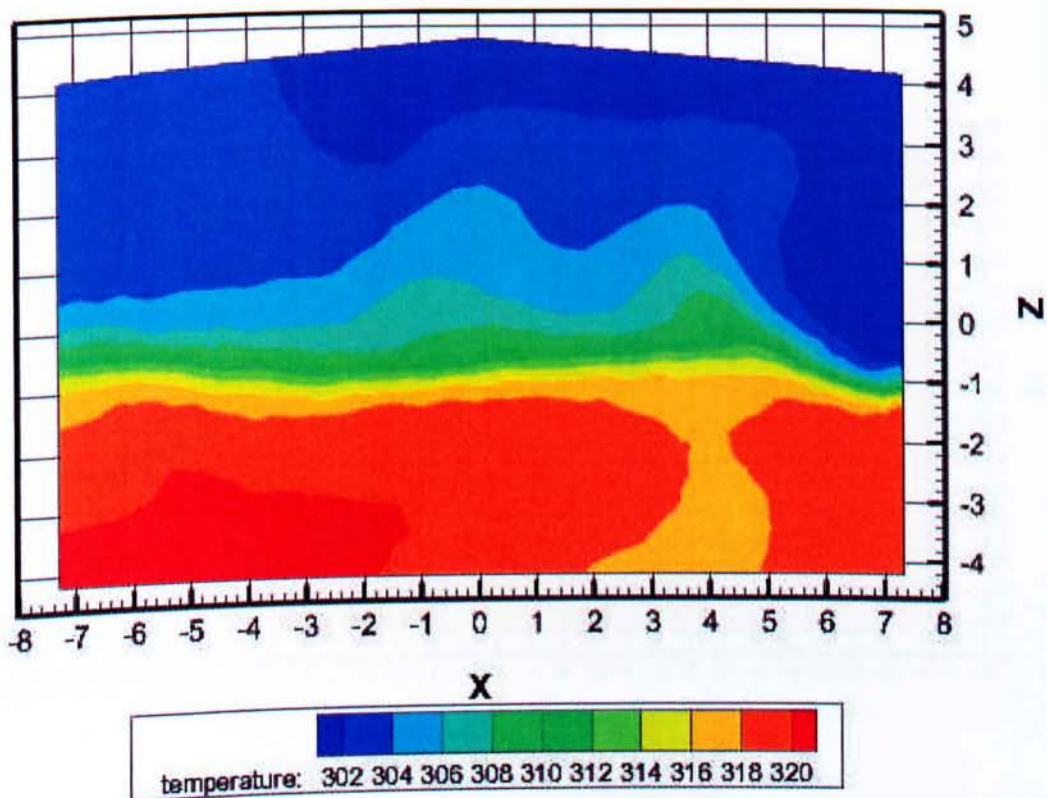
Εικόνα 5.18: Ποσοστά CO_2 κατά $y-x$, σε ύψος 1,7 m από το έδαφος.



Εικόνα 5.19: Ποσοστά CO κατά $y-x$, σε ύψος 1,7 m από το έδαφος.

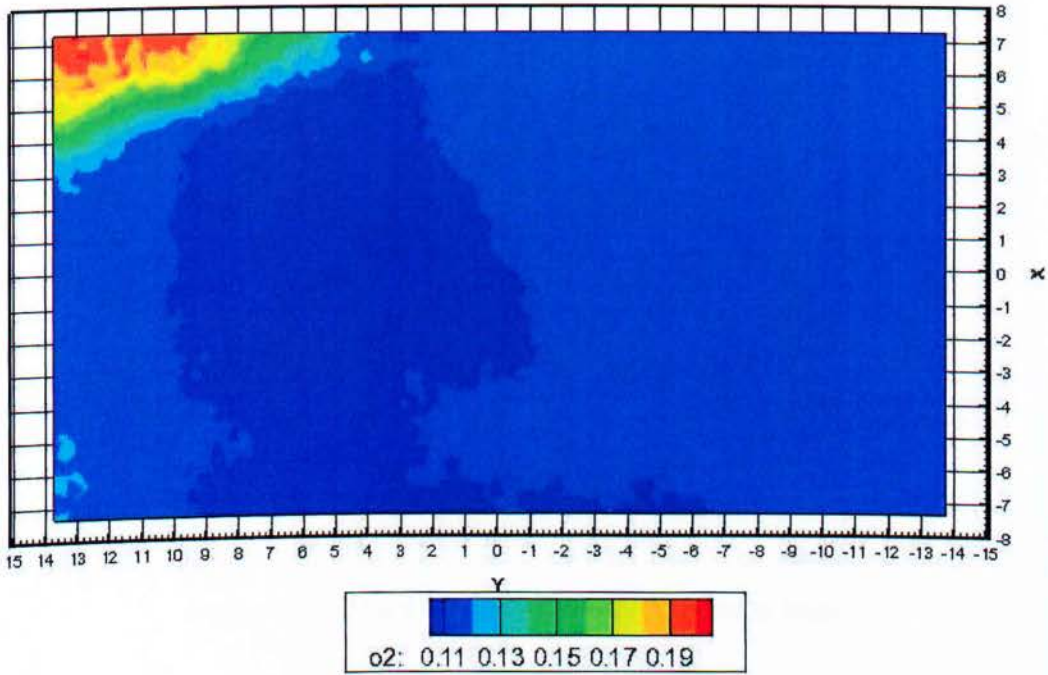


Εικόνα 5.20: Κατανομή θερμοκρασίας κατά $y-x$, σε ύψος 1,7 m από το έδαφος.

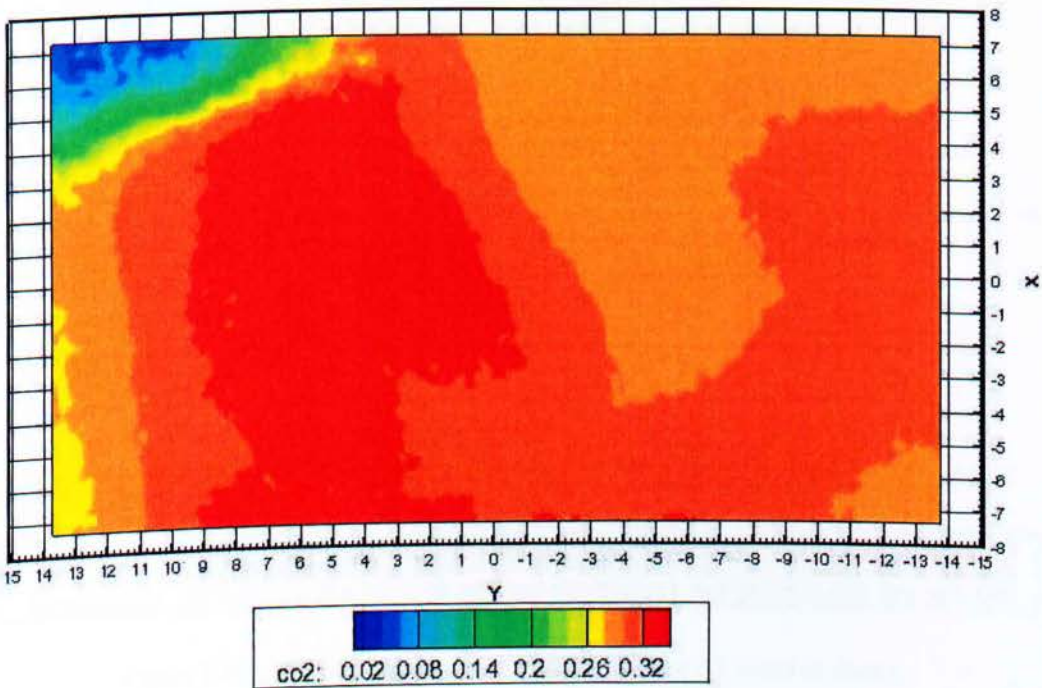


Εικόνα 5.21: Κατανομή θερμοκρασίας κατά $x-z$, στο κέντρο της πηγής.

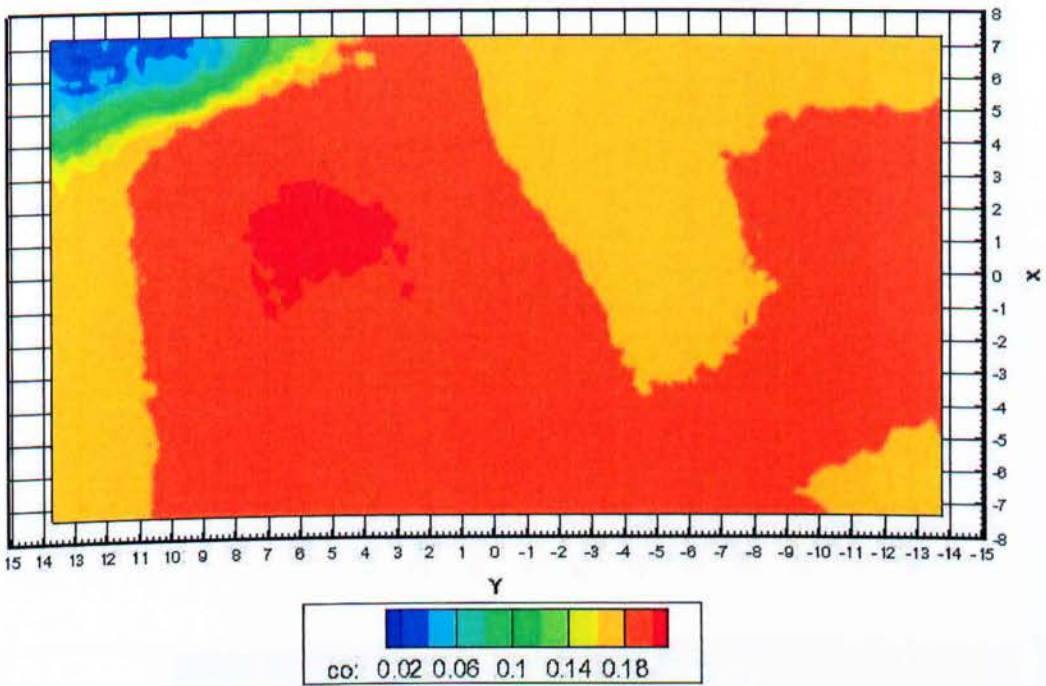
5.2.5 Χρονική στιγμή: 500 s



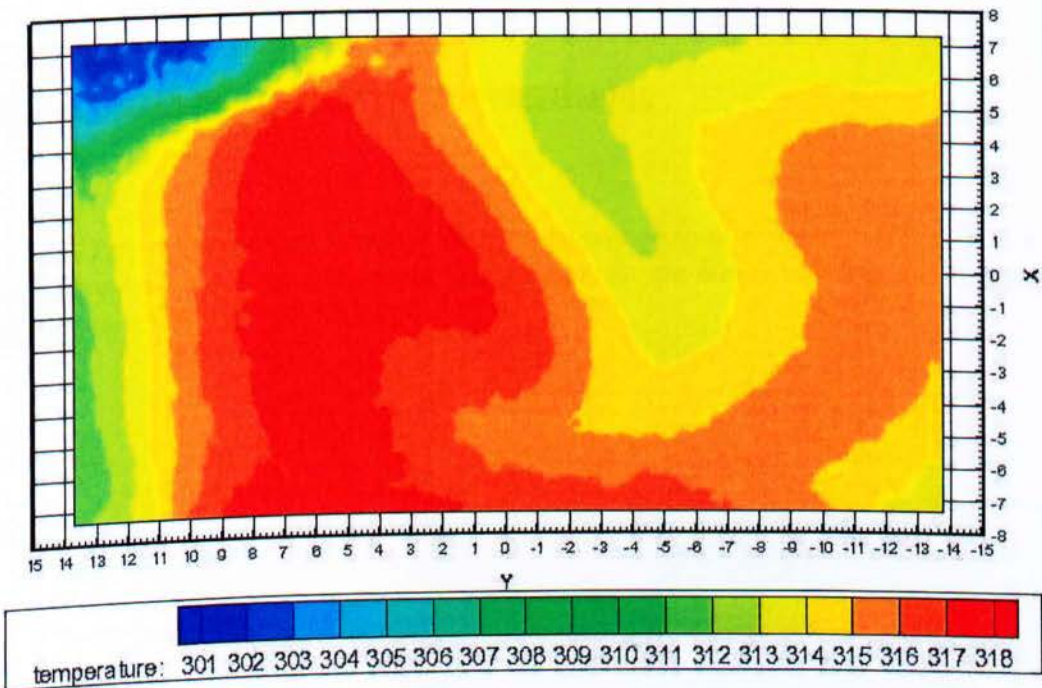
Εικόνα 5.22: Ποσοστά O_2 κατά y - x , σε ύψος 1,7 m από το έδαφος.



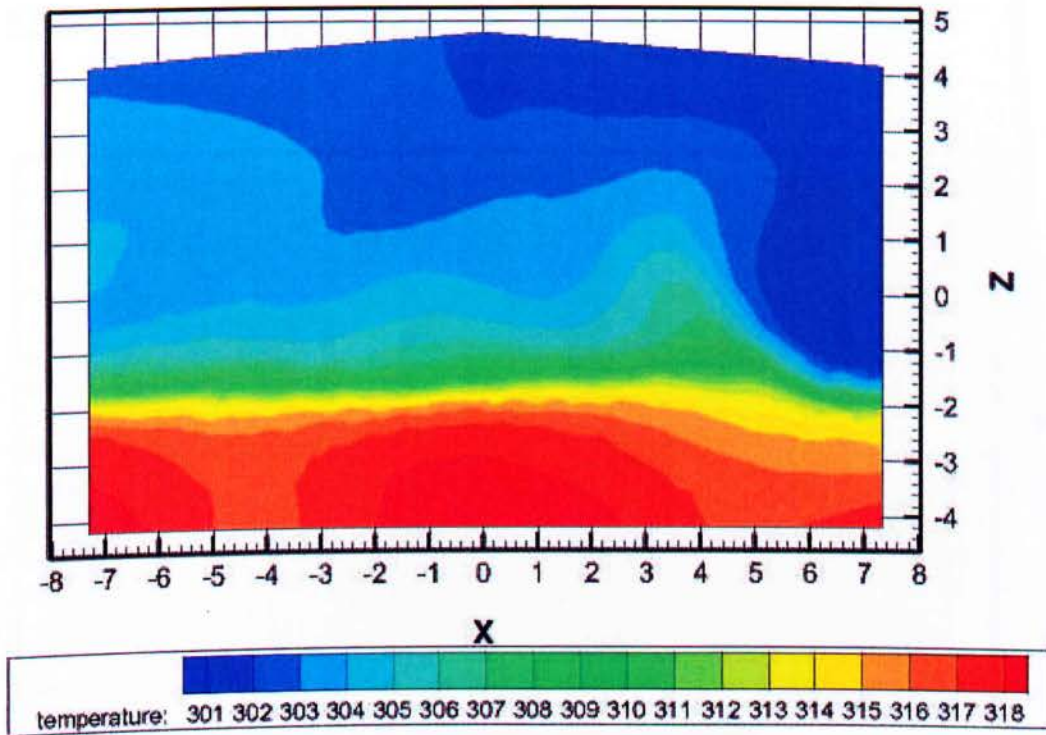
Εικόνα 5.23: Ποσοστά CO_2 κατά y - x , σε ύψος 1,7 m από το έδαφος.



Εικόνα 5.24: Ποσοστά CO κατά y-x, σε ύψος 1,7 m από το έδαφος.



Εικόνα 5.25: Κατανομή θερμοκρασίας κατά y-x, σε ύψος 1,7 m από το έδαφος.

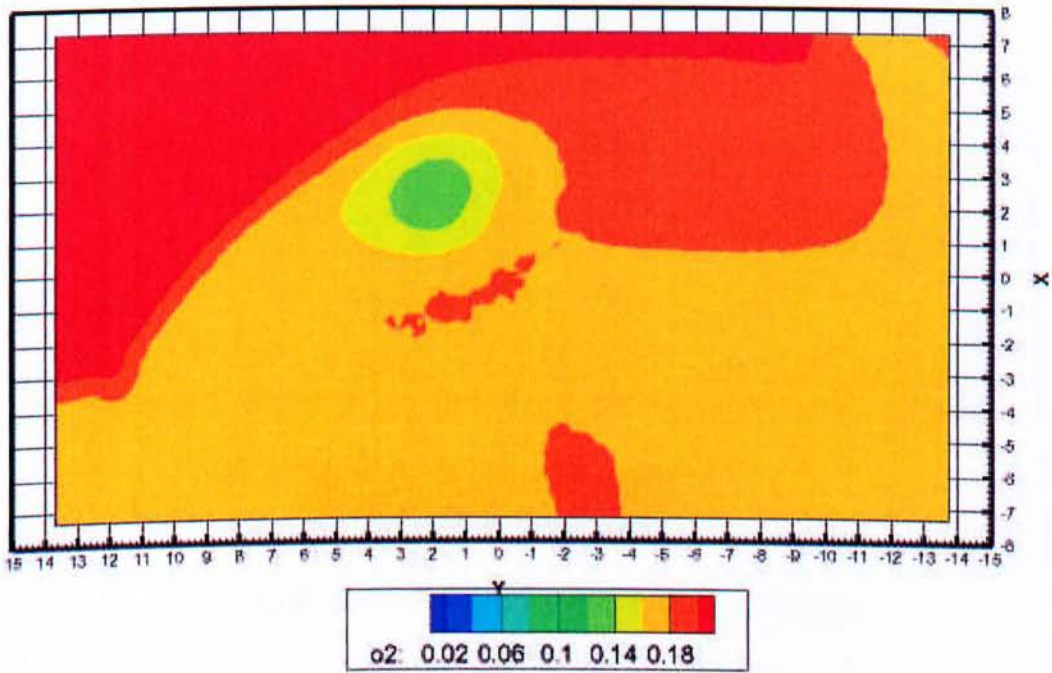


Εικόνα 5.26: Κατανομή θερμοκρασίας κατά x - z , στο κέντρο της πηγής.

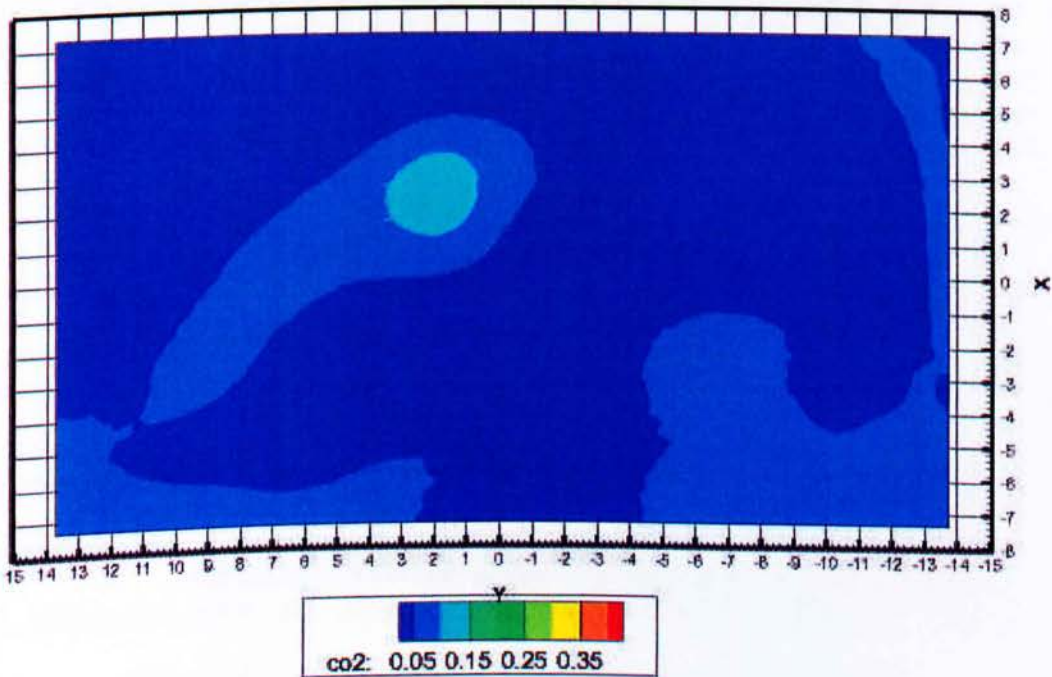
5.3 Αποτελέσματα δεύτερης προσομοίωσης

Στη συγκεκριμένη προσομοίωση έχει χρησιμοποιηθεί χρονικό βήμα 0,05 s, τα παράθυρα βρίσκονται σε διαγώνια θέση και η πηγή βρίσκεται στο κέντρο του κτιρίου.

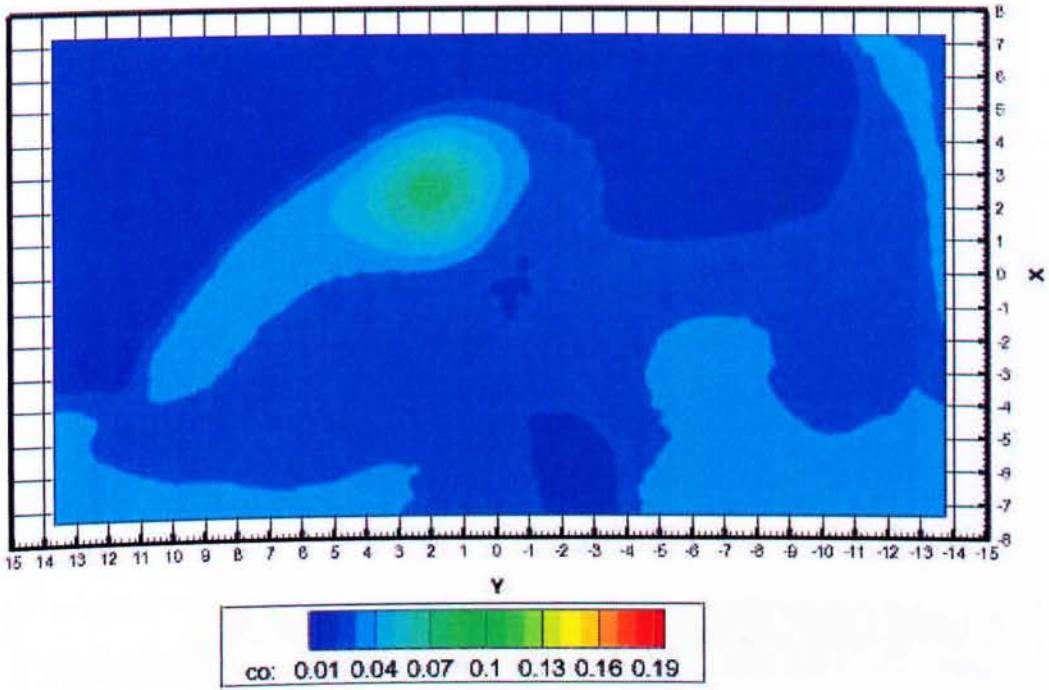
5.3.1 Χρονική στιγμή: 100 s



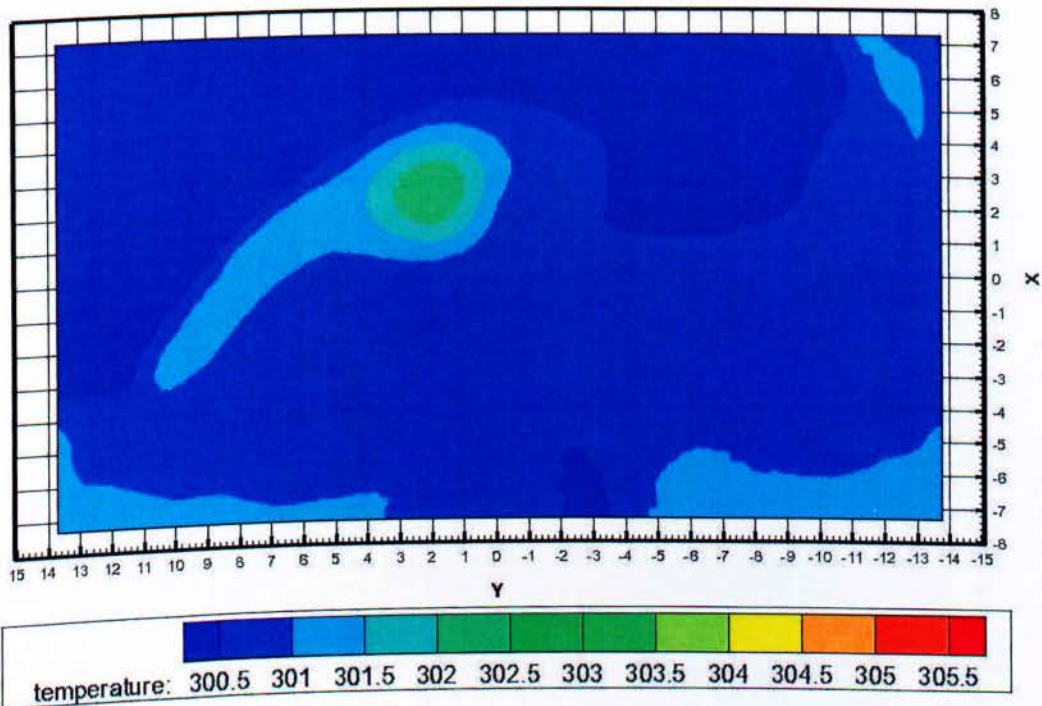
Εικόνα 5.27: Ποσοστά O_2 κατά $y-x$, σε ύψος 1,7 m από το έδαφος.



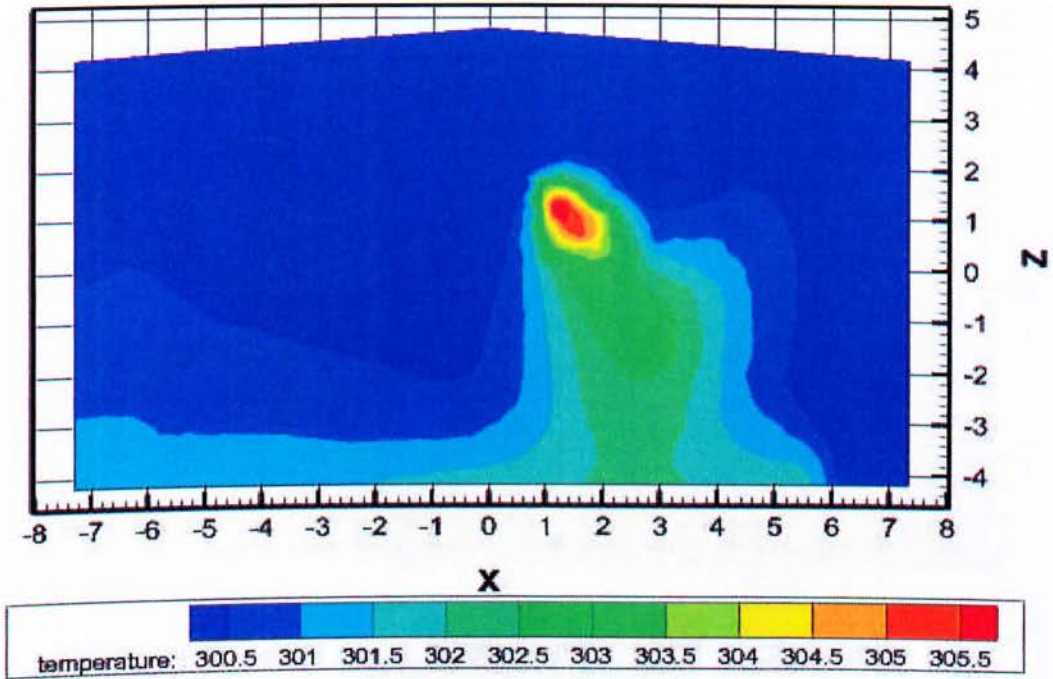
Εικόνα 5.28: Ποσοστά CO_2 κατά $y-x$, σε ύψος 1,7 m από το έδαφος.



Εικόνα 5.29: Ποσοστά CO κατά $y-x$, σε ύψος 1,7 m από το έδαφος.

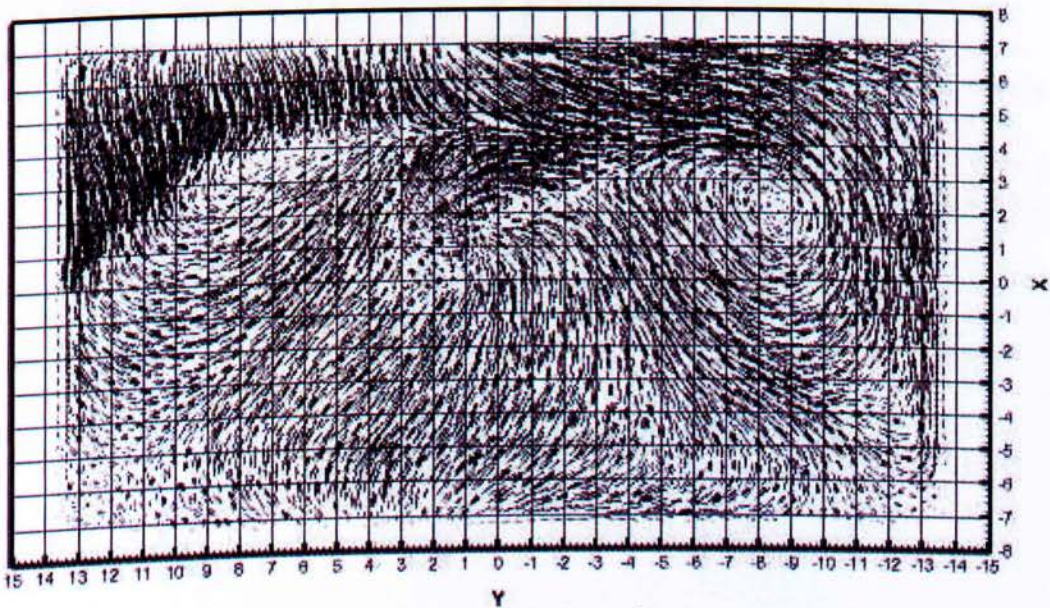


Εικόνα 5.30: Κατανομή θερμοκρασίας κατά $y-x$, σε ύψος 1,7 m από το έδαφος.

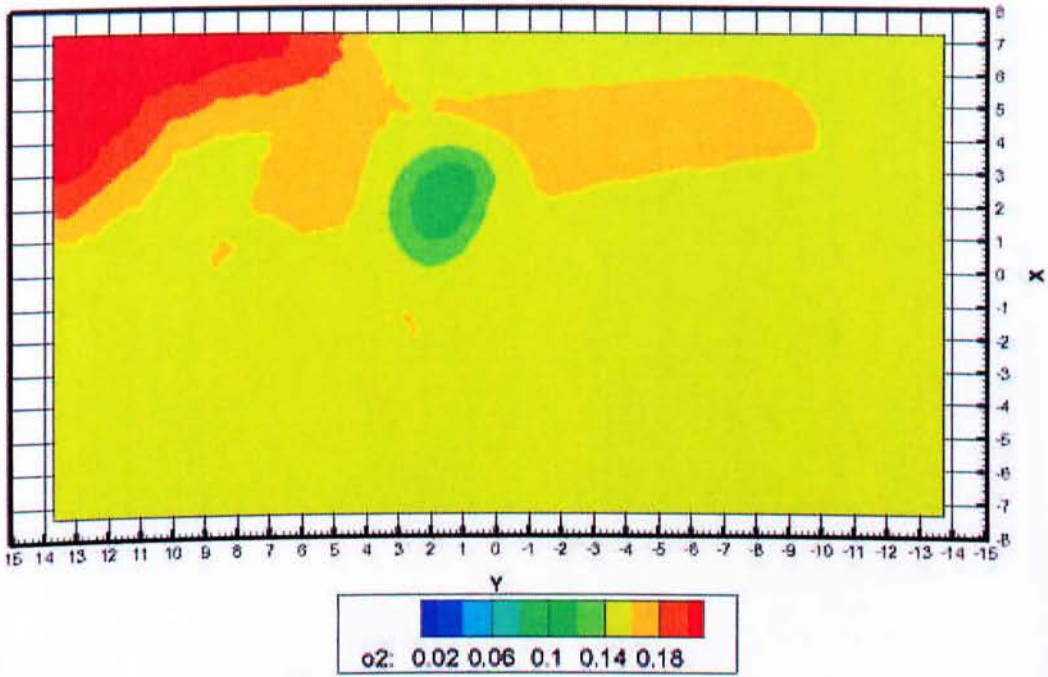


Εικόνα 5.31: Κατανομή θερμοκρασίας κατά x - z , στο κέντρο της πηγής.

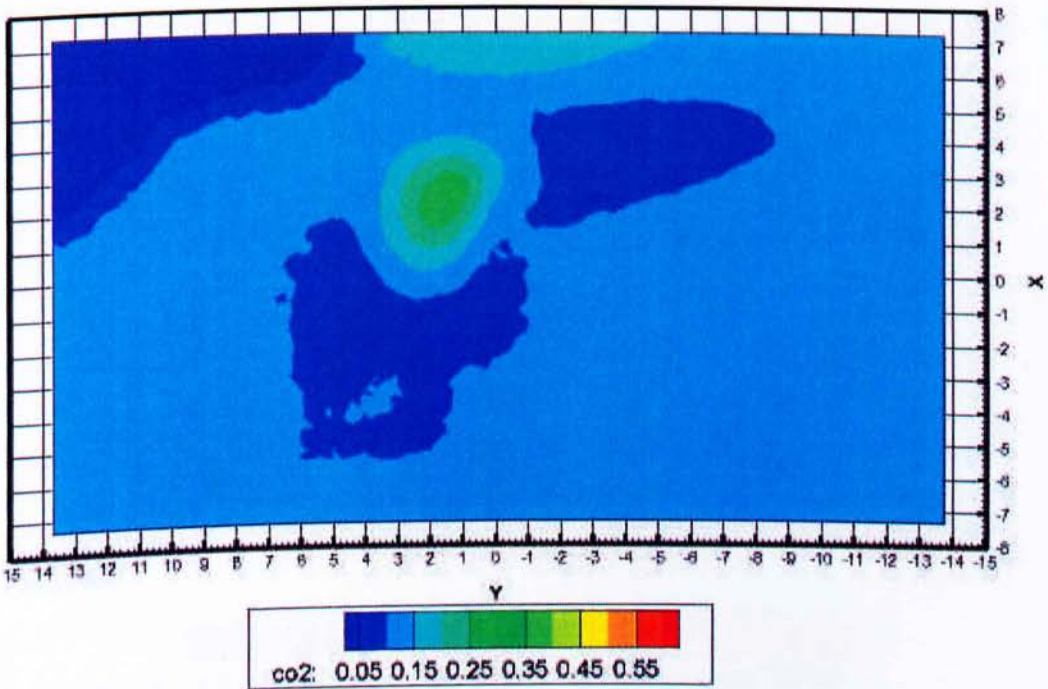
5.3.2 Χρονική στιγμή: 200 s



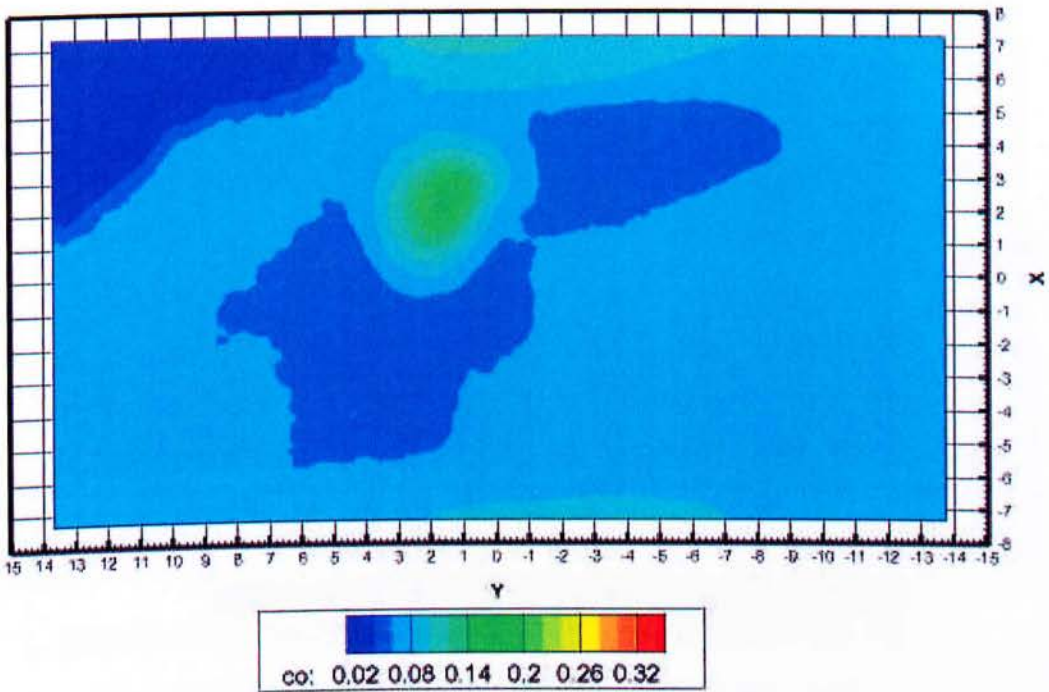
Εικόνα 5.32: Ροή αέρα κατά y - x .



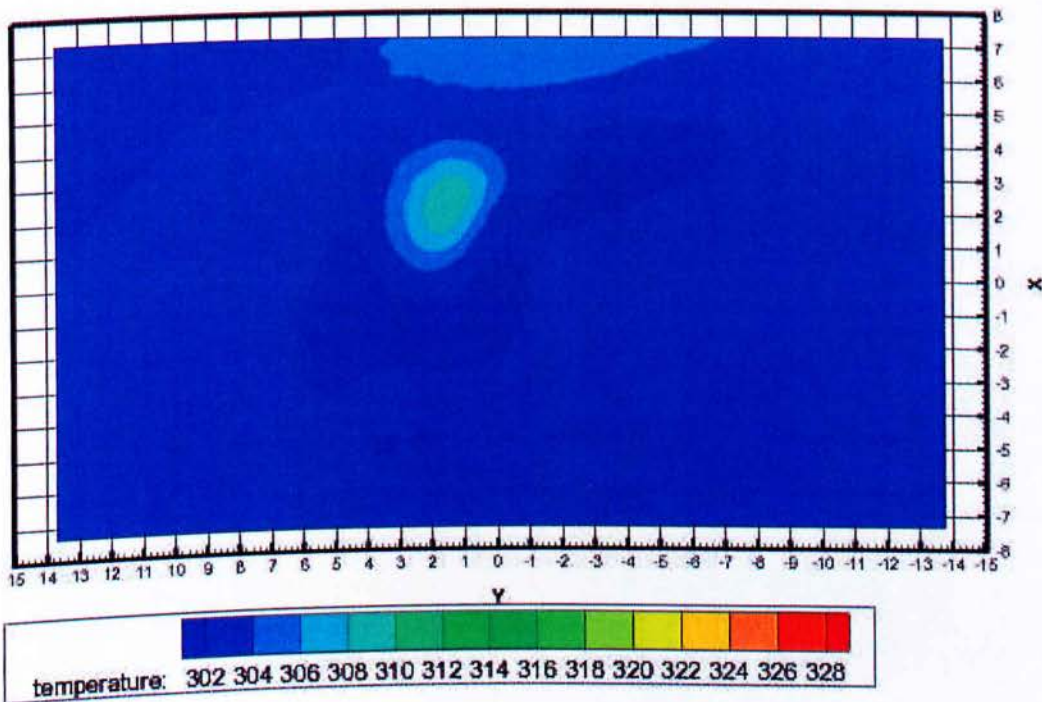
Εικόνα 5.33: Ποσοστά O_2 κατά $y-x$, σε ύψος 1,7 m από το έδαφος.



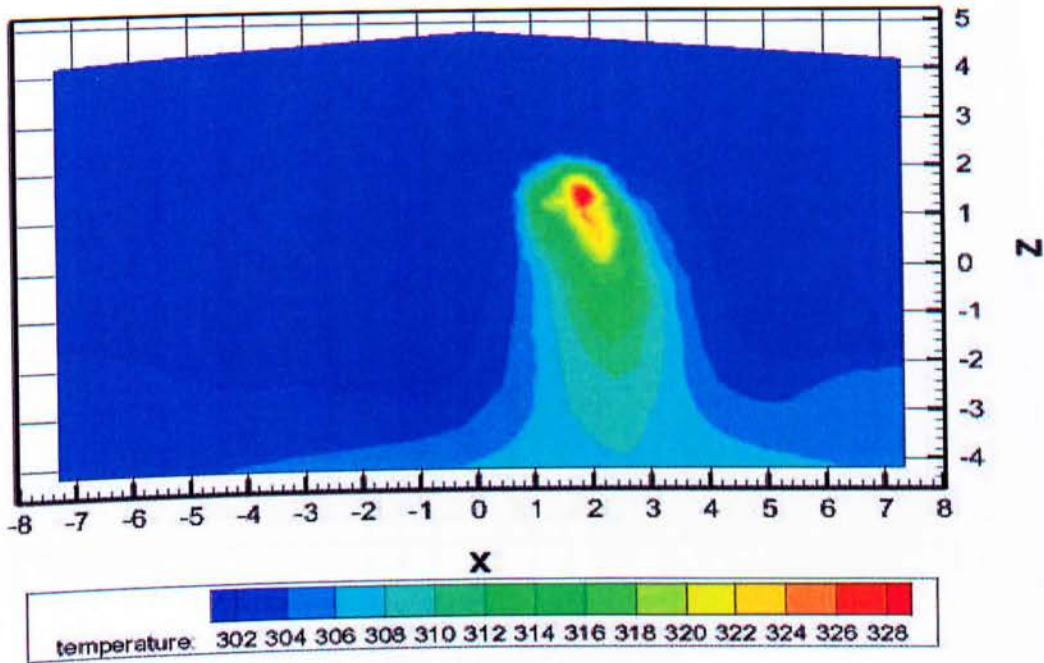
Εικόνα 5.34: Ποσοστά CO_2 κατά $y-x$, σε ύψος 1,7 m από το έδαφος.



Εικόνα 5.35: Ποσοστά CO κατά γ-χ, σε ύψος 1,7 m από το έδαφος.

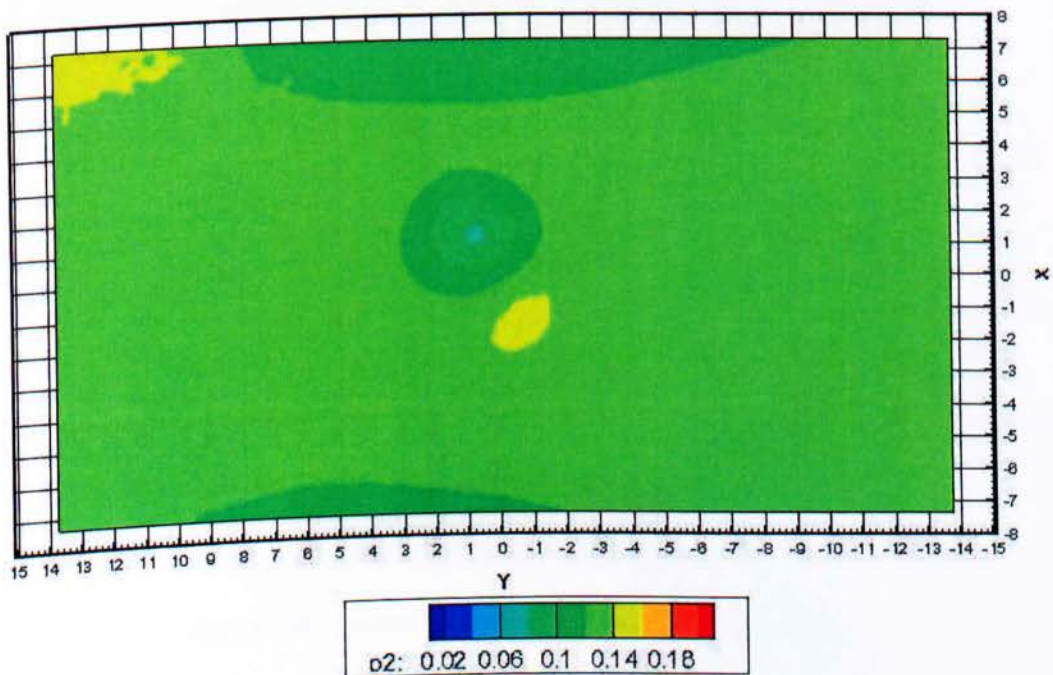


Εικόνα 5.36: Κατανομή θερμοκρασίας κατά γ-χ, σε ύψος 1,7 m από το έδαφος.

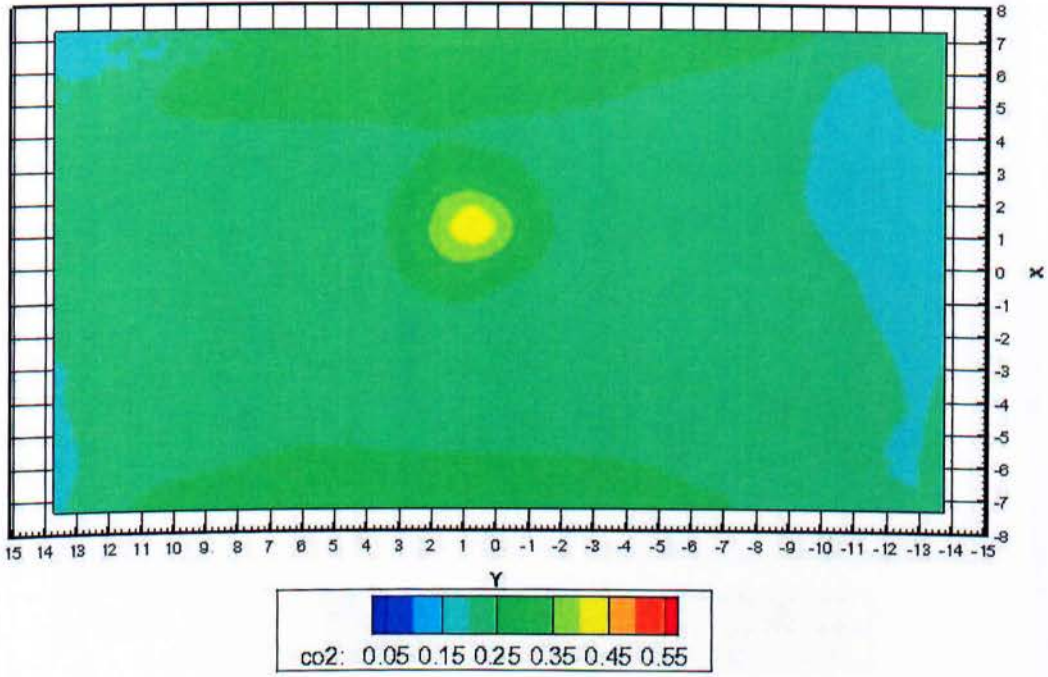


Εικόνα 5.37: Κατανομή θερμοκρασίας κατά x - z , στο κέντρο της πηγής.

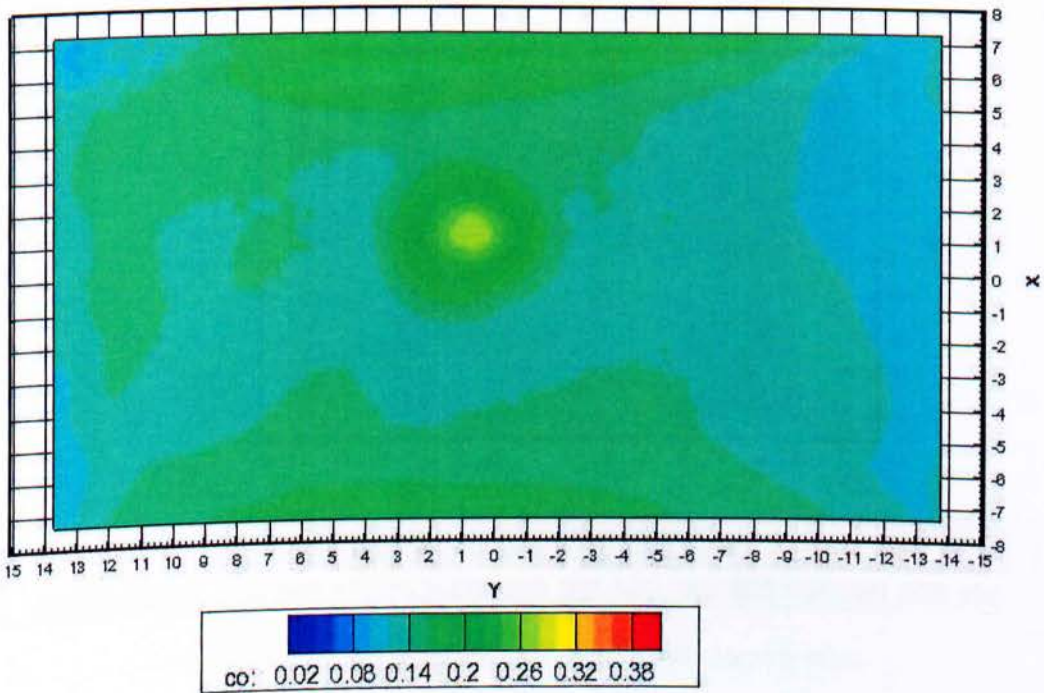
5.3.3 Χρονική στιγμή: 300 s (μέγιστη θερμοκρασία στην πηγή)



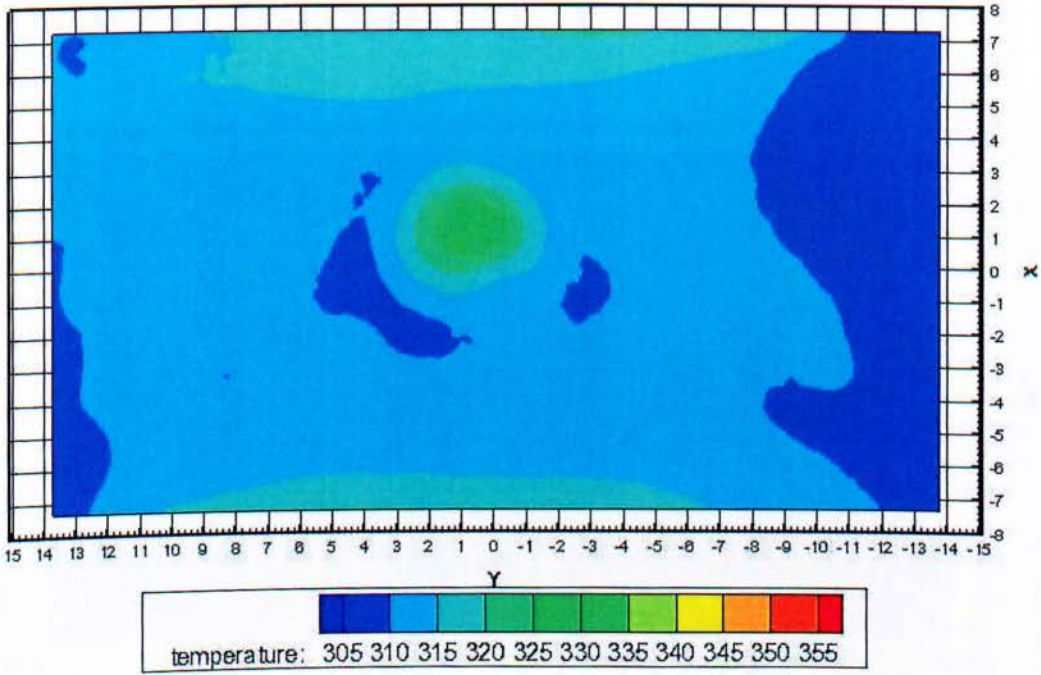
Εικόνα 5.38: Ποσοστά O₂ κατά y - x , σε ύψος 1,7 m από το έδαφος.



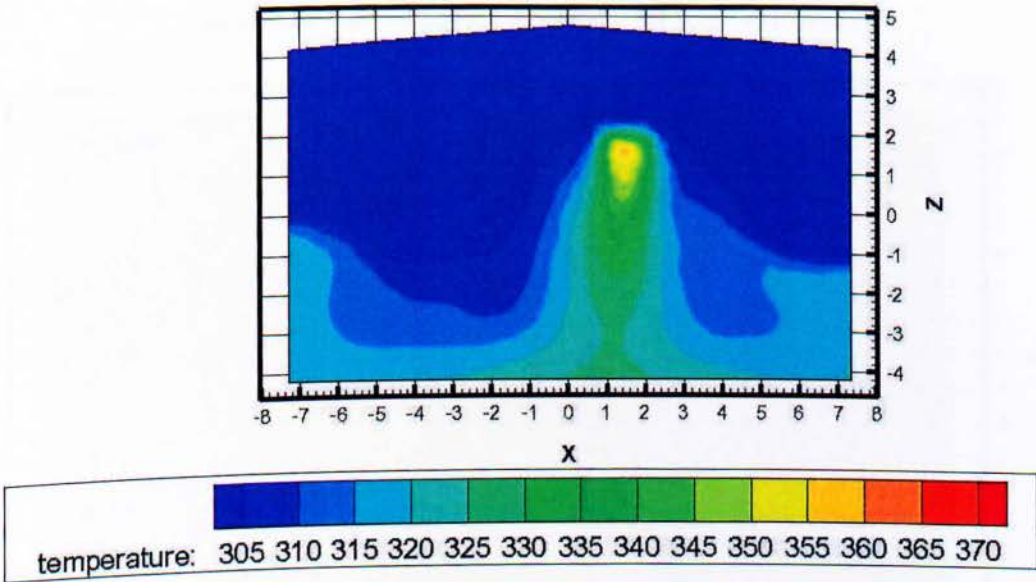
Εικόνα 5.39: Ποσοστά CO_2 κατά $y-x$, σε ύψος 1,7 m από το έδαφος.



Εικόνα 5.40: Ποσοστά CO κατά $y-x$, σε ύψος 1,7 m από το έδαφος.

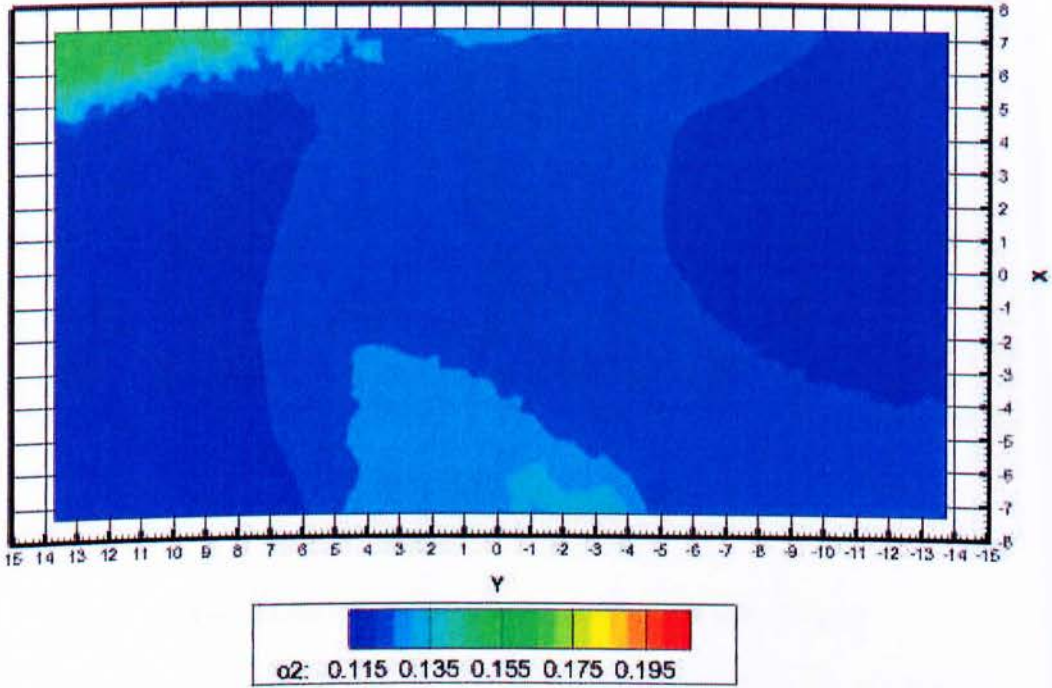


Εικόνα 5.41: Κατανομή θερμοκρασίας κατά $y-x$, σε ύψος 1,7 m από το έδαφος.

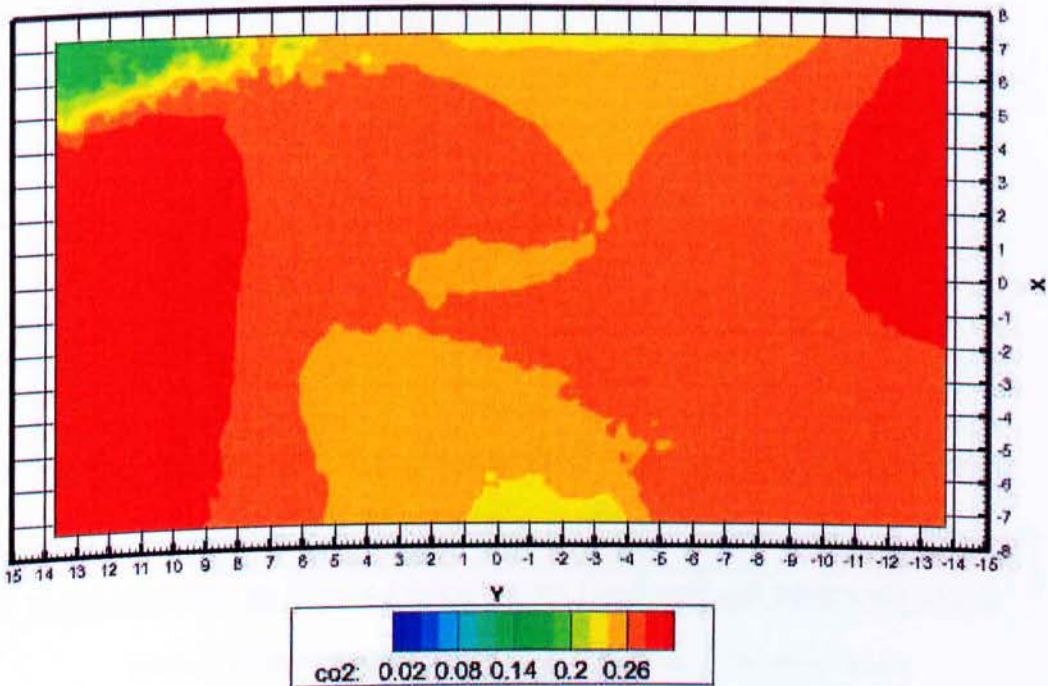


Εικόνα 5.42: Κατανομή θερμοκρασίας κατά $x-z$, στο κέντρο της πηγής.

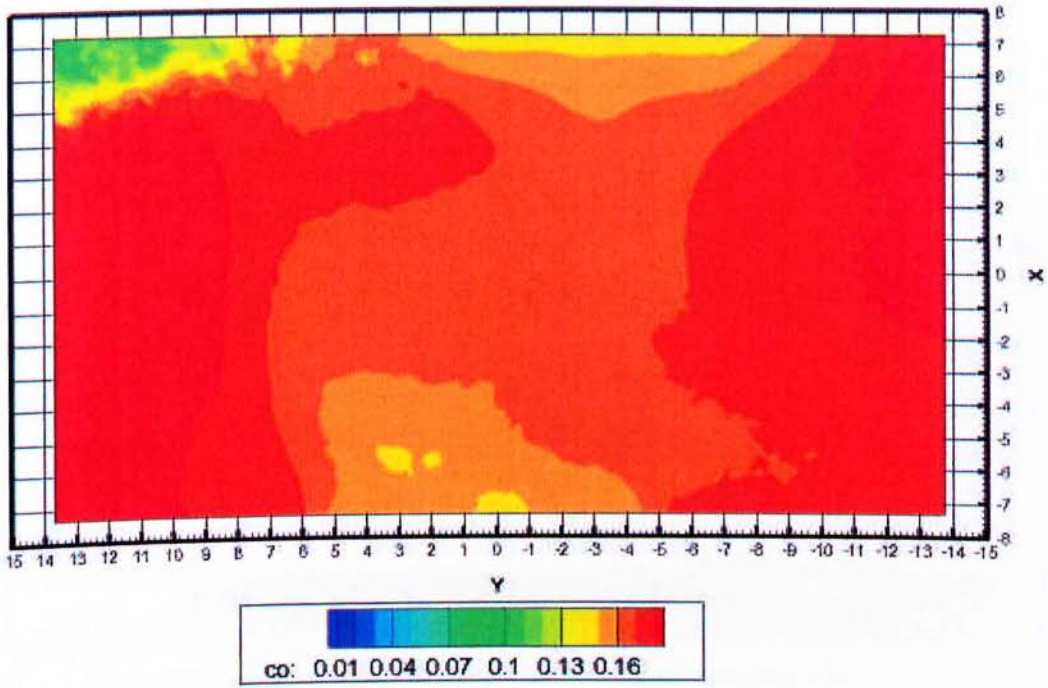
5.3.4 Χρονική στιγμή: 400 s



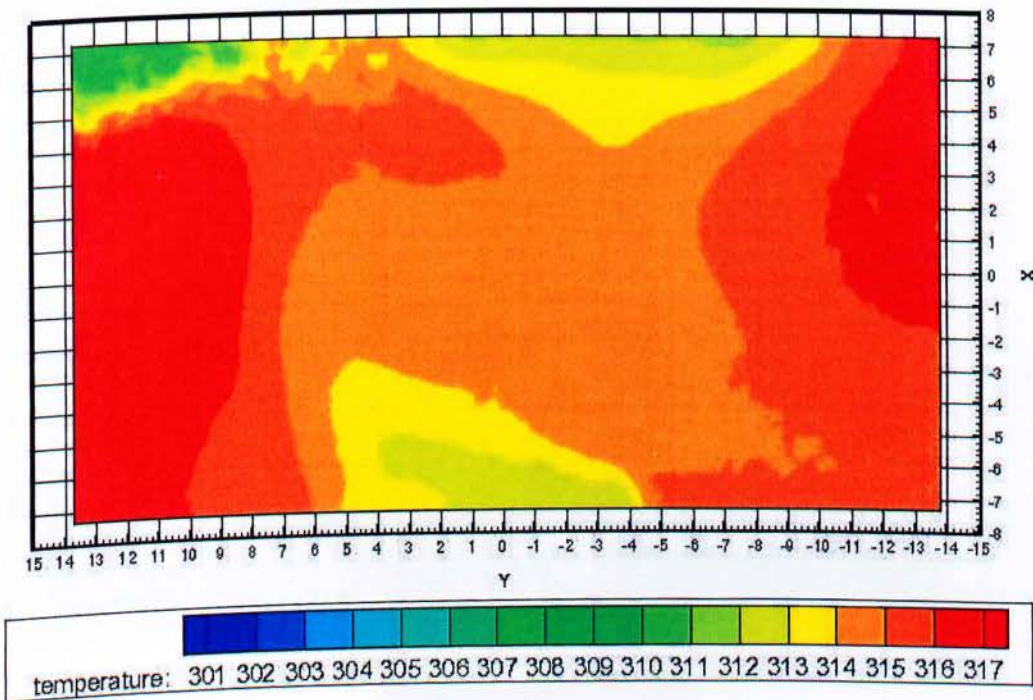
Εικόνα 5.43: Ποσοστά O_2 κατά y - x , σε ύψος 1,7 m από το έδαφος.



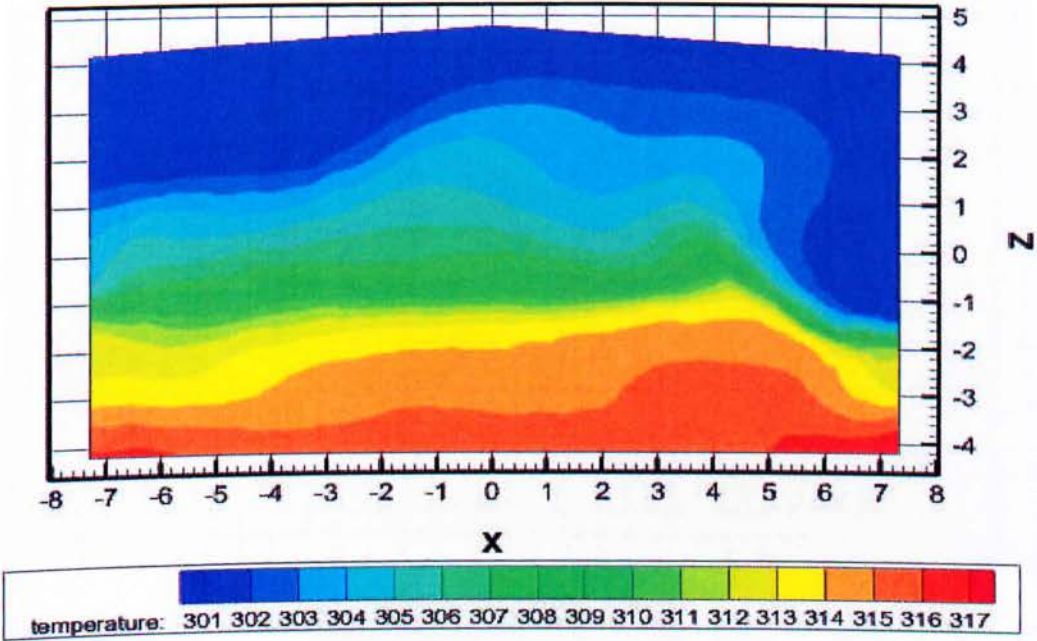
Εικόνα 5.44: Ποσοστά CO_2 κατά y - x , σε ύψος 1,7 m από το έδαφος.



Εικόνα 5.45: Ποσοστά CO κατά γ-χ, σε ύψος 1,7 m από το έδαφος.

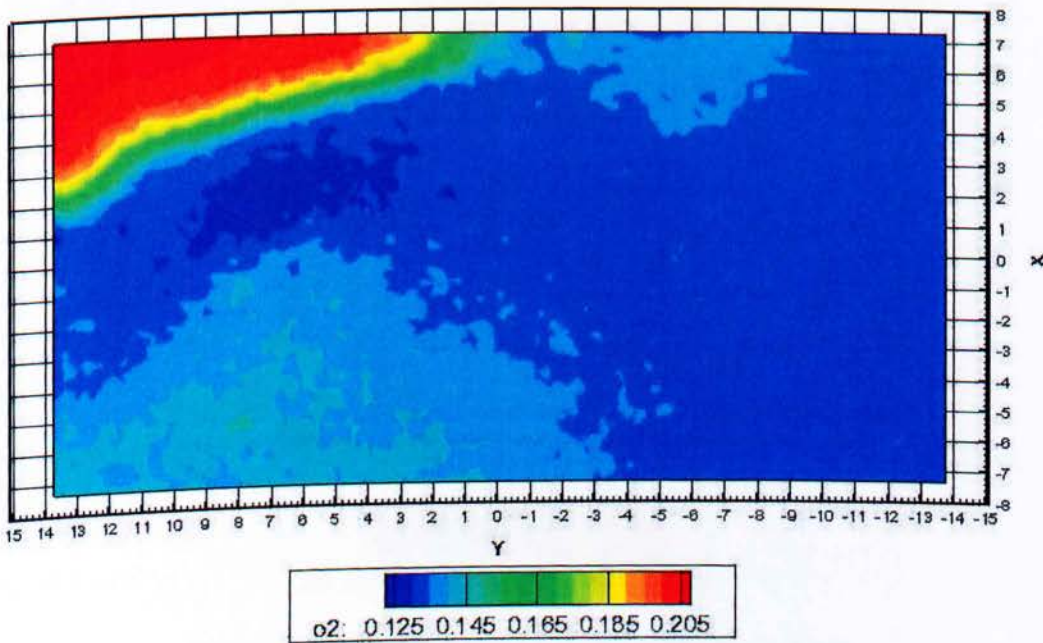


Εικόνα 5.46: Κατανομή θερμοκρασίας κατά γ-χ, σε ύψος 1,7 m από το έδαφος.

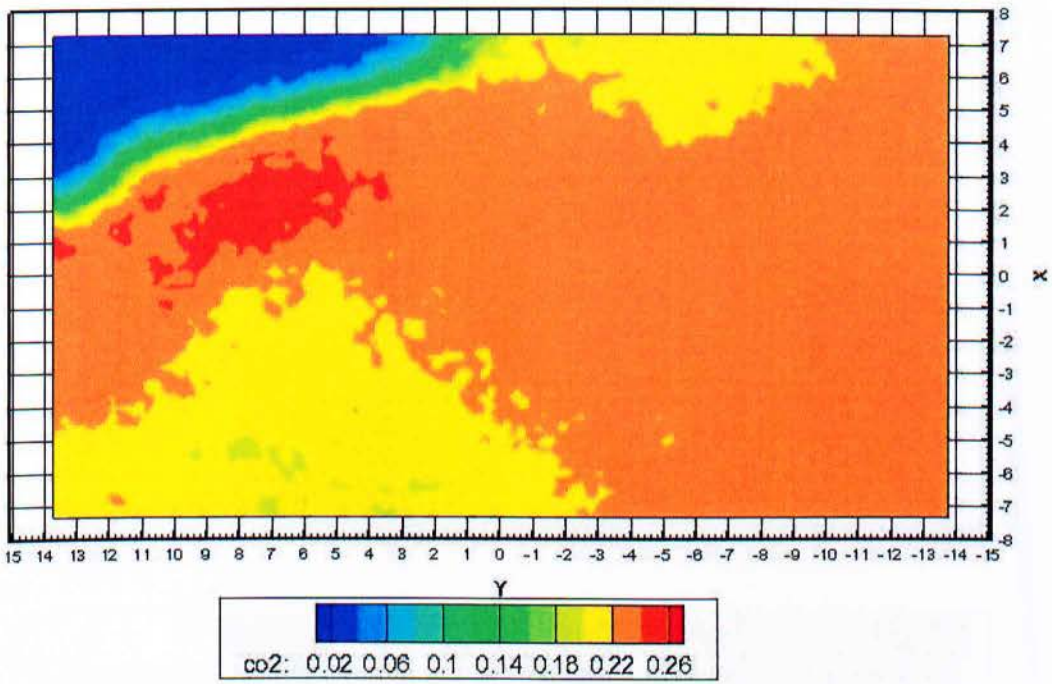


Εικόνα 5.47: Κατανομή θερμοκρασίας κατά x - z , στο κέντρο της πηγής.

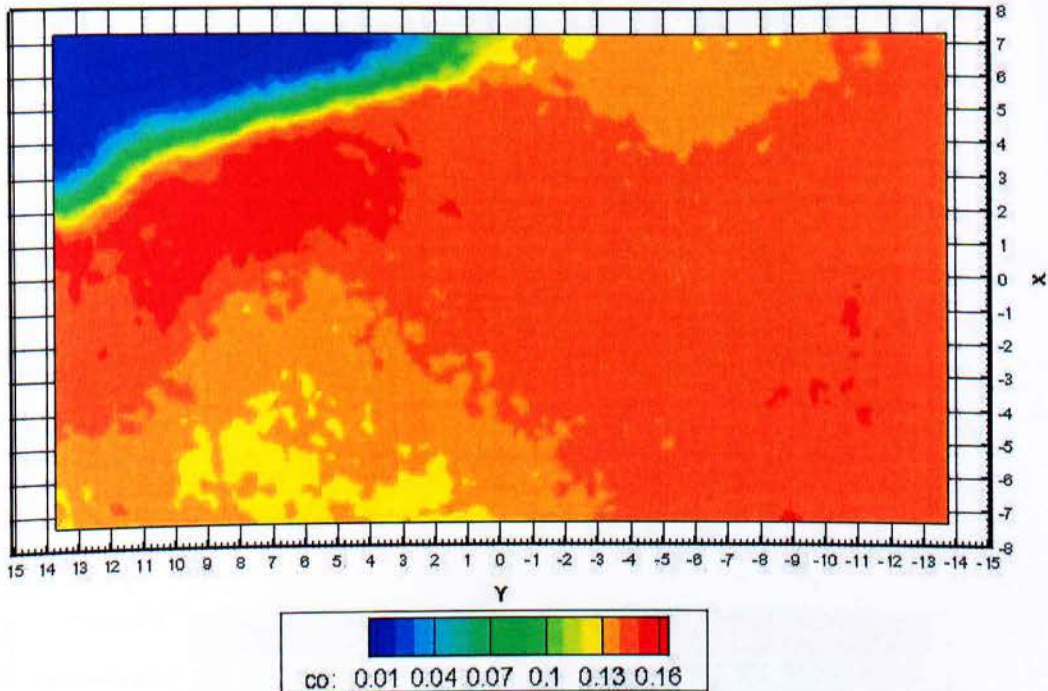
5.3.5 Χρονική στιγμή: 500 s



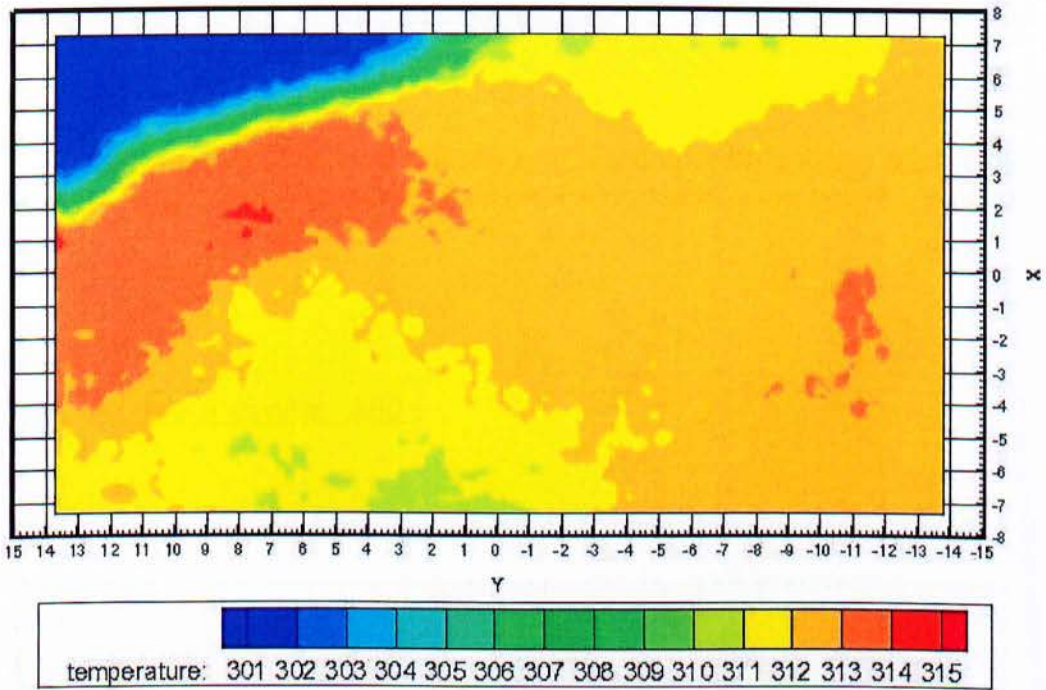
Εικόνα 5.48: Ποσοστά O₂ κατά y - x , σε ύψος 1,7 m από το έδαφος.



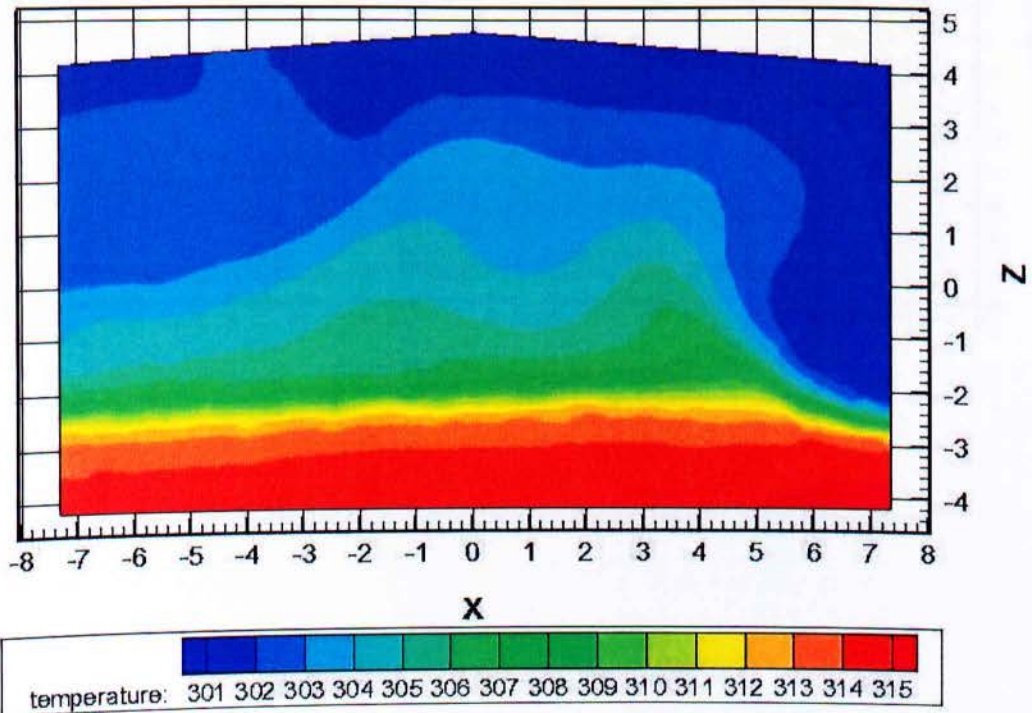
Εικόνα 5.49: Ποσοστά CO₂ κατά y-x, σε ύψος 1,7 m από το έδαφος.



Εικόνα 5.50: Ποσοστά CO κατά y-x, σε ύψος 1,7 m από το έδαφος.



Εικόνα 5.51: Κατανομή θερμοκρασίας κατά y - x , σε ύψος 1,7 m από το έδαφος.

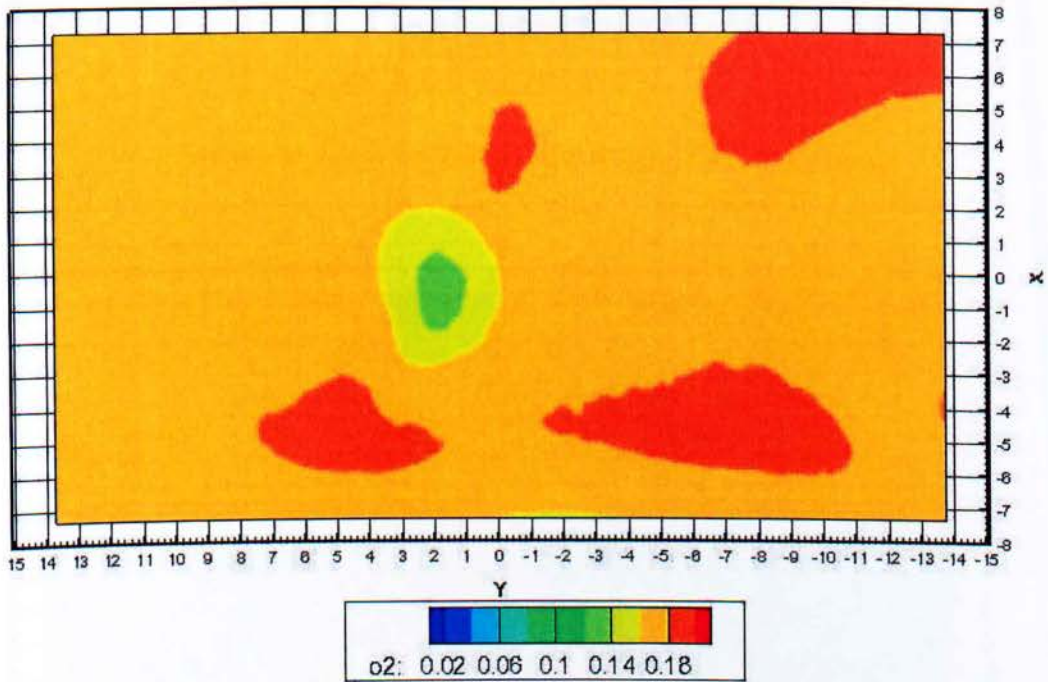


Εικόνα 5.52: Κατανομή θερμοκρασίας κατά x - z , στο κέντρο της πηγής.

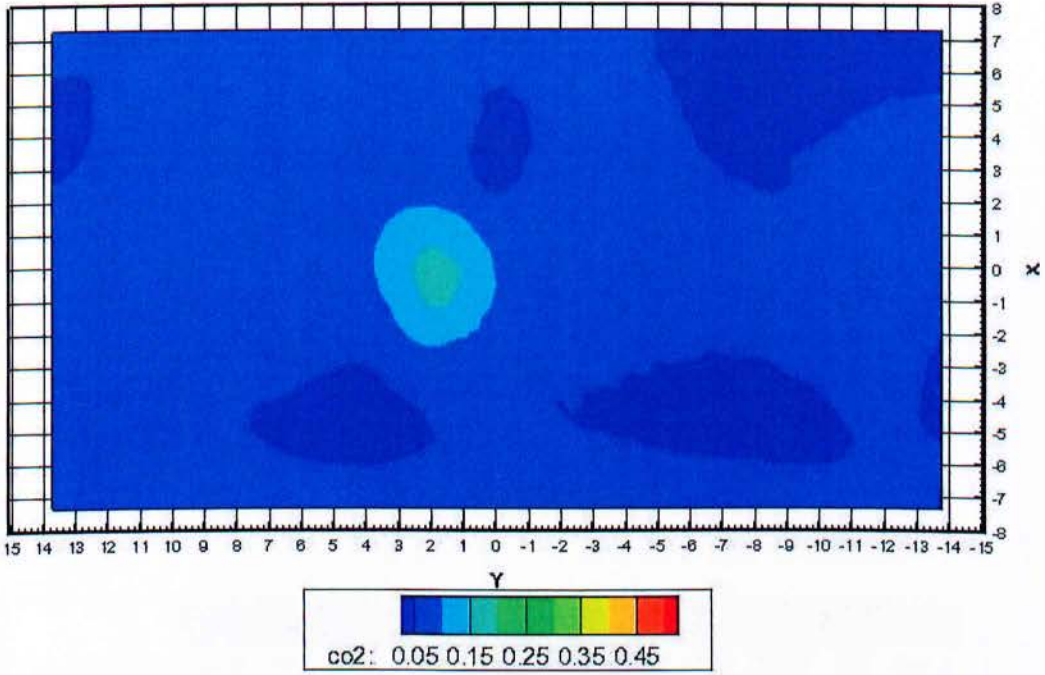
5.4 Αποτελέσματα τρίτης προσομοίωσης

Στη συγκεκριμένη προσομοίωση έχει χρησιμοποιηθεί χρονικό βήμα 0,05 s, ταχύτητα ανέμου 2 m/s, τα παράθυρα βρίσκονται στο κέντρο του κτιρίου, όπως και η πηγή.

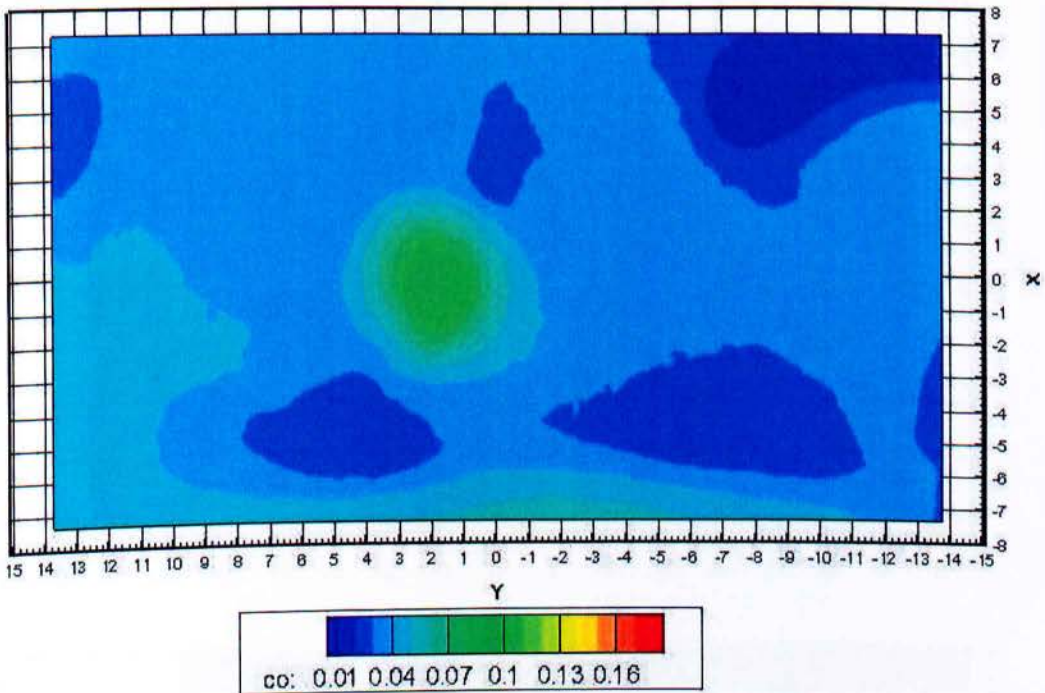
5.4.1 Χρονική στιγμή: 100 s



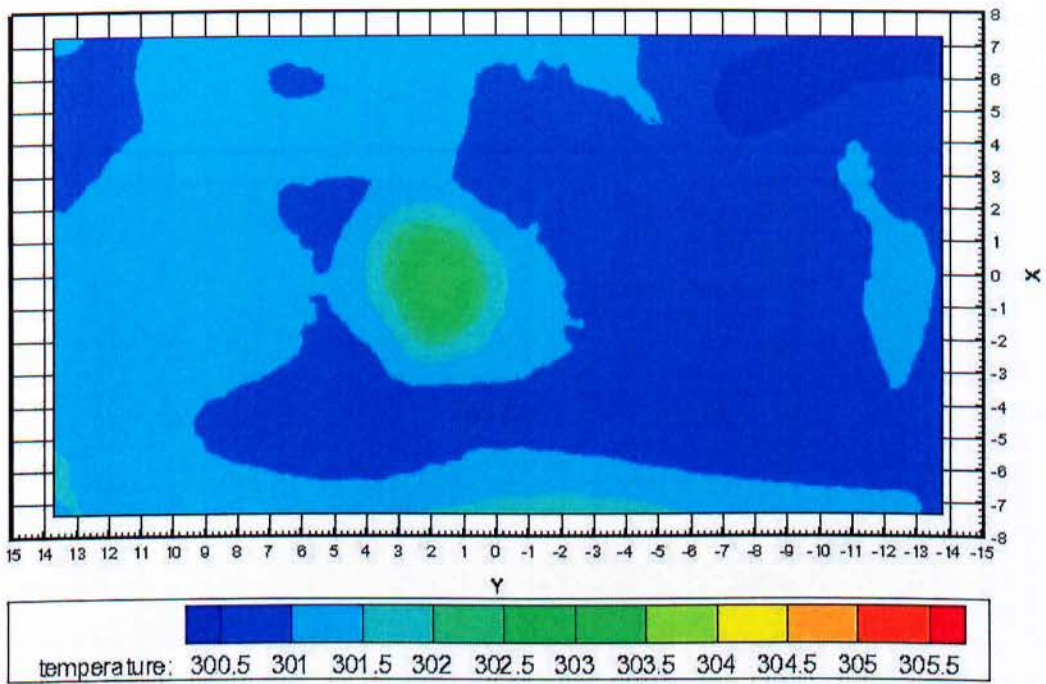
Εικόνα 5.53: Ποσοστά O_2 κατά y - x , σε ύψος 1,7 m από το έδαφος.



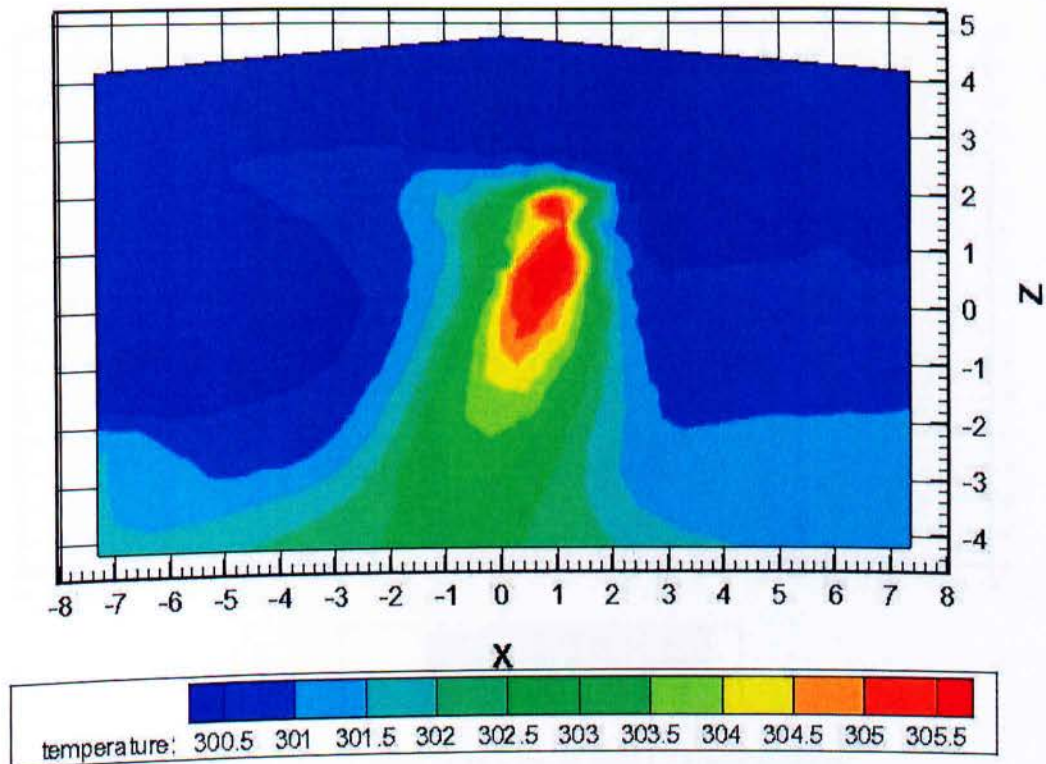
Εικόνα 5.54: Ποσοστά CO₂ κατά γ-χ, σε ύψος 1,7 m από το έδαφος.



Εικόνα 5.55: Ποσοστά CO κατά γ-χ, σε ύψος 1,7 m από το έδαφος.

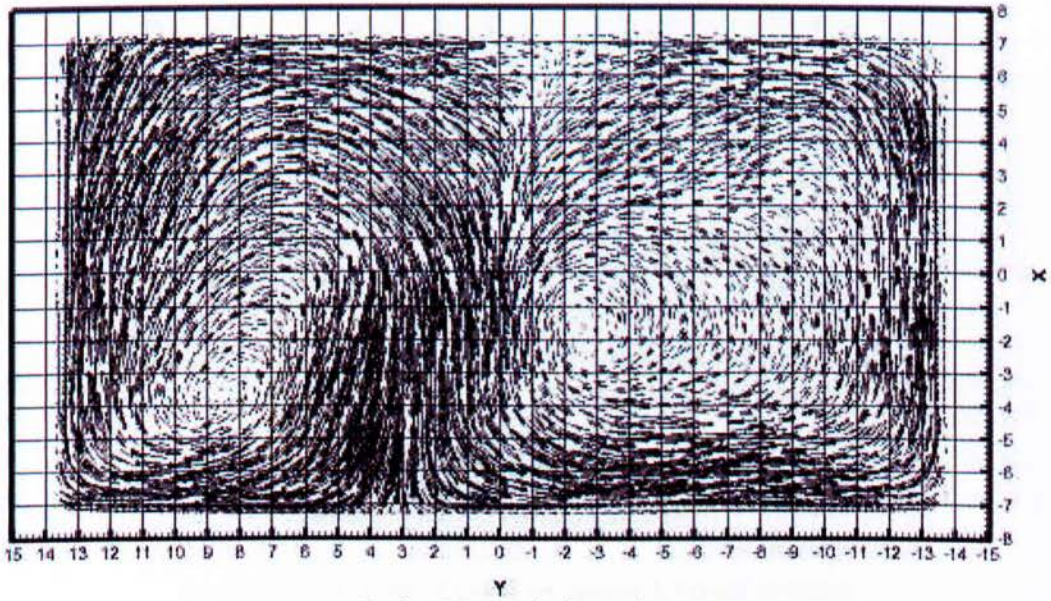


Εικόνα 5.56: Κατανομή θερμοκρασίας κατά $y-x$, σε ύψος 1,7 m από το έδαφος.

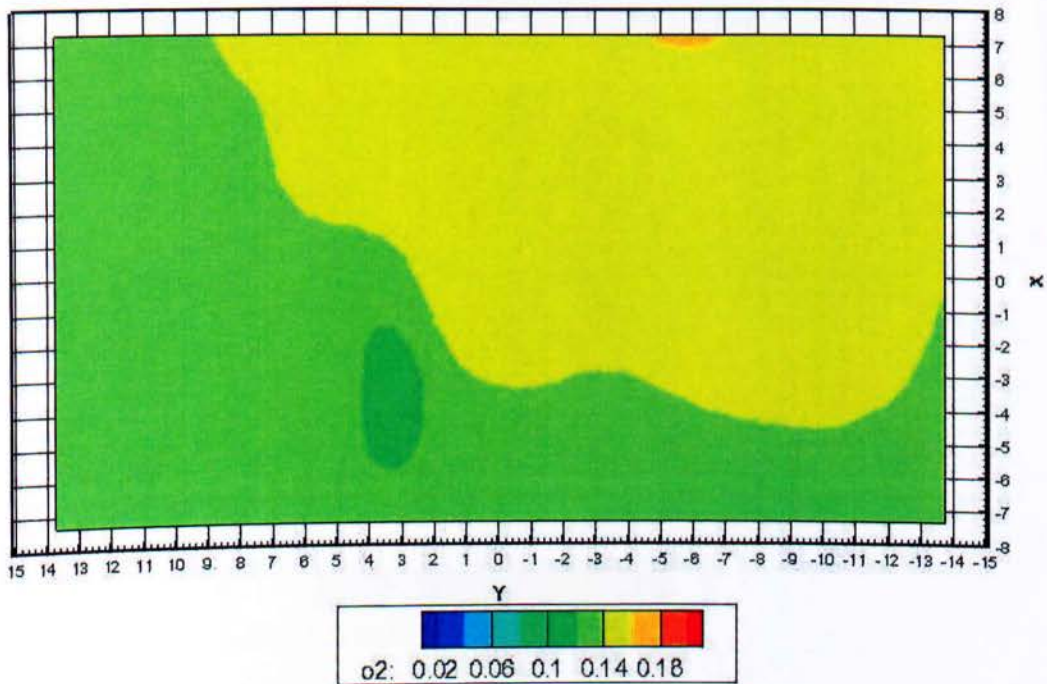


Εικόνα 5.57: Κατανομή θερμοκρασίας κατά $x-z$, στο κέντρο της πηγής.

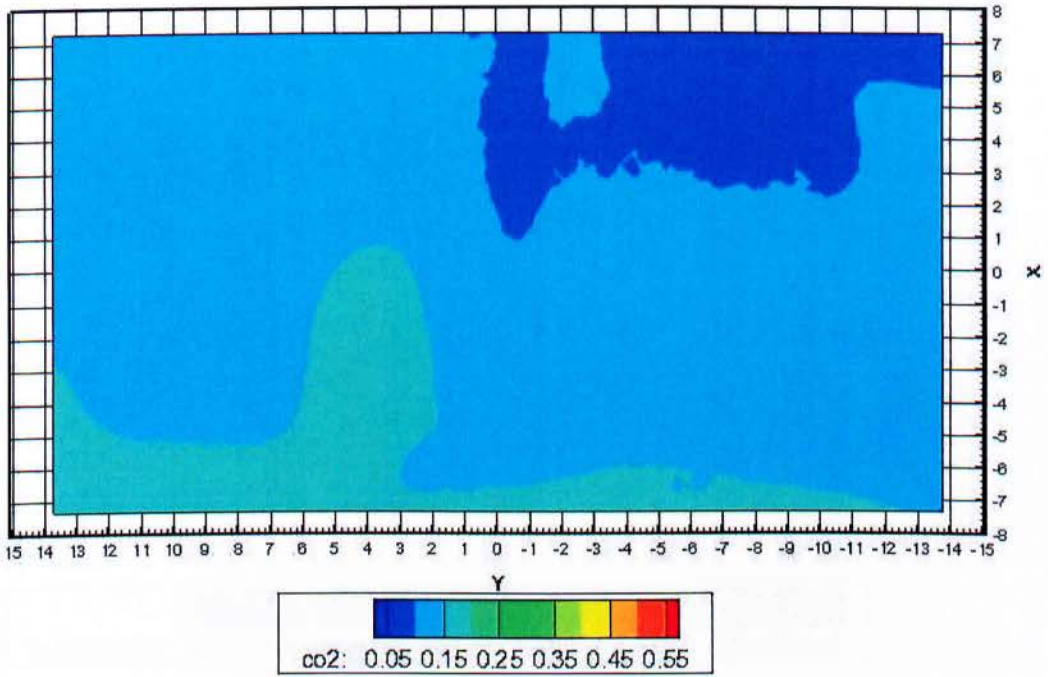
5.4.2 Χρονική στιγμή: 200 s



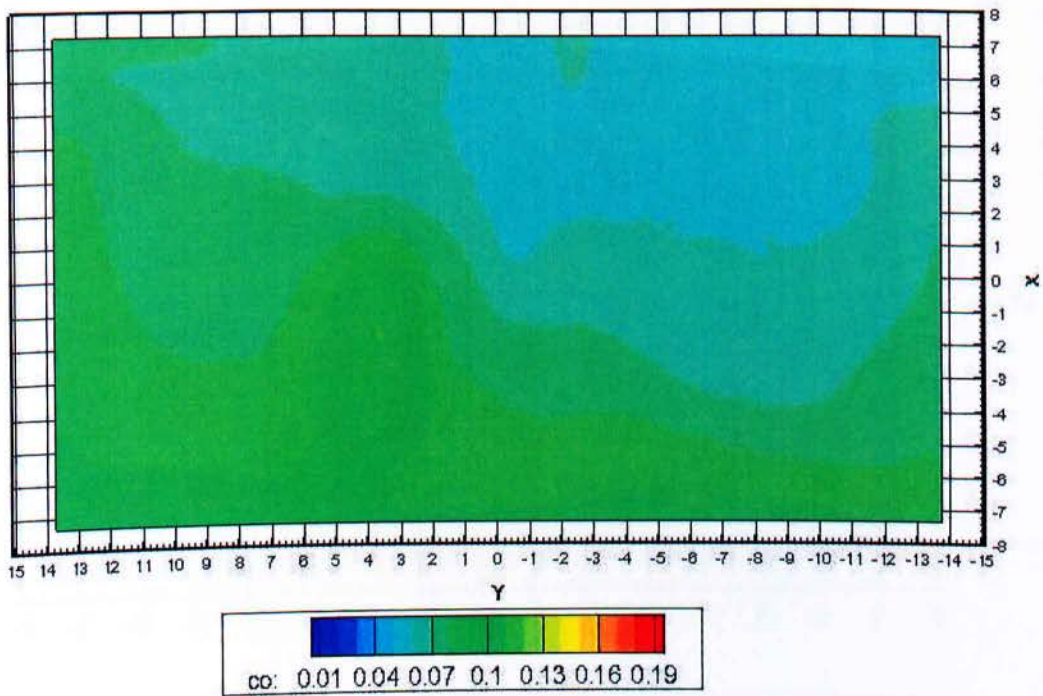
Εικόνα 5.58: Ροή αέρα κατά γ - χ .



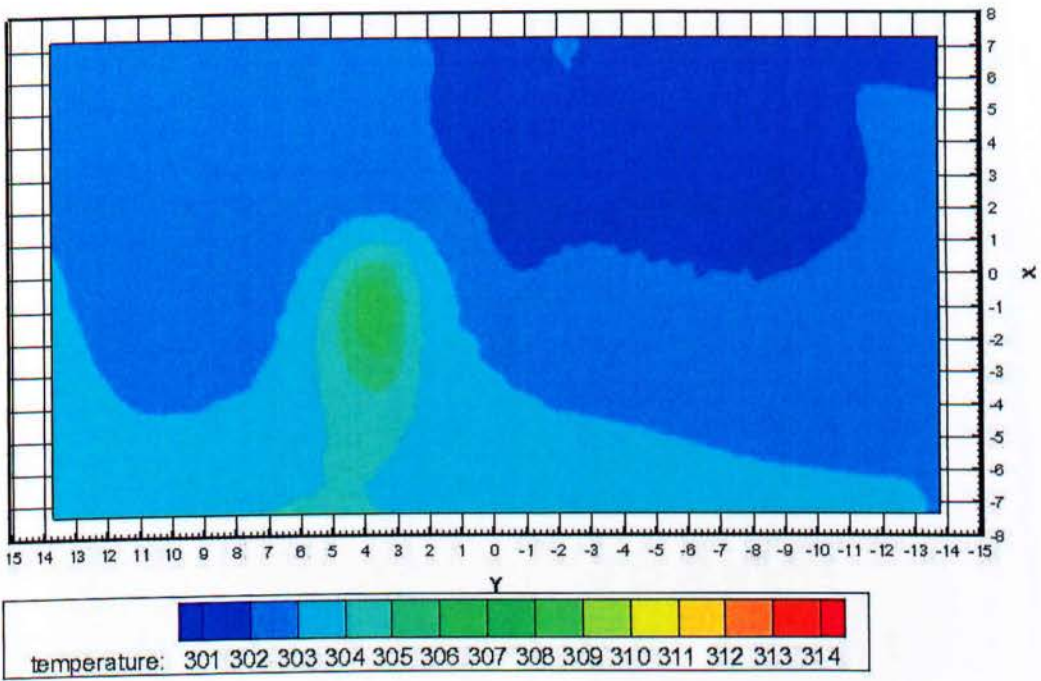
Εικόνα 5.59: Ποσοστά O_2 κατά γ - χ , σε ύψος 1,7 m από το έδαφος.



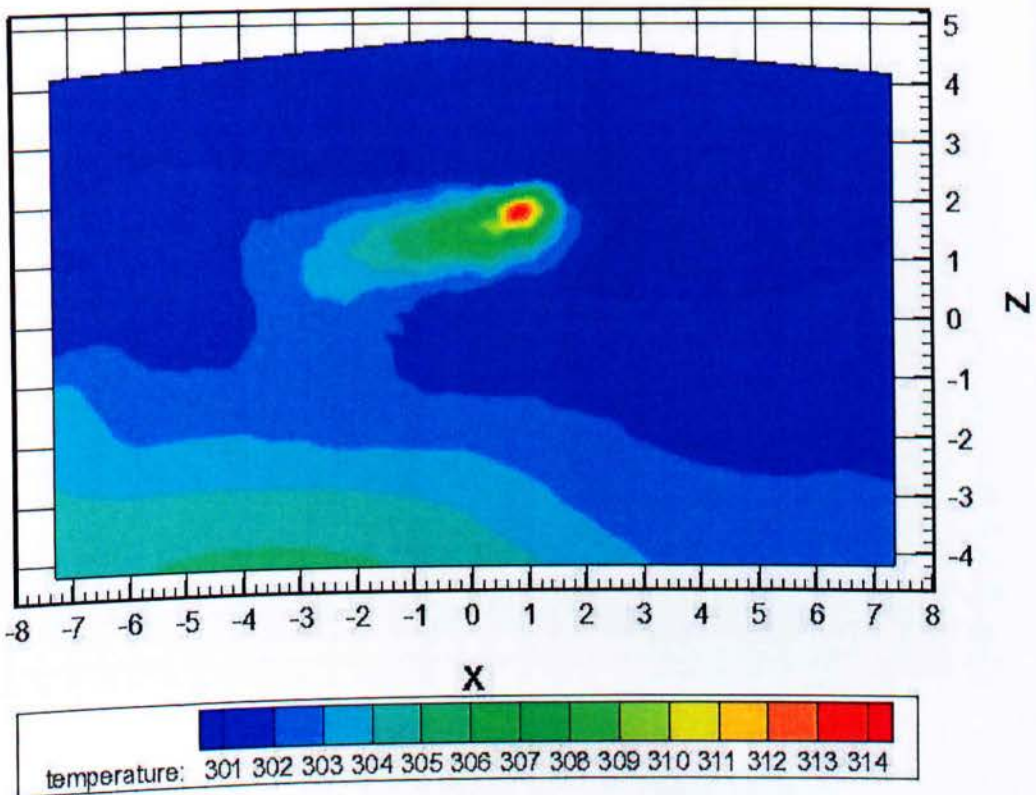
Εικόνα 5.60: Ποσοστά CO_2 κατά $y-x$, σε ύψος 1,7 m από το έδαφος.



Εικόνα 5.61: Ποσοστά CO κατά $y-x$, σε ύψος 1,7 m από το έδαφος.

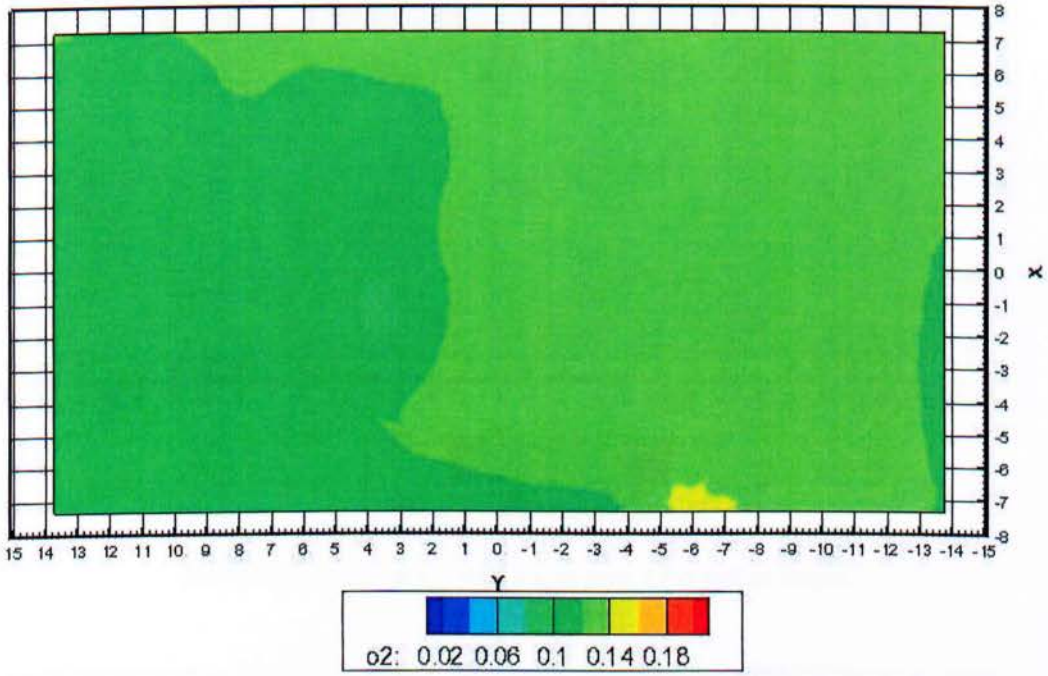


Εικόνα 5.62: Κατανομή θερμοκρασίας κατά y - x , σε ύψος 1,7 m από το έδαφος.

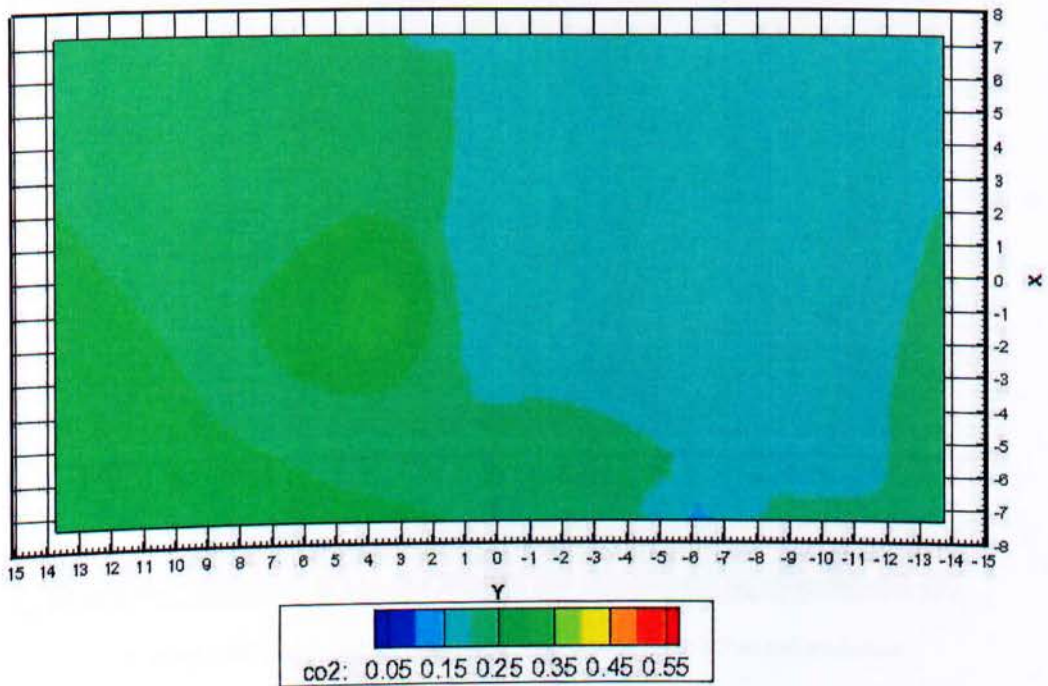


Εικόνα 5.63: Κατανομή θερμοκρασίας κατά x - z , στο κέντρο της πηγής.

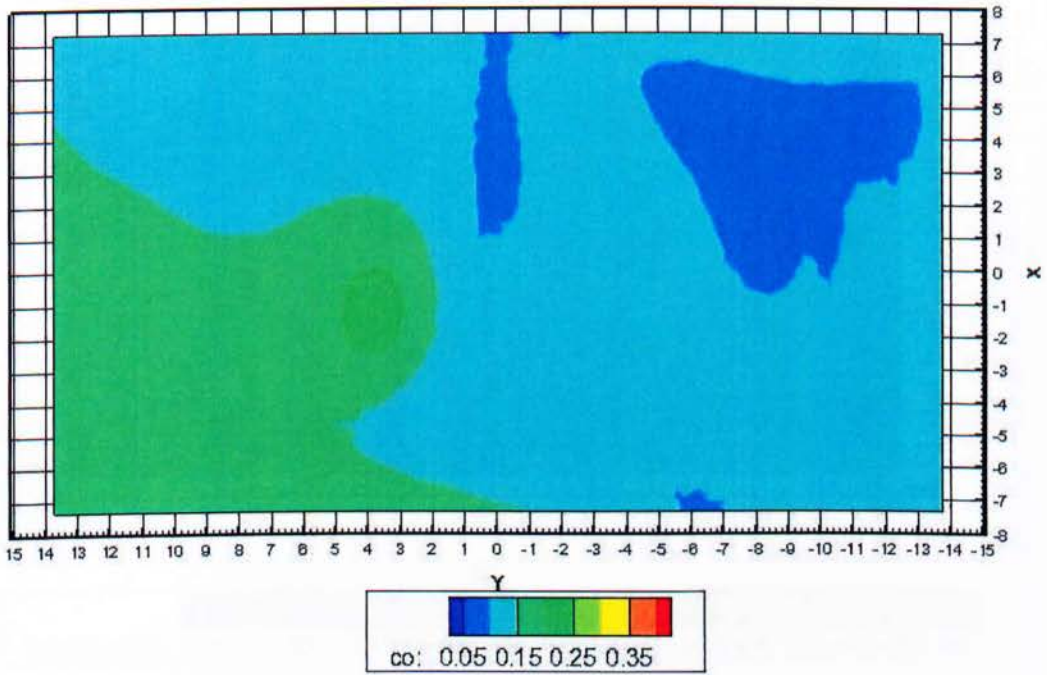
5.4.3 Χρονική στιγμή: 345 s (μέγιστη θερμοκρασία στην πηγή)



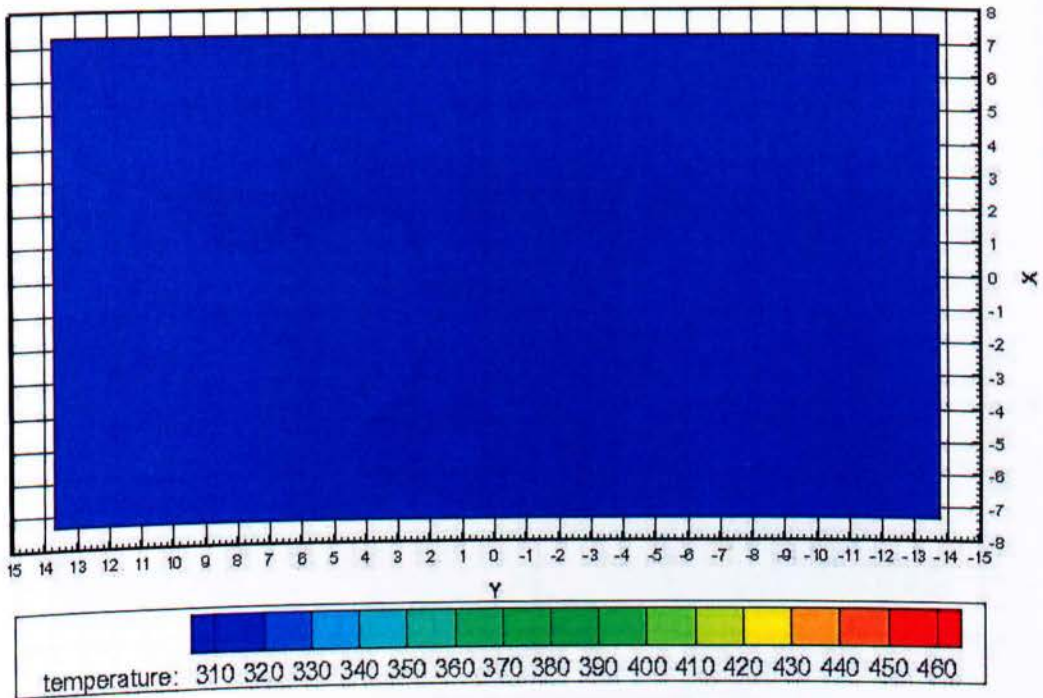
Εικόνα 5.64: Ποσοστά O_2 κατά $y-x$, σε ύψος 1,7 m από το έδαφος.



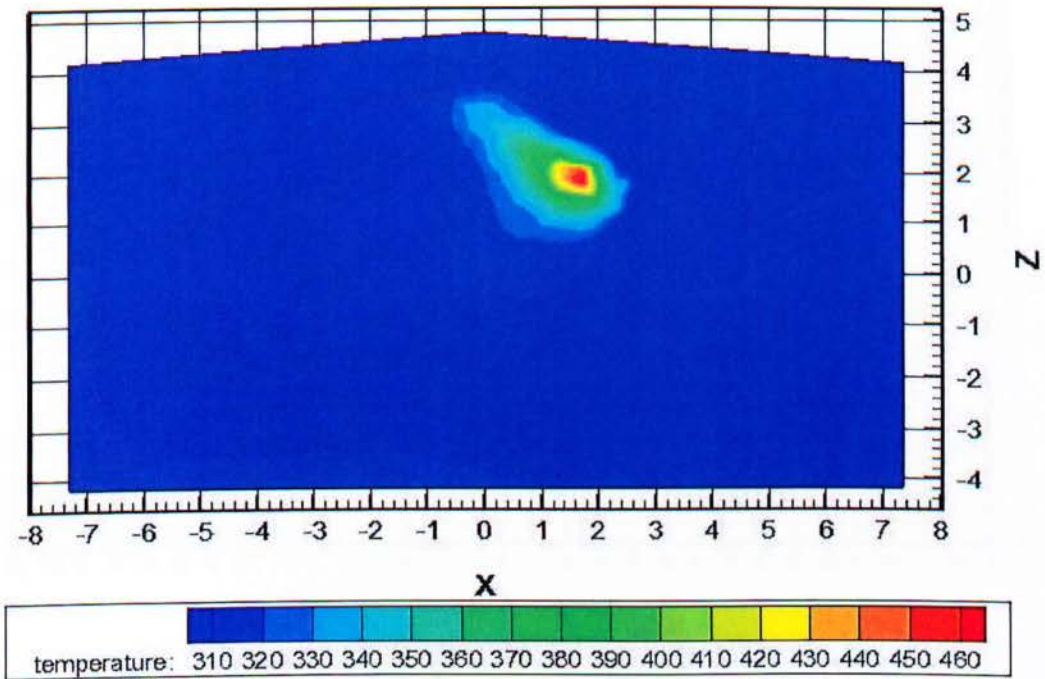
Εικόνα 5.65: Ποσοστά CO_2 κατά $y-x$, σε ύψος 1,7 m από το έδαφος.



Εικόνα 5.66: Ποσοστά CO κατά y-x, σε ύψος 1,7 m από το έδαφος.

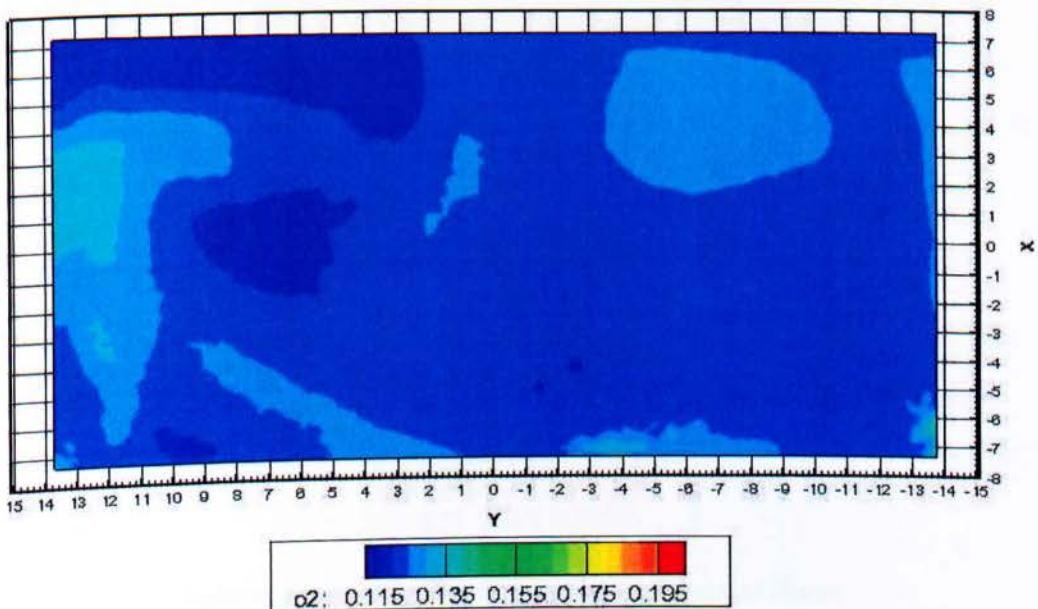


Εικόνα 5.67: Κατανομή θερμοκρασίας κατά y-x, σε ύψος 1,7 m από το έδαφος.

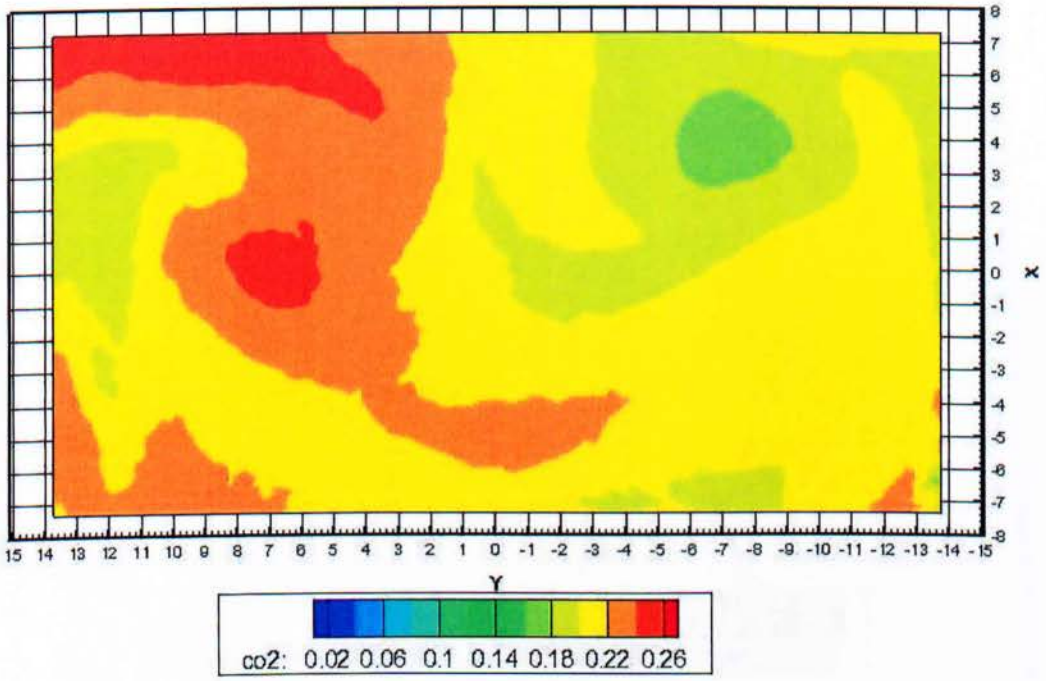


Εικόνα 5.68: Κατανομή θερμοκρασίας κατά x - z , στο κέντρο της πηγής.

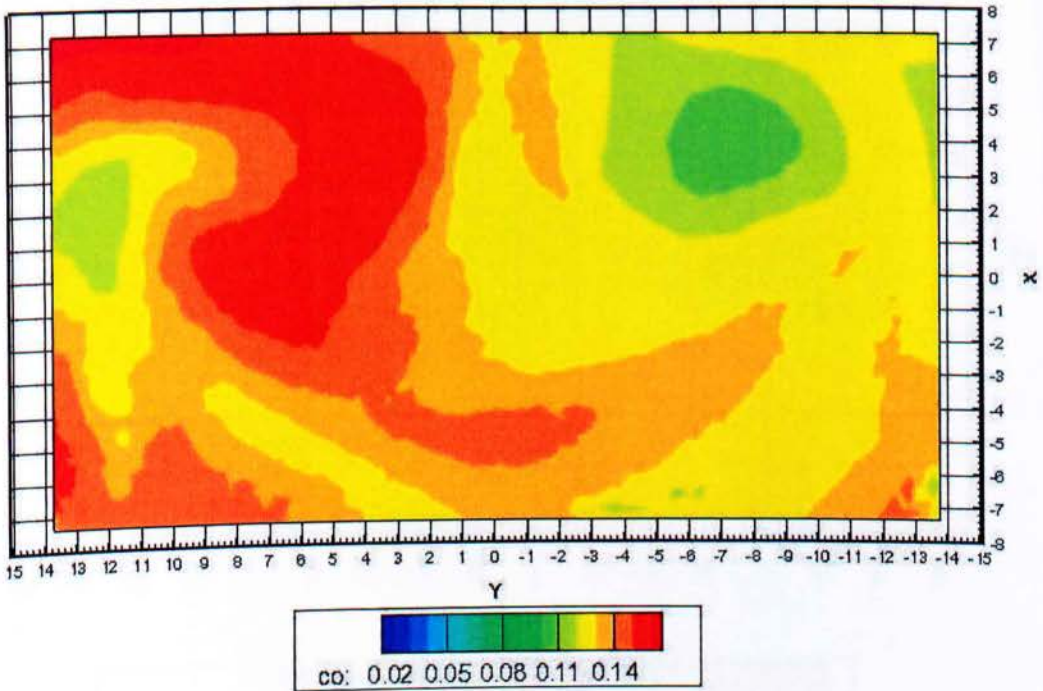
5.4.4 Χρονική στιγμή: 400 s



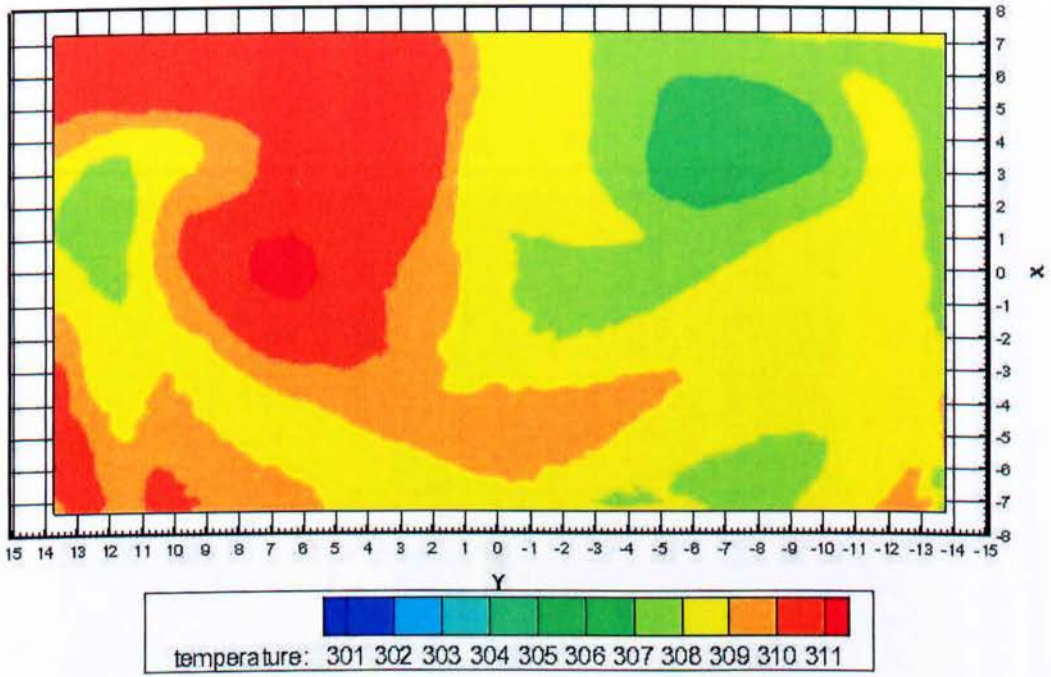
Εικόνα 5.69: Ποσοστά O_2 κατά y - x , σε ύψος 1,7 m από το έδαφος.



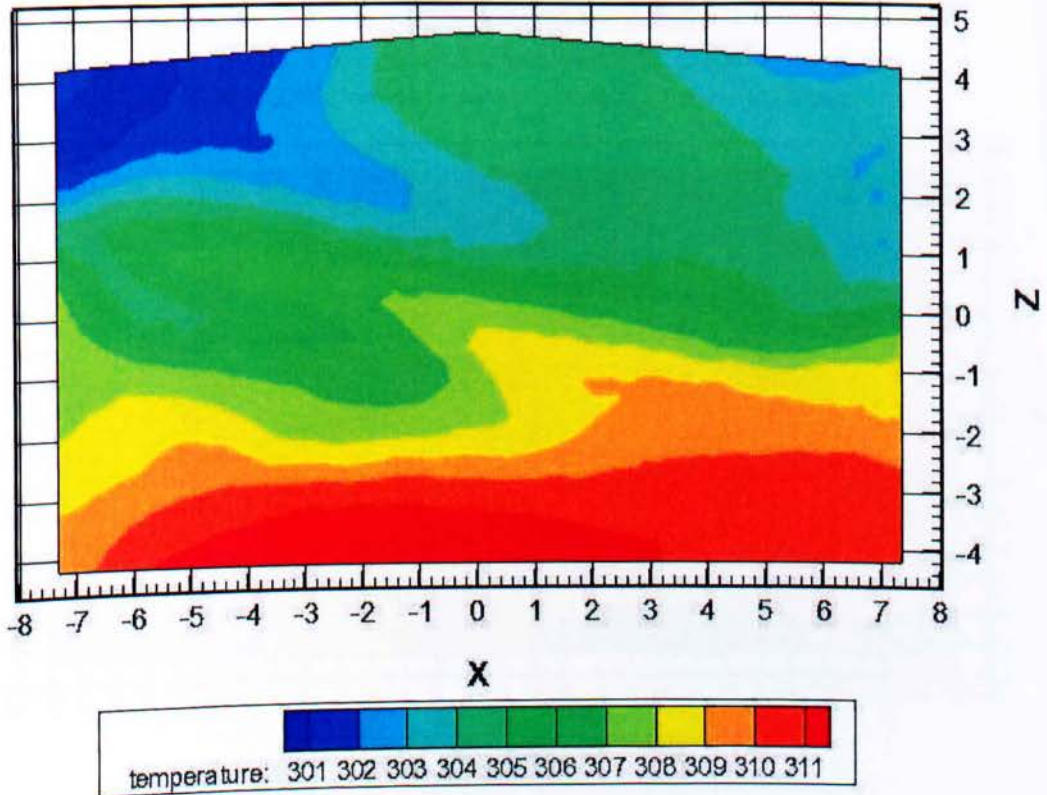
Εικόνα 5.70: Ποσοστά CO₂ κατά y-x, σε ύψος 1,7 m από το έδαφος.



Εικόνα 5.71: Ποσοστά CO κατά y-x, σε ύψος 1,7 m από το έδαφος.

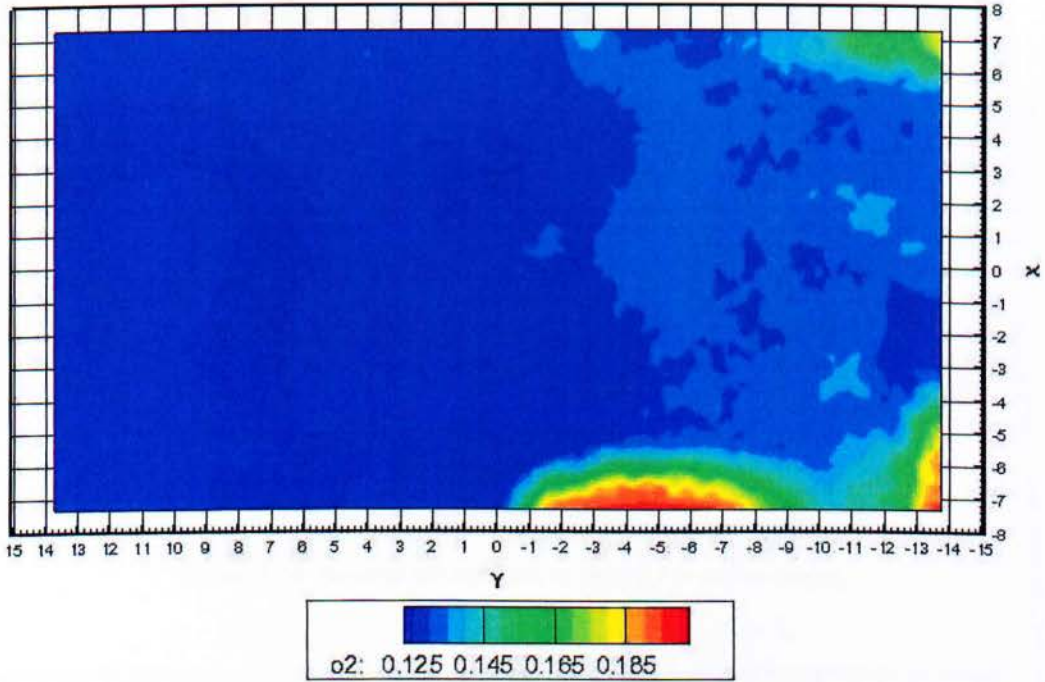


Εικόνα 5.72: Κατανομή θερμοκρασίας κατά $y-x$, σε ύψος 1,7 m από το έδαφος.

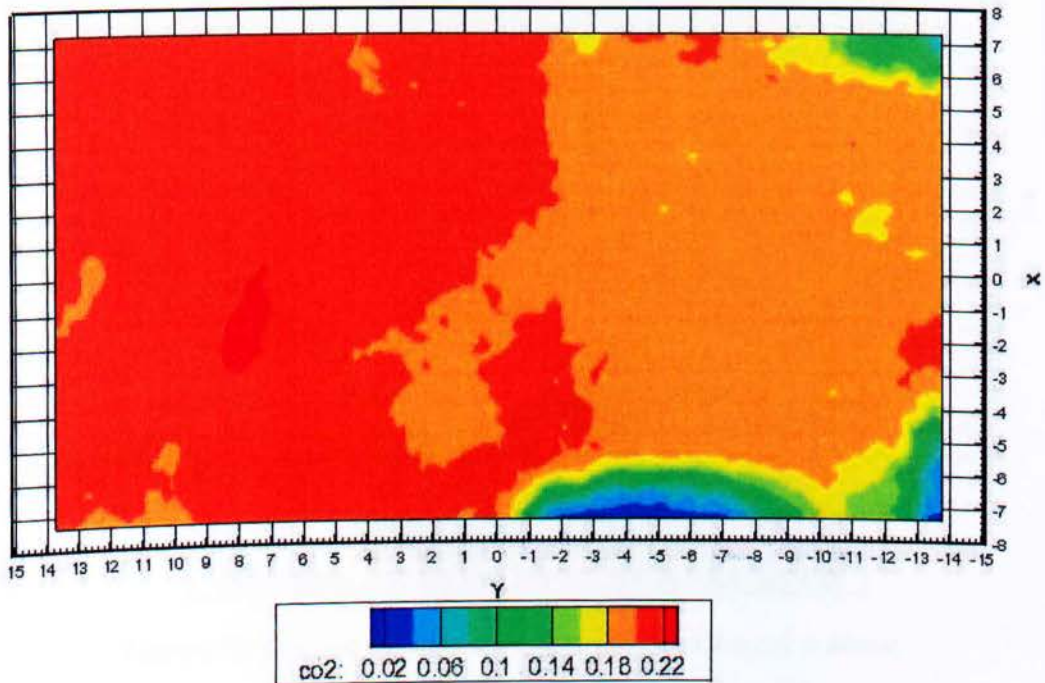


Εικόνα 5.73: Κατανομή θερμοκρασίας κατά $x-z$, στο κέντρο της πηγής.

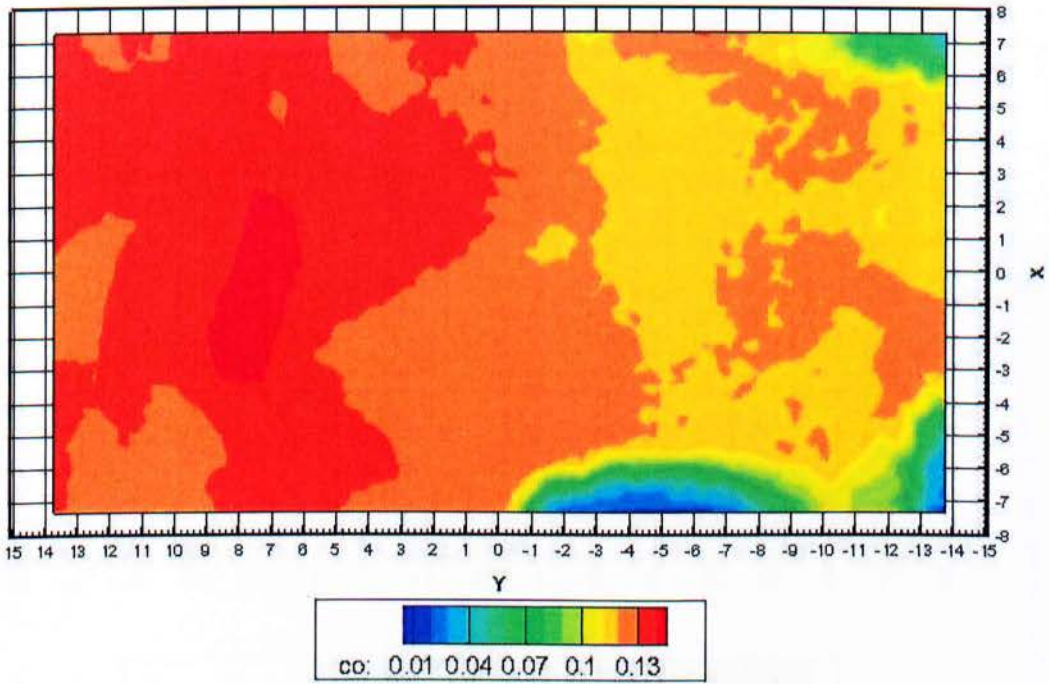
5.4.5 Χρονική στιγμή: 500 s



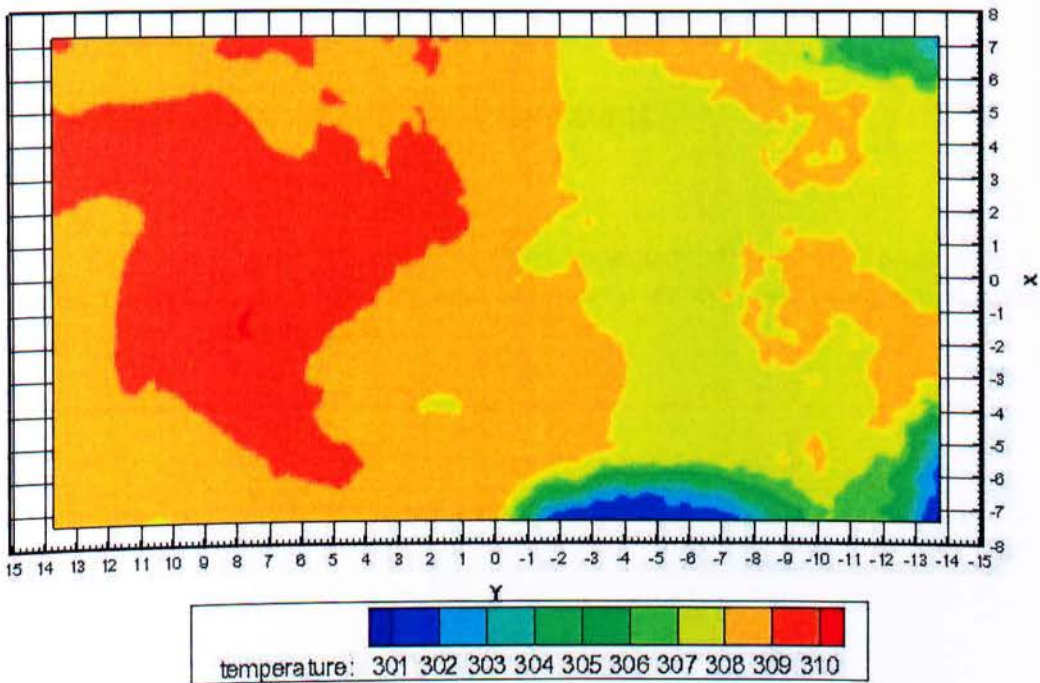
Εικόνα 5.74: Ποσοστά O_2 κατά y - x , σε ύψος 1,7 m από το έδαφος.



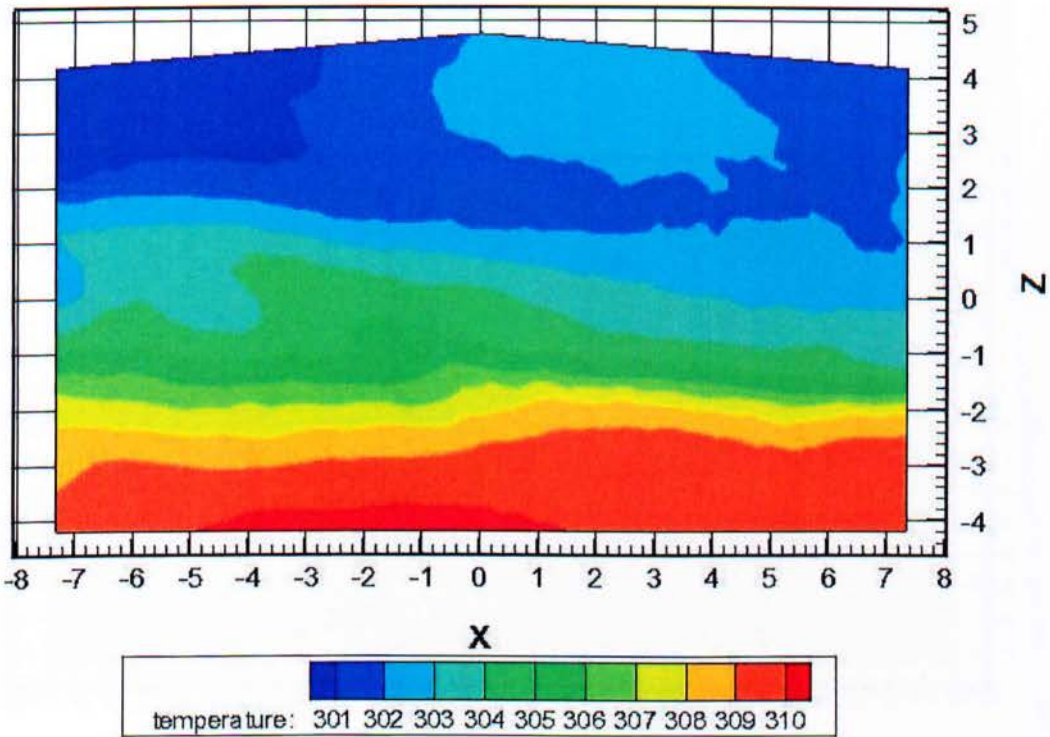
Εικόνα 5.75: Ποσοστά CO_2 κατά y - x , σε ύψος 1,7 m από το έδαφος.



Εικόνα 5.76: Ποσοστά CO κατά y-x, σε ύψος 1,7 m από το έδαφος.



Εικόνα 5.77: Κατανομή θερμοκρασίας κατά y-x, σε ύψος 1,7 m από το έδαφος.

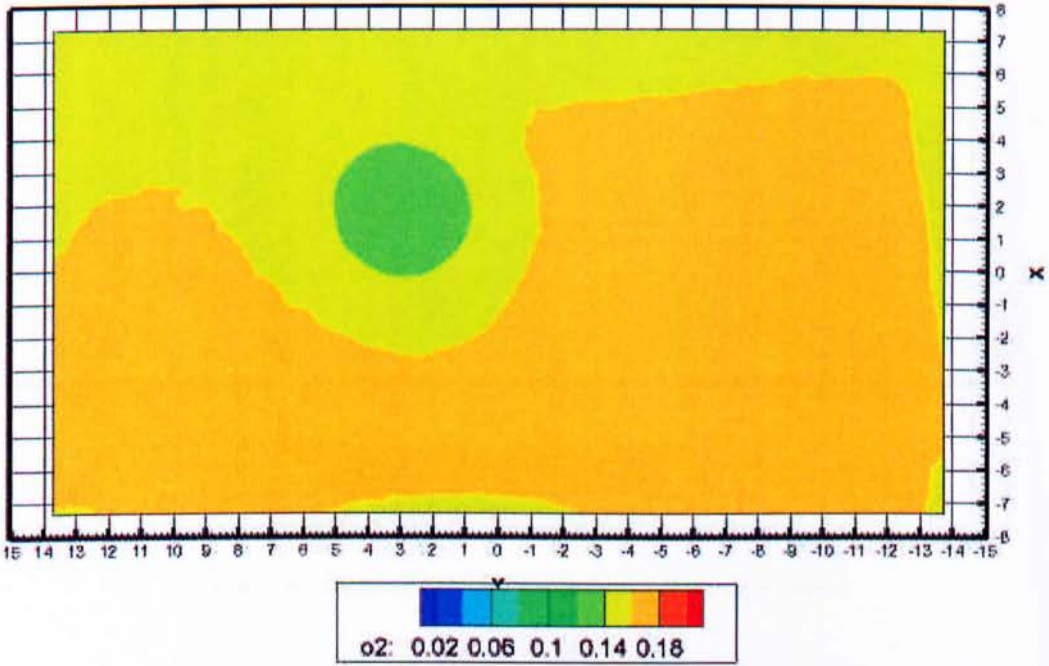


Εικόνα 5.78: Κατανομή θερμοκρασίας κατά x - z , στο κέντρο της πηγής.

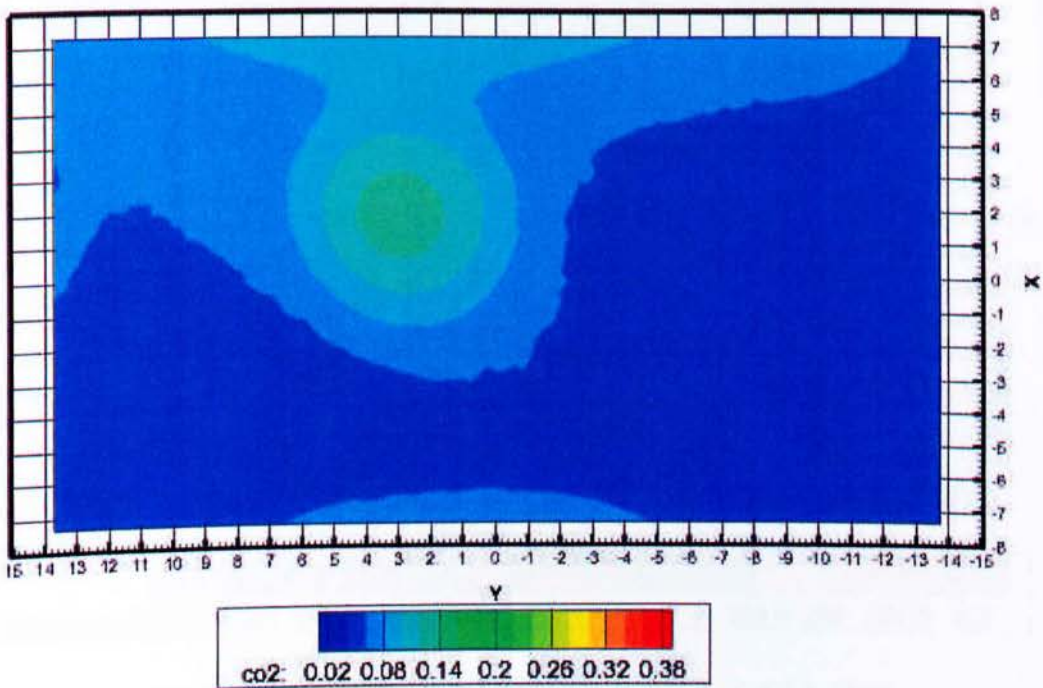
5.5 Αποτελέσματα τέταρτης προσομοίωσης

Στη συγκεκριμένη προσομοίωση έχει χρησιμοποιηθεί χρονικό βήμα 0,05 s, ταχύτητα ανέμου 0 m/s, τα παράθυρα βρίσκονται σε διαγώνια θέση και η πηγή βρίσκεται στο κέντρο του κτιρίου.

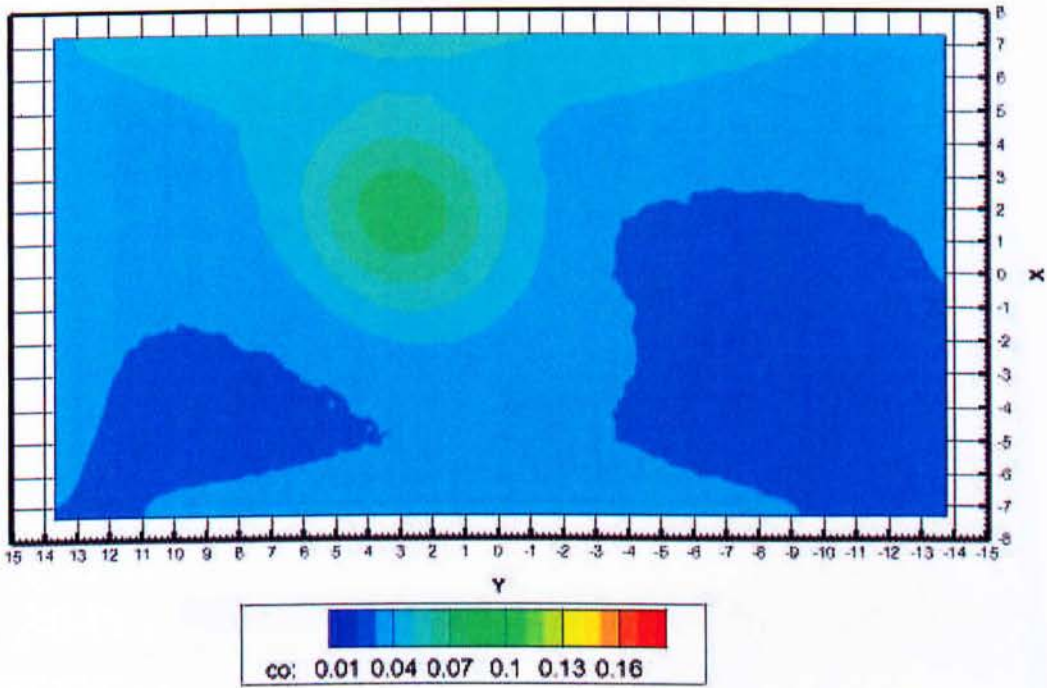
5.5.1 Χρονική στιγμή: 100 s



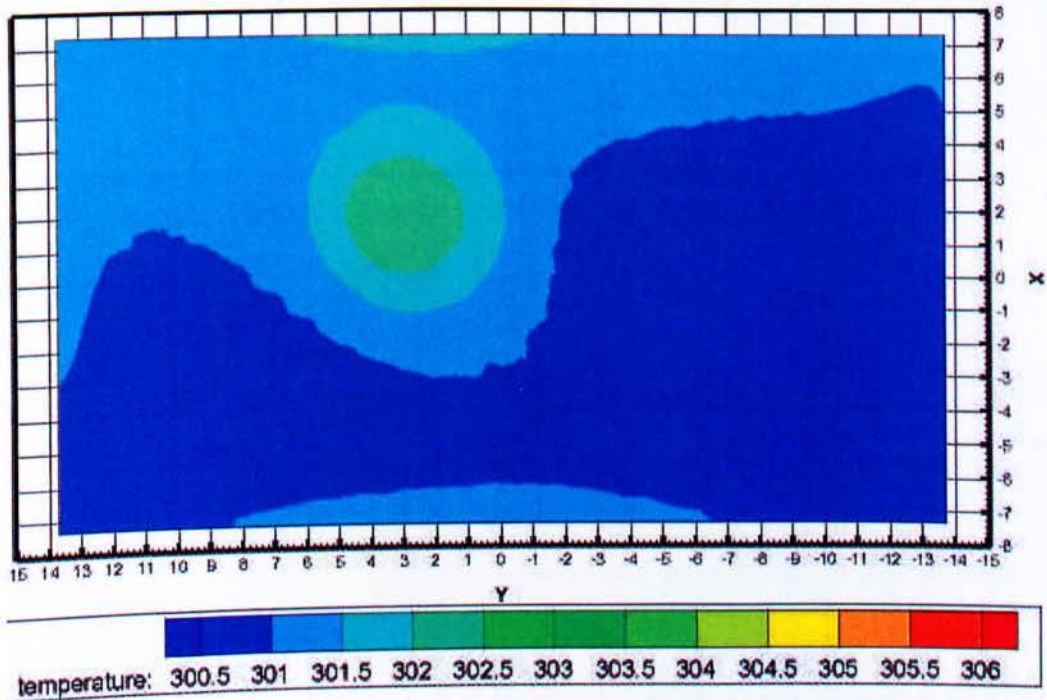
Εικόνα 5.79: Ποσοστά O_2 κατά y - x , σε ύψος 1,7 m από το έδαφος.



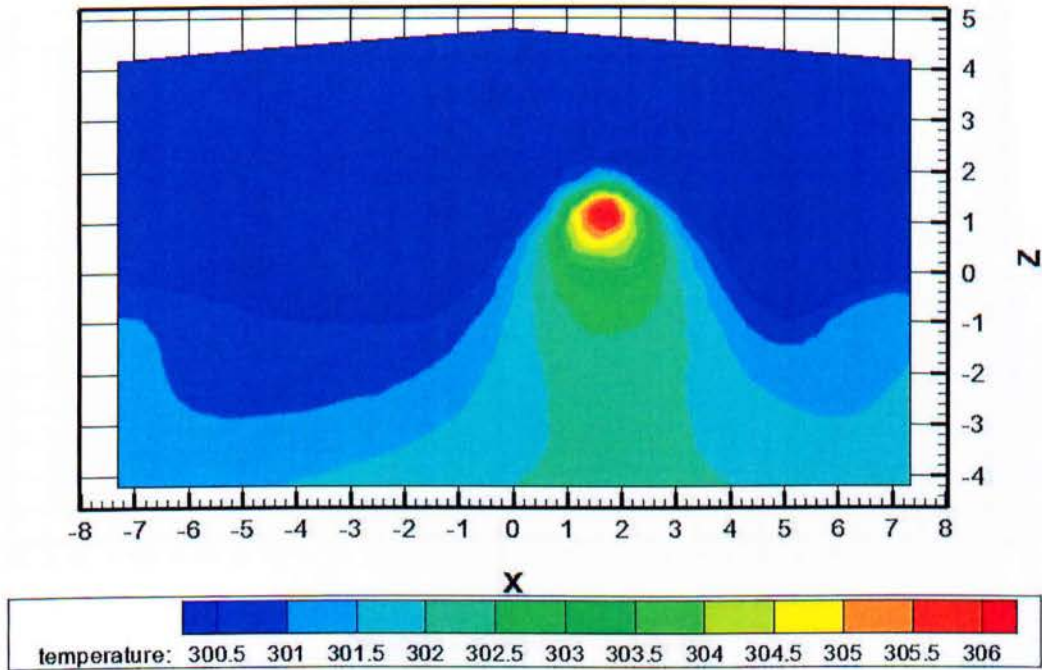
Εικόνα 5.80: Ποσοστά CO_2 κατά y - x , σε ύψος 1,7 m από το έδαφος.



Εικόνα 5.81: Ποσοστά CO κατά y-x, σε ύψος 1,7 m από το έδαφος.

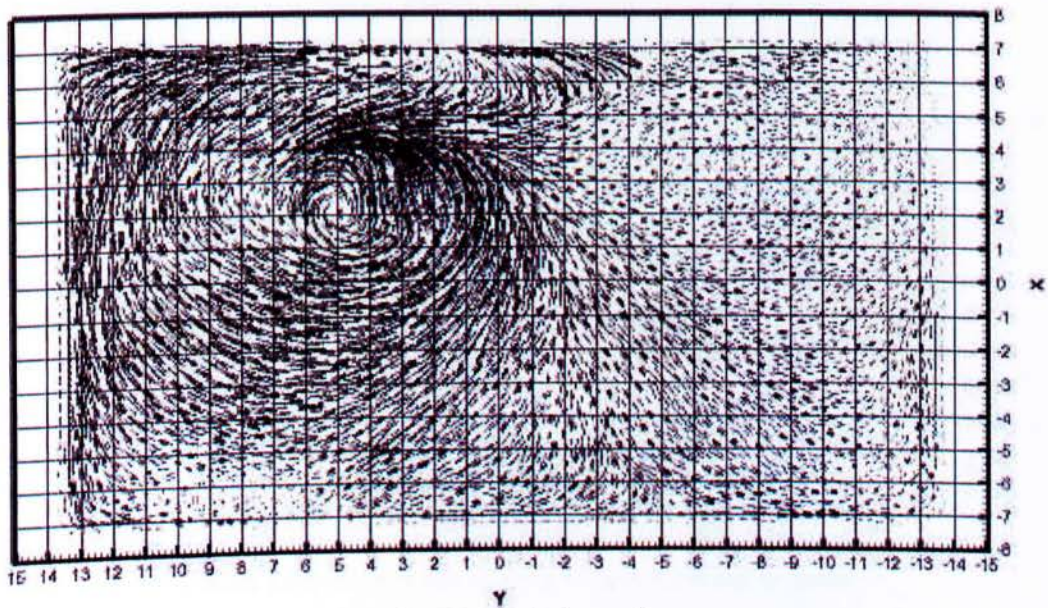


Εικόνα 5.82: Κατανομή θερμοκρασίας κατά y-x, σε ύψος 1,7 m από το έδαφος.

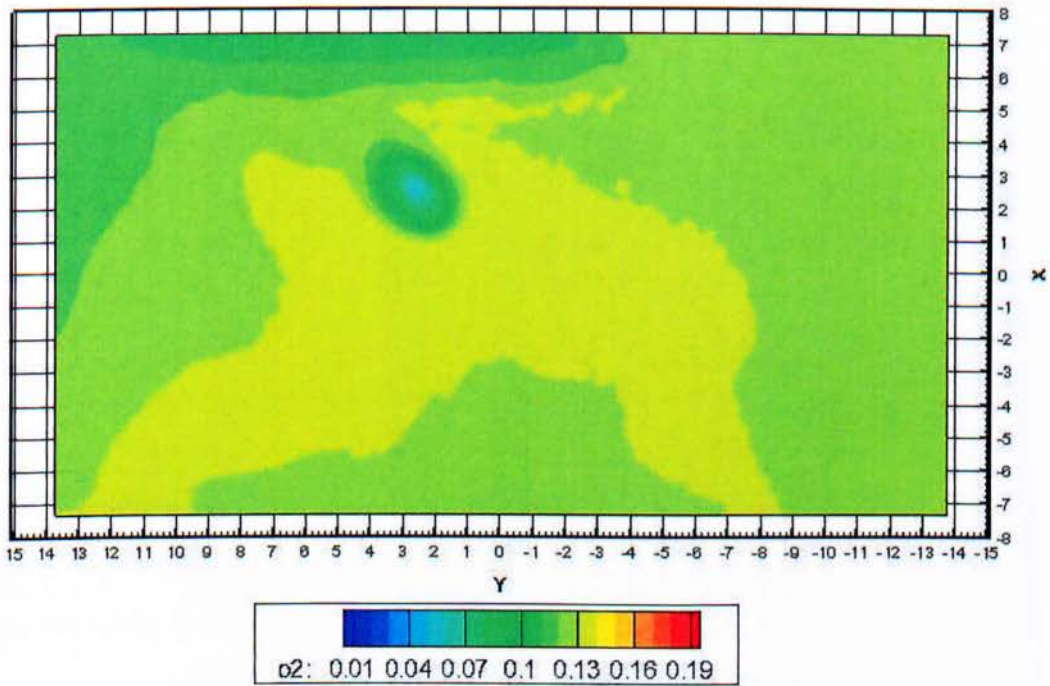


Εικόνα 5.83: Κατανομή θερμοκρασίας κατά x - z , στο κέντρο της πηγής.

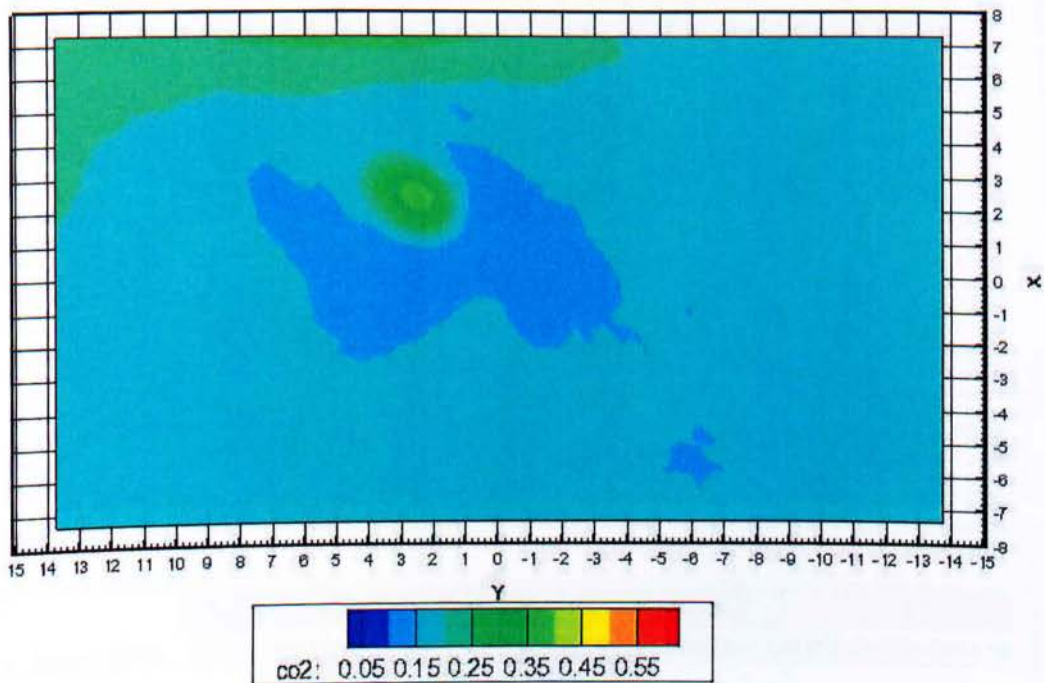
5.5.2 Χρονική στιγμή: 200 s



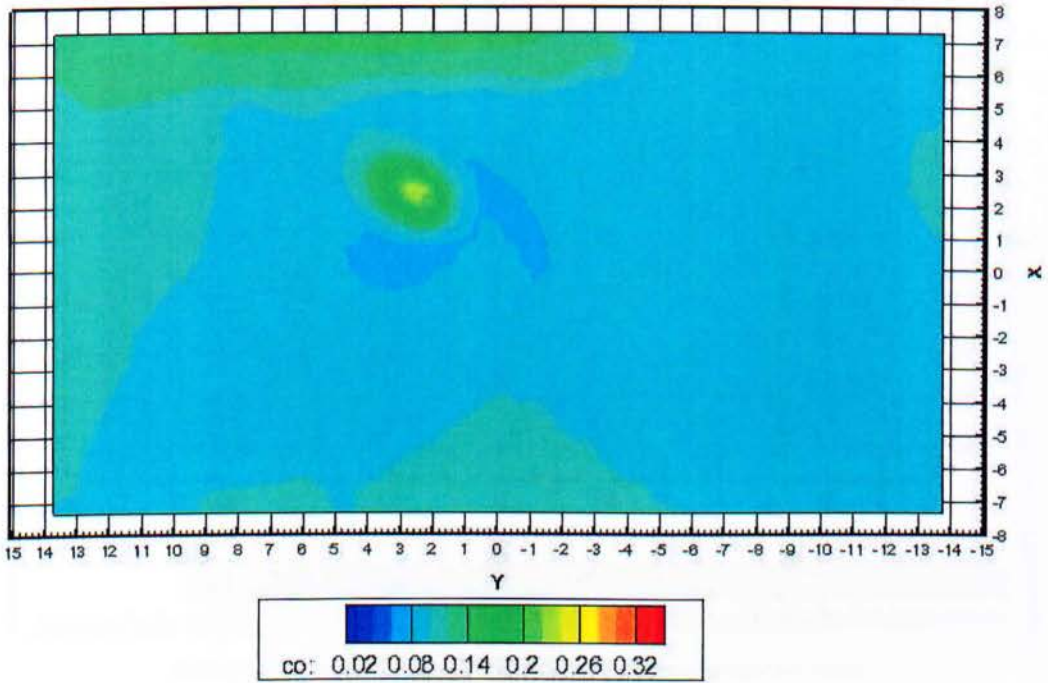
Εικόνα 5.84: Ροή αέρα κατά y - x .



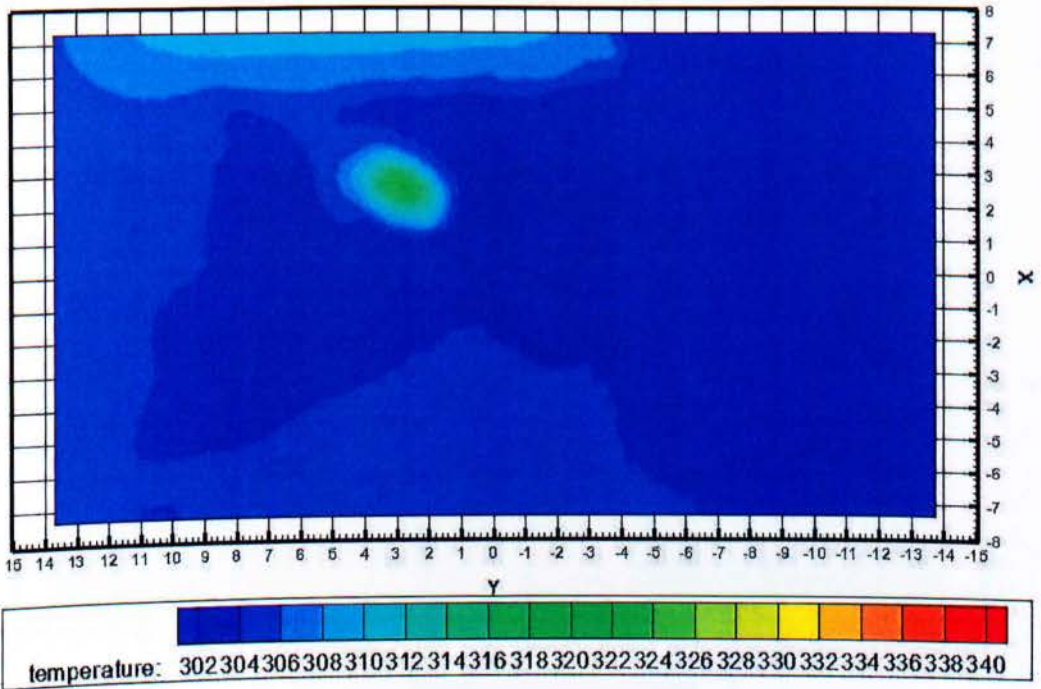
Εικόνα 5.85: Ποσοστά O_2 κατά y - x , σε ύψος 1,7 m από το έδαφος.



Εικόνα 5.86: Ποσοστά CO_2 κατά y - x , σε ύψος 1,7 m από το έδαφος.



Εικόνα 5.87: Ποσοστά CO κατά y - x , σε ύψος 1,7 m από το έδαφος.



Εικόνα 5.88: Κατανομή θερμοκρασίας κατά y - x , σε ύψος 1,7 m από το έδαφος.