

Προσομοίωση λειτουργίας λέβητα για καύση βιομάζας

Μπαμπίλας Νικόλαος Α.Ε.Μ. : 1111

Τσαπραλής Αποστόλης Α.Ε.Μ. : 1092

Επιβλέπων: Καθηγητής Τομπουλίδης Ανανίας

Κοζάνη, Ιούλιος 2015

Πρόλογος

Στη Διπλωματική εργασία που εκπονήθηκε με τίτλο 'Προσομοίωση λειτουργίας λέβητα για καύση βιομάζας', έγινε μια γνωριμία με τον κόσμο της προσομοίωσης. Η αλήθεια είναι ότι η κατανόηση της λειτουργίας και της λογικής του συγκεκριμένου κόσμου, όπως διαπιστώσαμε σε όλο αυτό το χρονικό διάστημα ασχολίας μας, δεν είναι κάτι απλό και εύκολο. Τα προβλήματα και οι δυσκολίες που αντιμετωπίσαμε ήταν πολλές και η επίλυση τους συχνά έμοιαζε με άλυτο γρίφο. Με υπομονή, επιμονή και αποφασιστικότητα συνεχίζαμε σε κάθε βήμα και σταδιακά η επίλυση του προβλήματος που είχαμε έπαιρνε σάρκα και οστά. Για όσους έχουν αντιμετωπίσει παρόμοια προβλήματα προσομοίωσης η παραπάνω περιγραφή μπορεί να τους βρει ταυτισμένους με αυτά τα λεγόμενα.

Σε όλη αυτή τη διαδρομή δεν ήμασταν μόνοι μας. Υπήρξαν άνθρωποι που μας βοήθησαν, μας στήριξαν, μας παρότρυναν να συνεχίσουμε και εν τέλει αποδείχθηκαν καταλυτικοί για την ολοκλήρωση του έργου μας. Γι' αυτό και εμείς σε αυτό το σημείο οφείλουμε να ευχαριστήσουμε τον Επιβλέπων Καθηγητή κ. Ανανία Τομπουλίδη, ο οποίος με την εμπειρία και τις γνώσεις του σε θέματα Θερμοδυναμικής και Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής μας καθοδήγησε αρμονικά στη σωστή κατεύθυνση σαν Επιστήμονας, αλλά και σαν Δάσκαλος. Επίσης, θα θέλαμε να κάνουμε μια ιδιαίτερη μνεία στον κ. Γιώργο Γιαννακόπουλο, υποψήφιο Διδάκτορα του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, καθώς ήταν δίπλα μας με ιδιαίτερο ζήλο, θυσιάζοντας συχνά πολύτιμο χρόνο από το δικό του επιστημονικό έργο, αγκαλιάζοντας αυτό το εγχείρημα σαν δικό του. Πολύτιμη ήταν και η γενικότερη βοήθεια του υποψηφίου Διδάκτορα του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών κ. Κυριάκου Βαφειάδη, ειδικά στα πρώτα μας βήματα στο Ansys και στο CFD.

Επιπλέον, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε όλους τους φίλους μας, καθώς η βοήθεια που μας προσέφεραν δεν μπορεί να αποτυπωθεί σε λέξεις ή φράσεις, στους οποίους δεν υπάρχει λόγος να αναφερθούμε προσωπικά, διότι ξέρουν από μόνοι τους ποιοι είναι. Και φυσικά ένα μεγάλο ευχαριστώ στις οικογένειες μας. Τέλος, το να ξεχάσουμε να ευχαριστήσουμε τον Ivan, θα ήταν μεγάλη αδικία...

*Μπαμπίλας Νικόλαος
Τσαπραλής Απόστολος*

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	10
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	11
1.1 ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ	11
1.1.1 Κατηγοριοποίηση Στερεής Βιομάζας	11
1.1.2 Κατηγοριοποίηση των πηγών βιομάζας	13
1.2 ΕΦΟΔΙΑΣΜΟΣ ΣΤΕΡΕΩΝ ΒΙΟΚΑΥΣΙΜΩΝ.....	17
1.3 ΒΙΟΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΕΜΠΟΡΙΟ.....	18
1.4 ΚΑΥΣΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΜΕ ΑΝΘΡΑΚΑ: ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΑ ΘΕΜΑΤΑ	24
1.4.1 Προετοιμασία καυσίμου και Εκτέλεση	24
1.4.2 Παραγωγή ρύπων	25
1.4.3 Μέγεθος και σχήμα σωματιδίων	27
1.4.4 Περιεχόμενο σε υγρασία και πτητικά	28
1.4.5 Πειράματα καύσης σωματιδίων.....	29
1.4.6 Μετατροπή άνθρακα και Εναπόθεση τέφρας.....	34
1.4.7 Αξιοποίηση ιπτάμενης τέφρας	34
1.5 ΕΜΠΕΙΡΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΑΠΟ ΚΑΥΣΗ ΑΝΘΡΑΚΑ ΜΕ ΣΤΕΡΕΑ ΑΝΑΚΤΟΥΜΕΝΑ ΚΑΥΣΙΜΑ (SRF).....	35
1.6 ΚΑΥΣΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΣΕ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΚΛΙΝΗ ΓΙΑ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟ ΚΑΙ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ	36
1.6.1 Διάβρωση/ Εναπόθεση και συσσώρευση Τέφρας.....	37
2. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΚΑΙ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ.....	38
2.1 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ NAVIER - STOKES	38
2.2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΥΡΒΗΣ.....	40
2.2.1 Γενική εικόνα.....	40
2.2.2 Εξισώσεις μεταφοράς για το μοντέλο Realizable $k-\epsilon$	41
2.2.3 Μοντελοποίηση του τυρβώδους ιξώδους	42
2.3 ΕΞΙΣΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	43
2.4 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ	45
2.4.1 Μοντέλο P_1	45
2.5 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ ΧΗΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	47
2.5.1 Ογκομετρικές Αντιδράσεις	48
2.5.1.1 Εξισώσεις Μεταφοράς για τα στοιχεία	48
2.5.1.1.1 Διάχυση μάζας σε τυρβώδη ροή	48
2.5.1.1.2 Επίδραση της μεταφοράς στοιχείων στην εξίσωση της ενέργειας.....	49
2.5.1.1.3 Διάχυση στις εισόδους	49
2.5.1.2 Γενικευμένη χημική αντίδραση με πεπερασμένη ταχύτητα για το μοντέλο αντίδρασης (The Generalized Finite-Rate Formulation for Reaction Modeling)	49
2.5.1.2.1 Το μοντέλο "Laminar Finite-Rate".....	49
2.5.1.2.2 Μοντέλο διάχυσης δινών (Eddy-Dissipation Model).....	52
2.5.1.2.3 Μοντέλο Eddy-Dissipation για προσομοίωση μεγάλων δινών (LES)	53
2.5.2 Αντιδράσεις στην επιφάνεια των σωματιδίων	53
2.5.2.1 Γενική περιγραφή	53
2.5.2.2 Μοντέλο αντιδρώντων σωματιδίων σε πολλαπλές αντιδράσεις επιφάνειας	54
2.5.2.3 Προέκταση της στοιχειομετρίας για αντιδρώντα με πολλαπλή αέρια φάση	56
2.5.2.4 Αντιδράσεις στερεού με στερεό	57
2.5.2.5 Αντιδράσεις διάσπασης στερεού	57
2.5.2.6 Αντιδράσεις εναπόθεσης στερεού	57
2.6 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ	57
2.6.1 Δύναμη Ισορροπίας σωματιδίου	57
2.7 ΤΥΡΒΩΔΗΣ ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΤΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ	58
2.7.1 Στοχαστική Παρακολούθηση	58

2.7.2	Μοντέλο Διακριτής Τυχαίας Διαδρομής-Discrete Random Walk Model.....	59
2.8	ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΤΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ ΚΙΝΗΣΗΣ ΤΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ.....	60
2.9	ΨΕΚΑΣΜΟΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ.....	61
2.10	ΣΥΝΔΕΣΗ ΔΙΑΚΡΙΤΟΥΣ ΚΑΙ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΦΑΣΗΣ.....	62
3.	ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	63
3.1	ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ.....	63
3.1.1	Επανασχεδιασμός με αλλαγή της γεωμετρίας στην έξοδο των καυσαερίων.....	69
3.2	ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ.....	71
3.3	ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ.....	77
3.3.1	Ιδιότητες καυσίμου.....	78
3.3.2	Υπολογισμός στοιχειομετρικά απαιτούμενου ξηρού αέρα.....	79
3.3.3	Οριακές συνθήκες καυσίμου.....	80
3.3.4	Οριακές συνθήκες αέρα.....	81
3.4	ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΓΙΑ ΕΠΙΛΥΣΗ ΣΤΟ SETUP ΤΟΥ FLUENT.....	82
4.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	83
4.1	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΡΟΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΤΟΥ ΑΕΡΑ ΚΑΥΣΗΣ.....	84
4.1.1	Αποτελέσματα για θερμοκρασία αέρα στους 300K.....	84
4.1.2	Αποτελέσματα για προθερμασμένο αέρα στους 500K.....	97
4.1.3	Σύγκριση αποτελεσμάτων για μη προθερμασμένο και προθερμασμένο αέρα.....	109
4.2	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΚΑΥΣΙΜΟΥ.....	113
4.2.1	Παρακολούθηση Σωματιδίων (Particle Tracking).....	113
4.2.2	Σύγκριση αποτελεσμάτων για θερμοκρασία εισαγωγής καυσίμου στους 400K και 300K.....	118
4.3	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΕΡΙΣΣΕΙΑΣ ΑΕΡΑ.....	122
4.3.1	Αποτελέσματα για στοιχειομετρική καύση.....	122
4.3.2	Σύγκριση αποτελεσμάτων για στοιχειο-μετρική καύση και καύση με περίσσεια αέρα.....	135
5.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	141
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	142

Περιεχόμενα Εικόνων

ΕΙΚΟΝΑ 1.1: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΩΝ ΞΥΛΙΝΩΝ PELLETS ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ [8]	12
ΕΙΚΟΝΑ 1.2: ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΔΑΣΟΚΟΜΙΑΣ, ΦΥΤΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΑΛΛΩΝ ΠΑΡΘΕΝΩΝ ΞΥΛΩΝ [1]	14
ΕΙΚΟΝΑ 1.3: ΥΠΟΠΡΟΪΟΝΤΑ ΚΑΙ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΑΠΟ ΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΞΥΛΟΥ [1]	15
ΕΙΚΟΝΑ 1.4: ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΒΟΤΑΝΩΔΟΥΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΑΠΟ ΓΕΩΡΓΙΑ ΚΑΙ ΚΗΠΟΥΡΙΚΗ [1]	15
ΕΙΚΟΝΑ 1.5: ΥΠΟΠΡΟΪΟΝΤΑ ΚΑΙ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΑΠΟ ΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ [1]	16
ΕΙΚΟΝΑ 1.6: ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΑΠΟ ΦΡΟΥΤΑ [1]	16
ΕΙΚΟΝΑ 1.7: ΥΠΟΠΡΟΪΟΝΤΑ ΚΑΙ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΑΠΟ ΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΦΡΟΥΤΩΝ [1]	16
ΕΙΚΟΝΑ 1.8: ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΑΝΤΗΣΕΩΝ ΤΟΥ ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟΥ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΟΥΣ ΔΑΣΜΟΥΣ ΕΙΣΑΓΩΓΩΝ/ΕΞΑΓΩΓΩΝ [12]	18
ΕΙΚΟΝΑ 1.9: ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΑΝΤΗΣΕΩΝ ΤΟΥ ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟΥ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑΣ [12]	19
ΕΙΚΟΝΑ 1.10: ΠΑΓΚΟΣΜΙΟ ΕΜΠΟΡΙΟ ΣΤΕΡΕΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΣΕ ΚΤΟΝΝΕΣ [13]	20
ΕΙΚΟΝΑ 1.11: ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΕΜΠΟΡΙΟΥ ΓΙΑ ΚΑΥΣΙΜΟ ΞΥΛΟ ΣΤΗΝ ΕΥΡΩΠΗ ΤΟ 2010 [14]	20
ΕΙΚΟΝΑ 1.12: ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΕΜΠΟΡΙΟΥ ΓΙΑ WOOD CHIP ΤΟ 2010 [15]	21
ΕΙΚΟΝΑ 1.13: ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΕΜΠΟΡΙΟΥ ΓΙΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ ΞΥΛΟΥ ΣΤΗΝ ΕΥΡΩΠΗ ΤΟ 2010 [14]	21
ΕΙΚΟΝΑ 1.14: ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΕΜΠΟΡΙΟΥ ΓΙΑ WOOD PELLETS ΣΤΗΝ ΕΥΡΩΠΗ ΤΟ 2010 [14]	22
ΕΙΚΟΝΑ 1.15: ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΠΑΓΚΟΣΜΙΟΥ ΕΜΠΟΡΙΟΥ WOOD PELLETS ΤΟ 2010 [14]	22
ΕΙΚΟΝΑ 1.16: ΕΜΠΟΡΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ WOOD PELLETS ΣΤΗΝ ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΈΝΩΣΗ (ΜΤΟΝΝΕΣ) [16, 17]	23
ΕΙΚΟΝΑ 1.17: ΚΑΝΑΔΙΚΟ ΕΜΠΟΡΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ WOOD PELLETS (ΚΤΟΝΝΕΣ) [16, 17]	23
ΕΙΚΟΝΑ 1.18: ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΝΟ _x ΒΟΤΑΝΩΔΟΥΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟ Ο ₂ ΠΟΥ ΠΕΡΙΕΧΕΙ ΚΑΙ ΤΙΣ ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΝΟ _x ΑΠΟ ΞΥΛΟ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΑΖΩΤΟ ΠΟΥ ΠΕΡΙΕΧΕΙ [19]	25
ΕΙΚΟΝΑ 1.19: ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΝΟ _x ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΜΙΞΕΙΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΜΕ ΑΝΘΡΑΚΑ [19]	26
ΕΙΚΟΝΑ 1.20: ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ ΝΟ ΚΑΙ ΝΗ ₃ ΓΙΑ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΡΟΗ [20]	26
ΕΙΚΟΝΑ 1.21: ΑΠΩΛΕΙΑ ΜΑΖΑΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΑ ΣΧΗΜΑΤΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΚΑΥΣΗ	27
ΕΙΚΟΝΑ 1.22: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΠΩΛΕΙΑ ΜΑΖΑΣ ΣΕ ΣΩΜΑΤΙΔΙΟ ΞΥΛΟΥ ΜΕ ΜΕΓΕΘΟΣ 9,5 ΜΜ ΜΕ ΑΡΧΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ 6%, ΣΕ ΕΝΑ ΚΛΙΒΑΝΟ ΜΕ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ 1273Κ.	28
ΕΙΚΟΝΑ 1.23: ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΜΕ ΑΝΑΛΟΓΙΑ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ 1 ΚΑΙ ΥΓΡΑΣΙΑ 1%	29
ΕΙΚΟΝΑ 1.24: ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΜΑΖΑΣ ΜΕ ΑΝΑΛΟΓΙΑ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ 1 ΚΑΙ ΥΓΡΑΣΙΑ 1%	30
ΕΙΚΟΝΑ 1.25: ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΟΥ ΜΕ ΑΝΑΛΟΓΙΑ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ 4, ΧΩΡΙΣ ΥΓΡΑΣΙΑ	31
ΕΙΚΟΝΑ 1.26: ΑΠΩΛΕΙΑ ΜΑΖΑΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΟΥ ΜΕ ΑΝΑΛΟΓΙΑ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ 4, ΧΩΡΙΣ ΥΓΡΑΣΙΑ	32
ΕΙΚΟΝΑ 1.27: ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΟΥ ΜΕ ΑΝΑΛΟΓΙΑ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ 1, ΜΕ ΥΓΡΑΣΙΑ 40%	32
ΕΙΚΟΝΑ 1.28: ΑΠΩΛΕΙΑ ΜΑΖΑΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΟΥ ΜΕ ΑΝΑΛΟΓΙΑ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ 1, ΜΕ ΥΓΡΑΣΙΑ 40%	33
ΕΙΚΟΝΑ 1.29: ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΟ ΠΡΟΦΙΛ ΑΠΟ ΥΓΡΟ ΜΗ ΣΦΑΙΡΙΚΟ ΣΩΜΑΤΙΔΙΟ	33
ΕΙΚΟΝΑ 1.30: ΑΠΩΛΕΙΑ ΜΑΖΑΣ ΣΕ ΥΓΡΟ ΜΗ ΣΦΑΙΡΙΚΟ ΣΩΜΑΤΙΔΙΟ	34
ΕΙΚΟΝΑ 3.1: ΙΣΟΜΕΤΡΙΚΗ ΟΨΗ ΤΟΥ ΛΕΒΗΤΑ	64
ΕΙΚΟΝΑ 3.2: ΙΣΟΜΕΤΡΙΚΗ ΟΨΗ ΤΟΥ ΛΕΒΗΤΑ (2)	65
ΕΙΚΟΝΑ 3.3: ΙΣΟΜΕΤΡΙΚΗ ΟΨΗ ΤΟΥ ΛΕΒΗΤΑ ΜΕ ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΕΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ	65
ΕΙΚΟΝΑ 3.4: ΙΣΟΜΕΤΡΙΚΗ ΟΨΗ ΤΟΥ ΛΕΒΗΤΑ ΜΕ ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΕΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ (2)	66
ΕΙΚΟΝΑ 3.5: ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ ΛΕΒΗΤΑ ΜΕ ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΕΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ	67
ΕΙΚΟΝΑ 3.6: ΣΩΛΗΝΩΣΕΙΣ	67
ΕΙΚΟΝΑ 3.7: ΙΣΟΜΕΤΡΙΚΗ ΟΨΗ ΤΟΥ ΘΑΛΑΜΟΥ ΚΑΥΣΗΣ, ΧΩΡΙΣ ΣΩΛΗΝΩΣΕΙΣ	68
ΕΙΚΟΝΑ 3.8: ΙΣΟΜΕΤΡΙΚΗ ΟΨΗ ΤΟΥ ΘΑΛΑΜΟΥ ΚΑΥΣΗΣ, ΧΩΡΙΣ ΣΩΛΗΝΩΣΕΙΣ ΜΕ ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΕΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ	68
ΕΙΚΟΝΑ 3.9: ΙΣΟΜΕΤΡΙΚΗ ΟΨΗ ΤΟΥ ΘΑΛΑΜΟΥ ΚΑΥΣΗΣ ΜΕ ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΣΤΗΝ ΕΞΟΔΟ	69
ΕΙΚΟΝΑ 3.10: ΙΣΟΜΕΤΡΙΚΗ ΟΨΗ ΤΟΥ ΘΑΛΑΜΟΥ ΚΑΥΣΗΣ ΜΕ ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΣΤΗΝ ΕΞΟΔΟ (2)	70
ΕΙΚΟΝΑ 3.11: ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ ΘΑΛΑΜΟΥ ΚΑΥΣΗΣ ΜΕ ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΣΤΗΝ ΕΞΟΔΟ ΜΕ ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΕΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ	70
ΕΙΚΟΝΑ 3.12: ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΠΛΕΓΜΑ ΜΕ 800.000 ΣΤΟΙΧΕΙΑ	71
ΕΙΚΟΝΑ 3.13: ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΠΛΕΓΜΑ ΜΕ 1.000.000 ΣΤΟΙΧΕΙΑ	72
ΕΙΚΟΝΑ 3.14: ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΠΛΕΓΜΑ ΜΕ 1.500.000 ΣΤΟΙΧΕΙΑ	72

ΕΙΚΟΝΑ 3.15: ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΠΛΕΓΜΑ ΜΕ 2.000.000 ΣΤΟΙΧΕΙΑ	73
ΕΙΚΟΝΑ 3.16: ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΠΛΕΓΜΑ ΜΕ 2.500.000 ΣΤΟΙΧΕΙΑ	73
ΕΙΚΟΝΑ 3.17: ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΠΛΕΓΜΑ ΜΕ 3.000.000 ΣΤΟΙΧΕΙΑ	74
ΕΙΚΟΝΑ 3.18: ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΠΛΕΓΜΑ ΜΕ 4.000.000 ΣΤΟΙΧΕΙΑ	74
ΕΙΚΟΝΑ 3.19: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΜΕ 3.000.000 ΣΤΟΙΧΕΙΑ (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) ΚΑΙ 4.000.000 ΣΤΟΙΧΕΙΑ (ΔΕΞΙΑ)	75
ΕΙΚΟΝΑ 3.20: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΕΛΙΚΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ (1)	76
ΕΙΚΟΝΑ 3.21: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΕΛΙΚΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ (2)	76
ΕΙΚΟΝΑ 3.22: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΕΛΙΚΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ (3)	77
ΕΙΚΟΝΑ 3.23: ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΟΡΙΑΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ	78
ΕΙΚΟΝΑ 4.1: ΤΟΜΗ ΛΕΒΗΤΑ ΓΙΑ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	83
ΕΙΚΟΝΑ 4.2: ΚΛΑΣΜΑ ΜΑΖΑΣ ΠΤΗΤΙΚΩΝ ΓΙΑ $T_{AIR}=300K$, $T_{FUEL}=400K$, ΚΑΙ $\Lambda=1.26$	85
ΕΙΚΟΝΑ 4.3: ΚΛΑΣΜΑ ΜΑΖΑΣ CO_2 ΓΙΑ $T_{AIR}=300K$, $T_{FUEL}=400K$, ΚΑΙ $\Lambda=1.26$	85
ΕΙΚΟΝΑ 4.4: ΚΛΑΣΜΑ ΜΑΖΑΣ H_2O ΓΙΑ $T_{AIR}=300K$, $T_{FUEL}=400K$ ΚΑΙ $\Lambda=1.26$	86
ΕΙΚΟΝΑ 4.5: ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΓΙΑ $T_{AIR}=300K$, $T_{FUEL}=400K$ ΚΑΙ $\Lambda=1.26$	86
ΕΙΚΟΝΑ 4.6: ΚΛΑΣΜΑ ΜΑΖΑΣ CO ΓΙΑ $T_{AIR}=300K$, $T_{FUEL}=400K$ ΚΑΙ $\Lambda=1.26$	87
ΕΙΚΟΝΑ 4.7: ΚΛΑΣΜΑ ΜΑΖΑΣ H_2 ΓΙΑ $T_{AIR}=300K$, $T_{FUEL}=400K$ ΚΑΙ $\Lambda=1.26$	88
ΕΙΚΟΝΑ 4.8: ΚΛΑΣΜΑ ΜΑΖΑΣ O_2 ΓΙΑ $T_{FUEL}=400K$, $T_{AIR}=300K$ ΚΑΙ $\Lambda=1.26$	88
ΕΙΚΟΝΑ 4.9: ΚΛΑΣΜΑ ΜΑΖΑΣ N_2 ΓΙΑ $T_{FUEL}=400K$, $T_{AIR}=300K$ ΚΑΙ $\Lambda=1.26$	89
ΕΙΚΟΝΑ 4.10: ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΓΙΑ $T=1100K$ ΓΙΑ $T_{FUEL}=400K$, $T_{AIR}=300K$ ΚΑΙ $\Lambda=1.26$	90
ΕΙΚΟΝΑ 4.11: ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΓΙΑ $T=1300K$ ΓΙΑ $T_{FUEL}=400K$, $T_{AIR}=300K$ ΚΑΙ $\Lambda=1.26$	90
ΕΙΚΟΝΑ 4.12: ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΓΙΑ $T=1800K$ ΓΙΑ $T_{FUEL}=400K$, $T_{AIR}=300K$ ΚΑΙ $\Lambda=1.26$	91
ΕΙΚΟΝΑ 4.13: ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΓΙΑ $T=2200K$ ΓΙΑ $T_{FUEL}=400K$, $T_{AIR}=300K$ ΚΑΙ $\Lambda=1.26$	91
ΕΙΚΟΝΑ 4.14: ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΓΙΑ ΚΛΑΣΜΑ ΜΑΖΑΣ O_2 0.23 ΓΙΑ $T_{FUEL}=400K$, $T_{AIR}=300K$ ΚΑΙ $\Lambda=1.26$	92
ΕΙΚΟΝΑ 4.15: ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΓΙΑ ΚΛΑΣΜΑ ΜΑΖΑΣ O_2 0.16 ΓΙΑ $T_{FUEL}=400K$, $T_{AIR}=300K$ ΚΑΙ $\Lambda=1.26$	92
ΕΙΚΟΝΑ 4.16: ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΓΙΑ ΚΛΑΣΜΑ ΜΑΖΑΣ O_2 0.1 ΓΙΑ $T_{FUEL}=400K$, $T_{AIR}=300K$ ΚΑΙ $\Lambda=1.26$	93
ΕΙΚΟΝΑ 4.17: ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΓΙΑ ΚΛΑΣΜΑ ΜΑΖΑΣ O_2 0.04 ΓΙΑ $T_{FUEL}=400K$, $T_{AIR}=300K$ ΚΑΙ $\Lambda=1.26$	93
ΕΙΚΟΝΑ 4.18: ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΓΙΑ ΚΛΑΣΜΑ ΜΑΖΑΣ CO_2 0.15 ΓΙΑ $T_{FUEL}=400K$, $T_{AIR}=300K$ ΚΑΙ $\Lambda=1.26$	94
ΕΙΚΟΝΑ 4.19: ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΓΙΑ ΚΛΑΣΜΑ ΜΑΖΑΣ CO_2 0.1 ΓΙΑ $T_{FUEL}=400K$, $T_{AIR}=300K$ ΚΑΙ $\Lambda=1.26$	94
ΕΙΚΟΝΑ 4.20: ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΓΙΑ ΚΛΑΣΜΑ ΜΑΖΑΣ CO_2 0.05 ΓΙΑ $T_{FUEL}=400K$, $T_{AIR}=300K$ ΚΑΙ $\Lambda=1.26$	95
ΕΙΚΟΝΑ 4.21: ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΓΙΑ ΚΛΑΣΜΑ ΜΑΖΑΣ ΠΤΗΤΙΚΩΝ 0.2 ΓΙΑ $T_{FUEL}=400K$, $T_{AIR}=300K$ ΚΑΙ $\Lambda=1.26$	95
ΕΙΚΟΝΑ 4.22: ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΓΙΑ ΚΛΑΣΜΑ ΜΑΖΑΣ ΠΤΗΤΙΚΩΝ 0.02 ΓΙΑ $T_{FUEL}=400K$, $T_{AIR}=300K$ ΚΑΙ $\Lambda=1.26$	96
ΕΙΚΟΝΑ 4.23: ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΓΙΑ ΚΛΑΣΜΑ ΜΑΖΑΣ ΠΤΗΤΙΚΩΝ 0.002 ΓΙΑ $T_{FUEL}=400K$, $T_{AIR}=300K$ ΚΑΙ $\Lambda=1.26$	96
ΕΙΚΟΝΑ 4.24: ΚΛΑΣΜΑ ΜΑΖΑΣ ΠΤΗΤΙΚΩΝ ΓΙΑ $T_{FUEL}=400K$, $T_{AIR}=500K$ ΚΑΙ $\Lambda=1.26$	97
ΕΙΚΟΝΑ 4.25: ΚΛΑΣΜΑ ΜΑΖΑΣ CO_2 ΓΙΑ $T_{FUEL}=400K$, $T_{AIR}=500K$ ΚΑΙ $\Lambda=1.26$	98
ΕΙΚΟΝΑ 4.26: ΚΛΑΣΜΑ ΜΑΖΑΣ H_2O ΓΙΑ $T_{FUEL}=400K$, $T_{AIR}=500K$ ΚΑΙ $\Lambda=1.26$	98
ΕΙΚΟΝΑ 4.27: ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΓΙΑ $T_{FUEL}=400K$, $T_{AIR}=500K$ ΚΑΙ $\Lambda=1.26$	99
ΕΙΚΟΝΑ 4.28: ΚΛΑΣΜΑ ΜΑΖΑΣ CO ΓΙΑ $T_{FUEL}=400K$, $T_{AIR}=500K$ ΚΑΙ $\Lambda=1.26$	100
ΕΙΚΟΝΑ 4.29: ΚΛΑΣΜΑ ΜΑΖΑΣ H_2 ΓΙΑ $T_{FUEL}=400K$, $T_{AIR}=500K$ ΚΑΙ $\Lambda=1.26$	100
ΕΙΚΟΝΑ 4.30: ΚΛΑΣΜΑ ΜΑΖΑΣ O_2 ΓΙΑ $T_{FUEL}=400K$, $T_{AIR}=500K$ ΚΑΙ $\Lambda=1.26$	101
ΕΙΚΟΝΑ 4.31: ΚΛΑΣΜΑ ΜΑΖΑΣ N_2 ΓΙΑ $T_{FUEL}=400K$, $T_{AIR}=500K$ ΚΑΙ $\Lambda=1.26$	101
ΕΙΚΟΝΑ 4.32: ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΓΙΑ $T=1100K$ ΓΙΑ $T_{FUEL}=400K$, $T_{AIR}=500K$ ΚΑΙ $\Lambda=1.26$	102
ΕΙΚΟΝΑ 4.33: ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΓΙΑ $T=1300K$ ΓΙΑ $T_{FUEL}=400K$, $T_{AIR}=500K$ ΚΑΙ $\Lambda=1.26$	103
ΕΙΚΟΝΑ 4.34: ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΓΙΑ $T=1800K$ ΓΙΑ $T_{FUEL}=400K$, $T_{AIR}=500K$ ΚΑΙ $\Lambda=1.26$	103
ΕΙΚΟΝΑ 4.35: ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΓΙΑ $T=1800K$ ΓΙΑ $T_{FUEL}=400K$, $T_{AIR}=500K$ ΚΑΙ $\Lambda=1.26$	104
ΕΙΚΟΝΑ 4.36: ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΓΙΑ ΚΛΑΣΜΑ ΜΑΖΑΣ O_2 0.23 ΓΙΑ $T_{FUEL}=400K$, $T_{AIR}=500K$ ΚΑΙ $\Lambda=1.26$	104
ΕΙΚΟΝΑ 4.37: ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΓΙΑ ΚΛΑΣΜΑ ΜΑΖΑΣ O_2 0.16 ΓΙΑ $T_{FUEL}=400K$, $T_{AIR}=500K$ ΚΑΙ $\Lambda=1.26$	105
ΕΙΚΟΝΑ 4.38: ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΓΙΑ ΚΛΑΣΜΑ ΜΑΖΑΣ O_2 0.1 ΓΙΑ $T_{FUEL}=400K$, $T_{AIR}=500K$ ΚΑΙ $\Lambda=1.26$	105
ΕΙΚΟΝΑ 4.39: ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΓΙΑ ΚΛΑΣΜΑ ΜΑΖΑΣ O_2 0.04 ΓΙΑ $T_{FUEL}=400K$, $T_{AIR}=500K$ ΚΑΙ $\Lambda=1.26$	106
ΕΙΚΟΝΑ 4.40: ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΓΙΑ ΚΛΑΣΜΑ ΜΑΖΑΣ CO_2 0.15 ΓΙΑ $T_{FUEL}=400K$, $T_{AIR}=500K$ ΚΑΙ $\Lambda=1.26$	106
ΕΙΚΟΝΑ 4.41: ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΓΙΑ ΚΛΑΣΜΑ ΜΑΖΑΣ CO_2 0.1 ΓΙΑ $T_{FUEL}=400K$, $T_{AIR}=500K$ ΚΑΙ $\Lambda=1.26$	107
ΕΙΚΟΝΑ 4.42: ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΓΙΑ ΚΛΑΣΜΑ ΜΑΖΑΣ CO_2 0.05 ΓΙΑ $T_{FUEL}=400K$, $T_{AIR}=500K$ ΚΑΙ $\Lambda=1.26$	107
ΕΙΚΟΝΑ 4.43: ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΓΙΑ ΚΛΑΣΜΑ ΜΑΖΑΣ ΠΤΗΤΙΚΩΝ 0.2 ΓΙΑ $T_{FUEL}=400K$, $T_{AIR}=500K$ ΚΑΙ $\Lambda=1.26$	108

ΕΙΚΟΝΑ 4.44: ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΓΙΑ ΚΛΑΣΜΑ ΜΑΖΑΣ ΠΗΤΗΤΙΚΩΝ 0.02 ΓΙΑ $T_{\text{FUEL}}=400\text{K}$, $T_{\text{AIR}}=500\text{K}$ ΚΑΙ $\Lambda=1.26$	108
ΕΙΚΟΝΑ 4.45: ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΓΙΑ ΚΛΑΣΜΑ ΜΑΖΑΣ ΠΗΤΗΤΙΚΩΝ 0.002 ΓΙΑ $T_{\text{FUEL}}=400\text{K}$, $T_{\text{AIR}}=500\text{K}$ ΚΑΙ $\Lambda=1.26$...	109
ΕΙΚΟΝΑ 4.46: ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΓΙΑ $T_{\text{AIR}}=300\text{K}$ (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) ΚΑΙ $T_{\text{AIR}}=500\text{K}$ (ΔΕΞΙΑ).....	110
ΕΙΚΟΝΑ 4.47: ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΠΗΤΗΤΙΚΩΝ ΓΙΑ $T_{\text{AIR}}=300\text{K}$ (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) ΚΑΙ $T_{\text{AIR}}=500\text{K}$ (ΔΕΞΙΑ)	111
ΕΙΚΟΝΑ 4.48: ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ CO ΓΙΑ $T_{\text{AIR}}=300\text{K}$ (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) ΚΑΙ $T_{\text{AIR}}=500\text{K}$ (ΔΕΞΙΑ).....	111
ΕΙΚΟΝΑ 4.49: ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ H ₂ ΓΙΑ $T_{\text{AIR}}=300\text{K}$ (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) ΚΑΙ $T_{\text{AIR}}=500\text{K}$ (ΔΕΞΙΑ).....	112
ΕΙΚΟΝΑ 4.50: ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ CO ₂ ΓΙΑ $T_{\text{AIR}}=300\text{K}$ (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) ΚΑΙ $T_{\text{AIR}}=500\text{K}$ (ΔΕΞΙΑ).....	112
ΕΙΚΟΝΑ 4.51: ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ H ₂ O ΓΙΑ $T_{\text{AIR}}=300\text{K}$ (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) ΚΑΙ $T_{\text{AIR}}=500\text{K}$ (ΔΕΞΙΑ).....	113
ΕΙΚΟΝΑ 4.52: ΚΛΑΣΜΑ ΜΑΖΑΣ ΠΗΤΗΤΙΚΩΝ ΤΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ	114
ΕΙΚΟΝΑ 4.53: ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ	115
ΕΙΚΟΝΑ 4.54: ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ.....	116
ΕΙΚΟΝΑ 4.55: ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ.....	116
ΕΙΚΟΝΑ 4.56: ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗ ΝΟΜΩΝ ΓΙΑ ΤΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ.....	117
ΕΙΚΟΝΑ 4.57: ΜΕΓΕΘΥΝΣΗ ΓΙΑ ΤΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ LAW 4.....	117
ΕΙΚΟΝΑ 4.58: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΓΙΑ $T_{\text{FUEL}}=400\text{K}$ (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) ΚΑΙ $T_{\text{FUEL}}=300$ (ΔΕΞΙΑ) ΓΙΑ ΚΛΑΣΜΑ ΜΑΖΑΣ ΠΗΤΗΤΙΚΩΝ ΙΣΟ ΜΕ 1	118
ΕΙΚΟΝΑ 4.59: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΓΙΑ $T_{\text{FUEL}}=400\text{K}$ (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) ΚΑΙ $T_{\text{FUEL}}=300$ (ΔΕΞΙΑ) ΓΙΑ ΚΛΑΣΜΑ ΜΑΖΑΣ ΠΗΤΗΤΙΚΩΝ ΙΣΟ ΜΕ 0.22	119
ΕΙΚΟΝΑ 4.60: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΓΙΑ $T_{\text{FUEL}}=400\text{K}$ (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) ΚΑΙ $T_{\text{FUEL}}=300$ (ΔΕΞΙΑ) ΓΙΑ ΚΛΑΣΜΑ ΜΑΖΑΣ ΠΗΤΗΤΙΚΩΝ ΣΧΕΔΟΝ ΙΣΟ ΜΕ 0	119
ΕΙΚΟΝΑ 4.61: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΓΙΑ $T_{\text{FUEL}}=400\text{K}$ (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) ΚΑΙ $T_{\text{FUEL}}=300$ (ΔΕΞΙΑ) ΓΙΑ ΚΛΑΣΜΑ ΜΑΖΑΣ CO ₂ ΙΣΟ ΜΕ 0.15.....	120
ΕΙΚΟΝΑ 4.62: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΓΙΑ $T_{\text{FUEL}}=400\text{K}$ (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) ΚΑΙ $T_{\text{FUEL}}=300$ (ΔΕΞΙΑ) ΓΙΑ ΚΛΑΣΜΑ ΜΑΖΑΣ H ₂ O ΙΣΟ ΜΕ 0.1.....	121
ΕΙΚΟΝΑ 4.63: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΓΙΑ $T_{\text{FUEL}}=400\text{K}$ (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) ΚΑΙ $T_{\text{FUEL}}=300$ (ΔΕΞΙΑ) ΓΙΑ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΙΣΗ ΜΕ 1800K	121
ΕΙΚΟΝΑ 4.64: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΓΙΑ $T_{\text{FUEL}}=400\text{K}$ (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) ΚΑΙ $T_{\text{FUEL}}=300$ (ΔΕΞΙΑ) ΓΙΑ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΙΣΗ ΜΕ 2200K	122
ΕΙΚΟΝΑ 4.65: ΚΛΑΣΜΑ ΜΑΖΑΣ ΠΗΤΗΤΙΚΩΝ ΓΙΑ $T_{\text{FUEL}}=400\text{K}$, $T_{\text{AIR}}=300\text{K}$ ΚΑΙ $\Lambda=1$	123
ΕΙΚΟΝΑ 4.66: ΚΛΑΣΜΑ ΜΑΖΑΣ CO ₂ ΓΙΑ $T_{\text{FUEL}}=400\text{K}$, $T_{\text{AIR}}=300\text{K}$ ΚΑΙ $\Lambda=1$	124
ΕΙΚΟΝΑ 4.67: ΚΛΑΣΜΑ ΜΑΖΑΣ H ₂ O ΓΙΑ $T_{\text{FUEL}}=400\text{K}$, $T_{\text{AIR}}=300\text{K}$ ΚΑΙ $\Lambda=1$	124
ΕΙΚΟΝΑ 4.68: ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΓΙΑ $T_{\text{FUEL}}=400\text{K}$, $T_{\text{AIR}}=300\text{K}$ ΚΑΙ $\Lambda=1$	125
ΕΙΚΟΝΑ 4.69: ΚΛΑΣΜΑ ΜΑΖΑΣ CO ΓΙΑ $T_{\text{FUEL}}=400\text{K}$, $T_{\text{AIR}}=300\text{K}$ ΚΑΙ $\Lambda=1$	126
ΕΙΚΟΝΑ 4.70: ΚΛΑΣΜΑ ΜΑΖΑΣ H ₂ ΓΙΑ $T_{\text{FUEL}}=400\text{K}$, $T_{\text{AIR}}=300\text{K}$ ΚΑΙ $\Lambda=1$	126
ΕΙΚΟΝΑ 4.71: ΚΛΑΣΜΑ ΜΑΖΑΣ O ₂ ΓΙΑ $T_{\text{FUEL}}=400\text{K}$, $T_{\text{AIR}}=300\text{K}$ ΚΑΙ $\Lambda=1$	127
ΕΙΚΟΝΑ 4.72: ΚΛΑΣΜΑ ΜΑΖΑΣ N ₂ ΓΙΑ $T_{\text{FUEL}}=400\text{K}$, $T_{\text{AIR}}=300\text{K}$ ΚΑΙ $\Lambda=1$	127
ΕΙΚΟΝΑ 4.73: ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΓΙΑ $T=1100\text{K}$ ΓΙΑ $T_{\text{FUEL}}=400\text{K}$, $T_{\text{AIR}}=300\text{K}$ ΚΑΙ $\Lambda=1$	128
ΕΙΚΟΝΑ 4.74: ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΓΙΑ $T=1300\text{K}$ ΓΙΑ $T_{\text{FUEL}}=400\text{K}$, $T_{\text{AIR}}=300\text{K}$ ΚΑΙ $\Lambda=1$	129
ΕΙΚΟΝΑ 4.75: ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΓΙΑ $T=1800\text{K}$ ΓΙΑ $T_{\text{FUEL}}=400\text{K}$, $T_{\text{AIR}}=300\text{K}$ ΚΑΙ $\Lambda=1$	129
ΕΙΚΟΝΑ 4.76: ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΓΙΑ $T=2200\text{K}$ ΓΙΑ $T_{\text{FUEL}}=400\text{K}$, $T_{\text{AIR}}=300\text{K}$ ΚΑΙ $\Lambda=1$	130
ΕΙΚΟΝΑ 4.77: ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΓΙΑ ΚΛΑΣΜΑ ΜΑΖΑΣ O ₂ 0.23 ΓΙΑ $T_{\text{FUEL}}=400\text{K}$, $T_{\text{AIR}}=300\text{K}$ ΚΑΙ $\Lambda=1$	130
ΕΙΚΟΝΑ 4.78: ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΓΙΑ ΚΛΑΣΜΑ ΜΑΖΑΣ O ₂ 0.16 ΓΙΑ $T_{\text{FUEL}}=400\text{K}$, $T_{\text{AIR}}=300\text{K}$ ΚΑΙ $\Lambda=1$	131
ΕΙΚΟΝΑ 4.79: ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΓΙΑ ΚΛΑΣΜΑ ΜΑΖΑΣ O ₂ 0.1 ΓΙΑ $T_{\text{FUEL}}=400\text{K}$, $T_{\text{AIR}}=300\text{K}$ ΚΑΙ $\Lambda=1$	131
ΕΙΚΟΝΑ 4.80: ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΓΙΑ ΚΛΑΣΜΑ ΜΑΖΑΣ O ₂ 0.04 ΓΙΑ $T_{\text{FUEL}}=400\text{K}$, $T_{\text{AIR}}=300\text{K}$ ΚΑΙ $\Lambda=1$	132
ΕΙΚΟΝΑ 4.81: ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΓΙΑ ΚΛΑΣΜΑ ΜΑΖΑΣ CO ₂ 0.15 ΓΙΑ $T_{\text{FUEL}}=400\text{K}$, $T_{\text{AIR}}=300\text{K}$ ΚΑΙ $\Lambda=1$	132
ΕΙΚΟΝΑ 4.82: ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΓΙΑ ΚΛΑΣΜΑ ΜΑΖΑΣ CO ₂ 0.1 ΓΙΑ $T_{\text{FUEL}}=400\text{K}$, $T_{\text{AIR}}=300\text{K}$ ΚΑΙ $\Lambda=1$	133
ΕΙΚΟΝΑ 4.83: ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΓΙΑ ΚΛΑΣΜΑ ΜΑΖΑΣ CO ₂ 0.05 ΓΙΑ $T_{\text{FUEL}}=400\text{K}$, $T_{\text{AIR}}=300\text{K}$ ΚΑΙ $\Lambda=1$	133

ΕΙΚΟΝΑ 4.84: ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΓΙΑ ΚΛΑΣΜΑ ΜΑΖΑΣ ΠΤΗΤΙΚΩΝ 0.2 ΓΙΑ $T_{\text{FUEL}}=400\text{K}$, $T_{\text{AIR}}=300\text{K}$ ΚΑΙ $\lambda=1$	134
ΕΙΚΟΝΑ 4.85: ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΓΙΑ ΚΛΑΣΜΑ ΜΑΖΑΣ ΠΤΗΤΙΚΩΝ 0.02 ΓΙΑ $T_{\text{FUEL}}=400\text{K}$, $T_{\text{AIR}}=300\text{K}$ ΚΑΙ $\lambda=1$	134
ΕΙΚΟΝΑ 4.86: ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΓΙΑ ΚΛΑΣΜΑ ΜΑΖΑΣ ΠΤΗΤΙΚΩΝ 0.002 ΓΙΑ $T_{\text{FUEL}}=400\text{K}$, $T_{\text{AIR}}=300\text{K}$ ΚΑΙ $\lambda=1$	135
ΕΙΚΟΝΑ 4.87: ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΔΙΑΒΑΤΙΚΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΚΑΥΣΗΣ (2390K) ΓΙΑ $\lambda=1$	136
ΕΙΚΟΝΑ 4.88: ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΔΙΑΒΑΤΙΚΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΚΑΥΣΗΣ (2370K) ΓΙΑ $\lambda=1.26$	136
ΕΙΚΟΝΑ 4.89: ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΔΙΑΒΑΤΙΚΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΚΑΥΣΗΣ (2250K) ΓΙΑ $\lambda=1.7$	137
ΕΙΚΟΝΑ 4.90: ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΓΙΑ $\lambda=1$ (ΑΡΙΣΤΕΡΑ), $\lambda=1.26$ (ΚΑΤΩ ΔΕΞΙΑ) ΚΑΙ $\lambda=1.7$ (ΠΑΝΩ ΔΕΞΙΑ)	138
ΕΙΚΟΝΑ 4.91: ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ O_2 ΓΙΑ $\lambda=1$ (ΑΡΙΣΤΕΡΑ), $\lambda=1.26$ (ΚΑΤΩ ΔΕΞΙΑ) ΚΑΙ $\lambda=1.7$ (ΠΑΝΩ ΔΕΞΙΑ)	138
ΕΙΚΟΝΑ 4.92: ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΤΗΤΙΚΩΝ ΓΙΑ $\lambda=1$ (ΑΡΙΣΤΕΡΑ), $\lambda=1.26$ (ΚΑΤΩ ΔΕΞΙΑ) ΚΑΙ $\lambda=1.7$ (ΠΑΝΩ ΔΕΞΙΑ)	139
ΕΙΚΟΝΑ 4.93: ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ CO_2 ΓΙΑ $\lambda=1$ (ΑΡΙΣΤΕΡΑ), $\lambda=1.26$ (ΚΑΤΩ ΔΕΞΙΑ) ΚΑΙ $\lambda=1.7$ (ΠΑΝΩ ΔΕΞΙΑ)	140
ΕΙΚΟΝΑ 4.94: ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ H_2O ΓΙΑ $\lambda=1$ (ΑΡΙΣΤΕΡΑ), $\lambda=1.26$ (ΚΑΤΩ ΔΕΞΙΑ) ΚΑΙ $\lambda=1.7$ (ΠΑΝΩ ΔΕΞΙΑ)	140

Περιεχόμενα Πινάκων

ΠΙΝΑΚΑΣ 1-1: ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΞΥΛΟΥ ΩΣ ΣΤΕΡΗ ΒΙΟΜΑΖΑ [8]	13
ΠΙΝΑΚΑΣ 3-1: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ	76
ΠΙΝΑΚΑΣ 3-2: ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ	78
ΠΙΝΑΚΑΣ 3-3: ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ	80
ΠΙΝΑΚΑΣ 3-4: ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΓΙΑ ΠΡΩΤΕΥΟΝ ΡΕΥΜΑ ΑΕΡΑ	81
ΠΙΝΑΚΑΣ 3-5: ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΓΙΑ ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΝ ΡΕΥΜΑ ΑΕΡΑ	81

Περίληψη

Στην παρούσα Διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε αριθμητική προσομοίωση λειτουργίας πρότυπου λέβητα βιομάζας, τριπλής διαδρομής. Ειδικότερα, πραγματοποιήθηκε μελέτη καύσης στερεών σωματιδίων άνθρακα, με σκοπό την παραγωγή ατμού. Η μοντελοποίηση της μεταφοράς σωματιδίων είναι ένα πολυφασικό μοντέλο, όπου τα σωματίδια παρακολουθούνται μέσα στη ροή με Lagrangian τρόπο, αντί να μοντελοποιούνται ως μια επιπλέον Eulerian φάση. Στα πλαίσια αυτής της εργασίας, αναπτύχθηκε ένα ολοκληρωμένο μοντέλο που επιλύει το τυρβώδες ροϊκό πεδίο λαμβάνοντας υπόψη τα φαινόμενα καύσης και ακτινοβολίας. Για την ανάπτυξη του μοντέλου χρησιμοποιήθηκε το εμπορικό πακέτο Ansys Fluent, ενώ για τη σχεδίαση χρησιμοποιήθηκε το εμπορικό πακέτο Solidworks. Απώτερος σκοπός της παρούσας Διπλωματικής εργασίας είναι η πραγματοποίηση παραμετρικής ανάλυσης, για την επίδραση διαφόρων παραμέτρων όπως είναι η θερμοκρασία εισόδου του καυσίμου, η θερμοκρασία εισόδου του αέρα, καθώς και η περίσσεια αέρα.

Η παρούσα διπλωματική εργασία χωρίζεται σε 5 κεφάλαια. Στο 1^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται ορισμένα στοιχεία για την εκμετάλλευση και τη τροφοδοσία της βιομάζας σαν καύσιμο, τον ρόλο της στην Ευρωπαϊκή οικονομία, καθώς και την κατηγοριοποίηση της. Τέλος, γίνεται μια γενική επισκόπηση της καύσης της βιομάζας με παρουσία άνθρακα και την επίδραση διαφόρων χαρακτηριστικών της βιομάζας.

Στο 2^ο κεφάλαιο γίνεται εκτενής αναφορά στις μαθηματικές σχέσεις οι οποίες διέπουν τη φυσική της ροής και της καύσης. Παρουσιάζονται και αναλύονται όλα τα μοντέλα και οι εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση της λειτουργίας του λέβητα. Πιο συγκεκριμένα αναλύονται τα μοντέλα τύρβης, καύσης, μεταφοράς ενέργειας, ακτινοβολίας και των αντιδράσεων.

Στο 3^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται ο αρχικός σχεδιασμός της γεωμετρίας, αναλύονται τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν και ο τελικός σχεδιασμός της γεωμετρίας. Επίσης, γίνεται αναφορά στη δημιουργία υπολογιστικού πλέγματος και στον τρόπο που επιλέχθηκε. Τέλος, παρουσιάζονται το καύσιμο και οι ιδιότητες του, καθώς και οι οριακές συνθήκες.

Στο 4^ο κεφάλαιο γίνεται παράθεση και ανάλυση των αποτελεσμάτων για κάθε περίπτωση. Επίσης, γίνεται σύγκριση διάφορων προσομοιώσεων, ώστε να αναλυθεί η επίδραση της περίσσειας αέρα, της προθέρμανσης του αέρα και της θερμοκρασίας του καυσίμου.

Στο 5^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα καθώς και οι προτάσεις για περαιτέρω μελέτη και έρευνα του συγκεκριμένου λέβητα.

1. Εισαγωγή

Αυτή τη στιγμή η βιομάζα για ενεργειακούς σκοπούς, συμβάλλει στη συνολική προμήθεια της παγκόσμιας ενέργειας. Σχεδόν τα δύο τρίτα της βιοενέργειας χρησιμοποιούνται για θερμικές εφαρμογές. Η αύξηση της χρήσης της μοντέρνας βιοενέργειας, είναι αναπόφευκτα συνυφασμένη με μία μεγάλη κλίμακα παγκόσμιου εμπορίου για προϊόντα βιοενέργειας. Οι παράγοντες που θα συμβάλλουν σε αυτή τη τάση είναι κυρίως λόγοι οικονομικοί, καθώς και η διαθεσιμότητα της βιομάζας.

1.1 Κατηγοριοποίηση Βιομάζας

1.1.1 Κατηγοριοποίηση Στερεής Βιομάζας

Καθώς υπάρχει ανάγκη πιστοποίησης, διαπίστευσης και τυποποίησης προϊόντων που σχεδιάζονται για να εκπληρώσουν συγκεκριμένες ανάγκες, ο **EN 14961** [1, 2], έχει δημιουργήσει τους αντίστοιχους πίνακες τυποποίησης για συγκεκριμένα στερεά βιοκαύσιμα. Όσον αφορά το ξύλο ως στερεό βιοκαύσιμο έχει τυποποιηθεί σε 6 βασικές κατηγορίες ανάλογα με τη μορφή του.

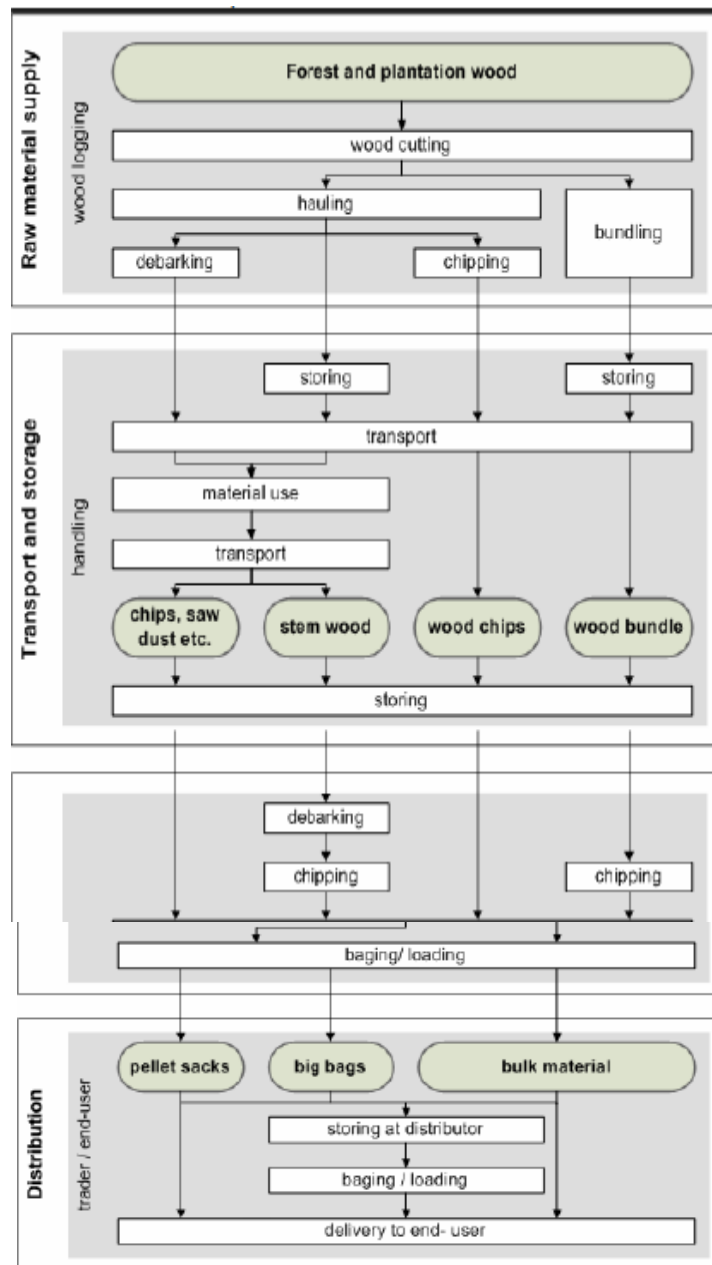
- Part 1: Γενικές απαιτήσεις [1]
- Part 2: Μη βιομηχανικά ξύλινα pellets [3]
- Part 3: Μη βιομηχανικές ξύλινες μπριγκέτες [4]
- Part 4: Μη βιομηχανικά ξύλινα chips [5]
- Part 5: Καυσόξυλα [6]
- Part 6: Μη ξύλινα Pellets [7]

Υπάρχουν διάφορες πηγές στερεών βιοκαυσίμων (προϊόντα από την αγροκτηνοτροφία και δασοκομία, λαχανικά απόβλητα, απόβλητα ξύλου μη αλογονούχα, απόβλητα φελλών, κλπ) για τη παραγωγή ενέργειας.

Το οργανόγραμμα της πιστοποίησης περιέχει την αρχική επιθεώρηση της παραγωγικής διαδικασίας και την αξιολόγηση των υπηρεσιών ελέγχου (factory production control FPC) της εκάστοτε εταιρίας από ένα ανεξάρτητο σώμα πιστοποίησης. Επίσης, περιέχει έλεγχο του προϊόντος και αξιολόγηση αποτελεσμάτων από ανεξάρτητο σώμα πιστοποίησης. Τέλος, αναφέρεται στη συνεχή αρχειοθέτηση και επιτήρηση των υπηρεσιών ελέγχου πάνω στις απαιτήσεις των συγκεκριμένων προϊόντων.

Οι ιδιότητες που πρέπει να οριστούν, δίνονται σε 14 πίνακες ανάλογα με τη μορφή που έχει το ξύλο ως στερεό βιοκαύσιμο.

Στη συνέχεια δίνεται σε μορφή διαγράμματος (**Εικόνα 1.1**) η μεθοδολογία κατεργασίας των ξύλινων pellets για διάφορες εφαρμογές. [8]



Εικόνα 1.1: μεθοδολογία κατεργασίας των ξύλινων pellets για διάφορες εφαρμογές [8]

Ακόμα, το ξύλο ως στερεή βιομάζα χωρίζεται σε δυο κατηγορίες. Στη κατηγορία Α ανήκουν τα βιοκαύσιμα που προορίζονται για σόμπες ή τζάκια και στη κατηγορία Β αυτά που προορίζονται για λέβητες. Οι ιδιότητες των 2 κατηγοριών φαίνονται στον Πίνακα 1.1

	Property class	A Stoves and fireplaces				B Boilers			
		I ^a		II		I		II	
Normative	Origin and source	1.1.3 Stemwood		1.1.3 Stemwood 1.1.4 Logging residues		1.1.3 Stemwood 1.1.4 Logging residues		1.1.3 Stemwood 1.1.4 Logging residues	
	Wood species ^b	to be stated				to be stated			
	Diameter, D ^c (cm)	D2 D05 D10 D15	D ≤ 2 D ≤ 5 5 < D ≤ 10 D15	D2 D05 D10 D15	D ≤ 2 D ≤ 5 5 < D ≤ 10 D15	D15	D ≤ 15	D15	D ≤ 15
	Length, L ^d (cm)	L20 L25 L33 L50 L50+	L = 20 L = 25 L = 33 L = 50 L > 50 (maximum value to be stated)	L20 L25 L33 L50 L50+	L ≤ 20 L ≤ 25 L ≤ 33 L ≤ 50 L > 50 (maximum value to be stated)	L33 L50 L100 L100+	L ≤ 33 L ≤ 50 L ≤ 100 L > 100 (maximum value to be stated)	L33 L50 L100 L100+	L = 33 L = 50 L = 100 L > 100 (maximum value to be stated)
	Moisture, M (w-%)	M20 ≤ 20 % M25 ≤ 25 %		M20 ≤ 20 % M25 ≤ 25 %		M25 ≤ 25 %		M35 ≤ 35 %	
	Volume or weight	To be stated which volume is used when retailed (m ³ stacked or m ³ loose, kg) and/or packaged log woods weight.							
	Proportion of split volume	All split		More than 85 % of volume split		no requirements			
	The cut-off surface	Even and smooth ^e		no requirements		no requirements			
Mould and decay	No mould and decay		15 % firewood volume affected by mould or decay		If significant amount (more than 10 % of weight) of mould and decay exists it should be stated. In case of doubt particle density or net calorific value could be used as indicator.				
Informative	Energy density, E ^f	kWh/kg or kWh/m ³ loose or stacked							

Πίνακας 1-1: κατηγορίες ξύλου ως στερεή βιομάζα [8]

1.1.2 Κατηγοριοποίηση των πηγών βιομάζας

Η ταξινόμηση των στερεών βιοκαυσίμων βασίζεται στη προέλευση και τη πηγή τους. Σκοπός της ταξινόμησης είναι να διαφοροποιηθούν και να καθοριστούν οι πρώτες ύλες με βάση τη προέλευση τους. Η ταξινόμηση της ποιότητας σε μορφή πινάκων έγινε μόνο για στερεά βιοκαύσιμα που αποτελούν μεγάλο αντικείμενο διαπραγμάτευσης. Τα στερεά βιοκαύσιμα χωρίζονται στις ακόλουθες υποκατηγορίες σύμφωνα με τον **EN 14961 – 1** [1]:

- Βιομάζα ξύλου (Εικόνα 1.2 και Εικόνα 1.3)
- Βοτανώδης Βιομάζα (Εικόνα 1.4 και Εικόνα 1.5)
- Βιομάζα φρούτων (Εικόνα 1.6 και Εικόνα 1.7)

Τα κύρια χαρακτηριστικά που μας ενδιαφέρουν είναι η περιεκτικότητα σε υγρασία, οι διαστάσεις σωματιδίων και η περιεκτικότητα σε τέφρα. Ακόμα, εξετάζεται και η πυκνότητα. Οι κύριες παράμετροι που άλλαζαν στα test ήταν τα παραπάνω χαρακτηριστικά. Οι δοκιμές έγιναν σε φούρνους και σε συμβατικούς καυστήρες για ξύλο και βιομάζα φρούτων. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, η υγρασία του ξύλου πρέπει να

είναι 10-20% κβ, ενώ αν η περιεκτικότητα σε τέφρα είναι μεγαλύτερη του 0,5% μειώνονται οι εκκρίσεις σωματιδίων.

1.1.1 Whole trees without roots	1.1.1.1 Broadleaf
	1.1.1.2 Coniferous
	1.1.1.3 Short rotation coppice
	1.1.1.4 Bushes
	1.1.1.5 Blends and mixtures
1.1.2 Whole trees with roots	1.1.2.1 Broadleaf
	1.1.2.2 Coniferous
	1.1.2.3 Short rotation coppice
	1.1.2.4 Bushes
	1.1.2.5 Blends and mixtures
1.1.3 Stemwood	1.1.3.1 Broadleaf
	1.1.3.2 Coniferous
	1.1.3.3 Blends and mixtures
1.1.4 Logging residues	1.1.4.1 Fresh/Green, Broadleaf (including leaves)
	1.1.4.2 Fresh/Green, Coniferous (including needles)
	1.1.4.3 Stored, broadleaf
	1.1.4.4 Stored, coniferous
	1.1.4.5 Blends and mixtures
1.1.5 Stumps/roots	1.1.5.1 Broadleaf
	1.1.5.2 Coniferous
	1.1.5.3 Short rotation coppice

Εικόνα 1.2: Ταξινόμηση Δασοκομίας, Φύτευσης και άλλων παρθένων ξύλων [1]

1.2 By-products and residues from wood processing industry	
1.2.1 Chemically untreated wood residues	1.2.1.1 Without bark, broadleaf 1.2.1.2 Without bark, coniferous 1.2.1.3 With bark, broadleaf 1.2.1.4 With bark, coniferous 1.2.1.5 Bark (from industry operations) ^a
1.2.2 Chemically treated wood residues (Figure 2.2), fibers and wood constituents	1.2.2.1 Without bark 1.2.2.2 With bark 1.2.2.3 Bark (from industry operations) ^a 1.2.2.4 Fibers and wood constituents
1.2.3 Blends and mixtures	
1.3 Used wood	
1.3.1 Chemically untreated wood	1.3.1.1 Without bark 1.3.1.2 With bark 1.3.1.3 Bark ^a
1.3.2 Chemically treated wood	1.3.2.1 Without bark 1.3.2.2 With bark 1.3.2.3 Bark ^a
1.3.3 Blends and mixtures	

Εικόνα 1.3: Υποπροϊόντα και υπολείμματα επεξεργασίας από τη βιομηχανία ξύλου [1]

2.1.1 Cereal crops	2.1.1.1 Whole plant 2.1.1.2 Straw parts 2.1.1.3 Grains or seeds 2.1.1.4 Husks or shells 2.1.1.5 Blends and mixtures
2.1.2 Grasses	2.1.2.1 Whole plant 2.1.2.2 Straw parts 2.1.2.3 Seeds 2.1.2.4 Shells 2.1.2.5 Blends and mixtures
2.1.3 Oil seed crops	2.1.3.1 Whole plant 2.1.3.2 Stalks and leaves 2.1.3.3 Seeds 2.1.3.4 Husks or shells 2.1.3.5 Blends and mixtures
2.1.4 Root crops	2.1.4.1 Whole plant 2.1.4.2 Stalks and leaves 2.1.4.3 Root 2.1.4.4 Blends and mixtures
2.1.5 Legume crops	2.1.5.1 Whole plant 2.1.5.2 Stalks and leaves 2.1.5.3 Fruit 2.1.5.4 Pods 2.1.5.5 Blends and mixtures
2.1.6 Flowers	2.1.6.1 Whole plant 2.1.6.2 Stalks and leaves 2.1.6.3 Seeds 2.1.6.4 Blends and mixtures

Εικόνα 1.4: Ταξινόμηση βοτανώδους βιομάζας από γεωργία και κηπουρική [1]

2.2.1 Chemically untreated herbaceous residues	2.2.1.1 Cereal crops and grasses
	2.2.1.2 Oil seed crops
	2.2.1.3 Root crops
	2.2.1.4 Legume crops
	2.2.1.5 Flowers
	2.2.1.6 Blends and mixtures
2.2.2 Chemically treated herbaceous residues	2.2.2.1 Cereal crops and grasses
	2.2.2.2 Oil seed crops
	2.2.2.3 Root crops
	2.2.2.4 Legume crops
	2.2.2.5 Flowers
	2.2.2.6 Blends and mixtures
2.2.3 Blends and mixtures	

Εικόνα 1.5: Υποπροϊόντα και υπολείμματα επεξεργασίας από τη βιομηχανία [1]

3.1 Orchard and horticulture fruit	3.1.1 Berries	3.1.1.1 Whole berries
		3.1.1.2 Flesh
		3.1.1.3 Seeds
		3.1.1.4 Blends and mixtures
	3.1.2 Stone/kernel fruits	3.1.2.1 Whole fruit
		3.1.2.2 Flesh
		3.1.2.3 Stone/kernel
		3.1.2.4 Blends and mixtures
	3.1.3 Nuts and acorns	3.1.3.1 Whole nuts
		3.1.3.2 Shells/husks
		3.1.3.3 Kernels
		3.1.3.4 Blends and mixtures
	3.1.4 Blends and mixtures	

Εικόνα 1.6: Ταξινόμηση της βιομάζας από φρούτα [1]

3.2 By-products and residues from fruit processing industry	3.2.1 Chemically untreated fruit residues	3.2.1.1 Berries
		3.2.1.2 Stone/kernel fruits
		3.2.1.3 Nuts and acorns
		3.2.1.4 Crude olive cake (Figure 2.4)
		3.2.1.5 Blends and mixtures
	3.2.2 Chemically treated fruit residues	3.2.2.1 Berries
		3.2.2.2 Stone/kernel fruits
		3.2.2.3 Nuts and acorns
		3.2.2.4 Exhausted olive cake
		3.2.2.5 Blends and mixtures
3.2.3 Blends and mixtures		
3.3 Blends and mixtures		

Εικόνα 1.7: Υποπροϊόντα και υπολείμματα επεξεργασίας από τη βιομηχανία φρούτων [1]

1.2 Εφοδιασμός στερεών βιοκαυσίμων

Ο εφοδιασμός βιομάζας μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε γεωργικό, δασοκομικό και βασισμένο σε απόβλητα. Ο αγροτικός εφοδιασμός περιλαμβάνει κυρίως υπολείμματα καλλιεργειών, καθώς και αγροτοβιομηχανικά υπολείμματα. Ο δασοκομικός εφοδιασμός περιλαμβάνει υπολείμματα και απόβλητα ξύλου. Οι πόροι της βιομάζας μπορούν να προσφέρουν σημαντική ποικιλία στις χημικές και φυσικές ιδιότητες. Η χρήση των υπολειμμάτων αναμένεται να αυξήσει την αξία των ακατέργαστων υλικών και να βελτιώσει το εισόδημα των παραγωγών. [9]

Ανάλογα με το κλίμα που επικρατεί, επηρεάζεται και η διαθεσιμότητα της βιομάζας. Για παράδειγμα, με κλίμα που ευνοεί την ανάπτυξη των δασών, έχουμε μεγαλύτερη διαθεσιμότητα βιομάζας, ενώ παράγοντας που μπορεί να επηρεάσει αρνητικά τη διαθεσιμότητα της είναι η πυρκαγιά. Η πρόληψη των παραγόντων που επηρεάζουν αρνητικά τη διαθεσιμότητα της βιομάζας, την οικολογία και τις ανάγκες της αγοράς είναι αναγκαία για τη μελλοντική βιο-οικονομία. [10]

Τα κύρια ζητήματα για την ανάλυση κόστους του εφοδιασμού βιομάζας είναι: α) καθορισμός κόστους για κάθε είδος τροφοδοσίας, β) ο ορισμός των εξαρτημάτων της αλυσίδας προμηθειών που συμβάλλουν στο μεγαλύτερο κόστος, γ) η εκτίμηση της μεταβλητότητας του κέρδους εξ' αιτίας των περιφερειακών, τομεακών παραγόντων και των παραγόντων των αναγκών της αγοράς. Υπάρχουν 3 είδη κόστους σε κανονική προμήθεια για υπολειμματικό εφοδιασμό, το μηδενικό αρχικό κόστος, το αρνητικό κόστος και το κόστος ευκαιρίας. Τα κύρια στοιχεία κόστους για ενέργεια από καλλιέργειες είναι, η ενοικίαση γης, η καλλιέργεια, η συγκομιδή, η αποθήκευση και η μεταφορά.

Οι κύριες προκλήσεις που αντιμετωπίζει ο τομέας προμήθειας της βιομάζας είναι οι ανάγκες διαφόρων αγορών και καταναλωτών, η επέκταση της τροφοδοσίας προμηθειών συμπεριλαμβανομένου του βιώσιμου εμπορίου, η κάλυψη της ποιότητας των προδιαγραφών για τη βελτίωση της πιστοποίησης, η αύξηση απόδοσης ανά μονάδα επιφάνειας και η μείωση των περιβαλλοντολογικών επιπτώσεων. Επιπλέον προκλήσεις είναι η δημιουργία κατάλληλων στρατηγικών για τα χαρακτηριστικά εδάφους-κλίματος και περιβαλλοντολογικών και κοινωνικοοικονομικών συνθηκών, η προώθηση πρωταρχικών και υπόλοιπων φορμών γεωργικών και δασοκομικών ενεργειών, ολοκληρωμένες προσεγγίσεις ώστε τα υπολείμματα γεωργίας, δασοκομίας και παρόμοιων τομέων, που μπορούν να δώσουν ενέργεια, να θεωρούνται ως καύσιμα και όχι ως απόβλητα. Τέλος, είναι η ανάπτυξη νέων υψηλών αποδόσεων και χαμηλών εισροών γεωργικών συστημάτων για τη παραγωγή καλλιεργειών και δένδρων με βελτιστοποιημένα χαρακτηριστικά, για να ταιριάζουν σε διαφορετικές αγορές. [11]

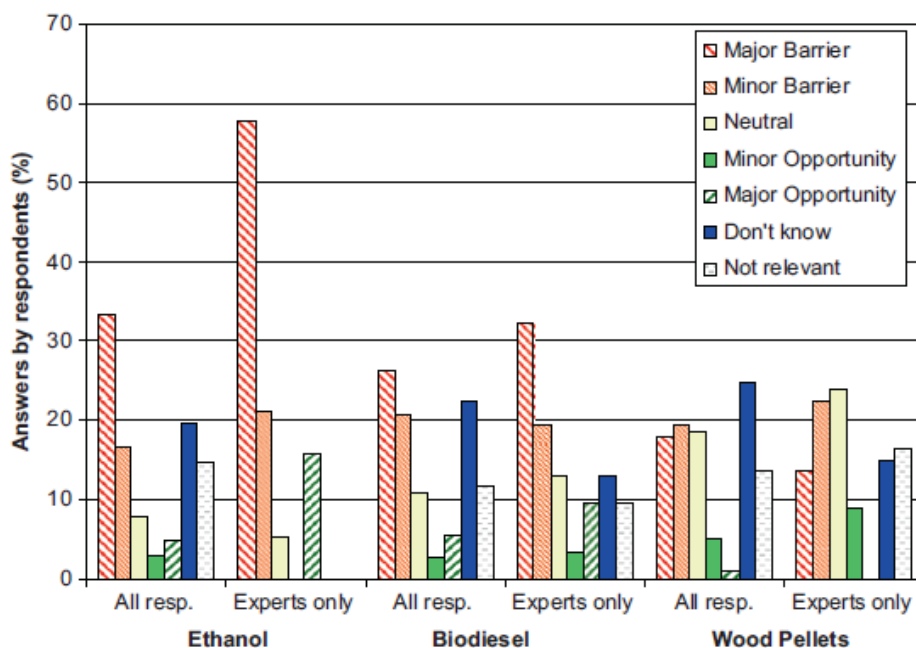
1.3 Βιοενέργεια και Εμπόριο

Το εμπόριο βιομάζας παρ' όλο που αναπτύσσεται ραγδαία, υπάρχουν εμπόδια όπως οι δασμοί και η εφαρμογή πιστοποίησης για βιοαιθανόλη, βιοντίζελ ενώ για τα ξύλινα pellets εμφανίζονται ορισμένα προβλήματα όπως τα logistics. Η αύξηση τιμών των ορυκτών καυσίμων θα αναπτύξει περαιτέρω την αγορά στερεής και υγρής βιομάζας. Γενικά, οι κυβερνήσεις παρέχουν σε ένα βαθμό φοροαπαλλαγές και επιδοτήσεις σε υγρά βιοκαύσιμα. Οι κύριες επιπτώσεις αυτών των πολιτικών στις αναπτυσσόμενες χώρες είναι η μείωση της ανταγωνιστικότητας και η δημιουργία παγκόσμιων ανισοτήτων.

Υπήρξε ένα ερωτηματολόγιο που συνέταξαν επιστημονικοί παράγοντες που αναφερόταν συγκεκριμένα στα προϊόντα βιομάζας όπως η βιοαιθανόλη, το βιοντίζελ και τα ξύλινα pellets και αναφερόταν σε τυχόν εμπόδια που συνάντησαν οι ενδιαφερόμενοι στο εμπόριο βιοενέργειας.

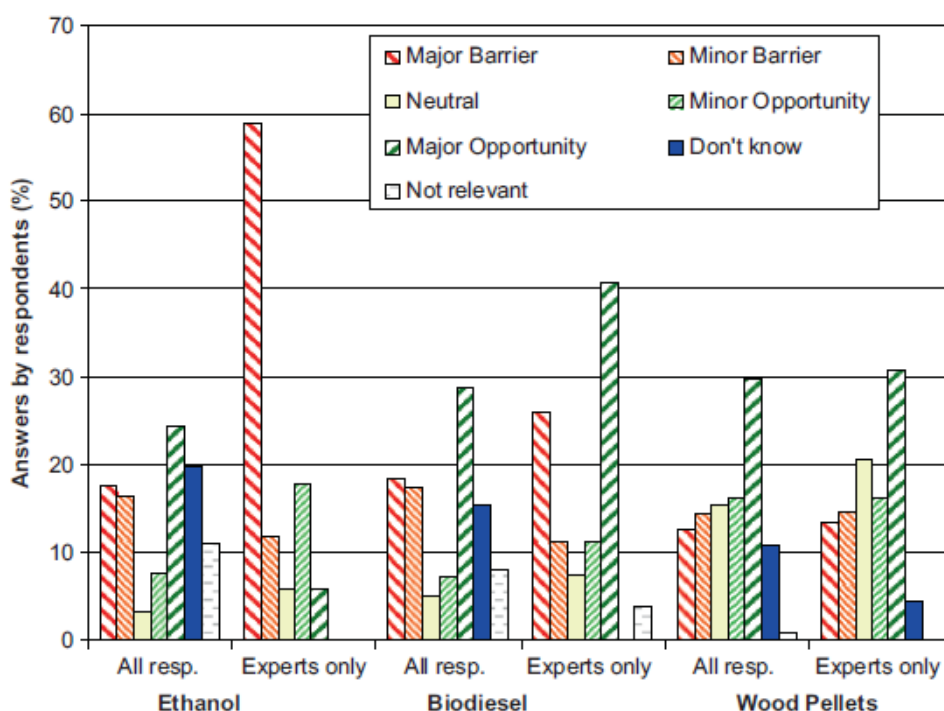
Όσον αφορά την φορολογία, τα ξύλινα pellet δεν έχουν δασμολόγια εισαγωγής ή εξαγωγής, ενώ για βιοντίζελ και βιοαιθανόλη αποτελούν κατά τους ενδιαφερόμενους επενδυτές μεγάλο πρόβλημα. Το βιοντίζελ συνήθως έχει χαμηλότερους εισαγωγικούς δασμούς από τη βιοαιθανόλη (με εύρος 0%-6,5% σε Ευρώπη και Αμερική). Το 2009 η ευρωπαϊκή κομισιόν ενέκρινε πολιτική μη επιδότησης και αύξησης εισαγωγών βιοντίζελ από Αμερική ύστερα από αίτηση του ευρωπαϊκού συμβουλίου βιοντίζελ. Γενικότερα, τα εμπόδια από δασμούς είναι πιο σημαντικά για τα υγρά βιοκαύσιμα.

Οι ενδιαφερόμενοι που συμμετείχαν υποστήριξαν ότι οι εξαγωγές αιθανόλης είναι πολύ περιορισμένες σε μαζική κατανάλωση εξ αιτίας εμποδίων εμπορίου. Για βιοντίζελ, οι γνώμες ποικίλουν ανάλογα τη χώρα προέλευσης των ερωτηθέντων, αλλά η γενική αντίληψη είναι ότι οι δασμοί εξαγωγής παραμορφώνουν την αγορά ενώ επιζητείται μια πιο ισορροπημένη προσέγγιση για μια πιο δίκαιη και βιώσιμη αλυσίδα τοπικής αγροτικής παραγωγής βάση δασμών. Στην **Εικόνα 1.8** φαίνονται με τη μορφή γραφήματος οι απαντήσεις που δόθηκαν σχετικά με τους δασμούς εισαγωγών/εξαγωγών. [12]



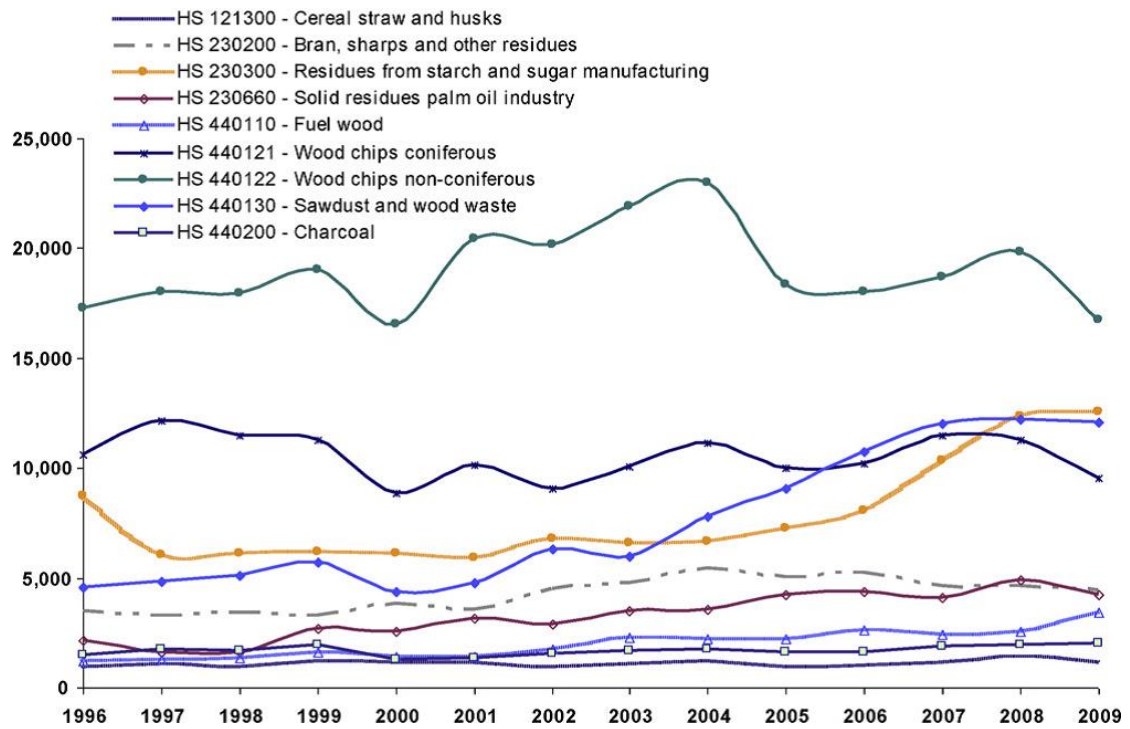
Εικόνα 1.8: Επισκόπηση των απαντήσεων του ερωτηματολογίου σχετικά με τους δασμούς εισαγωγών/εξαγωγών [12]

Για τα κριτήρια βιωσιμότητας και τα συστήματα πιστοποίησης, το κύριο θέμα προς συζήτηση είναι η εφαρμογή κανόνων σε παγκόσμιο επίπεδο (πχ ίδια όρια ρύπων που επηρεάζουν το φαινόμενο του θερμοκηπίου) σε συγκεκριμένους τομείς, διότι αλλιώς δημιουργούνται στρεβλώσεις στην αγορά και ανεπανόρθωτες συνέπειες στο περιβάλλον. Η απόκλιση απόψεων στα κριτήρια οφείλεται στο ότι δεν υπάρχει συγκεκριμένος ορισμός για την “βιώσιμη βιομάζα”, καθώς αν διατυπώνονταν πολύ αυστηρά κριτήρια τότε αυτά θα αποτελούσαν τροχοπέδη για την διακίνησή της σε παγκόσμιο επίπεδο. Στην **Εικόνα 1.9** φαίνονται με μορφή γραφήματος οι απαντήσεις που δόθηκαν σχετικά με τα κριτήρια βιωσιμότητας. [12]

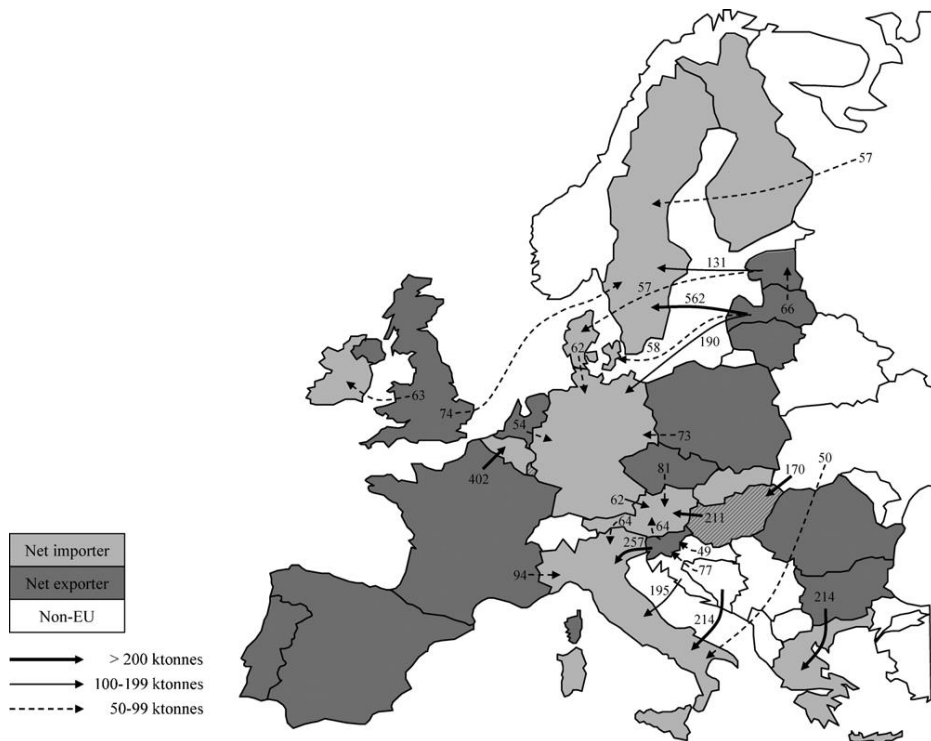


Εικόνα 1.9: Επισκόπηση των απαντήσεων του ερωτηματολογίου σχετικά με τα κριτήρια βιωσιμότητας [12]

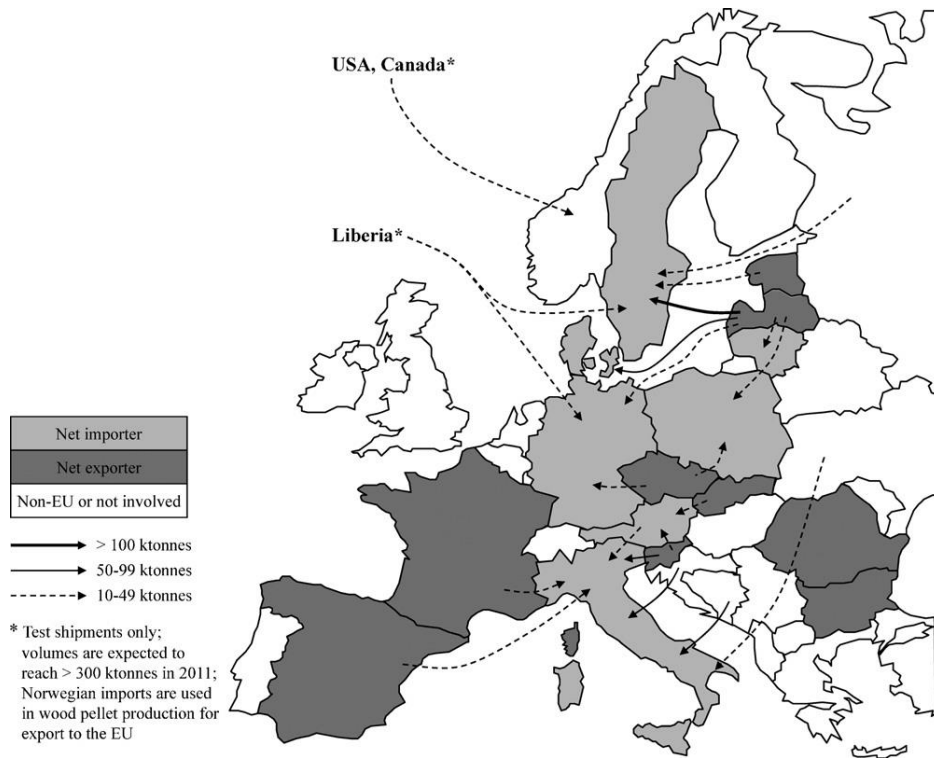
Έρευνες έχουν δείξει πως τα φυτοϋγειονομικά μέτρα επηρεάζουν τις πρώτες ύλες κυρίως σε υγρά βιοκαύσιμα διότι βάζουν όριο στην ποσότητα φυτοφαρμάκων στα κατακάθια. Τα ξύλινα pellet δεν υπόκεινται συνήθως σε αυτήν την διαδικασία. Έτσι, οι περισσότεροι ερωτώμενοι λόγω άγνοιας των συγκεκριμένων μέτρων δεν ήταν σε θέση να κρίνουν θετικά ή αρνητικά την επίδραση που έχουν στο εμπόριο βιομάζας. Τέλος, στις **Εικόνες 1.10 -1.17** μια γενική ανασκόπηση της ανάπτυξης του εμπορίου βιομάζας τα τελευταία χρόνια.



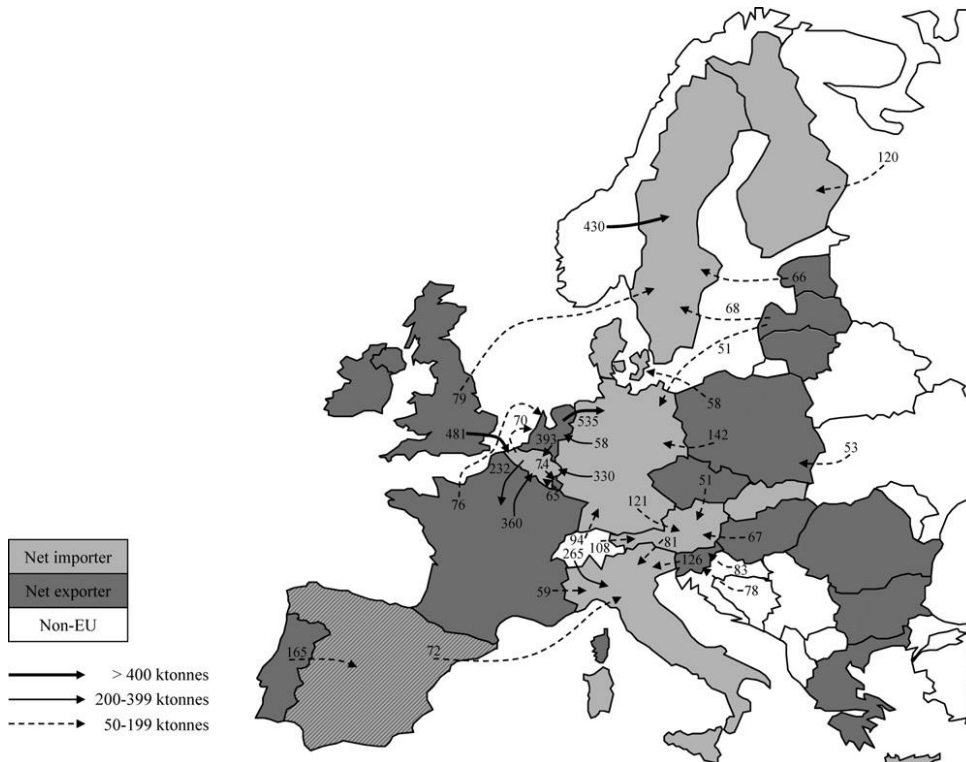
Εικόνα 1.10: Παγκόσμιο Εμπόριο στερεής βιομάζας σε κτοννες [13]



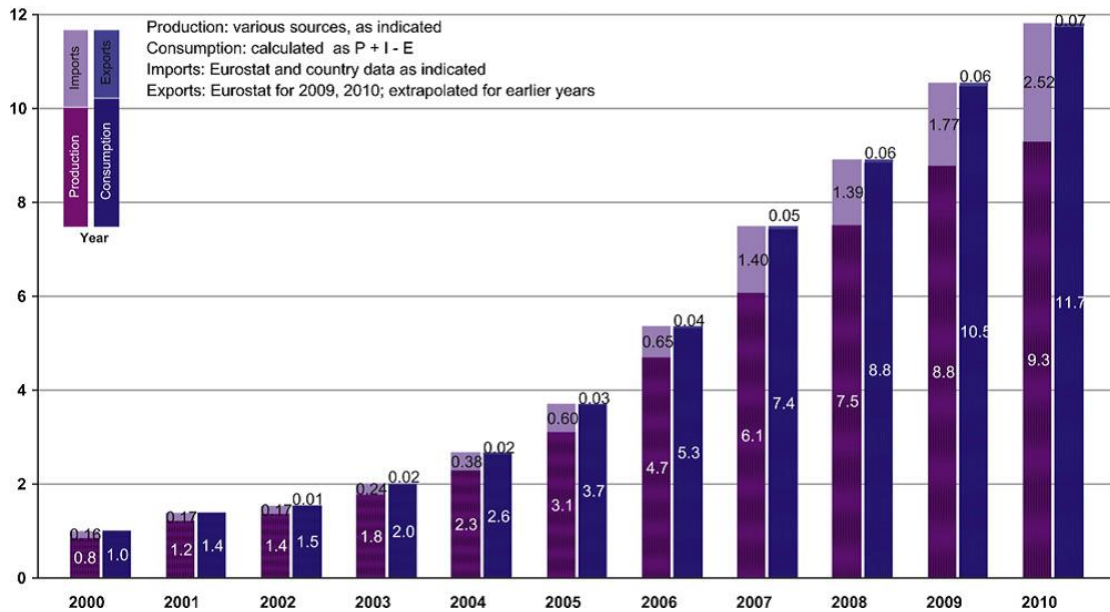
Εικόνα 1.11: Γεωγραφική κατανομή εμπορίου για καύσιμο ξύλο στην Ευρώπη το 2010 [14]



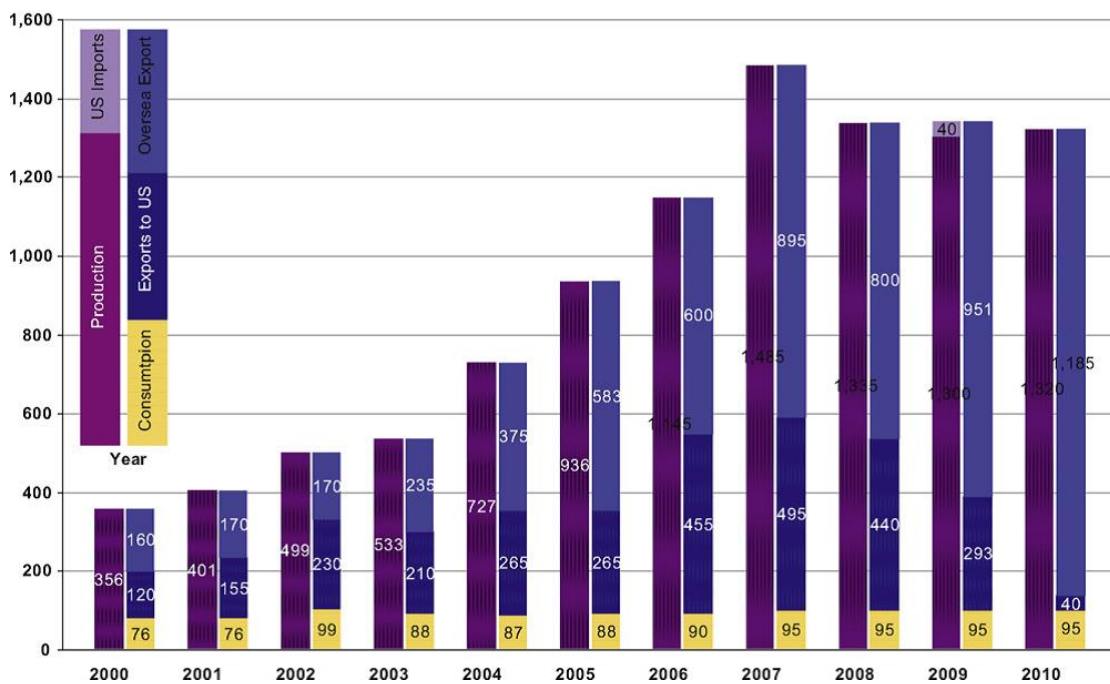
Εικόνα 1.12: Γεωγραφική κατανομή εμπορίου για wood chip το 2010 [15]



Εικόνα 1.13: Γεωγραφική κατανομή εμπορίου για απόβλητα ξύλου στην Ευρώπη το 2010 [14]



Εικόνα 1.16: Εμπορικό Ισοζύγιο wood pellet στην Ευρωπαϊκή Ένωση (Μtonnes) [16, 17]



Εικόνα 1.17: Καναδικό εμπορικό ισοζύγιο wood pellet (Κtonnes) [16, 17]

1.4 Καύση βιομάζας με άνθρακα: Επισκόπηση και τεχνικά θέματα

Η καύση βιομάζας με άνθρακα μειώνει τις εκπομπές του CO₂, SO_x, NO_x που σχετίζονται με το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Η καύση με άνθρακα δεν επηρεάζει ή επηρεάζει ελάχιστα την απόδοση του λέβητα, ενώ ταυτόχρονα μειώνει τους ρύπους. Οι κύριες τεχνικές για τη καύση βιομάζας με άνθρακα είναι [18]:

- Προετοιμασία καυσίμου, αποθήκευση και διανομή
- Απόθεση τέφρας
- Μετατροπή καυσίμου
- Σύνθεση ρύπων
- Διάβρωση
- Αξιοποίηση ιπτάμενης τέφρας
- Επίδραση στα CSR συστήματα
- Σύνθεση ροής (striated)

1.4.1 Προετοιμασία καυσίμου και Εκτέλεση

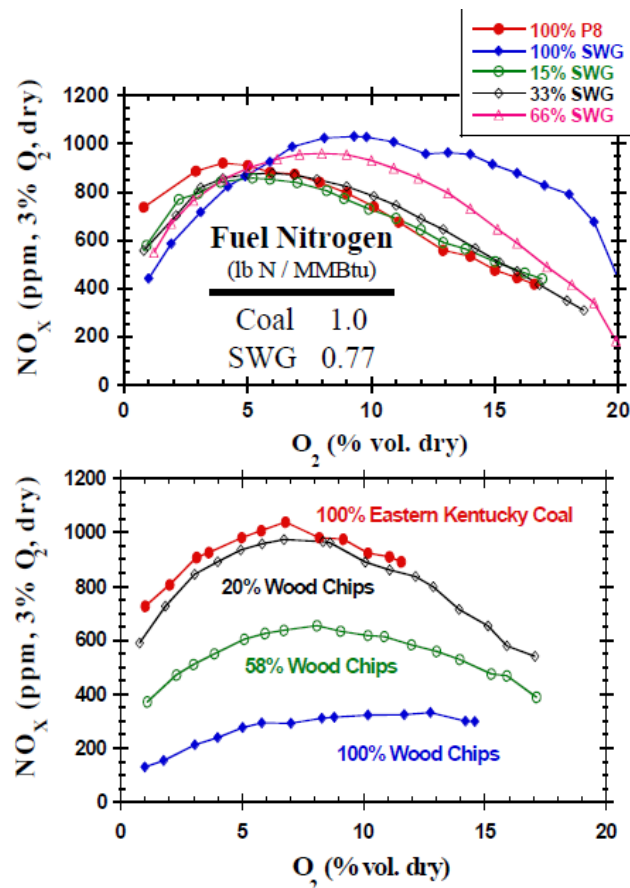
Η προετοιμασία της βιομάζας σαν καύσιμο απαιτεί περισσότερη ενέργεια απ' ό τι ο άνθρακας (κονιορτοποιήση). Καθώς η φλόγα εξελίσσεται, τα σωματίδια άνθρακα και βιομάζας, που έχουν λεπτή δομή καίγονται, αφήνοντας πίσω μεγάλα σωματίδια βιομάζας. Αυτά τα σωματίδια αποτελούν μεγάλο κλάσμα της συνολικής ροής και εξακολουθούν να υπάρχουν για πολύ στη φλόγα ώστε να αλλάξουν τη συμπεριφορά της. Τα σωματίδια άνθρακα είναι μικρά και αναπτύσσουν μικρές αλλαγές στη διαβάθμιση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό. Αντίθετα, τα σωματίδια της βιομάζας είναι μεγάλα και αναπτύσσουν μεγάλες διαβαθμίσεις.

Όσον αφορά τη σύγκριση βιομάζας και άνθρακα, ο άνθρακας έχει μεγαλύτερη πυκνότητα, οπότε για το ίδιο μέγεθος ο άνθρακας θερμαίνεται πιο αργά. Η κατευθυντήρια γραμμή για τη προετοιμασία του καυσίμου είναι η προετοιμασία του καυσίμου χρησιμοποιώντας εξοπλισμό ειδικό για συστήματα τροφοδοσίας βιομάζας και να διαχωριστεί ο χειρισμός και η μεταφορά. Τα μεγάλα, μη σφαιρικά σωματίδια βιομάζας καίγονται διαφορετικά συγκριτικά με τα σωματίδια άνθρακα και αυτή η διαφορά οδηγεί σε διαφορετικά χαρακτηριστικά φλόγας, στις ιδιότητες των σωματιδίων και στη συμπεριφορά της καύσης. [18]

Τα σωματίδια της βιομάζας δε μπορούν να μειωθούν και να φτάσουν στο μέγεθος των σωματιδίων του άνθρακα, γι' αυτό μπαίνουν σε καυστήρες για μεγαλύτερα μεγέθη. Αν εγχυθεί στα χαμηλά επίπεδα καύσης, μεγάλο μέρος οδηγείται στο πάτο της χοάνης με την τέφρα, χωρίς να καεί. Αν μπει στα ψηλά επίπεδα καύσης, δεν έχει επαρκή χρόνο παραμονής να καεί πλήρως. Γι' αυτό εγχέεται στα μεσαία επίπεδα καύσης, που πρέπει όμως να αποφευχθεί η πρόσκρουση με τα τοιχώματα. Όταν η ροή στον καυστήρα στο μεγαλύτερο μέρος είναι στρωτή, σημαίνει πως το συνολικό ποσοστό βιομάζας είναι χαμηλό. Υπάρχουν πολλά οφέλη της καύσης βιομάζας με άνθρακα και μια καλή στρατηγική είναι να καίγεται τουλάχιστον 50% άνθρακα σε κάθε καυστήρα που περιέχει βιομάζα. Τέλος, για τη μεταφορά όλες οι σωλήνες/αγωγοί για τη βιομάζα πρέπει να ενισχυθούν με σκυρόδεμα, για να αποφευχθεί η αστοχία λόγω διάβρωσης. [18]

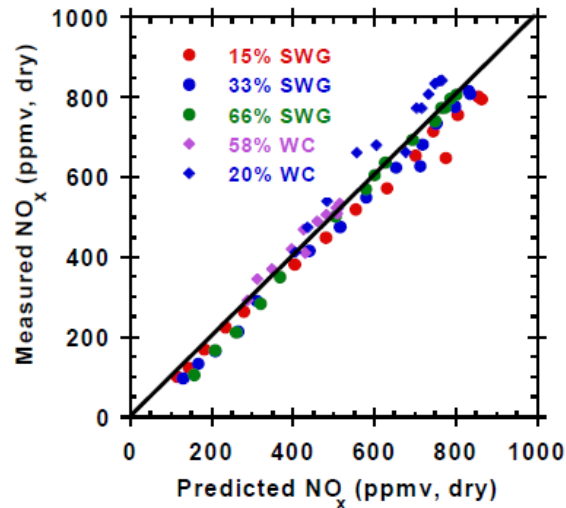
1.4.2 Παραγωγή ρύπων

Η παραγωγή ρύπων που θα διερευνηθεί αφορά τις εκπομπές SO_x και NO_x . Μείωση των εκπομπών SO_x αναμένεται όταν στο καύσιμο υπάρχει θείο ή μέταλλα αλκαλικών γαιών. Κάποια είδη βιομάζας περιέχουν αυτά τα μέταλλα. Πειράματα που έγιναν για τις εκπομπές NO_x σε καύση βιομάζας, άνθρακα ή σε μίξεις καυσίμων δείχνουν πως οι εκπομπές NO_x της βιομάζας μπορεί να είναι μεγαλύτερες από αυτές του άνθρακα. Η **Εικόνα 1.18** δείχνει τις εκπομπές NO_x βωτανώδους βιομάζας σε σχέση με το O_2 που περιέχει και τις εκπομπές NO_x από ξύλο σε σχέση με το άζωτο που περιέχει.

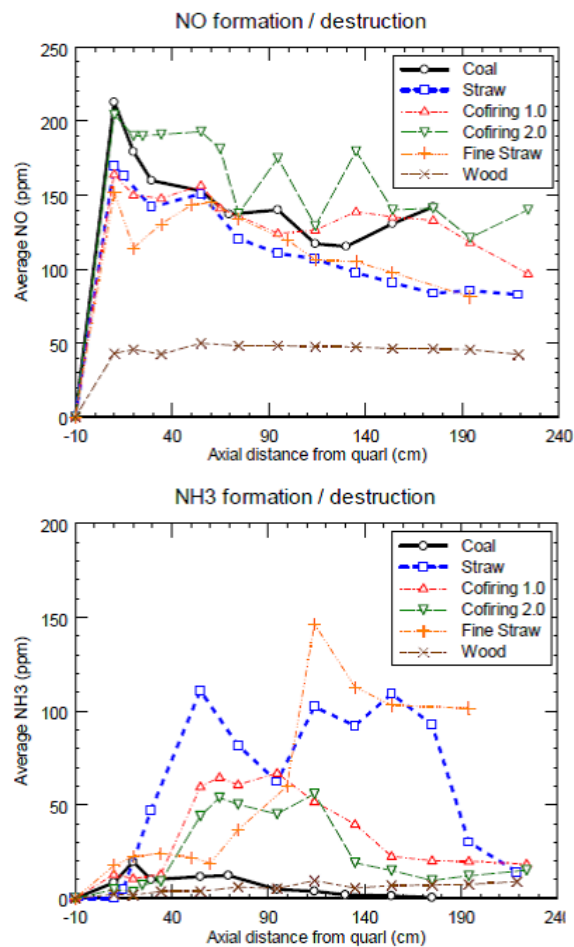


Εικόνα 1.18 Εκπομπές NO_x βωτανώδους βιομάζας σε σχέση με το O_2 που περιέχει και τις εκπομπές NO_x από ξύλο σε σχέση με το άζωτο που περιέχει [19]

Η ανάμειξη βιομάζας και καυσίμου έχει πολύ διαφορετικά αποτελέσματα από αυτά που έχει το κάθε καύσιμο ξεχωριστά στις εκπομπές NO_x . Στην **Εικόνα 1.19** φαίνονται οι εκπομπές NO_x για διαφορετικές μίξεις βιομάζας με άνθρακα. Τα δεδομένα αυτά ήταν για ιδεατή ροή, χωρίς στροβιλισμούς και δίνες. Στην **Εικόνα 1.20** παρουσιάζονται διαγράμματα με τις συγκεντρώσεις NO και NH_3 για πραγματική ροή.



Εικόνα 1.19: Εκπομπές NO_x για διαφορετικές μίξεις βιομάζας με άνθρακα [19]



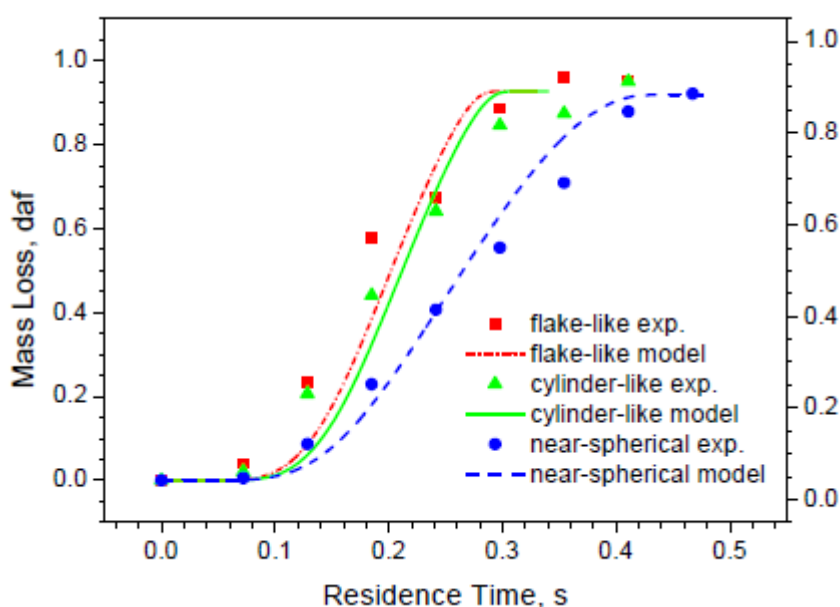
Εικόνα 1.20: Συγκεντρώσεις NO και NH_3 για πραγματική ροή [20]

Γενικά, συμπεράσματα για τις εκπομπές NO_x είναι ότι υπάρχει ασήμαντη χημική αλληλεπίδραση μεταξύ των αερίων της βιομάζας και του άνθρακα, για να μεταβάλλουν τις εκπομπές του NO_x . Οι εκπομπές NO_x από την πιο κατάλληλη βιομάζα είναι μικρότερες από αυτές του άνθρακα

1.4.3 Μέγεθος και σχήμα σωματιδίων

Τα τυπικά μεγέθη σωματιδίων που έχουν εμπορικό ενδιαφέρον, κυμαίνονται σε διαμέτρους από 2-10mm. Τα σωματίδια βιομάζας παρουσιάζουν μη σφαιρικά χαρακτηριστικά, γι' αυτό η διάμετρος τους υπολογίζεται από μια ισοδύναμη σφαίρα με ίδια μάζα και όγκο. Υπάρχουν πολλές εφαρμογές από αυτά τα μεγάλα μεγέθη πάνω στην καύση βιομάζας, ειδικά όταν συγκρίνονται με τις παραδοσιακές περιπτώσεις καύσης άνθρακα. Κατά τη διάρκεια των πρώτων σταδίων της οξείδωσης, το σύννεφο κάπνας φεύγει και η σωματιδιακές θερμοκρασίες είναι κατά μέσο όρο υψηλότερες από ότι κατά τη διάρκεια της αποπτητικοποίησης, αν και παραμένουν οι σημαντικές θερμοκρασιακές διαφορές στην επιφάνεια των σωματιδίων.

Η **Εικόνα 1.21** δείχνει τις επιπτώσεις για διάφορα σχήματα σωματιδίων βιομάζας κατά τη καύση. Αυτό το διάγραμμα συγκρίνει την μετρούμενη και προβλεπόμενη απώλεια μάζας από σχετικά μικρά σωματίδια βιομάζας (περίπου 300 μm) με διαφορετικά σχήματα. Όπως φαίνεται, τα σχεδόν σφαιρικά σωματίδια καίγονται πιο αργά από τα σωματίδια με μεγαλύτερη αναλογία μεγέθους. Εφόσον η μεταφορά θερμότητας και μάζας εξαρτάται κυρίως από την περιοχή της επιφάνειας για αυτά τα μεγάλα σωματίδια, τα σωματίδια που έχουν μικρότερη αναλογία επιφάνειας προς μάζα καίγονται πιο αργά συγκριτικά με σωματίδια τα οποία είναι λιγότερο συμμετρικά, ενώ έχουν την ίδια συνολική μάζα [18].

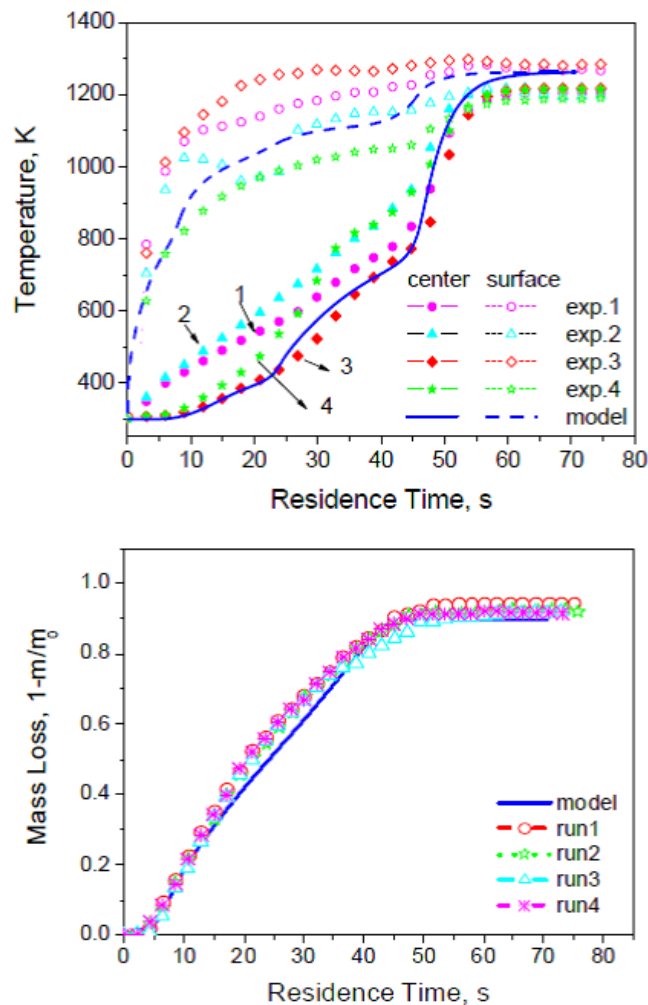


Εικόνα 1.21: Απώλεια μάζας για διάφορα σχήματα σωματιδίων βιομάζας κατά τη καύση

1.4.4 Περιεχόμενο σε υγρασία και πτητικά

Το σχήμα, το μέγεθος και το περιεχόμενο σε υγρασία και πτητικά των σωματιδίων βιομάζας παίζει σημαντικό ρόλο στη καύση. Στην **Εικόνα 1.22** φαίνεται πως τα χαρακτηριστικά αυτά επιδρούν στη θερμοκρασία στο κέντρο και στην επιφάνεια των σωματιδίων και στην απώλεια μάζας. Το κέντρο των σταγονιδίων παραμένει υγρό και εξατμίζεται πλήρως όταν η επιφάνεια φτάσει την θερμοκρασία αποπτητικοποίησης. Οι μετρήσεις που ελήφθησαν αναφέρονται σε σωματίδιο ξύλου με μέγεθος 9,5 mm με αρχική υγρασία 6%, σε ένα κλίβανο με θερμοκρασία 1273K.

Τα σωματίδια της βιομάζας ξεκινούν την αποπτητικοποίησης και διόγκωσης σε χαμηλότερες θερμοκρασίες από ότι τα σωματίδια άνθρακα, κυρίως λόγω του συνολικά μικρότερου μοριακού βάρους των οργανικών συστατικών. Μεγαλύτερα σωματίδια και μεγαλύτεροι βαθμοί θέρμανσης δημιουργούν μεγαλύτερες θερμοκρασιακές διαβαθμίσεις. Πέρα από την θερμοκρασία που σχετίζεται με την εξάτμιση του νερού που φαίνεται στο κέντρο των σωματιδίων, η ραγδαία απώλεια πτητικών επίσης επιδρά και στην άνοδο της θερμοκρασίας. [21, 22, 23]



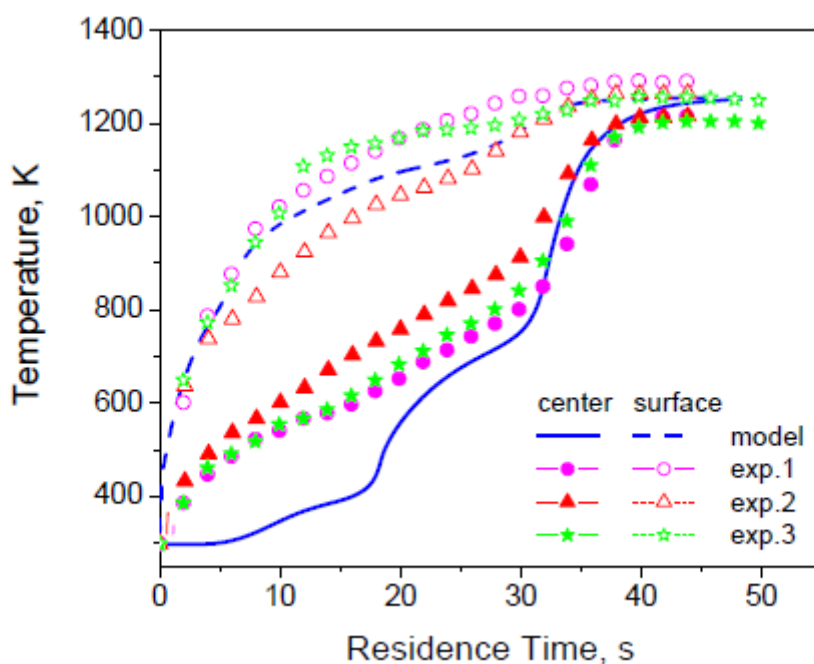
Εικόνα 1.22: Διαγράμματα θερμοκρασία και απώλεια μάζας σε σωματίδιο ξύλου με μέγεθος 9,5 mm με αρχική υγρασία 6%, σε ένα κλίβανο με θερμοκρασία 1273K.

1.4.5 Πειράματα καύσης σωματιδίων

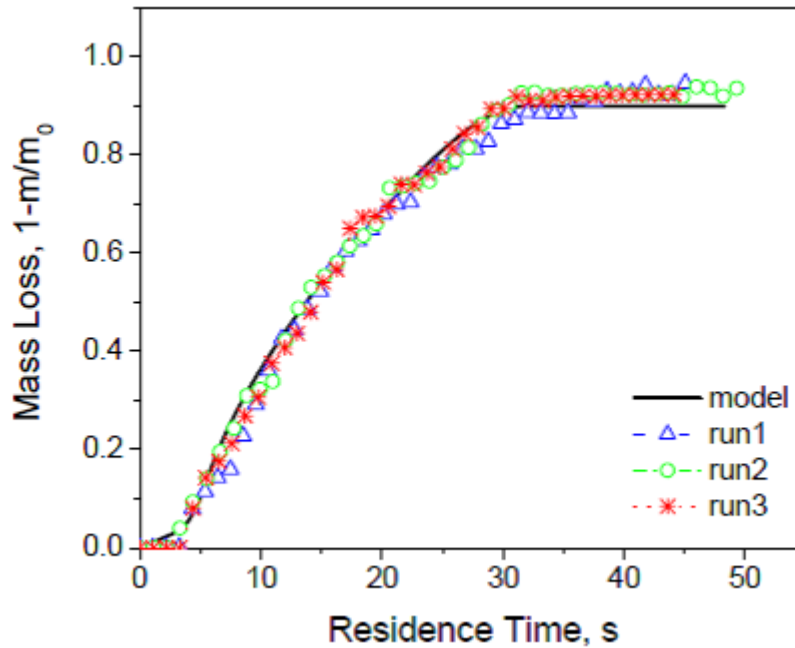
Αποπτητικοποίηση σωματιδίων

Τα δεδομένα για ένα σχεδόν σφαιρικό σωματίδιο ($d_p=11\mu\text{m}$) με αναλογία 1 και υγρασία 6%, κατά τη πυρόλυση, φαίνονται στις **Εικόνες 1.23** και **1.24**. Οι αρχικές συνθήκες ήταν η θερμοκρασία του τοίχου του αντιδραστήρα στους 1273K και η θερμοκρασία του αερίου στους 1050K. Όλα τα υπόλοιπα πειράματα περιλαμβάνουν τις ίδιες συνθήκες.

Οι προβλέψεις για απώλεια μάζας των σωματιδίων και για την θερμοκρασία της επιφάνειας των σωματιδίων γενικότερα συμφωνούν με τα πειραματικά δεδομένα εκτός από το γεγονός ότι η μετρούμενη θερμοκρασία του κέντρου των σωματιδίων αυξάνεται γρηγορότερα από τις προβλέψεις του μοντέλου στην αρχή. Αυτό μπορεί να προκαλείται από τις επιπτώσεις που έχει η θερμική αγωγιμότητα μέσω του σύρματος που χρησιμοποιήθηκε για την εύρεση της θερμοκρασίας του κέντρου των σωματιδίων. Γενικά η μετρούμενη θερμοκρασία της επιφάνειας των σωματιδίων και η θερμοκρασία στο κέντρο των σωματιδίων πρέπει να προσεγγίζουν την ίδια τιμή στο τέλος της πυρόλυσης αλλά μια μικρή απόκλιση υπάρχει εξαιτίας της μη ομοιόμορφης θερμοκρασίας του αντιδραστήρα και διαφορές στο σχήμα και το μέγεθος του θερμοζεύγους. Επίσης η θερμοκρασία του κέντρου των σωματιδίων μετρούμενη σε ακτινική διεύθυνση αυξάνεται πολύ γρηγορότερα από ότι σε αξονική διεύθυνση στην αρχή, δείχνοντας ότι η θερμική αγωγιμότητα του καλωδίου επηρεάζει τις αρχικές θερμοκρασίες του κέντρου των σωματιδίων. [18]



Εικόνα 1.23:Θερμοκρασία με αναλογία διαστάσεων 1 και υγρασία 1%



Εικόνα 1.24: απώλειας μάζας με αναλογία διαστάσεων 1 και υγρασία 1%

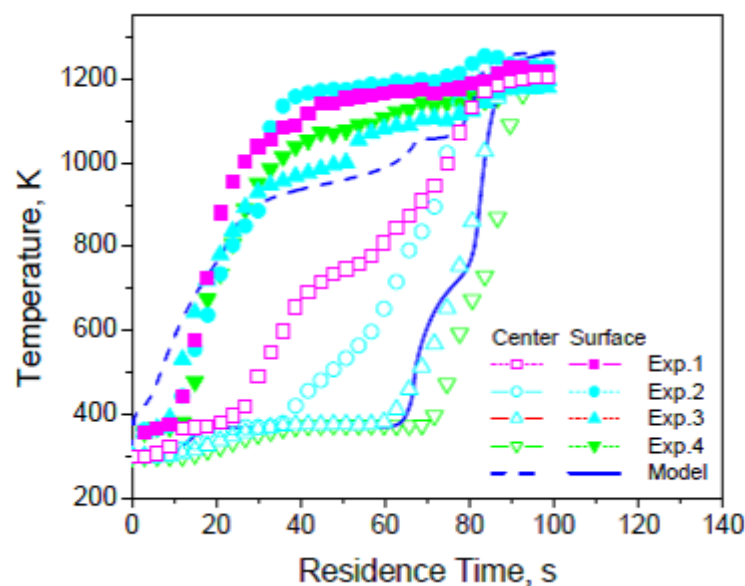
Ξήρανση σωματιδίων

Για το μοντέλο ξήρανσης έγινε πείραμα χρησιμοποιώντας σωματίδια με υψηλό περιεχόμενο υγρασίας, ίση με με 40%. Η θερμοκρασία των σωματιδίων στην επιφάνειά τους και στο κέντρο τους μετρήθηκε κατά την ξήρανση και την αποπτητικοποίηση. Η θερμοκρασία στο κέντρο των σωματιδίων μετρήθηκε σε αξονική και ακτινική διεύθυνση. Στην **Εικόνα 1.25** και **1.26** αποτυπώνονται η θερμοκρασία και η απώλεια μάζας σφαιρικού σωματιδίου κατά την ξήρανση και την πυρόλυση σε άζωτο με διάμετρο 11 mm, αναλογία διαστάσεων 4 και θερμοκρασία κλιβάνου 1273K. Στην **Εικόνα 1.27** και **1.28** μετρούνται η θερμοκρασία και η απώλεια μάζας ενός σχεδόν σφαιρικού σωματιδίου κατά τη διάρκεια της ξήρανσης και της πυρόλυσης σε άζωτο με διάμετρο 11 mm, αναλογία διαστάσεων 1 υγρασία 40% και θερμοκρασία κλιβάνου 1273K. Οι γραμμές 1 και 2 δείχνουν την θερμοκρασία στο κέντρο μετρημένη σε ακτινική διεύθυνση, ενώ οι γραμμές 3,4 δείχνουν την αξονική μέτρηση. Τα πειραματικά αποτελέσματα καθώς και τα δεδομένα δείχνουν ότι η θερμοκρασία των σωματιδίων αρχικά αυξάνεται σε μία σταθερή τιμή κοντά αλλά κάτω από το σημείο βρασμού, με την εξάτμιση να γίνεται σε αυτό το στάδιο. Μετά αποξηραίνοντας τα σωματίδια, η θερμοκρασία αυξάνεται ξανά μέχρι η αποπτητικοποίηση της βιομάζας επιβραδύνει το βαθμό θέρμανσης εξαιτίας της ενδόθερμης εναπόθεσης των υλικών της βιομάζας καθώς επίσης και της επίδρασης της ραγδαίας απώλειας μάζας κατά την ανταλλαγή θερμότητας (αυτός είναι και ο κύριος παράγοντας επιβράδυνσης). Η προβλεπόμενη θερμοκρασία της επιφάνειας εξαρτάται κυρίως στην ακτινοβολούσα θερμότητα, την θερμότητα συναγωγής, την επίδραση του παραπάνω κύριου παράγοντα στην ανταλλαγή θερμότητας και στο βαθμό και στην θερμοδυναμική της εξάτμισης του νερού.

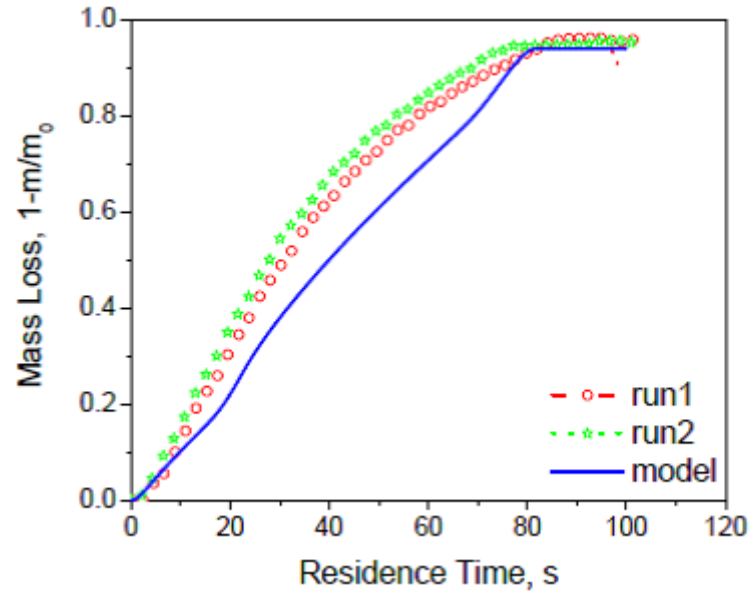
Το μοντέλο επίσης αξιολογείται με υγρά σχεδόν σφαιρικά σωματίδια τα οποία αποξηραίνονται και αποπτητικοποιούνται όπως φαίνεται στην **Εικόνα 1.27** και **1.28**. Τα

αποτελέσματα δείχνουν ότι η προβλεπόμενη απώλεια μάζας είναι ίδια με τα πειραματικά δεδομένα. Τα δεδομένα της επιφανειακής θερμοκρασίας των σωματιδίων δείχνουν ότι αυτή αυξάνεται λίγο πιο κάτω από το σημείο βρασμού του νερού και συμπερασματικά όταν η επιφάνεια αποξηραίνεται η θερμοκρασία αυξάνεται ραγδαία.. η θερμοκρασία στο κέντρο έχει ανάλογη συμπεριφορά ενώ η επίδραση της θερμικής αγωγιμότητας παραμένει σε όλο το φάσμα.

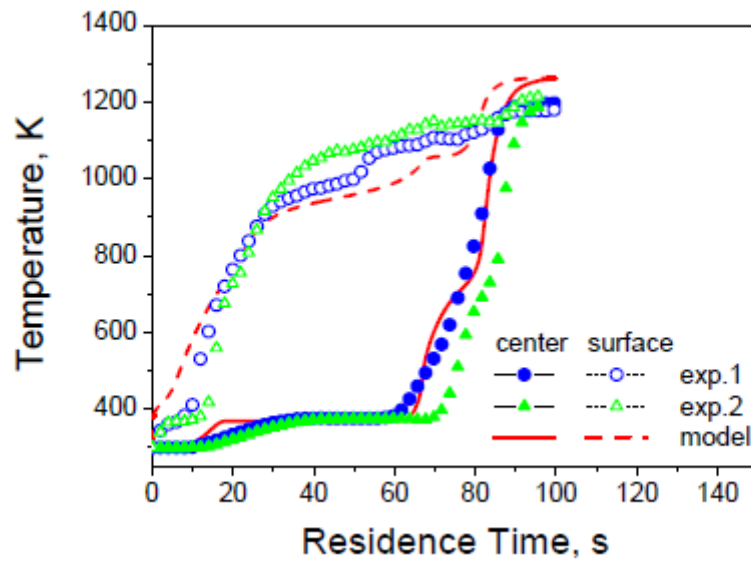
Στην **Εικόνα 1.27** φαίνεται ότι οι μετρούμενες θερμοκρασίες στο κέντρο και στην επιφάνεια αυξάνονται πιο γρήγορα από τις αντίστοιχες προβλεπόμενες. Η ασυμφωνία στην επιφανειακή θερμοκρασία μπορεί να εξηγηθεί από τα διάφορα σφάλματα στην εγκατάσταση του πειράματος. Όταν εισάγεται ένα υγρό σωματίδιο στον αντιδραστήρα, το σωματίδιο αυτό αρχίζει να αποξηραίνεται. Αφού αποξηραίνεται σε κάποιο βαθμό το σωματίδιο αρχίζει να συρρικνώνεται και εν τέλει θρυμματίζεται παρέχοντας επάρκεια επαφής στο θερμοζεύγος. Αντίθετα, για την ασυμφωνία της θερμοκρασίας στο κέντρο των σωματιδίων, η θερμότητα που συνάγεται από το ζεστό περιβάλλον στο θερμοζεύγος μέσω του καλωδίου μπορεί να είναι η κύρια επιρροή στις μετρήσεις της θερμοκρασίας όταν το σωματίδιο είναι μικρό. [18]



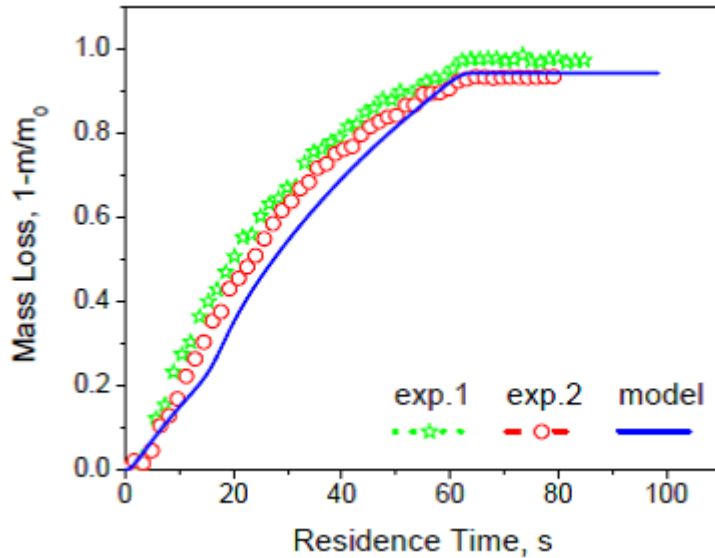
Εικόνα 1.25: θερμοκρασία σωματιδίου με αναλογία διαστάσεων 4, χωρίς υγρασία



Εικόνα 1.26: απώλεια μάζας σωματιδίου με αναλογία διαστάσεων 4, χωρίς υγρασία



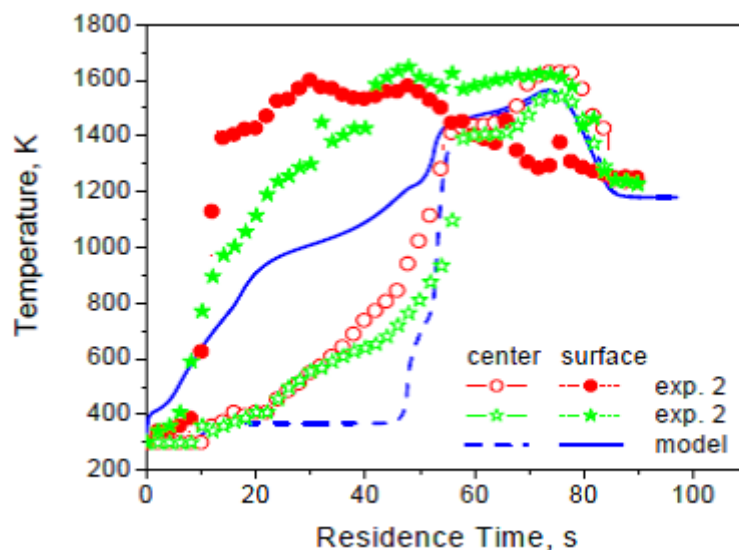
Εικόνα 1.27: θερμοκρασία σωματιδίου με αναλογία διαστάσεων 1, με υγρασία 40%



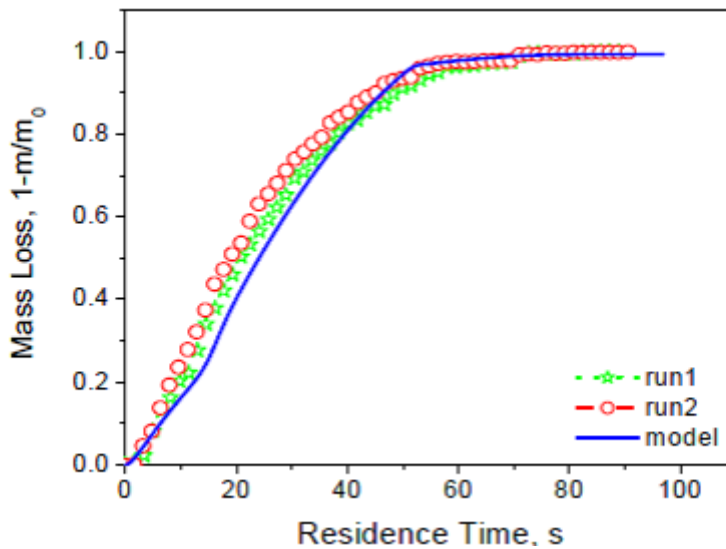
Εικόνα 1.28: απώλεια μάζας σωματιδίου με αναλογία διαστάσεων 1, με υγρασία 40%

Καύση σωματιδίων

Στην **Εικόνα 1.29** απεικονίζεται το θερμοκρασιακό προφίλ από υγρό μη σφαιρικό σωματίδιο με 40% υγρασία διάμετρο 11 mm αναλογία διαστάσεων 1 και θερμοκρασία κλιβάνου 1276 K. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας της καύσης με αέρα. Τα θερμοζεύγη τύπου A και B παρέχουν δεδομένα θερμοκρασίας για πειράματα καύσης αφού το μέγιστο της θερμοκρασίας ξεπερνά το αξιόπιστο εύρος του θερμοζευγών τύπου K. Η μετρούμενη θερμοκρασία της επιφάνειας των σωματιδίων δεν συνάδει με της προβλέψεις του μοντέλου εξαιτίας των συρρικνωμένων σωματιδίων. Η επιφάνεια μειώνεται καθώς συρρικνώνονται τα σωματίδια. Η μετρούμενη θερμοκρασία στο κέντρο των σωματιδίων επίσης διαφέρει από την προβλεπόμενη. Πάντως και τα πειραματικά δεδομένα και τα προβλεπόμενα δείχνουν ότι κατά την καύση η θερμοκρασία των σωματιδίων αυξάνεται σε μία μέγιστη τιμή και μετά αποκλίνει δραματικά. Η απώλεια μάζας προκύπτει συνάρτηση του χρόνου όπως απεικονίζεται στην **Εικόνα 1.30**. [18]



Εικόνα 1.29: θερμοκρασιακό προφίλ από υγρό μη σφαιρικό σωματίδιο



Εικόνα 1.30: Απώλεια μάζας σε υγρό μη σφαιρικό σωματίδιο

1.4.6 Μετατροπή άνθρακα και Εναπόθεση τέφρας

Συνήθως δεν είναι πρακτικό να μειώσουμε το μέγεθος της βιομάζας σ' αυτό της σκόνης του άνθρακα, γιατί η μείωση μεγέθους βιομάζας χρειάζεται περισσότερη ενέργεια από αυτή που χρειάζεται ο άνθρακας.

Οι κύριες γραμμές για τη μετατροπή του άνθρακα είναι [18]:

- Τα σωματίδια του άνθρακα πρέπει να έχουν διάμετρο 3-6mm
- Υπάρχουν καύσιμα στα οποία η περιεκτικότητα σε υγρασία υπερβαίνει το 40%. Για να επιτευχθεί πλήρης καύση πρέπει να μειωθεί αυτό το ποσοστό.
- Οι ρυθμοί καύσης βιομάζας εξαρτώνται από τη γεωμετρία και το μέγεθος, δηλαδή εξαρτώνται από το αν το μέγεθος, το σχήμα, η πυκνότητα και η περιεκτικότητα σε υγρασία είναι ίδια.

1.4.7 Αξιοποίηση ιπτάμενης τέφρας

Πολλοί καυστήρες δε μπορούν να αναμίξουν αποτελεσματικά τα αέρια, με αποτέλεσμα οι συνθέσεις των αερίων να παρουσιάζουν διαφοροποιήσεις κοντά στην έξοδο του καυστήρα, στη στοιχειομετρία και σε άλλες ιδιότητες. Αν τα αέρια δεν αναμιχθούν πλήρως, κάποιες περιοχές του καυστήρα θα εκτεθούν σε μεγαλύτερα ποσοστά βιομάζας απ' όσο πρέπει.

Σε πολλές περιπτώσεις, η χρησιμοποίηση της τέφρας γίνεται μετά την εγκατάσταση, για δύο λόγους:

- Η ακριβής σύνθεση της τέφρας δε μπορεί να προβλεφθεί, γιατί εξαρτάται από το καύσιμο και το τύπο της εγκατάστασης
- Υπάρχει πάντα η επιλογή της υγειονομικής ταφής. Ωστόσο, το κόστος της υγειονομικής ταφής είναι μεγάλο

Η τέφρα που απελευθερώνεται από τη καύση βιομάζας μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν λίπασμα. Κατά την ανάπτυξη των φυτών, τους παρέχονται από το χώμα κάποια θρεπτικά συστατικά. Όταν τα φυτά αυτά συλλέγονται, για να καούν σαν βιομάζα, τα θρεπτικά συστατικά χάνονται. Μετά τη καύση της βιομάζας, τα συστατικά αυτά εμφανίζονται σε μορφή τέφρας, όπου μπορούν να επιστρέψουν πίσω στη γη όπου αναπτύσσεται η βιομάζα. Η πιο προφανής χρήση της, είναι να τη χρησιμοποιήσουμε σαν καύσιμο, γιατί έχει υψηλή θερμογόνο δύναμη. Χρειάζεται όμως προσοχή, γιατί περιέχει πολλούς ρύπους.

Σαν γενικά συμπεράσματα θα μπορούσαν να αναφερθούν πως η καύση βιομάζας με άνθρακα αποτελεί μία ελκυστική λύση για τη μείωση των εκπομπών που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Υπάρχουν επιτακτικοί λόγοι που πρέπει να ακολουθήσουμε αυτή τη λύση, αλλά πρέπει να γίνει προσεκτικά ώστε να μην υπάρξουν αρνητικές συνέπειες. Όλα αυτά είναι διαχειρίσιμα, αλλά απαιτούν προσεκτική εξέταση του καυσίμου και του σχεδιασμού και των συνθηκών λειτουργίας του καυστήρα. [24-26]

1.5 Εμπειρικά δεδομένα από καύση άνθρακα με στερεά ανακτούμενα καύσιμα (SRF)

Η παραγωγή των SRF από ακίνδυνα βιοκατάλοιπα αναμειγμένα με ροές αποβλήτων είναι ένα στοιχείο κλειδί για ένα αναβαθμισμένο εγχείρημα διαχείρισης αποβλήτων και γίνεται ως εξής [18]:

- Πρόληψη αποβλήτων
- Ανάκτηση (Υλικού αντί ενέργειας)
- Τελική Εναπόθεση

Τα SRF είναι σε μορφή δεμάτων ή pellets. Χωρίζονται σε 5 βασικές κατηγορίες **[σύμφωνα με την τυποποίηση 2000/532/EC]:**

- Ξύλο, χαρτί και κουτιά από χαρτόνι
- Υφάσματα και ίνες
- Πλαστικό και καουτσούκ
- Απόβλητα μελανιού, χρησιμοποιημένα αμορτισέρ
- Μεγάλα θερμικά κλάσματα από μη ακίνδυνα ανακατεμένα απόβλητα

Είναι μια καλή περιβαλλοντική επιλογή με οικονομικά και κοινωνικά κριτήρια και υπάρχουν κοινοτικές οδηγίες **[1999/31/EC και 2001/77/ EC]**. Η χρήση των SRF όπως και η καύση ξύλου με άνθρακα βοηθούν στη μείωση των ρύπων που προκαλούν το φαινόμενο του θερμοκηπίου και επίσης είναι αναγκαία διότι δίνουν προοπτική στη βιομηχανία να στρέφεται σε φθηνά καύσιμα.

Όσον αφορά την ταξινόμηση [CEN/TS 15359] και τυποποίηση [CEN/TC 343] των SRF, γίνεται με συγκεκριμένους κανόνες. Τα κριτήρια με τα οποία γίνεται η τυποποίηση είναι τα εξής:

- Καθαρή θερμογόνο δύναμη >3-45 MJ/kg
- Περιεχόμενο Χλωρίου <0,1-6%
- Περιεχόμενο Υδραργύρου , 0,02- 0,5 mg/MJ

Υπάρχουν διάφοροι μέθοδοι για την ανάλυση των δυνατοτήτων των SRF. Οι προηγμένοι μέθοδοι δίνουν στοιχεία για τον χρόνο καύσης των σωματιδίων για την αεροδυναμική συμπεριφορά, όπως και για το μέγιστο απαιτούμενο μέγεθος των σωματιδίων για πλήρη καύση. Για τα παραπάνω, εκτός από τις συμβατικές πειραματικές μεθόδους σε κωνοροτοποιημένα συστήματα καύσης, τσιμεντένιους κλιβάνους κλπ, υπάρχουν συστήματα προσομοίωσης καύσης σε CFD για βελτιστοποίηση συνθηκών καύσης και συμπεριφοράς. Όταν τα SRF καίγονται με άνθρακα, σε καυστήρες για κωνοροτοποιημένα καύσιμα πρέπει να έχουν μέγεθος 10-20 mm. Έχουν υπάρξει διάφορα εγχειρήματα άμεσης καύσης άνθρακα με SRF.

Τα περιβαλλοντικά και λειτουργικά προβλήματα που εντοπίστηκαν και χρήζουν βελτιστοποίησης είναι τα εξής:

- Λειτουργία/Απόδοση Καυστήρα (συμπεριλαμβανομένου επικαθίσεων και διάβρωσης)
- Αυξανόμενη απενεργοποίηση των καταλυτών για NO_x
- Μειωμένη απόδοση ESP
- Περιορισμός ρύπων (HCl, Hg)
- Ποιότητα και χρήση κατακαθιών και υπολειμμάτων

1.6 ΚΑΥΣΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΣΕ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΚΛΙΝΗ ΓΙΑ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟ ΚΑΙ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Κεντρική ιδέα είναι η καύση κάποιου καυσίμου σε μια αεριωθούμενη κλίνη με αδρανή σωματίδια. Το υλικό της κλίνης είναι αρκετά μεγαλύτερο από το καύσιμο (98%-2%). Η καύση σε ρευστοποιημένη κλίνη (Fluidized Bed Combustion-FBC) περιορίζει την περιβαλλοντική επίδραση ελέγχοντας τους ρύπους SO_x και NO_x. Υπάρχουν 2 είδη κλινών. Η Bubbling Fluidized Bed (**BFB**) με ταχύτητα αέρα 1-3m/s και η Circulating Fluidized Bed (**CFB**) με ταχύτητα αέρα 3-6 m/s. Σε BFB το υλικό της κλίνης δεν απομακρύνεται ενώ σε CFB ανακυκλώνονται στο φούρνο με τη βοήθεια διακομιστή. Και τα δύο είδη κλινών έχουν θερμοκρασία λειτουργίας περίπου 800°C - 900°C [27].

Τρία θέματα προς συζήτηση σε CFB, είναι η τροφοδοσία καυσίμου και η ποιότητα (ποικιλία καυσίμων σε ιδιότητες, προετοιμασία), η λειτουργία (συσσώρευση σωματιδίων, διάβρωση) και η περιβαλλοντική πλευρά (ρύποι, τέφρα). Μερικές από τις ιδιότητες της βιομάζας που έχουν σημασία σε κλίνη είναι [18]:

- Το υψηλό πτητικό περιεχόμενο τις βιομάζας και ο μικρός βαθμός έκλυσης θερμότητας
- Για την θερμογόνο δύναμη ισχύει ότι η παρουσία άνθρακα και υδρογόνου την αυξάνει ενώ σε μεγάλους βαθμούς οξειδωσης μειώνεται
- Η περιεκτικότητα σε χλώριο κυμαίνεται από 0,1-2%
- Η περιεκτικότητα σε στάχτη για είδη ξύλου είναι κάτω από 1% και χαμηλά ποσοστά έχουν επίσης τα γεωργικά υπολείμματα. Η ποιοτική ανάλυση της στάχτης της βιομάζας διαφέρει από τον άνθρακα και περιέχει αλκάλια, μέταλλα και πυρίτιο
- Η υγρασία κυμαίνεται από 25-60%

1.6.1 Διάβρωση/ Εναπόθεση και συσσώρευση Τέφρας

Ένα πρόβλημα που παρατηρείται είναι η σταδιακή μείωση του βαθμού μετάδοσης θερμότητας εξ' αιτίας των επικαθίσεων που συσσωρεύονται στον εξοπλισμό της κλίνης. Και ενώ το σκούριασμα που προκαλείται διορθώνεται με καθαρισμό όταν δεν δουλεύει η κλίνη, η διάβρωση είναι μόνιμη και επηρεάζει το χρόνο ζωής του εξοπλισμού. Τα στοιχεία που τα προκαλούν είναι οι αλκαλικές ενώσεις, το θείο και το χλώριο. Ορισμένα είδη βιομάζας έχουν μεγάλες συγκεντρώσεις θείου και αλκαλίων όπως το άχυρο και τα κατάλοιπα της γεωργίας. Γι' αυτό σε πολλές μελέτες προτείνεται η χρήση προσθετικών όπως βωξίτης, ο ασβεστόλιθος και καολινίτης, στοιχεία τα οποία μειώνουν εν μέρει το ρυθμό επικαθίσεων και διάβρωσης.

Αναφέρεται στην συσσώρευση στάχτης που γίνεται στα σωματίδια της κλίνης. Επηρεάζεται κυρίως από αλκαλικές συγκεντρώσεις σε τέφρα και από την θερμοκρασία ρευστοποίησης. Η παρουσία σωματιδίων συσσώρευσης παρατηρείται από τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας και τις συχνές πτώσεις πίεσης στην κλίνη. Προτείνεται η χρήση συνθετικών ενώ η καύση βιομάζας με άνθρακα βοηθάει στη μείωση της συσσώρευσης. Μία επίσης ελκυστική λύση είναι η χρήση εναλλακτικών υλικών κλίνης όπως αναδεικνύουν οι τεχνολογίες ECOFLUID, BioCOM.

Όσον αφορά την περιβαλλοντική σκοπιά σε FBC, το μεγάλο πλεονέκτημα της βιομάζας είναι ότι είναι ανανεώσιμο καύσιμο με αμελητέες ή ακόμα και καθόλου εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Βέβαια, υπάρχουν οι ρύποι που χωρίζονται σε 2 κατηγορίες [18]:

Άκαυστοι Ρύποι

- Πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες
- Διοξίνες
- Μονοξειδίο του άνθρακα

Ρύποι παραγόμενη κατά την διάρκεια καύσης:

- Οξειδία του αζώτου και του θείου

- Όξινα αέρια και σκόνη
- Βαριά μέταλλα

Υπάρχουν διάφοροι μέθοδοι για την αντιμετώπιση των συγκεκριμένων ρύπων και ακόμα και αν αυτοί αποτυγχάνουν να καλύψουν τα επιτρεπτά περιβαλλοντικά όρια τότε υιοθετούνται μέθοδοι καθαρισμού των καυσαερίων (π.χ. SCR) [18].

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία δε χρησιμοποιήθηκε κανένα από τα παραπάνω πρότυπα ή πειράματα. Σκοπός της είναι η μελέτη της ροής και της καύσης σε πρότυπο λέβητα και το καύσιμο που επιλέχθηκε αποτελείται από 64% από άνθρακα, 28% πτητικά, ενώ το υπόλοιπο 8% είναι τέφρα και αδρανή στοιχεία. Στο επόμενο Κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα όλα τα αριθμητικά μοντέλα και οι εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος.

2. Αριθμητικά μοντέλα και εξισώσεις

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα μελετηθούν και θα αναλυθούν με λεπτομέρειες όλα τα μοντέλα και όλες οι εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν σ' αυτή τη διπλωματική. Πιο συγκεκριμένα, θα αναλυθούν οι εξισώσεις Navier – Stokes, τα μοντέλα τύρβης, ενέργειας και ακτινοβολίας. Επίσης, θα αναλυθούν οι εξισώσεις διατήρησης χημικών στοιχείων, οι εξισώσεις κίνησης και η τυρβώδης διασπορά των σωματιδίων. Τέλος, θα αναλυθεί το μοντέλο ψεκασμού των σωματιδίων και η σύνδεση Διακριτής και Συνεχής φάσης.

2.1 Εξισώσεις Navier - Stokes

Η τύρβη περιλαμβάνει τις διακυμάνσεις του ροϊκού πεδίου στο χώρο και στο χρόνο. Πρόκειται για μία πολύπλοκη διαδικασία, κυρίως επειδή είναι τρισδιάστατη και ασταθής. Τύρβη εμφανίζεται όταν οι δυνάμεις αδράνειας του ρευστού γίνονται πιο σημαντικές από τις ιξώδεις δυνάμεις και χαρακτηρίζεται από μεγάλους αριθμούς Reynolds. Γενικά οι εξισώσεις Navier – Stokes περιγράφουν μαζί στρωτές και τυρβώδεις ροές.

Για να καταστεί ικανό να προβλέπονται τα αποτελέσματα της τύρβης, μεγάλο τμήμα της CFD έρευνας έχει επικεντρωθεί σε μεθόδους οι οποίες κάνουν χρήση υπολογιστικών μοντέλων τύρβης. Τα μοντέλα τύρβης αναπτύχθηκαν για να ερευνήσουν τις επιδράσεις, τα αποτελέσματα της τύρβης, χωρίς να κρίνεται αναγκαία η χρήση κάποιας απευθείας αριθμητικής ανάλυσης. Τα περισσότερα μοντέλα τύρβης είναι στατικά μοντέλα. Οι μοναδικές εξαιρέσεις είναι το μοντέλο Large Eddy Simulation (Προσομοίωση Μεγάλης Δίνης) και το μοντέλο Detached Eddy Simulation. Πολύ συνηθισμένο στην επίλυση βιομηχανικών ροών είναι το μοντέλο $k - \epsilon$.

Τα λεγόμενα “δύο εξισώσεων μοντέλα τύρβης” (two equation turbulence models) χρησιμοποιούνται ευρέως διότι επιτυγχάνουν ένα καλό συμβιβασμό μεταξύ της αριθμητικής προσπάθειας και της υπολογιστικής ακρίβειας. Αυτά τα μοντέλα είναι περισσότερο πολύπλοκα από τα zero equation models. Η ταχύτητα και το μήκος κλίμακας επιλύονται χρησιμοποιώντας ξεχωριστές εξισώσεις μεταφοράς.

Το CFD δεν αναπαράγει φυσικές εξισώσεις. Σε οτιδήποτε αφορά, για παράδειγμα τη τύρβη, την προσομοιάζει με την εμπειρική βάση δεδομένων. Βελτιώνεται διαρκώς ο

υπολογισμός της τύρβης σε προβλήματα καθώς όλες οι τυρβώδης ροές υπόκεινται στην εξίσωση Navier -Stokes.

Οι εξισώσεις Navier -Stokes απορρέουν από την εξίσωση της συνέχειας και τις εξισώσεις ορμής . Η εξίσωση της συνέχειας φαίνεται στην **Εξίσωση 2.1** [28].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = S_m \quad (2.1)$$

Όπου,

$\frac{\partial \rho}{\partial t}$: μεταβολή μάζας στο χρόνο

$\nabla \cdot (\rho \vec{u})$: εισερχόμενη μάζα στην επιφάνεια ελέγχου

S_m : σημειακές πηγές ή καταβόθρες μάζας

Επειδή στη συγκεκριμένη εργασία έγινε ανάλυση σταθερής κατάστασης και δεν υπάρχουν πηγές ή καταβόθρες μάζας η **Εξίσωση 2.1** γίνεται:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (2.2)$$

Η εξίσωση της ορμής φαίνεται στην **Εξίσωση 2.3**:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{u}) + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = - \nabla p + \nabla(\bar{\tau}) + \rho g + \vec{F} \quad (2.3)$$

όπου:

$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{u})$: χρονική μεταβολή της ορμής στον όγκο ελέγχου

$\nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u})$: εισερχόμενη ορμή από την επιφάνεια ελέγχου

∇p : χωρική μεταβολή στατικής πίεσης

$\nabla(\bar{\tau})$: χωρική μετάβολή ορθών και διατμητικών τάσεων

ρg : δυνάμεις βαρύτητας

F : εξωτερικές δυνάμεις

Επειδή στη συγκεκριμένη εργασία έγινε ανάλυση σταθερής κατάστασης και δεν υπάρχουν εξωτερικές δυνάμεις η **Εξίσωση 2.3** γίνεται:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u}\vec{u}) = -\nabla p + \nabla(\bar{\tau}) + \rho g \quad (2.4)$$

2.2 Μοντελοποίηση Τύρβης

2.2.1 Γενική εικόνα

Το μοντέλο Standard k – ε βασίζεται στη μοντελοποίηση της τυρβώδους κινητικής ενέργειας k (m²/s²) και τη τυρβώδη απώλεια δινών ε (m²/s³). Για τη παραγωγή του συγκεκριμένου μοντέλου έγινε η παραδοχή πως η ροή είναι πλήρως τυρβώδης και ότι οι επιδράσεις του μοριακού ιξώδους είναι αμελητέες. Όποτε το μοντέλο Standard k – ε είναι έγκυρο μόνο για ροές που είναι πλήρως τυρβώδης. Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε στη παρούσα Εργασία είναι το Realizable k-ε, το οποίο διαφέρει από το Standard k – ε σε δύο σημαντικούς τομείς [29]:

- Το μοντέλο realizable k-ε περιέχει μία διαφορετική διατύπωση για το τυρβώδες ιξώδες
- Το μοντέλο realizable k-ε περιέχει μία τροποποιημένη εξίσωση μεταφοράς για τη τυρβώδη απώλεια δινών, ε

Ο όρος “realizable” σημαίνει ότι το μοντέλο ικανοποιεί ορισμένους μαθηματικούς περιορισμούς για τις τάσεις Reynolds, σύμφωνα με τη φυσική των ροών με τύρβη. Ούτε το μοντέλο standard k-ε, ούτε το μοντέλο RNG k-ε δε θεωρούνται “realizable” .

Στο συγκεκριμένο μοντέλο, πρέπει να συνδυάσουμε την εξίσωση Boussinesq (**Εξίσωση 2.5**) [30] και την **Εξίσωση 2.6** [31].

$$-\overline{\rho u_i' u_j'} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \quad (2.5)$$

Έτσι προκύπτει η ακόλουθη εξίσωση για τις τάσεις Reynolds για ασυμπίεστη ροή

$$\overline{u^2} = \frac{2}{3} k - 2\nu_t \frac{\partial U}{\partial x} \quad (2.6)$$

Το μοντέλο realizable k-ε δημιουργήθηκε για να καλύψει τις αδυναμίες των παραδοσιακών μοντέλων k – ε [30] και αυτό έγινε υιοθετώντας τα ακόλουθα:

- Μία καινούργια διατύπωση για το τυρβώδες ιξώδες περιλαμβάνοντας μία μεταβλητή, C_μ, προτεινόμενη κατά τον αριθμό Reynolds [32]

- Μία καινούργια εξίσωση για τη τυρβώδη απώλεια δινών ε , βασισμένη σε μία δυναμική εξίσωση του μέσου τετραγώνου της διακύμανσης της στροβιλότητας

Ο μόνος περιορισμός για το μοντέλο realizable k-ε είναι ότι παράγει μη φυσικά τυρβώδη ιξώδη σε περιπτώσεις που ο χώρος που γίνονται οι υπολογισμοί αποτελείται από περιστρεφόμενες και σταθερές ζώνες ροής [31].

2.2.2 Εξισώσεις μεταφοράς για το μοντέλο Realizable k-ε

Οι εξισώσεις μεταφοράς για το k και το ε στο συγκεκριμένο μοντέλο φαίνονται στις Εξισώσεις 2.7 και 2.8, αντίστοιχα.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (2.7)$$

και

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \end{aligned} \quad (2.8)$$

Όπου

$$C_1: \max \left[0.43, \frac{n}{n+5} \right]$$

$$n = S \frac{k}{\varepsilon}$$

$$S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}$$

Στις παραπάνω εξισώσεις το G_k αντιπροσωπεύει τη παραγωγή της τυρβώδους κινητικής ενέργειας λόγω των κύριων βαθμίδων ταχύτητας και το G_b τη παραγωγή της τυρβώδους κινητικής ενέργειας λόγω άνωσης.

Ο όρος Y_M αντιπροσωπεύει τη συνεισφορά των διακυμάνσεων συστολής στη συμπιεστή στροβιλότητα, στο συνολικό βαθμό διάχυσης. Οι ποσότητες σ_k και σ_ε είναι οι αντίστροφοι αριθμοί Prandtl για το k και το ε , αντίστοιχα. Το S_k και το S_ε είναι όροι που ορίζονται από το χρήση [31].

2.2.3 Μοντελοποίηση του τυρβώδους ιξώδους

Όπως και στα υπόλοιπα μοντέλα $k - \varepsilon$ το τυρβώδες ιξώδες υπολογίζεται από [31]:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.9)$$

Η διαφορά μεταξύ του Realizable και του RNG και Standard μοντέλου, είναι ότι πλέον ο όρος c_μ δεν είναι πια σταθερός, αλλά υπολογίζεται από τη παρακάτω εξίσωση:

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{kU^*}{\varepsilon}} \quad (2.10)$$

Όπου

$$U^* \equiv \sqrt{S_{ij}S_{ij} + \widetilde{\Omega}_{ij}\widetilde{\Omega}_{ij}}$$

$$A_0 = 4.04$$

$$A_s = \sqrt{6} \cos \varphi$$

με

$$\varphi = \frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6}W)$$

όπου

$$W = \frac{S_{ij}S_{jk}S_{ki}}{\widetilde{S}^3}$$

$$\widetilde{S} = \sqrt{S_{ij}S_{ij}}$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)$$

και

$$\widetilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2\varepsilon_{ijk}\omega_k$$

$$\Omega_{ij} = \overline{\Omega_{ij}} - \varepsilon_{ijk}\omega_k$$

Οι σταθερές του μοντέλου είναι $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_2 = 1.9$, $\sigma_k = 1.0$ και $\sigma_\varepsilon = 1.2$ [31]

2.3 Εξίσωση Ενέργειας

Το ANSYS FLUENT επιλύει την εξίσωση ενέργειας στην ακόλουθη μορφή:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla(\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla(k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + \bar{\tau}_{eff} \vec{v})) + S_h \quad (2.11)$$

όπου

k_{eff} : η συνολική θερμική αγωγιμότητα ($k + k_t$, όπου το k_t είναι η τυρβώδης θερμική αγωγιμότητα και ορίζεται ανάλογα με το μοντέλο τύρβης που χρησιμοποιείται)

\vec{J}_j : είναι η ροή διάχυσης των j στοιχείων

S_h : περιλαμβάνει την θερμότητα της χημικής αντίδρασης και οποιαδήποτε άλλη πηγή θερμότητας που έχει οριστεί

Οι τρεις πρώτοι όροι του αριστερού μέλους της εξίσωσης αναπαριστούν την μεταφορά ενέργειας λόγω συναγωγής, διάχυσης των στοιχείων και της ιξώδους διάχυσης αντίστοιχα.

Επίσης στην παραπάνω εξίσωση:

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} \quad (2.12)$$

όπου η ενθαλπία ορίζεται για τα ιδανικά αέρια ως εξής:

$$h = \sum_j Y_j h_j \quad (2.13)$$

και για ασυμπίεστες ροές:

$$h = \sum_j Y_j h_j + \frac{p}{\rho} \quad (2.14)$$

Το Y_j είναι το κλάσμα μάζας των στοιχείων j , ενώ το h_j :

$$h_j = \int_{T_{ref}}^T c_{p,j} dT \quad (2.15)$$

Η τιμή που χρησιμοποιείται ως θερμοκρασία αναφοράς για τον υπολογισμό της ενθαλπίας εξαρτάται από τον solver και τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται. Για solver που επιλύουν με βάση την πίεση η θερμοκρασία αναφοράς είναι 298.15K ενώ για solver που έχουν βάση την πυκνότητα όπου είναι μηδέν Kelvin.

Η εξίσωση της ενέργειας επιλύεται και σε κινούμενο πλαίσιο αναφοράς ως εξής:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla (\rho \vec{v} H) = \nabla (k \nabla T + \bar{\tau} \vec{v}) + S_h \quad (2.16)$$

όπου E είναι η σχετική εσωτερική ενέργεια και H η σχετική συνολική ενθαλπία, γνωστή και ως ροθαλπία. οι μεταβλητές αυτές ορίζονται ως εξής:

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{1}{2} (v^2 - u^2) \quad (2.17)$$

$$H = E + \frac{p}{\rho} \quad (2.18)$$

Στην **Εξίσωση 2.11** περιγράφεται και η θερμική ενέργεια η οποία δημιουργείται από τις ιξώδης διατμήσεις. Όταν χρησιμοποιείται solver που επιλύει με βάση την πίεση, η αρχική μορφή της εξίσωσης ενέργειας δεν τις περιλαμβάνει. Η μεταφορά θερμότητας λόγω δινών (Viscous Heating) είναι σημαντική όταν ο αριθμός Brackman προσεγγίζει ή ξεπερνά τη μονάδα. Όπου αριθμός Brackman ο εξής:

$$Br = \frac{\mu U_e^2}{k \Delta T} \quad (2.19)$$

Όταν το πρόβλημα που έχουμε το να συμπεριληφθούν οι όροι της ιξώδους διάχυσης και χρησιμοποιείται solver που επιλύει με βάση την πίεση πρέπει να ενεργοποιηθεί η επιλογή του Viscous heating. Οι συμπιεστές ροές έχουμε αριθμό Brackman μεγαλύτερο της μονάδας.

Σε ότι αφορά την θερμότητα που απορρέει από τις χημικές αντιδράσεις, S_h :

$$S_h = - \sum_j \frac{h_j^0}{M_j} R_j \quad (2.20)$$

όπου :

h_j^0 : η ενθαλπία σχηματισμού των στοιχείων j

R_j : ο ρυθμός αντίδρασης των στοιχείων j

Επίσης, όταν χρησιμοποιείται ένα μοντέλο ακτινοβολίας, η ακτινοβολία περιλαμβάνεται στην θερμότητα κατά την διάρκεια των χημικών αντιδράσεων όπως περιγράφεται στο παρακάτω κεφάλαιο. [31]

2.4 Μοντελοποίηση ακτινοβολίας

Ο σκοπός της μοντελοποίησης της ακτινοβολίας είναι η επίλυση της εξίσωσης μεταφοράς της ακτινοβολίας για να προσδιοριστεί ο όρος S στην εξίσωση ενέργειας και η ακτινοβολούμενη θερμότητα στα τοιχώματα. Υπάρχουν πολλά μοντέλα ακτινοβολίας όπως το Rosseland, το P1, το Discrete Transfer, το Monte Carlo και το Spectral. Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία επιλέχθηκε το μοντέλο P1, το οποίο θα αναλυθεί παρακάτω.

2.4.1 Μοντέλο P₁

Το μοντέλο ακτινοβολίας P₁ είναι η πιο απλή περίπτωση από τα P_N μοντέλα, το οποίο στηρίζεται στη διεύρυνση της έντασης της ακτινοβολίας σε μια ορθογωνική σειρά από σφαιρικές αρμονικές. Όταν μοντελοποιείται η gray radiation, η παρακάτω εξίσωση δηλώνει την ροή ακτινοβολίας q_r [31]:

$$q_r = - \frac{1}{3(a + \sigma_s) - C\sigma_s} \nabla G \quad (2.21)$$

όπου:

a : συντελεστής απορρόφησης

σ_s : συντελεστής σκέδασης

G : υπάρχουσα ακτινοβολία

C : συντελεστής της γραμμικής ανισότροπης φάσης της εξίσωσης

Επίσης, εισάγεται η παρακάτω παράμετρος:

$$\Gamma = \frac{1}{(3(a + \sigma_s) - C\sigma_s)} \quad (2.22)$$

Έτσι η Εξίσωση 2.21 μετατρέπεται ως εξής:

$$q_r = -\Gamma \nabla G \quad (2.23)$$

Η εξίσωση μεταφοράς για την υπάρχουσα ακτινοβολία αναλύεται ως εξής:

$$\nabla(\Gamma \nabla G) - \alpha G + 4an^2\sigma T^4 = s_G \quad (2.24)$$

όπου

n: διαθλαστικός δείκτης του μέσου

σ : σταθερά Stefan-Boltzmann

Το ANSYS FLUENT επιλύει την αυτήν την εξίσωση για να προσδιορίσει την τοπική υπάρχουσα ακτινοβολία όταν το P1 μοντέλο είναι ενεργοποιημένο. Συνδυάζοντας τις Εξισώσεις 2.23 και 2.24 προκύπτει η εξής εξίσωση [31]:

$$-\nabla q_r = \alpha G - 4an^2\sigma T^4 \quad (2.25)$$

Η έκφραση $-\nabla q_r$ υποκαθίσταται ευθέως σε εξίσωση ενέργειας που υπολογίζει τις πηγές θερμότητας εξαιτίας της ακτινοβολίας.

Το ANSYS FLUENT επίσης επιτρέπει την μοντελοποίηση non-gray radiation χρησιμοποιώντας gray-band model. Για non-gray radiation η **Εξίσωση 2.24** τροποποιείται ως εξής:

$$\nabla(\Gamma_\lambda \nabla G_\lambda) - \alpha_\lambda G_\lambda + 4\alpha_\lambda n^2 \sigma T^4 = s_{G\lambda} \quad (2.26)$$

όπου

G_λ : φασματική υπάρχουσα ακτινοβολία

α_λ : συντελεστής φασματικής απορρόφησης

n: διαθλαστικός δείκτης του μέσου

$s_{G\lambda}$: όρος που καθορίζεται από το χρήστη

σ : σταθερά Stefan-Boltzmann

Επίσης ο όρος Γ_λ προσδιορίζεται ως εξής:

$$\Gamma_\lambda = \frac{1}{(3(\alpha_\lambda + \sigma_{s\lambda}) - C\sigma_{s\lambda})} \quad (2.27)$$

όπου:

$\sigma_{s\lambda}$: συντελεστής φασματικής σκέδασης

C : συντελεστής της γραμμικής ανισότροπης φάσης της εξίσωσης

Η φασματική εκπομπή μαύρου σώματος (spectral black body emission) $G_{b\lambda}$ μεταξύ των μηκών κυμάτων λ_1 και λ_2 δίνεται ως [31]:

$$G_{b\lambda} = 4[F(0 \rightarrow \eta\lambda_2 T) - F(0 \rightarrow \eta\lambda_1 T)]\sigma T^4 \quad (2.28)$$

όπου

$F(0 \rightarrow \eta\lambda T)$: κλάσμα της ακτινοβολούσας ενέργειας η οποία εκπέμπεται από ένα μαύρο σώμα σε διάστημα μήκους κύματος από 0 έως λ σε θερμοκρασία T σε ένα μέσο με διαθλαστικό δείκτη n . Η φασματική ακτινοβολούσα ροή υπολογίζεται ως εξής:

$$q_\lambda = -\Gamma_\lambda \nabla G_\lambda \quad (2.29)$$

Ο όρος της πηγής ακτινοβολίας στην εξίσωση ενέργειας δίνεται ως εξής:

$$-\nabla q_r = \sum_{All\ Bands} -\nabla q_{r,\lambda} = \sum_{All\ Bands} \alpha_\lambda (G_\lambda - n^2 G_{b\lambda}) \quad (2.30)$$

2.5 Εξισώσεις διατήρησης χημικών στοιχείων

Το μοντέλο μεταφοράς σωματιδίων, είναι ένας τύπος πολλαπλού μοντέλου, κατά το οποίο τα σωματίδια εντοπίζονται στη ροή με τη βοήθεια των εξισώσεων του Lagrange και όχι του Euler. Η ολοκληρωμένη προσομοίωση της κίνησης των σωματιδίων πραγματοποιείται

με τη βοήθεια δειγματοληψίας. Ο προσδιορισμός θέσης των σωματιδίων γίνεται με την επίλυση μιας ομάδας διαφορικών εξισώσεων για κάθε ένα σωματίδιο. Οι διαφορικές εξισώσεις έχουν να κάνουν με τον προσδιορισμό της θέσης, της ταχύτητας, της θερμοκρασίας και της μάζας των σωματιδίων. Στη συνέχεια, οι εξισώσεις αυτές ολοκληρώνονται, δίνοντας μια εικόνα για τη συμπεριφορά των σωματιδίων καθώς αυτά περνούν μέσα από την εξεταζόμενη περιοχή. Μια σύντομη περιγραφή της μεθοδολογίας για τον καθορισμό των σωματιδίων παρατίθεται παρακάτω.

Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των σωματιδίων είναι η μέθοδος Lagrange. Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο υπολογισμού σωματιδίων η ροή των σωματιδίων μοντελοποιείται από τον υπολογισμό μερικών εξ' αυτών που κυκλοφορούν εντός αυτής της ροής. Τα σωματίδια μπορεί να είναι στερεά (όπως και στην περίπτωση καύσης στερεών σωματιδίων άνθρακα), σταγονίδια ή ακόμα και μικρές περιοχές παγιδευμένου αέρα.

Κατά τη μέθοδο Lagrange, που χρησιμοποιεί το Fluent, ανεξάρτητα σωματίδια υπολογίζονται από το σημείο της εισαγωγής τους και κατά μήκος ροής της εξεταζόμενης γεωμετρίας, εκτός και αν εκπληρωθούν κάποιες αρχικές οριακές συνθήκες από ορίστηκαν από το χρήστη κατά το σχεδιασμό του προβλήματος. Κάθε σωματίδιο εγχέεται με σκοπό την αλληλεπίδραση του με την κύρια μάζα του ρευστού και προκαλεί μεταβολές στις εξισώσεις ορμής και ενέργειας. Επειδή κάθε σωματίδιο υπολογίζεται από το σημείο εισαγωγής του μέχρι και την έξοδο από την εξεταζόμενη γεωμετρία, θεωρείται πως η μελέτη ροής γίνεται σε σταθερή κατάσταση.

2.5.1 Ογκομετρικές Αντιδράσεις

2.5.1.1 Εξισώσεις Μεταφοράς για τα στοιχεία

Όταν επιλέγεται να λυθούν εξισώσεις διατήρησης για χημικά στοιχεία, το Ansys Fluent προβλέπει ένα τοπικό κλάσμα μάζας για κάθε στοιχείο, Y_i , κατά τη λύση μιας εξίσωσης μεταφοράς-διάχυσης για κάθε στοιχείο i . Αυτές οι εξισώσεις διατήρησης παίρνουν τη παρακάτω γενική μορφή όπως φαίνεται στην **Εξίσωση 2.31** [31].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i + S_i \quad (2.31)$$

Όπου R_i είναι ο συνολικός βαθμός παραγωγής στοιχείων i από τις χημικές αντιδράσεις και S_i είναι ο βαθμός επιπρόσθετης παραγωγής, συν την οποιαδήποτε πηγή που έχει καθοριστεί από το χρήστη.

2.5.1.1.1 Διάχυση μάζας σε τυρβώδη ροή

Στις τυρβώδεις ροές, το Ansys Fluent υπολογίζει τη διάχυση μάζας σύμφωνα με την **Εξίσωση 2.44** [31].

$$\vec{J}_i = -\left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_t}\right) \nabla Y_i - D_{T,i} \frac{\nabla T}{T} \quad (2.32)$$

Όπου Sc_t είναι ο αριθμός Schmidt, μ_t είναι το τυρβώδες ιξώδες και D_T είναι η διαχυτότητα στροβιλισμού. Ο όρος Sc_t είναι προεπιλεγμένος και έχει τη τιμή 0.7.

2.5.1.1.2 Επίδραση της μεταφοράς στοιχείων στην εξίσωση της ενέργειας

Για πολυσύνθετες ροές ανάμιξης, η μεταφορά ενθαλπίας ($\nabla[\sum_{i=1}^n h_i \vec{j}_i]$), λόγω διάχυσης των στοιχείων μπορεί να έχει σημαντική επίπτωση στο συνολικό πεδίο της ενθαλπίας και δε πρέπει να αγνοείται. Ειδικότερα, όταν ο αριθμός Lewis για οποιοδήποτε στοιχείο απέχει πολύ από τη μονάδα, αγνοώντας αυτόν το όρο μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά σφάλματα. Το Ansys Fluent έχει προεπιλεγμένο τον αριθμό αυτό και γενικά υπολογίζεται σύμφωνα με την **Εξίσωση 2.45**, όπου k είναι η θερμική αγωγιμότητα [31].

$$Le_i = \frac{k}{\rho c_p D_{i,m}} \quad (2.33)$$

2.5.1.1.3 Διάχυση στις εισόδους

Για τους τρόπους επίλυσης των εξισώσεων που βασίζονται στη πίεση στο Ansys Fluent, η συνολική μεταφορά των στοιχείων στις εισόδους περιλαμβάνει και τη μεταφορά και τη διάχυση. Για τους τρόπους επίλυσης των εξισώσεων που βασίζονται στη πυκνότητα περιλαμβάνεται μόνο η μεταφορά. Η μεταφορά ορίζεται από το κλάσμα μάζας των στοιχείων που εισέρχονται και αυτά ορίζονται από το χρήστη. Η διάχυση εξαρτάται από τον βαθμό των στοιχείων που υπολογίζονται στην είσοδο, οπότε δε μπορεί να προσδιορισθεί εκ των προτέρων [31].

2.5.1.2 Γενικευμένη χημική αντίδραση με πεπερασμένη ταχύτητα για το μοντέλο αντίδρασης (The Generalized Finite-Rate Formulation for Reaction Modeling)

Στη παρούσα Διπλωματική εργασία για την αλληλεπίδραση τύρβης-χημείας (Turbulence – Chemistry Interaction) χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο “Finite – Rate/Eddy – Dissipation”. Το συγκεκριμένο μοντέλο υπολογίζει και το ρυθμός Arrhenius και το ρυθμό ανάμιξης (mixing rate) (που αναλύονται στη συνέχεια) και χρησιμοποιεί το μικρότερο από τα δύο.

2.5.1.2.1 Το μοντέλο “Laminar Finite-Rate”

Το συγκεκριμένο μοντέλο υπολογίζει τους χημικούς όρους, χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις Arrhenius. Είναι ακριβές για στρωτές ροές, αλλά ανακριβές για τυρβώδης ροές. Το κάθε στοιχείο i λόγω της αντίδρασης, υπολογίζεται από τις αντιδράσεις Arrhenius σύμφωνα με τις N_R αντιδράσεις που το στοιχείο παίρνει μέρος όπως φαίνεται στην **Εξίσωση 2.34**. [31]

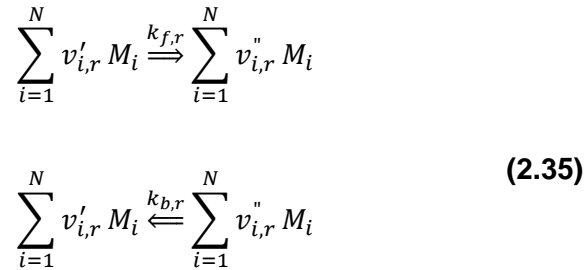
$$R_i = M_{w,i} \sum_{r=1}^{N_R} \hat{R}_{i,r} \quad (2.34)$$

Όπου

$M_{w,i}$: μοριακό βάρος του κάθε στοιχείου

$\hat{R}_{i,r}$: μοριακός ρυθμός Arrhenius παραγωγή/καταστροφή του κάθε στοιχείου για κάθε αντίδραση r

Η εξίσωση r γράφεται με τη γενική μορφή, όπως φαίνεται στην **Εξίσωση 2.35** [31].



Όπου

N : αριθμός χημικών στοιχείων

$v'_{i,r}$: στοιχειομετρικός συντελεστής των αντιδρώντων i σε κάθε αντίδραση r

$v''_{i,r}$: στοιχειομετρικός συντελεστής των προϊόντων i σε κάθε αντίδραση r

M_i : σύμβολο που υποδηλώνει τα στοιχεία i

$k_{f,r}$: forward rate constant for reaction r

$k_{b,r}$: backward rate constant for reaction r

Για μη αντιστρεπτή αντίδραση ο μοριακός βαθμός παραγωγής/καταστροφής των στοιχείων i στην αντίδραση r δίνεται στην **Εξίσωση 2.36** [31].

$$\hat{R}_{i,r} = \Gamma(v''_{i,r} - v'_{i,r}) \left(k_{f,r} \prod_{j=1}^N [C_{j,r}]^{(n'_{j,r} + n''_{j,r})} \right) \quad (2.36)$$

Όπου,

$C_{j,r}$: μοριακή συγκέντρωση των στοιχείων j στην αντίδραση r

$n'_{j,r}$: βαθμός έκθεσης των αντιδρώντων στοιχείων j στην αντίδραση r

$n''_{j,r}$: βαθμός έκθεσης των προϊόντων στοιχείων j στην αντίδραση r

Για αντιστρεπτή αντίδραση ο μοριακός βαθμός παραγωγής/καταστροφής των στοιχείων i στην αντίδραση r δίνεται στην **Εξίσωση 2.50** [31].

$$\hat{R}_{i,r} = \Gamma (v''_{i,r} - v'_{i,r}) \left(k_{f,r} \prod_{j=1}^N [C_{j,r}]^{(n'_{j,r})} - k_{b,r} \prod_{j=1}^N [C_{j,r}]^{(v''_{j,r})} \right) \quad (2.37)$$

Όπου $v''_{j,r}$ είναι ο στοιχειομετρικός συντελεστής των προϊόντων.

Το Γ αντιπροσωπεύει την επιρροή των τρίτων σωμάτων στα στοιχεία κατά τις αντιδράσεις. Το Ansys Fluent από μόνο του δεν περιλαμβάνει από μόνο του αυτή την επιρροή. Ωστόσο, αν υπάρχουν δεδομένα, υπάρχει η δυνατότητα να εισαχθούν. Ο όρος Γ υπολογίζεται από την **Εξίσωση 2.38** [31].

$$\Gamma = \sum_j^N \gamma_{j,r} C_j \quad (2.38)$$

Όπου $\gamma_{j,r}$ είναι η επιρροή των τρίτων σωμάτων στα στοιχεία κατά τις αντιδράσεις.

Ο όρος “forward rate” για τη κάθε αντίδραση r, υπολογίζεται από την εξίσωση Arrhenius [31].

$$k_{f,r} = A_r T^{\beta_r} e^{E_r/RT} \quad (2.39)$$

Όπου

A_r : pre-exponential factor (consistent units)

β_r : exponent temperature (αδιάστατο)

E_r : ενέργεια ενεργοποίησης για κάθε αντίδραση r (J/kmol)

R : παγκόσμια σταθερά των αερίων (J/kmol ·k)

Αν η αντίδραση είναι αντιστρεπτή, the backward rate constant, $k_{b,r}$, για κάθε αντίδραση r, υπολογίζεται από [31]:

$$k_{b,r} = \frac{k_{f,r}}{K_r} \quad (2.40)$$

Όπου K_r είναι η σταθερά ισορροπίας για κάθε αντίδραση r και υπολογίζεται από [31]:

$$K_r = \exp\left(\frac{\Delta S_r}{R} - \frac{\Delta H_r}{RT}\right) \left(\frac{P_{atm}}{RT}\right)^{\sum_{i=1}^N (v_{i,r}'' - v_{i,r}')}$$
(2.41)

Όπου

P_{atm} : ατμοσφαιρική πίεση (101325Pa)

και

$$\frac{\Delta S_r}{R} = \sum_{i=1}^N (v_{i,r}'' - v_{i,r}') \frac{S_i}{R} \quad (2.42)$$

$$\frac{\Delta H_r}{RT} = \sum_{i=1}^N (v_{i,r}'' - v_{i,r}') \frac{h_i}{RT} \quad (2.43)$$

Όπου S_i και h_i είναι η εντροπία και η ενθαλπία του κάθε στοιχείου i , αντίστοιχα, στην κάθε θερμοκρασία και P_{atm} ατμοσφαιρική πίεση.

2.5.1.2.2 Μοντέλο διάχυσης δινών (Eddy-Dissipation Model)

Τα περισσότερα καύσιμα καίγονται γρήγορα και ο συνολικός βαθμός αντίδρασης ελέγχεται από το turbulent-mixing. Στις μη προ-αναμεμιγμένες καύσεις, οι στροβιλισμοί αναμιγνύουν αργά το καύσιμο και το οξειδίο στις περιοχές που γίνονται οι αντιδράσεις, όπου καίγονται γρήγορα. Στις προ-αναμεμιγμένες καύσεις, οι στροβιλισμοί αναμιγνύουν αργά τα κρύα αντιδρώντα και τα ζεστά προϊόντα στις περιοχές που γίνονται οι αντιδράσεις, όπου οι αντιδράσεις γίνονται γρήγορα. Σ' αυτές τις περιπτώσεις, η καύση λέγεται "mixing-limited" και οι πολύπλοκοι, ή συχνά και άγνωστοι, χημικοί κινητικοί όροι, μπορούν με ασφάλεια να αγνοηθούν.

Το Ansys Fluent παρέχει ένα μοντέλο αλληλεπίδρασης "turbulence-chemistry", βασισμένο στη μελέτη των Magnussen και Hjertager [33] και ονομάζεται "Eddy-Dissipation Model". Ο συνολικός βαθμός παραγωγής στοιχείων i , λόγω της κάθε αντίδρασης r , είναι η μικρότερη τιμή από τις δύο παρακάτω εξισώσεις [31]:

$$R_{i,r} = v_{i,r}' M_{w,i} A_p \frac{\varepsilon}{k} \min_{\mathcal{R}} \left(\frac{\sum_p Y_p}{v_{\mathcal{R},r}' M_{w,\mathcal{R}}} \right) \quad (2.44)$$

$$R_{i,r} = v'_{i,r} M_{w,i} A B \rho \frac{\varepsilon}{k} \left(\frac{Y_{\mathcal{R}}}{\sum_j^N v''_{j,r} M_{w,j}} \right) \quad (2.45)$$

Όπου

Y_P : το κλάσμα μάζας των στοιχείων στα προϊόντα, P

$Y_{\mathcal{R}}$: το κλάσμα μάζας των στοιχείων στα αντιδρώντα, \mathcal{R}

A: μια εμπειρική σταθερά ίση με 4.0

B: μια εμπειρική σταθερά ίση με 0.5

2.5.1.2.3 Μοντέλο Eddy-Dissipation για προσομοίωση μεγάλων δινών (LES)

Όταν χρησιμοποιείται το μοντέλο “LES turbulence”, ο όρος ε/k , στις **Εξισώσεις 2.44** και **2.45**, είναι ίσο με [31]:

$$\tau_{sgs}^{-1} = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (2.46)$$

Όπου

τ_{sgs}^{-1} : subgrid-scale mixing rate (s^{-1})

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (s^{-1})$$

2.5.2 Αντιδράσεις στην επιφάνεια των σωματιδίων

2.5.2.1 Γενική περιγραφή

Οι σχέσεις για τον υπολογισμό καύσης σωματιδίων, έχουν υπολογισθεί και μελετηθεί από τον Smith [34]. Ο βαθμός αντίδρασης των σωματιδίων **R (kg/m²-s)**, εκφράζεται όπως φαίνεται στην **Εξίσωση 2.31**.

$$R = D_0(C_g - C_s) = R_c(C_s)^N \quad (2.47)$$

Όπου

D_0 : συντελεστής διάχυσης (**m/s**)

C_g : συγκέντρωση των αντιδρώντων στοιχείων σε αέρια μορφή (**kg/m³**)

C_s : συγκέντρωση των αντιδρώντων στοιχείων στην επιφάνεια των σωματιδίων (**kg/m³**)

R_c : συντελεστής χημικής αντίδρασης (**μονάδες ποικίλουν**)

N : συντελεστής αντίδρασης (**αδιάστατο**)

Στην **Εξίσωση 2.47**, επειδή η συγκέντρωση των σωματιδίων C_s είναι άγνωστη, η εξίσωση μπορεί να αναδιατυπωθεί όπως φαίνεται στην **Εξίσωση 2.61**.

$$R = R_c \left[C_g - \frac{R}{D_0} \right]^N \quad (2.48)$$

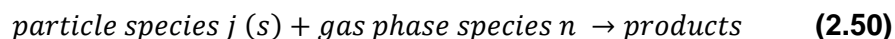
Η παραπάνω εξίσωση λύνεται με επαναληπτική διαδικασία, με εξαίρεση τις περιπτώσεις που έχουμε $N=1$ ή $N=0$. Για τη περίπτωση που έχουμε **$N=1$** , η **Εξίσωση 2.48** γράφεται [31]:

$$R = \frac{C_g R_c D_0}{D_0 + R_c} \quad (2.49)$$

Στη περίπτωση που έχουμε **$N=0$** , αν υπάρχει μια πεπερασμένη συγκέντρωση αντιδρώντων στην επιφάνεια των σωματιδίων, ο βαθμός μείωσης του στερεού είναι ίσος με το βαθμό χημικής αντίδρασης. Αν δεν υπάρχουν αντιδρώντα στην επιφάνεια, ο βαθμός μείωσης του στερεού, αλλάζει απότομα σύμφωνα με το βαθμό διάχυσης. Σ' αυτή τη περίπτωση, ωστόσο, το Ansys Fluent, χρησιμοποιεί πάντα χημικό βαθμό αντίδρασης, για λόγους σταθερότητας της λύσης [31].

2.5.2.2 Μοντέλο αντιδρώντων σωματιδίων σε πολλαπλές αντιδράσεις επιφάνειας

Για να περιγραφεί ο βαθμός αντίδρασης r , των στοιχείων στην επιφάνεια των στοιχείων j με τα στοιχεία στην αέρια φάση, το Ansys Fluent χρησιμοποιεί την ακόλουθη εξίσωση [31].



Ο βαθμός αντίδρασης δίνεται από [31]:

$$\bar{\mathcal{R}}_{j,r} = A_p n_r Y_j \mathcal{R}_{j,r} \quad (2.51)$$

$$\mathcal{R}_{j,r} = \mathcal{R}_{kin,r} \left(P_n - \frac{\mathcal{R}_{j,r}}{D_{0,r}} \right)^N \quad (2.52)$$

Όπου,

$\bar{\mathcal{R}}_{j,r}$: ρυθμός μείωσης στοιχείων στην επιφάνεια των σωματιδίων (kg/s)

A_p : εμβαδόν επιφάνειας στοιχείων (m²)

Y_j : κλάσμα μάζας των στοιχείων στην επιφάνεια των σωματιδίων

n_r : συντελεστής αποτελεσματικότητας (αδιάστατο)

$\mathcal{R}_{j,r}$: ρυθμός αντίδρασης των στοιχείων της επιφάνειας των σωματιδίων ανά μονάδα επιφάνειας (kg/m² –s)

P_n : μερική πίεση των στοιχείων στην αέρια φάση (Pa)

$D_{0,r}$: συντελεστής ρυθμού διάχυσης για κάθε αντίδραση r

$\mathcal{R}_{kin,r}$: κινητικός ρυθμός της κάθε αντίδρασης r (μονάδες ποικίλων)

Ο συντελεστής αποτελεσματικότητας, n_r , σχετίζεται με το εμβαδόν της επιφάνειας και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κάθε αντίδραση, στη περίπτωση που έχουμε πολλαπλές αντιδράσεις. Ο όρος $D_{0,r}$ δίνεται από [31]:

$$D_{0,r} = C_{1,r} \frac{[(T_p + T_\infty)/2]^{0.75}}{d_p} \quad (2.53)$$

Ο όρος $\mathcal{R}_{kin,r}$ δίνεται από

$$\mathcal{R}_{kin,r} = A_r T_p^{\beta_r} e^{-(E_r/RT_p)} \quad (2.54)$$

Ο ρυθμός μείωσης στοιχείων στην επιφάνεια των σωματιδίων για συντελεστή αντίδρασης $N_r=1$, δίνεται από

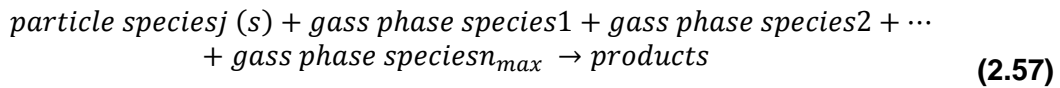
$$\bar{\mathcal{R}}_{j,r} = A_p n_r Y_j P_n \frac{\mathcal{R}_{kin,r} D_{0,r}}{D_{0,r} + R_{kin,r}} \quad (2.55)$$

Και για συντελεστή αντίδρασης N_r , δίνεται από

$$\bar{\mathcal{R}}_{j,r} = A_p n_r Y_j \mathcal{R}_{kin,r} \quad (2.56)$$

2.5.2.3 Προέκταση της στοιχειομετρίας για αντιδρώντα με πολλαπλή αέρια φάση

Όταν περισσότερα από ένα αντιδρώντα στην αέρια φάση παίρνουν μέρος σε μία αντίδραση, η στοιχειομετρική αντίδραση προεκτείνεται όπως φαίνεται παρακάτω [31]:



Για να περιγράψουμε τον βαθμό αντίδρασης r , των στοιχείων στην επιφάνεια των σωματιδίων j , με τη παρουσία των n_{max} στοιχείων στην αέρια φάση, είναι απαραίτητο να ορίσουμε το “diffusion-limited species” για κάθε αντίδραση στερεού σωματιδίου. Για τα υπόλοιπα στοιχεία οι συγκεντρώσεις στον όγκο και την επιφάνειά τους θεωρούνται ότι είναι ίσες. [31]

Ο κινητικός ρυθμός της κάθε αντίδρασης r ορίζεται ως [31]:

$$\mathcal{R}_{kin,r} = \frac{A_r T^{\beta_r} e^{-(E_r/RT)^{n_{max}}}}{(p_{r,d})^{N_{r,d}}} \prod_{n=1}^{n_{max}} p_n^{N_{r,n}} \quad (2.58)$$

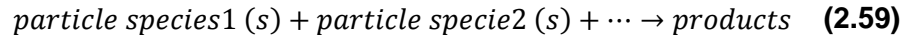
Όπου

p_n : μερική πίεση των αέριων στοιχείων n

$N_{r,n}$: βαθμός αντίδρασης των στοιχείων n

2.5.2.4 Αντιδράσεις στερεού με στερεό

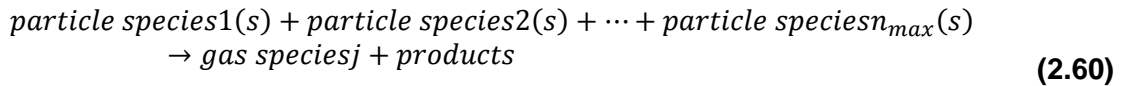
Αντιδράσεις που περιλαμβάνουν μόνο αντιδρώντα στην επιφάνεια των σωματιδίων μπορούν να μοντελοποιηθούν, υπό την προϋπόθεση ότι τα αντιδρώντα και τα προϊόντα υπάρχουν στο ίδιο σωματίδιο. [31]



Ο ρυθμός αντίδρασης σ' αυτή τη περίπτωση δίνεται από την **Εξίσωση 2.26**.

2.5.2.5 Αντιδράσεις διάσπασης στερεού

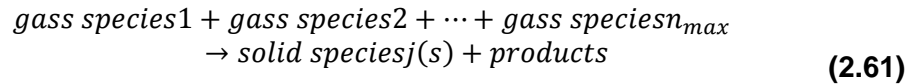
Οι αντιδράσεις διάσπασης στερεού μπορούν να μοντελοποιηθούν όπως φαίνεται παρακάτω [31]:



Ο βαθμός αντίδρασης σ' αυτές τις περιπτώσεις δίνεται από τις Εξισώσεις 2.51 – 2.58, όπου τώρα είναι τα αέρια προϊόντα της κάθε αντίδρασης. [31]

2.5.2.6 Αντιδράσεις εναπόθεσης στερεού

Οι αντιδράσεις εναπόθεσης στερεών στοιχείων στα σωματίδια μπορούν να μοντελοποιηθούν σύμφωνα με την παρακάτω παραδοχή [31]:



Για να υπολογιστεί ο βαθμός αντίδρασης χρησιμοποιούνται οι **Εξισώσεις 2.51-2.58**.

2.6 Εξισώσεις κίνησης σωματιδίων

2.6.1 Δύναμη Ισορροπίας σωματιδίου

Το ANSYS προβλέπει την κίνηση των σωματιδίων της διακριτής φάσης ολοκληρώνοντας την δύναμη ισορροπίας στο σωματίδιο, η οποία υπολογίζεται σε πλαίσιο αναφοράς Lagrangian. Αυτή η δύναμη ισορροπίας εξισώνει το σωματίδιο σε αδράνεια με τις δυνάμεις που επιδρούν στο σωματίδιο και γράφεται ως εξής [31]:

$$\frac{d\vec{u}_p}{dt} = F_D(\vec{u} - \vec{u}_p) + \frac{\vec{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \vec{F} \quad (2.62)$$

Όπου

\vec{F} : δύναμη ανά μάζα σωματιδίου

$F_D(\vec{u} - \vec{u}_p)$: δύναμη ολίσθησης (drag force) ανά μάζα σωματιδίου και γράφεται ως εξής [31]:

$$F_D = \frac{18\mu C_D Re}{\rho_p d_p^2} \quad (2.63)$$

Όπου:

\vec{u} : ταχύτητα της φάσης του ρευστού

\vec{u}_p : ταχύτητα σωματιδίων

μ : μοριακό ιξώδες του ρευστού

ρ : πυκνότητα σωματιδίων

d_p : διάμετρος των σωματιδίων

2.7 Τυρβώδης Διασπορά των σωματιδίων

Η διασπορά των σωματιδίων εξαιτίας της τύρβης στην φάση του ρευστού (είναι η συνεχής φάση) μπορεί να προβλεφθεί με τη χρήση του μοντέλου στοχαστικής παρακολούθησης (stochastic tracking model) ή με το μοντέλο σύννεφου σωματιδίων (particle cloud model). Το μοντέλο στοχαστικής παρακολούθησης περιλαμβάνει την επίδραση στιγμιαίων τυρβωδών διακυμάνσεων στην ταχύτητα κατά την τροχιά που διανύουν τα σωματίδια μέσω της χρήσης στοχαστικών μεθόδων. Από την άλλη πλευρά το μοντέλου σύννεφου σωματιδίων ακολουθεί την εξέλιξη ενός 'σύννεφου' σωματιδίων που ακολουθούν μια κύρια διαδρομή. Η συγκέντρωση των σωματιδίων αυτών αναπαριστάται από μια Γκαουσιανή συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (Probability density function-PDF). [31]

Στη συγκεκριμένη Διπλωματική Εργασία έγινε η επιλογή της χρήση του μοντέλου στοχαστικής παρακολούθησης, καθώς πιστοποιήθηκε ότι παρέχει μεγαλύτερη ακρίβεια αποτελεσμάτων και αναλύεται στο επόμενο κεφάλαιο.

2.7.1 Στοχαστική Παρακολούθηση

Όταν η ροή είναι τυρβώδης, το ANSYS FLUENT προβλέπει τις τροχιές των σωματιδίων χρησιμοποιώντας την ταχύτητα της φάσης του ρευστού. Στην στοχαστική προσέγγιση το ANSYS FLUENT προβλέπει την τυρβώδη διασπορά των σωματιδίων ολοκληρώνοντας τις εξισώσεις των πορειών ξεχωριστά για τα σωματίδια χρησιμοποιώντας τη στιγμιαία ταχύτητα του ρευστού κατά τη διάρκεια αυτής της πορείας των σωματιδίων. Υπολογίζοντας τις πορείες κατά αυτόν τον τρόπο για έναν επαρκή αριθμό αντιπροσωπευτικών σωματιδίων, που ονομάζεται Number of Tries (Αριθμός Δοκιμών), περιλαμβάνονται και οι τυχαίες επιδράσεις της τύρβης στην διασπορά των σωματιδίων.

Το ANSYS FLUENT χρησιμοποιεί στοχαστική μέθοδο (random walk model) για να προσδιορίσει την στιγμιαία ταχύτητα της αέριας φάσης. Στο μοντέλο Discrete Random Walk, η κυμαινόμενη ταχύτητα των ενώσεων είναι διακριτές συναρτήσεις του χρόνου. Το μοντέλο DRW μπορεί να δώσει αφύσικα αποτελέσματα για μη ομογενής ροές με διάχυση, όπου υπάρχει περίπτωση τα πολύ μικρά σωματίδια να διασκορπιστούν ανομοιόμορφα. Το μοντέλο αυτό έχει την τάση να μαζεύει τα συγκεκριμένα σωματίδια σε περιοχές της ροής με μικρές τύρβες. Παρακάτω υπάρχει αναλυτική περιγραφή του. [31]

2.7.2 Μοντέλο Διακριτής Τυχαίας Διαδρομής-Discrete Random Walk Model

Σε αυτό το μοντέλο προσομοιώνεται η αλληλεπίδραση ενός σωματιδίου με μία σειρά από διακριτές τυρβώδης δίνες της φάσης του ρευστού [35]. Κάθε δίνη χαρακτηρίζεται από μια γκαουσιανή τυχαία διακύμανση της ταχύτητας u', v', w' και μια κλίμακα χρόνου (time scale) τ_e' .

Οι τιμές των u', v', w' κατά τη διάρκεια της εξέλιξης μια τυρβώδης δίνης παίρνονται δειγματοληπτικά χρησιμοποιώντας τον παρακάτω τύπο που υπακούει στην γκαουσιανή διανομή πιθανότητας [31]:

$$u' = \zeta \sqrt{u'^2} \quad (2.64)$$

όπου

ζ : κανονικά κατανομημένα τυχαίο νούμερο

ομοίως ο τύπος για v', w' .

Ο χαρακτηριστικός χρόνος ζωής μπορεί να είναι σταθερός ή μεταβλητός. Όταν είναι σταθερός ισχύει [31]:

$$\tau_e = 2T_L \quad (2.65)$$

Όπου

T_L : είναι ο χρόνος ολοκλήρωσης του ρευστού κατά μέθοδο Lagrange

Όταν ο χαρακτηριστικός χρόνος ζωής είναι μεταβαλλόμενος ισχύει [31]:

$$\tau_e = -T_L \ln(r) \quad (2.66)$$

Όπου

r : ένας τυχαίος αριθμός μεγαλύτερος του μηδέν και μικρότερος του 1

Ο χρόνος διάρκειας της δίνης που συμμετέχουν τα σωματίδια ορίζεται ως εξής [31]:

$$t_{cross} = -\tau \ln \left[1 - \left(\frac{L_e}{\tau |u - u_p|} \right) \right] \quad (2.67)$$

όπου

L_e : μήκος δίνης

$|u - u_p|$: μέγεθος της σχετικής ταχύτητας

2.8 Ολοκλήρωση των εξισώσεων κίνησης των σωματιδίων

Οι εξισώσεις της πορείας των σωματιδίων και οι υπόλοιπες βοηθητικές εξισώσεις που περιγράφουν την μεταφορά ενέργειας και μάζας από και προς τα σωματίδια λύνονται με σταδιακή ολοκλήρωση σε διακριτά χρονικά στάδια. Στην **Εξίσωση 2.68** αν ολοκληρώσουμε με βάση το χρόνο μας δίνεται η ταχύτητα των σωματιδίων σε κάθε σημείο της τροχιάς τους [31]:

$$\frac{dx}{dt} = u_p \quad (2.68)$$

Παρατηρούμε ότι οι **Εξισώσεις 2.62** και **2.68** είναι ένα ζεύγος συνηθισμένων διαφορικών εξισώσεων και επομένως η **Εξίσωση 2.69** μπορεί να μετατραπεί στην ακόλουθη γενική μορφή [31]:

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{1}{\tau_p} (u - u_p) + a \quad (2.69)$$

όπου

a : επιτάχυνση που οφείλεται σε όλες τις δυνάμεις εκτός από την δύναμη ολίσθησης

Για την ταχύτητα σωματιδίου σε άλλο σημείο του χώρου ισχύει [31]:

$$u_p^{n+1} = u^n + e^{-\frac{\Delta t}{\tau_p}}(u_p^n - u^n) - a\tau_p(e^{-\frac{\Delta t}{\tau_p}} - 1) \quad (2.70)$$

Ομοίως το νέο σημείο μπορεί να εντοπιστεί από μία παρόμοια σχέση ως εξής [31]:

$$x_p^{n+1} = x_p^n + \Delta t(u^n + a\tau_p) + \tau_p(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau_p}})(u_p^n - u^n - a\tau_p) \quad (2.71)$$

Σε αυτές τις εξισώσεις οι παράγοντες u_p^n και u^n αναπαριστούν τα ταχύτητες των σωματιδίων και τις ταχύτητες ρευστού σε προηγούμενα σημεία τοποθεσίες

Οι **Εξισώσεις 2.62** και **2.68** μπορούν να επιλυθούν χρησιμοποιώντας αριθμητικό μοντέλο διακριτοποίησης. Η διακριτοποίηση μπορεί να είναι είτε κατά Euler είτε κατά Runge Kutta. Αυτές είναι οι πιο συνηθισμένες μέθοδοι διακριτοποίησης. Επίσης χρησιμοποιούνται και τα μοντέλα “Implicit” ή τραπεζοειδής (trapezoidal). [31]

2.9 Ψεκασμός Σωματιδίων

Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά ενός ψεκασμού είναι το μέγεθος των σωματιδίων. Μελετώντας ένα ψεκαστήρα, η διασπορά των διαμέτρων των σωματιδίων σχετίζεται με την κατάσταση του ακροφυσίου. Τα μοντέλα ψεκασμού του ANSYS FLUENT χρησιμοποιούν την διασπορά Rosin-Rammler δύο παραμέτρων, η οποία χαρακτηρίζεται από το πιο πιθανό μέγεθος σωματιδίων και μία διάμετρο εξάπλωσης (Spread Diameter) [36].

Ροές που περιλαμβάνουν μία φάση χρησιμοποιείται η παρακάτω σχέση [37] για να υπολογιστεί η μέση διάμετρος d_{32} [31]:

$$d_{32} = 133\lambda We^{-0.74} \quad (2.72)$$

Όπου

$\lambda=d/8$: μήκος ακτινικής ολοκλήρωσης (radial integral length scale)

We: αριθμός Weber και ορίζεται ως εξής:

$$We = \frac{\rho_l u^2 \lambda}{\sigma} \quad (2.73)$$

Όπου

σ : επιφανειακή τάση των σωματιδίων

Ένας δεύτερος παράγοντας που χρειάζεται για να οριστεί η διασπορά του μεγέθους των σωματιδίων είναι η διάμετρος εξάπλωσης (Spread Diameter), s . Οι τιμές που λαμβάνει αυτός ο όρος επιλέγονται από παλαιότερες μοντελοποιήσεις και από μια σειρά πειραματικών παρατηρήσεων. Όσο πιο μεγάλη είναι η τιμή της διαμέτρου εξάπλωσης τόσο πιο μικρή είναι η διασπορά του μεγέθους των σωματιδίων. Στην κατάσταση στην οποία ο ψεκασμός είναι μιας φάσης η επιθυμητή τιμή της διαμέτρου εξάπλωσης είναι 3.5, ενώ όταν έχουμε σπηλαιώση η επιθυμητή τιμή είναι 1.5 [36].

2.10 Σύνδεση Διακριτούς και Συνεχούς Φάσης

Με τη χρήση του ANSYS FLUENT μπορεί να προσδιοριστεί η διακριτή φάση βάση το πεδίο ροής της συνεχούς φάσης (one way coupling) ή υπάρχει και η πιθανότητα να συμπεριληφθεί η επίδραση της διακριτής φάσης στην συνέχεια (two way coupling). Στην δεύτερη προσέγγιση η ροή της συνεχούς φάσης επηρεάζεται από την διακριτή και μπορούν να τροποποιηθούν οι εξισώσεις των δυο φάσεων μέχρι να συγκλίνουν τα αποτελέσματα. [31]

Στο μοντέλο διπλής σύζευξης (Two Way Coupling), καθώς υπολογίζεται η τροχιά του σωματιδίου το ANSYS FLUENT κρατάει τα δεδομένα της θερμότητας, της μάζας και της ορμής που κερδήθηκαν ή χάθηκαν από το σωματίδιο και αυτές οι ποσότητες ενσωματώνονται στους υπολογισμούς της συνεχούς φάσης. Έτσι, ενώ η συνεχής φάση επιδρά πάντα στην διακριτή μπορεί να ενσωματωθούν οι τροχιές της διακριτής φάσης στην συνεχή. [31]

Η μεταφορά ορμής από τη συνεχή στη διακριτή φάση υπολογίζεται από το ANSYS FLUENT εξετάζοντας την μεταβολή της ορμής των σωματιδίων καθώς βαίνουν μέσα από τον όγκο ελέγχου του εκάστοτε μοντέλου. Η συγκεκριμένη μεταβολή της ορμής υπολογίζεται ως εξής [31]:

$$F = \sum \left(\frac{18\mu C_D Re}{\rho_p d_p^2 24} (u_p - u) + F_{other} \right) \dot{m}_p \Delta t \quad (2.74)$$

όπου

μ : ιξώδες του ρευστού

ρ_p : πυκνότητα του σωματιδίου

d_p : διάμετρος σωματιδίου

Re : αριθμός Reynolds

u_p : ταχύτητα σωματιδίου

u : ταχύτητα ρευστού

C_D : συντελεστής αντίστασης

\dot{m}_p : ροή μάζας σωματιδίων

F_{other} : άλλες δυνάμεις αλληλεπίδρασης

Η μετάδοση θερμότητας από την συνεχή στην διακριτή φάση ομοίως υπολογίζεται από το ANSYS FLUENT εξετάζοντας την μετάδοση θερμότητας των σωματιδίων καθώς βαίνουν μέσα από τον όγκο ελέγχου του εκάστοτε μοντέλου. Η μετάδοση θερμότητας υπολογίζεται ως εξής [31]:

$$Q = \dot{m}_-(p, 0)/m_-(p, 0) [(m_{p,in} - m_{p,out}) [-H_{lat_{ref}} + H_{pyrol}] - m_{p,out} \int_{T_{ref}}^{T_{p,out}} c_{pp} dT + m_{p,in} \int_{T_{ref}}^{T_{p,in}} c_{pp} dT] \quad (2.75)$$

Όπου,

$\dot{m}_{p,0}$: αρχική ροή μάζας από τον ψεκασμό σωματιδίων

$m_{p,0}$: αρχική μάζα σωματιδίων

$m_{p,in}$: μάζα σωματιδίων στην είσοδο

$m_{p,out}$: μάζα σωματιδίων στην έξοδο

c_{pp} : θερμοχωρητικότητα σωματιδίων

H_{pyrol} : θερμότητα πυρόλυσης καθώς παράγονται πτητικά

$T_{p,in}$: θερμοκρασία εισόδου σωματιδίων

$T_{p,out}$: θερμοκρασία εξόδου σωματιδίων

$H_{lat_{ref}}$: λανθάνουσα θερμότητα σε συνθήκες αναφοράς

Η μεταφορά μάζας από την συνεχή στην διακριτή φάση ομοίως υπολογίζεται από το ANSYS FLUENT εξετάζοντας την μεταφορά μάζας των σωματιδίων καθώς βαίνουν μέσα από τον όγκο ελέγχου του εκάστοτε μοντέλου. Η μεταφορά μάζας υπολογίζεται ως εξής [31]:

$$M = \frac{\Delta m_p}{m_{p,0}} \dot{m}_{p,0} \quad (2.76)$$

3. Μεθοδολογία

3.1 Σχεδιασμός της γεωμετρίας

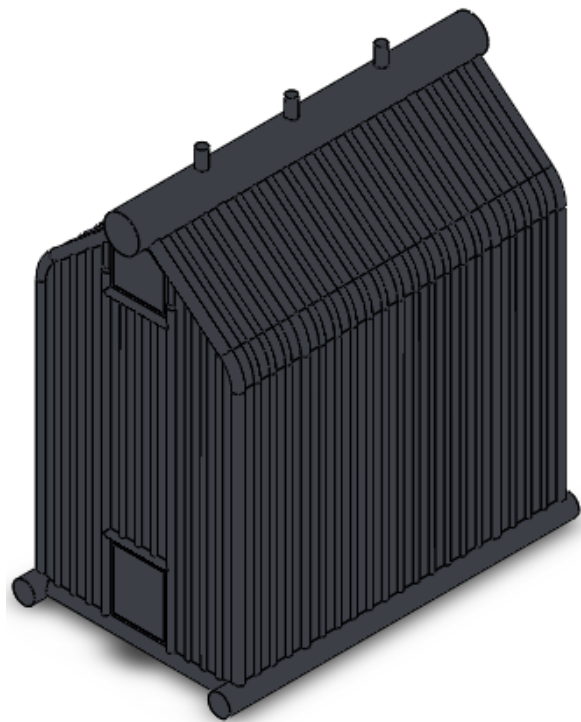
Στη παρούσα Εργασία σχεδιάστηκε ένας πρότυπος λέβητας τριπλής διαδρομής για καύση βιομάζας. Οι λέβητες στερεών καυσίμων, χρησιμοποιούν μια σειρά στερεών καυσίμων, με χειροκίνητη ή αυτόματη τροφοδοσία για την παραγωγή ατμού. Ο λέβητας έχει την κλασική δομή των τριών περασμάτων που έχει αποδειχθεί πως είναι σχεδιασμός αποδοτικός και ανθεκτικός στις πιέσεις. Επίσης, οι λέβητες τριπλής διαδρομής έχουν τη δυνατότητα να

κρατούν τα καυσαέρια περισσότερη ώρα, ώστε να επιτευχθεί καλύτερη θερμική απόδοση. Ο χώρος καύσης είναι αρκετά μεγάλος ώστε να επιτρέπει τη γρήγορη και συνεχή παραγωγή ατμού, ενώ η απομάκρυνση των στερεών υπολειμμάτων καύσης είναι πολύ πιο εύκολη. Για το σχεδιασμό του λέβητα έγινε χρήση του SolidWorks, ενώ για τη μελέτη και τη βελτιστοποίηση της ροής και της καύσης στο λέβητα, έγινε χρήση του Ansys Fluent.

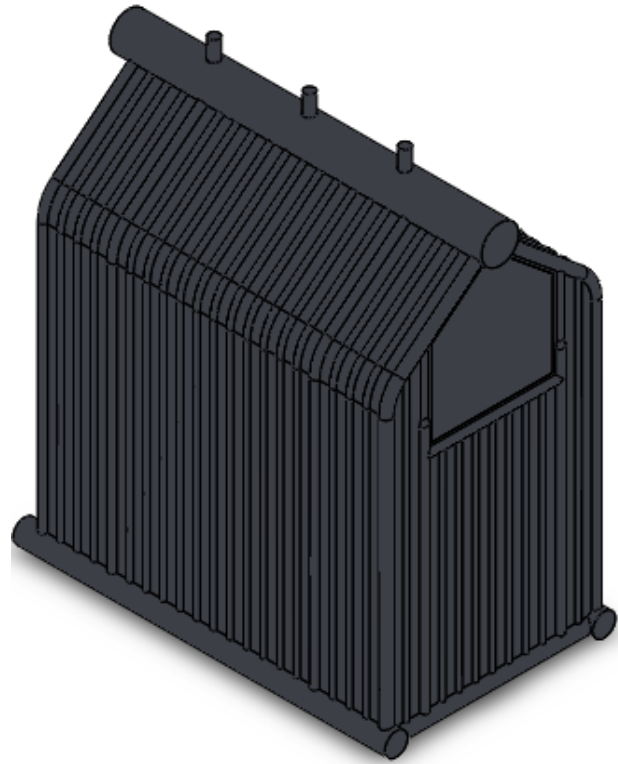
Ο σχεδιασμός αποτελείται από 3 στάδια:

- Σχεδιασμός του χώρου καύσης
- Σχεδιασμός των τοιχωμάτων των σωληνώσεων
- Σχεδιασμός εσωτερικού των σωληνώσεων

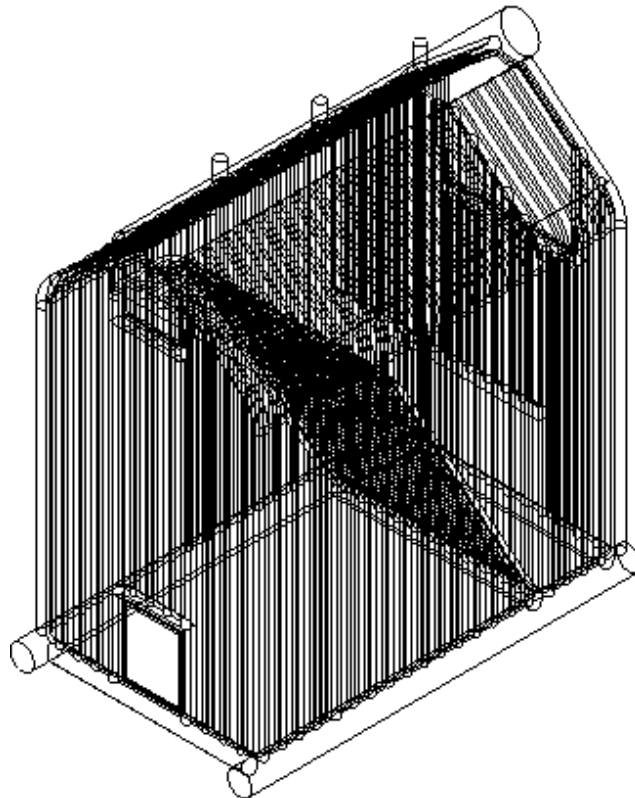
Με τη μέθοδο Assembly του σχεδιαστικού πακέτου Solidworks οι σωληνώσεις τοποθετήθηκαν γύρω από τον λέβητα, όπως φαίνεται στις **Εικόνες 3.1** έως **3.5**, ενώ στην **Εικόνα 3.6** φαίνονται ξεχωριστά οι σωληνώσεις. Στην **Εικόνα 3.1** και **3.2** φαίνεται ο λέβητας από δύο διαφορετικές όψεις, ενώ στις **Εικόνες 3.3** και **3.4** φαίνεται το εσωτερικό μέρος του λέβητα, ώστε να αναδειχθεί η τριπλή διαδρομή των καυσαερίων. Για καλύτερη κατανόηση της γεωμετρίας στην **Εικόνα 3.6** φαίνονται ξεχωριστά οι σωληνώσεις. Τέλος, οι διαστάσεις του λέβητα είναι 2,720m X 1,521m X 2,8m.



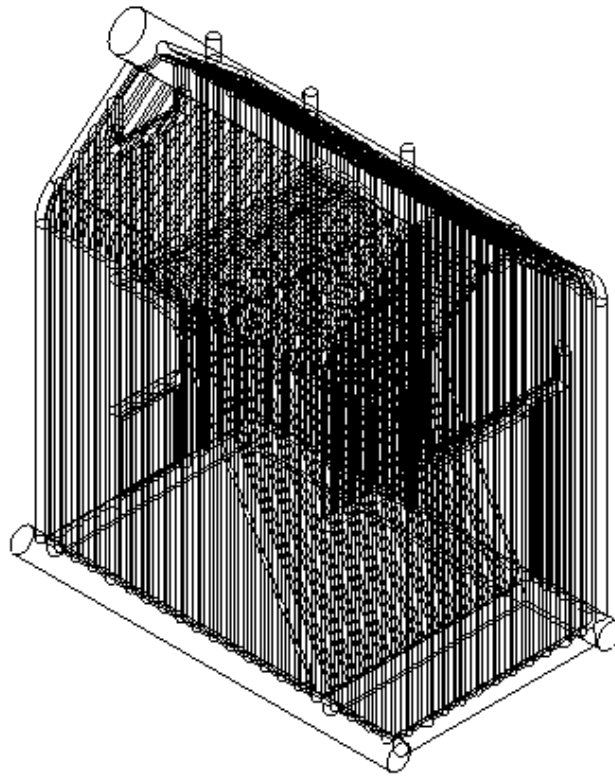
Εικόνα 3.1: Ισομετρική όψη του λέβητα



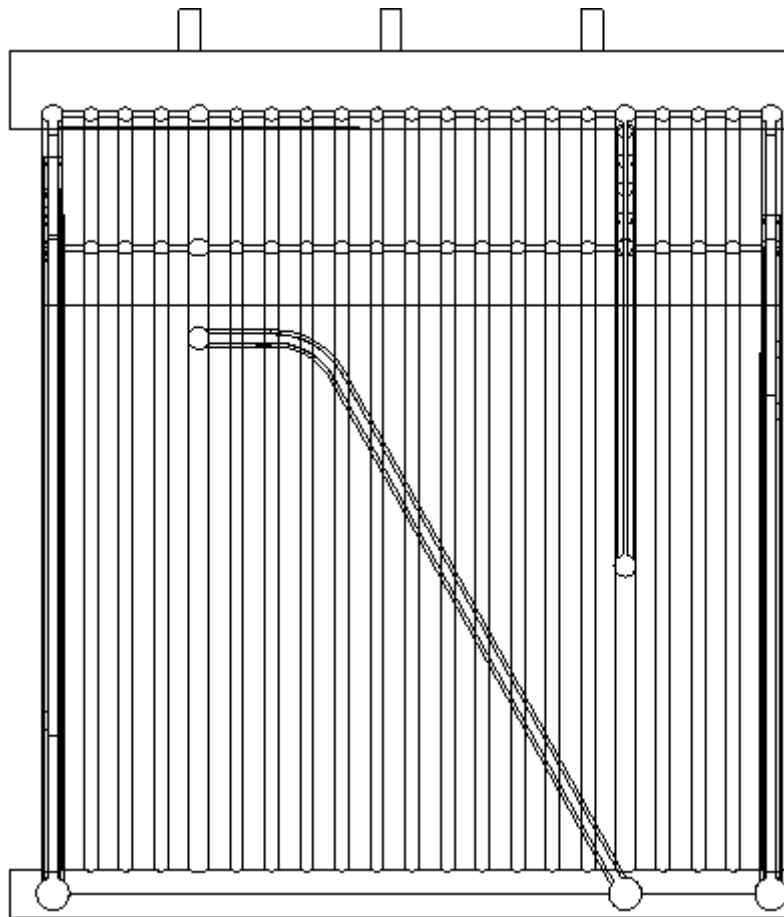
Εικόνα 3.2: Ισομετρική όψη του λέβητα (2)



Εικόνα 3.3: Ισομετρική όψη του λέβητα με λεπτομέρειες εσωτερικού



Εικόνα 3.4: Ισομετρική όψη του λέβητα με λεπτομέρειες εσωτερικού (2)



Εικόνα 3.5: Πλάγια όψη λέβητα με λεπτομέρειες εσωτερικού

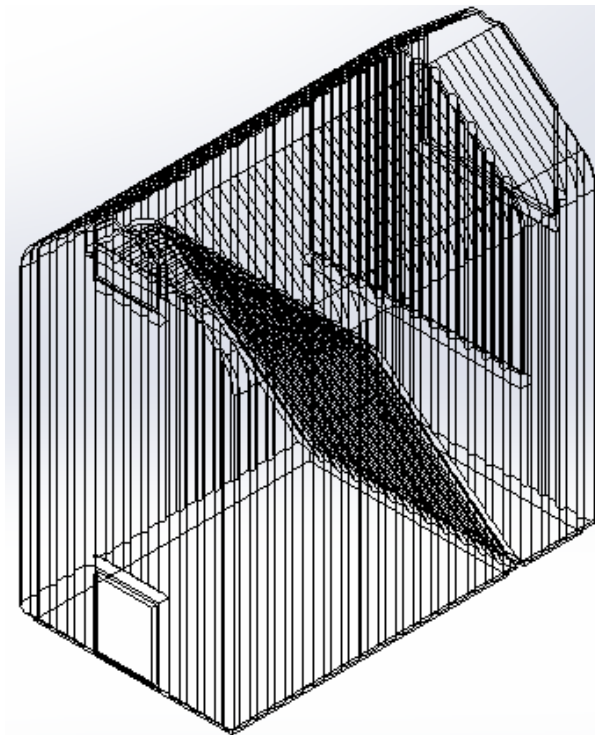


Εικόνα 3.6: Σωληνώσεις

Για τη μελέτη παραγωγής ατμού, χρειάστηκε να ενεργοποιηθούν μοντέλα αλλαγής φάσης (από νερό σε ατμό), μεταφοράς θερμότητας από τον λέβητα προς τις σωληνώσεις και να οριστούν οριακές συνθήκες συναγωγής στα τοιχώματα του λέβητα και των σωληνώσεων. Επίσης, θα έπρεπε να δημιουργηθεί υπολογιστικό πλέγμα εντός, αλλά στα τοιχώματα των σωληνώσεων. Λόγω αυξημένου υπολογιστικού κόστους, το πρόβλημα απλοποιήθηκε και εξετάστηκε μόνο ο θάλαμος καύσης, όπως φαίνεται στις **Εικόνες 3.7** και **3.8**.



Εικόνα 3.7: Ισομετρική όψη του θαλάμου καύσης, χωρίς σωληνώσεις



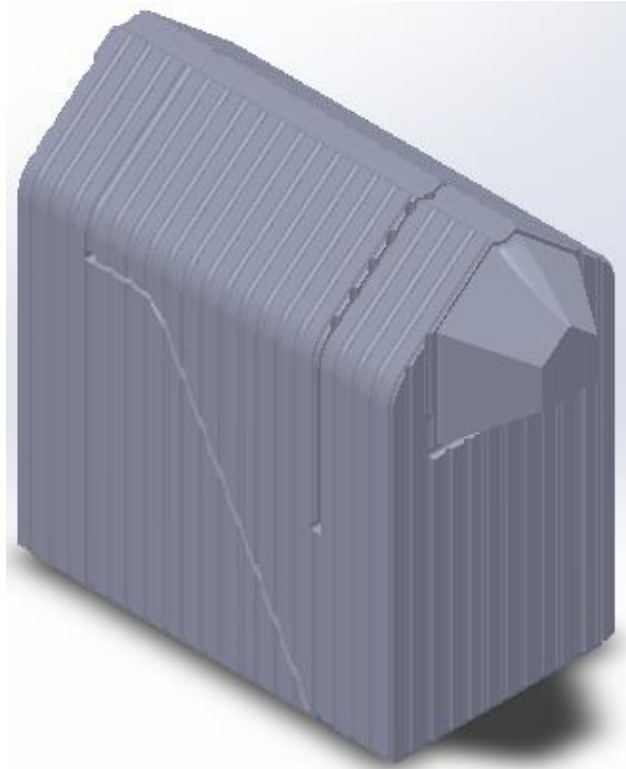
Εικόνα 3.8: Ισομετρική όψη του θαλάμου καύσης, χωρίς σωληνώσεις με λεπτομέρειες εσωτερικού

3.1.1 Επανασχεδιασμός με αλλαγή της γεωμετρίας στην έξοδο των καυσαερίων

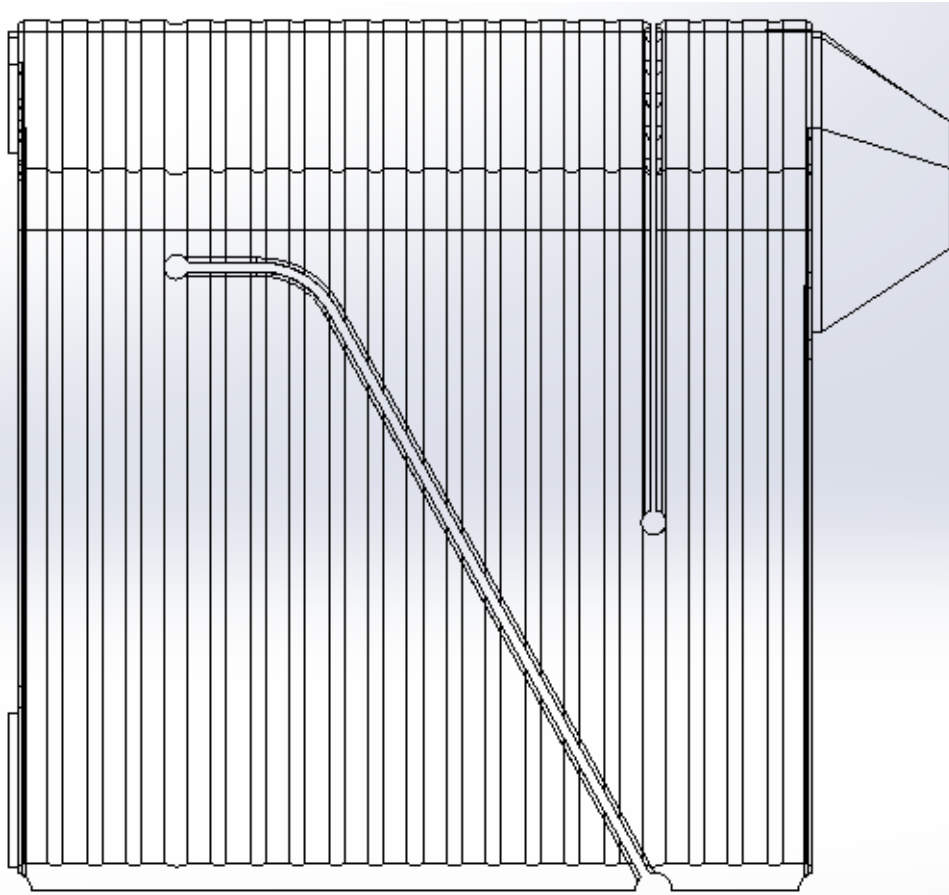
Στη συγκεκριμένη γεωμετρία αρχικά έγιναν προσομοιώσεις κρούς αέρα στους 300K, χωρίς να γίνει καύση, για να μελετηθεί η ροή στο εσωτερικό του λέβητα. Το πρόβλημα που παρατηρήθηκε ήταν η ύπαρξη ανακυκλοφορίας στην έξοδο, οπότε υπήρχε εισερχόμενη ροή αέρα από την έξοδο. Αυτό δεν ήταν επιθυμητό και για τον λόγο αυτό, στην έξοδο του λέβητα σχεδιάστηκε μια γεωμετρία, ώστε να επιταχύνει τη ροή στην έξοδο, όπως φαίνεται στις **Εικόνες 3.9 – 3.11**.



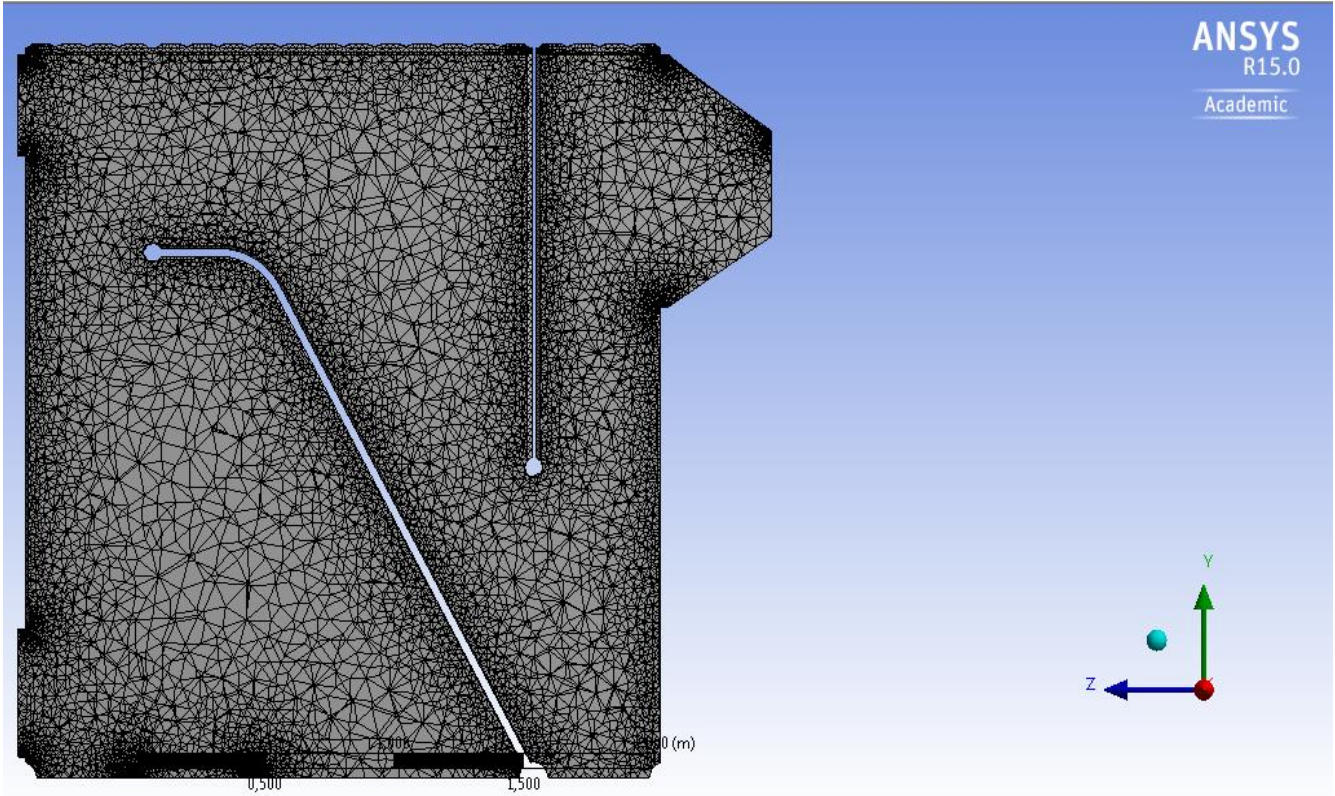
Εικόνα 3.9: Ισομετρική όψη του θαλάμου καύσης με βελτιωμένη γεωμετρία στην έξοδο



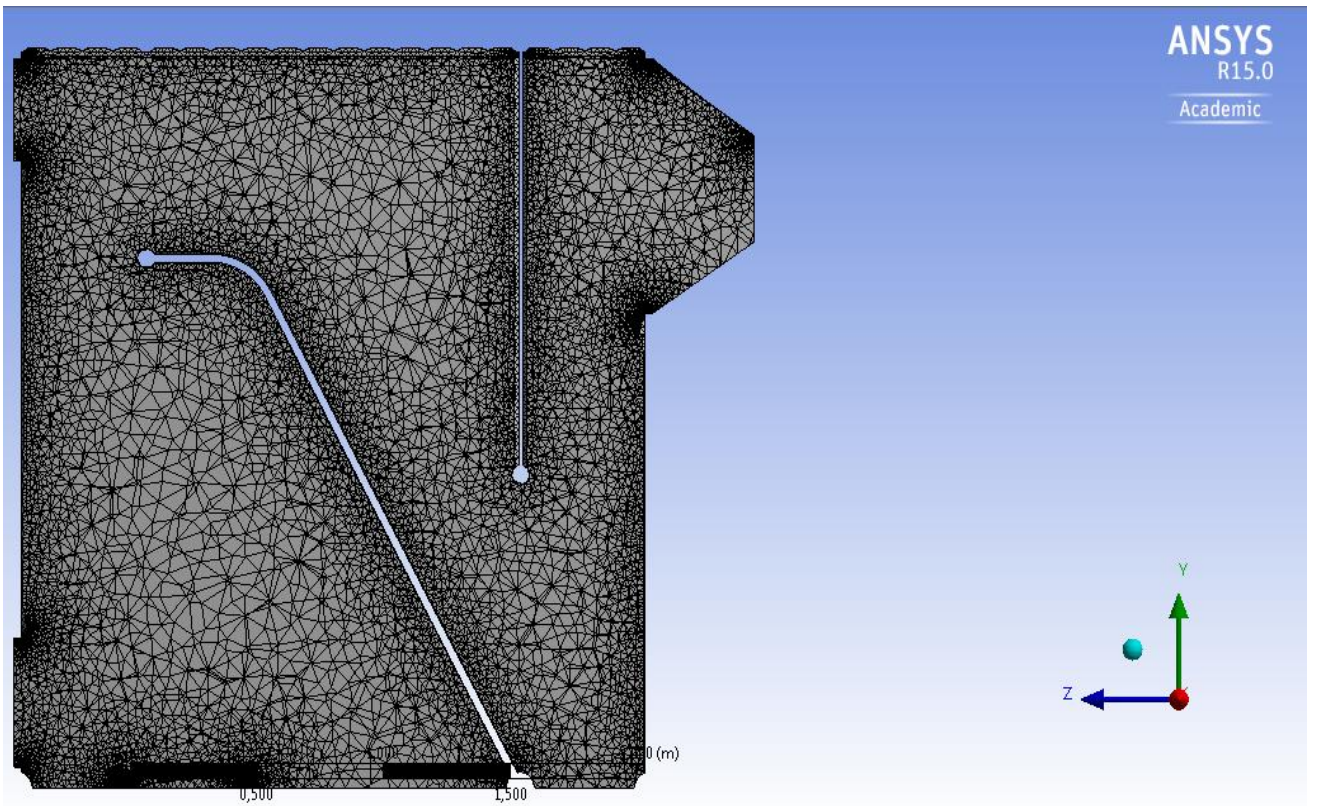
Εικόνα 3.10: Ισομετρική όψη του θαλάμου καύσης με βελτιωμένη γεωμετρία στην έξοδο (2)



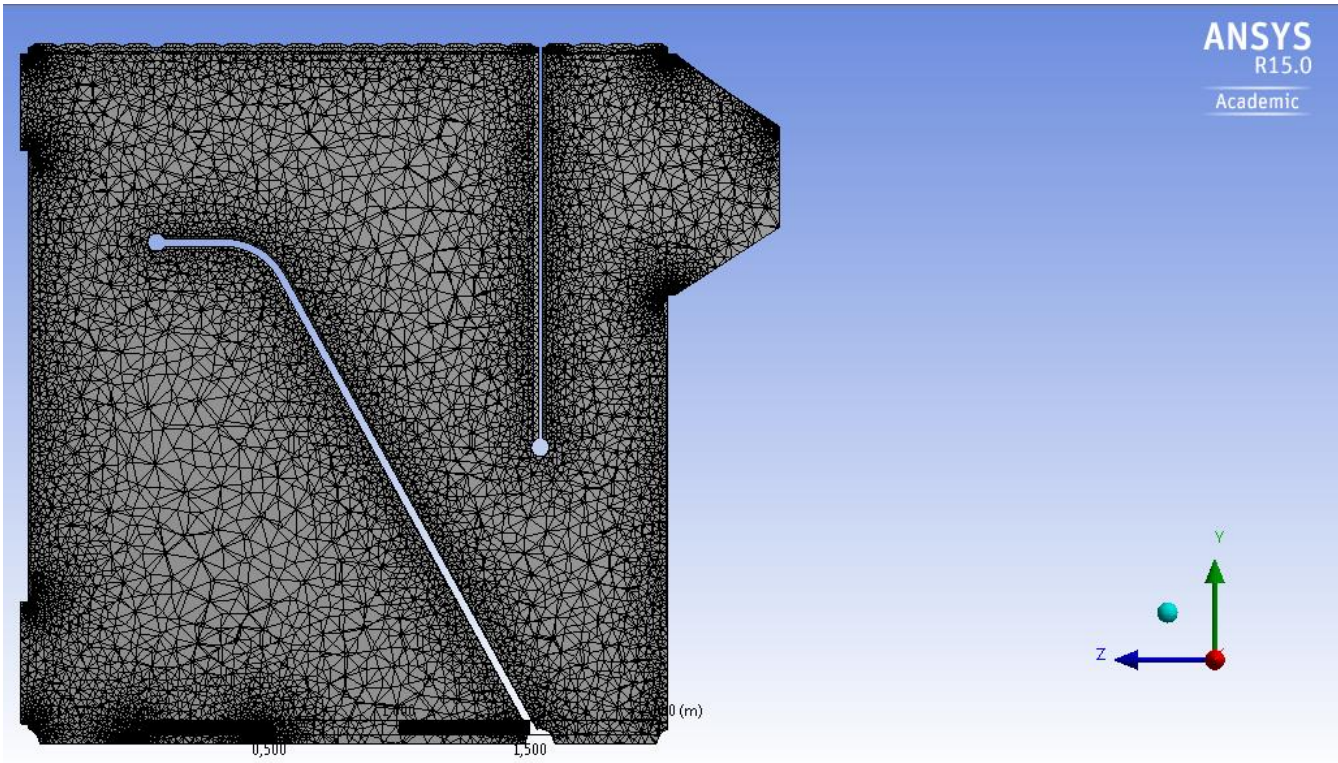
Εικόνα 3.11: Πλάγια όψη θαλάμου καύσης με βελτιωμένη γεωμετρία στην έξοδο με λεπτομέρειες εσωτερικού



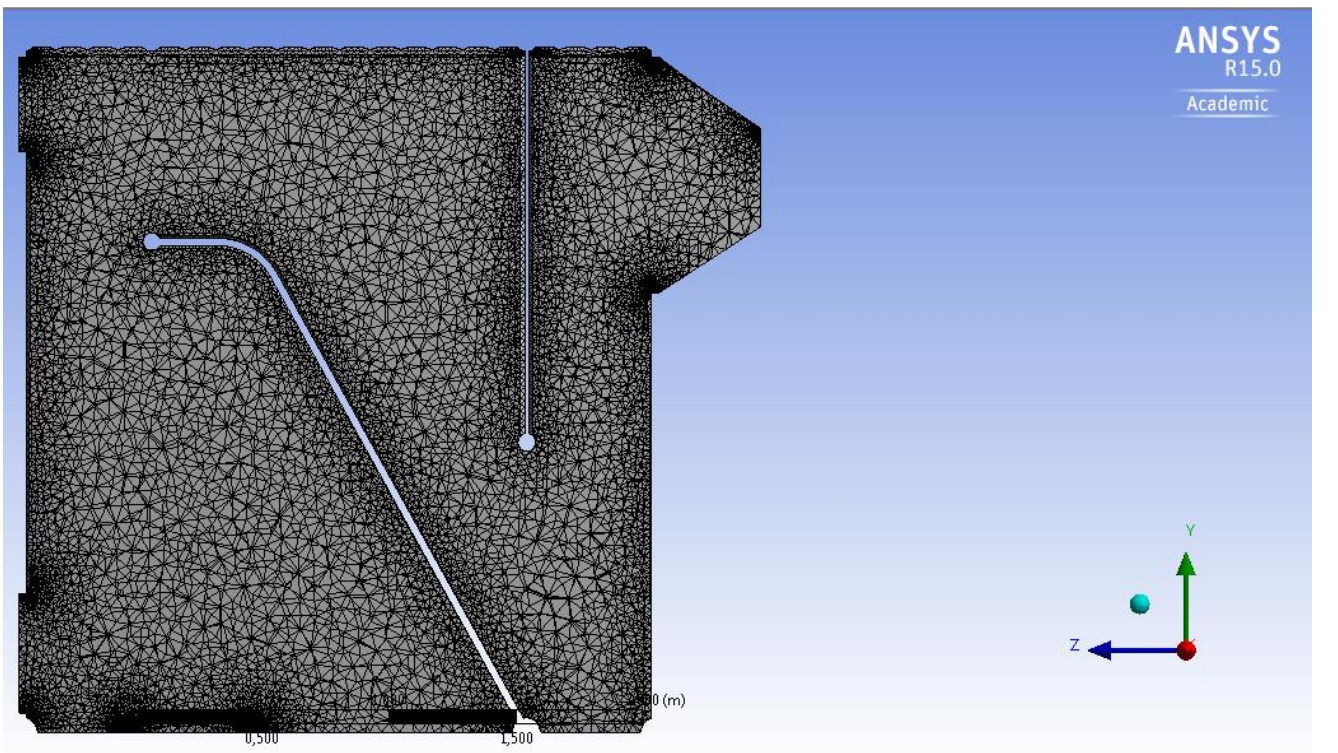
Εικόνα 3.13: Υπολογιστικό Πλέγμα με 1.000.000 στοιχεία



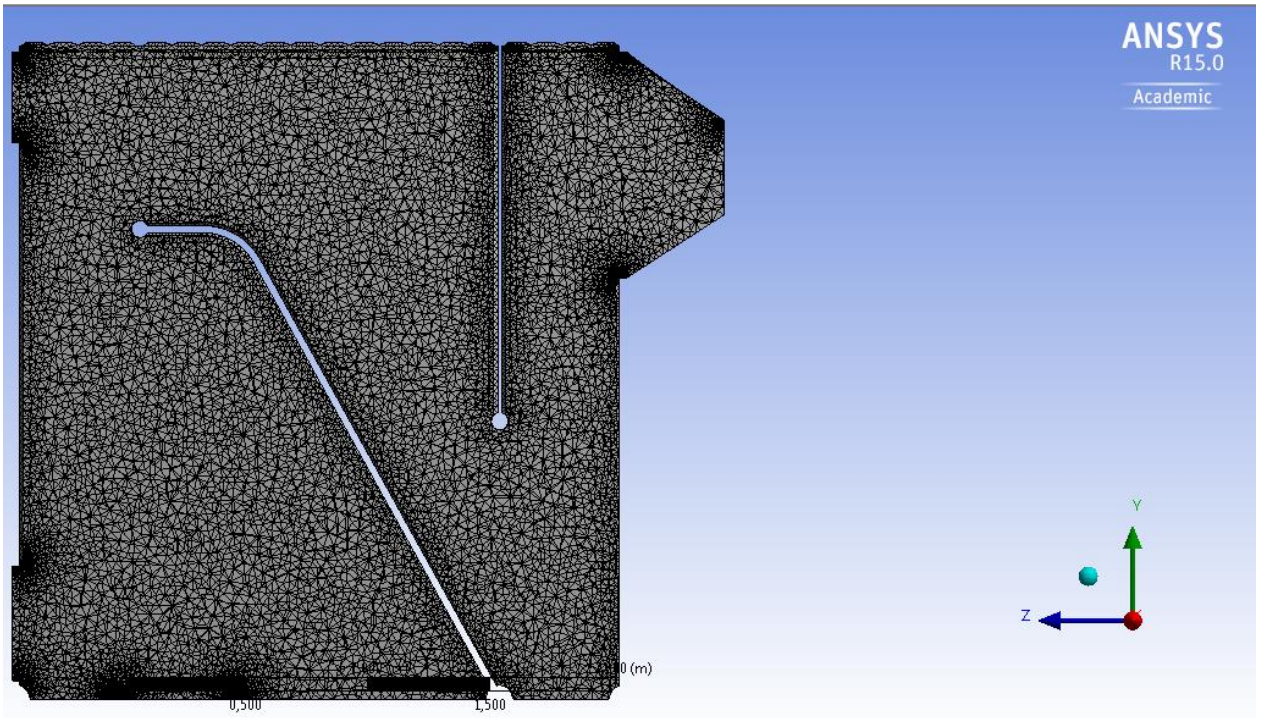
Εικόνα 3.14: Υπολογιστικό Πλέγμα με 1.500.000 στοιχεία



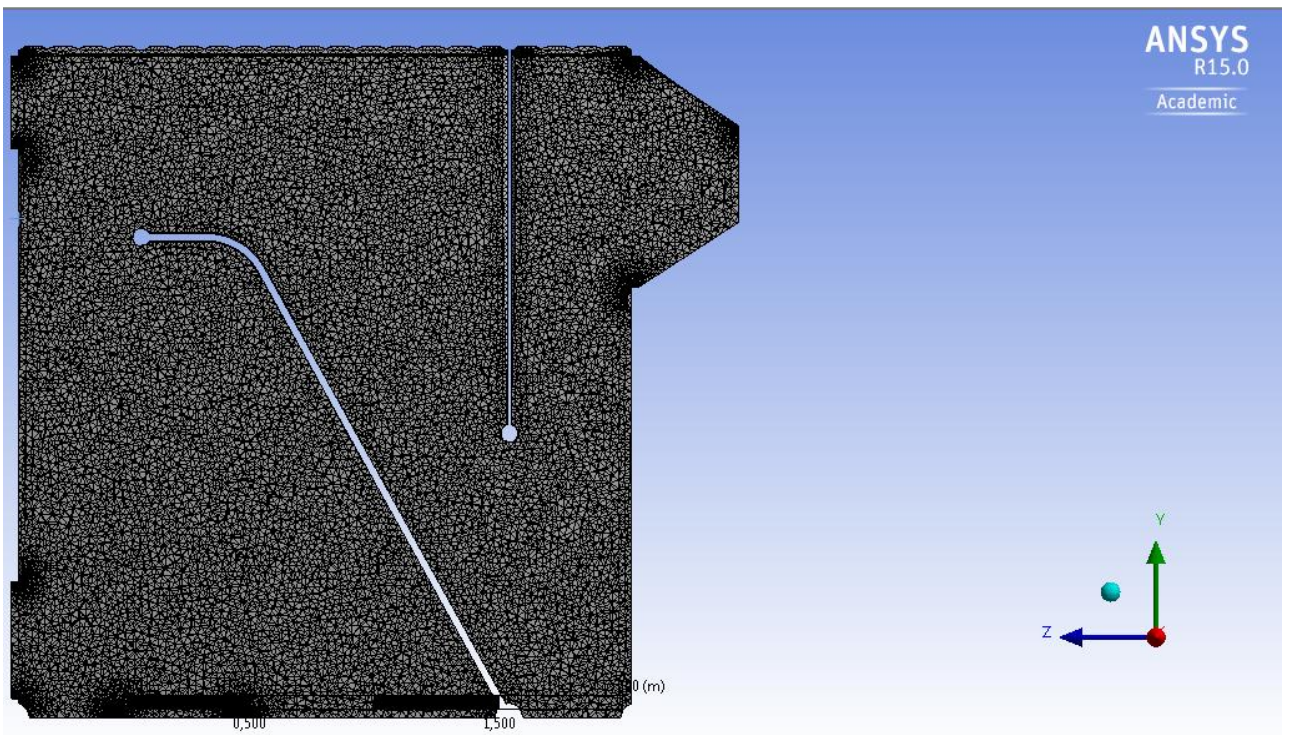
Εικόνα 3.15: Υπολογιστικό Πλέγμα με 2.000.000 στοιχεία



Εικόνα 3.16: Υπολογιστικό Πλέγμα με 2.500.000 στοιχεία



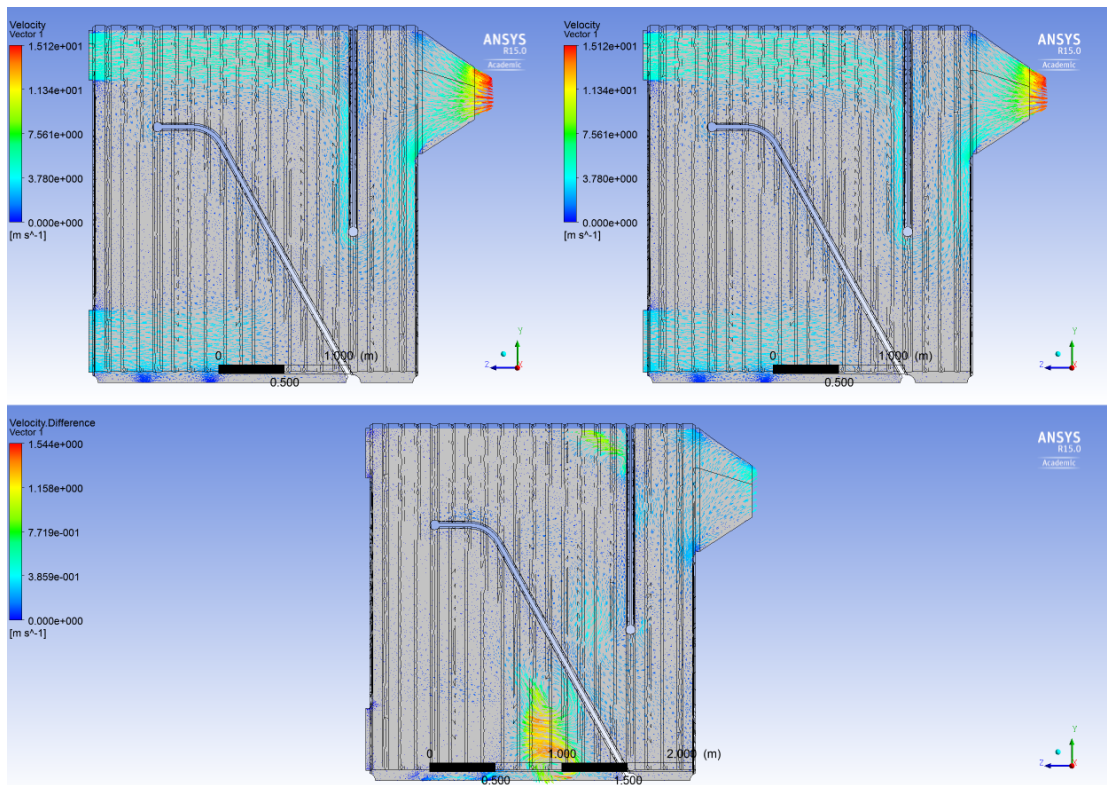
Εικόνα 3.17: Υπολογιστικό Πλέγμα με 3.000.000 στοιχεία



Εικόνα 3.18: Υπολογιστικό Πλέγμα με 4.000.000 στοιχεία

Η υπολογιστική ισχύς που ήταν διαθέσιμη, δεν επέτρεπε περαιτέρω πύκνωση του πλέγματος, οπότε συγκρίθηκαν οι δύο τελευταίες περιπτώσεις, για ροή κρούου αέρα. Στην **Εικόνα 3.19** φαίνεται η σύγκριση του πλέγματος. Οι διαφορές θεωρήθηκαν αμελητέες, οπότε επιλέχθηκε το πλέγμα των 3.000.000 στοιχείων το οποίο παρουσιάζεται στις **Εικόνες 3.20 – 3.22**.

Για το τελικό πλέγμα που επιλέχθηκε χρησιμοποιήθηκε η αυτόματη μέθοδος του Mesh του Fluent και εισήχθη η μέθοδος ‘Body sizing’, η οποία δίνει τη δυνατότητα να τροποποιηθεί το ελάχιστο και το μέγιστο μέγεθος των στοιχείων, τα οποία έχουν προεπιλεγμένη τιμή από την αυτόματη μέθοδο. Ο αριθμός των συνολικών στοιχείων ανέρχεται στα 3.054.395 και των κόμβων στα 568.750. Το ελάχιστο μήκος των στοιχείων είναι $9,0724 \cdot 10^{-4}$ m και το μέγιστο $5 \cdot 10^{-2}$ m, ενώ ο ρυθμός αύξησης μεγέθους των στοιχείων (Growth Rate) είναι 1,18.

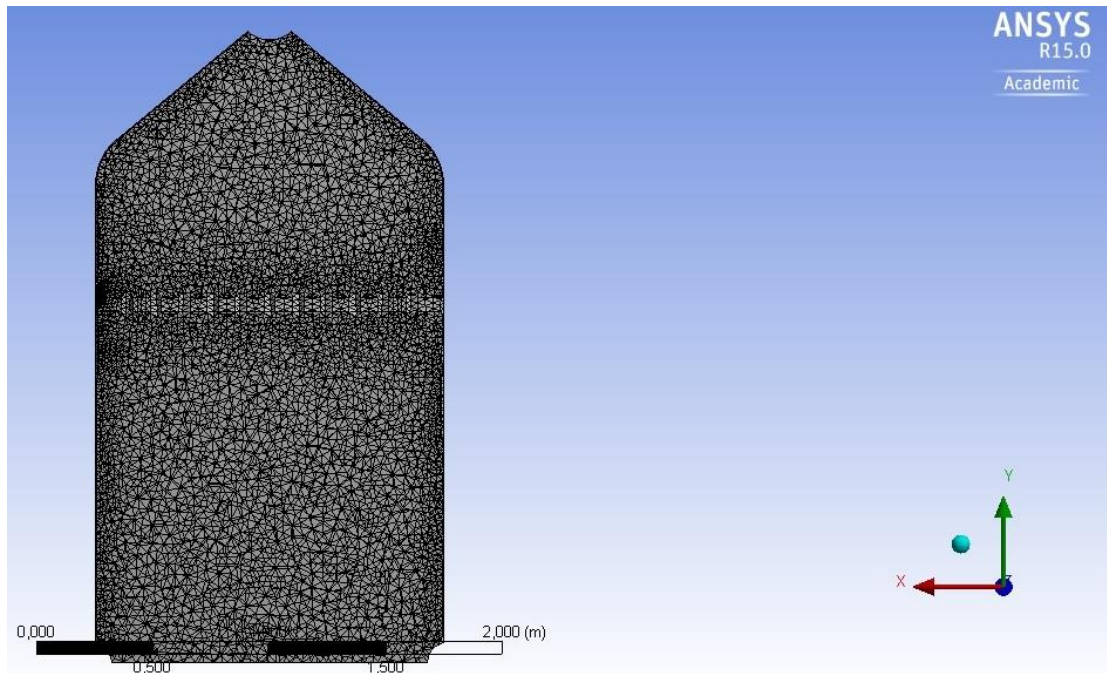


Εικόνα 3.19: Σύγκριση πλέγματος με 3.000.000 στοιχεία (αριστερά) και 4.000.000 στοιχεία (δεξιά)

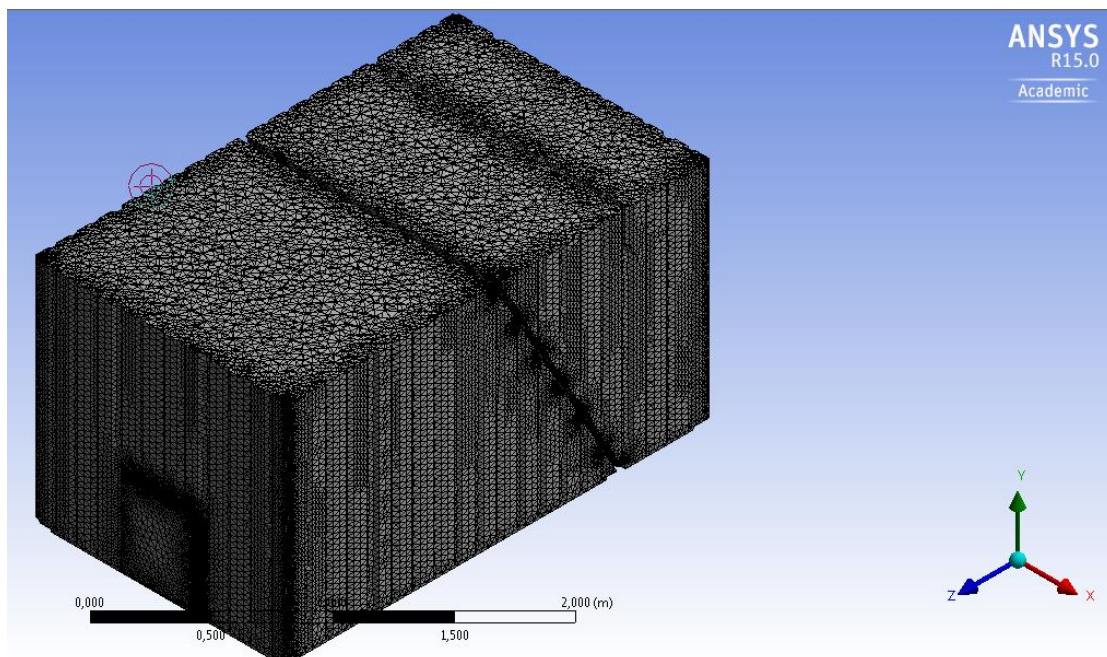
Σημαντικό ρόλο στην ποιότητα του πλέγματος εκτός από την ποιότητα των στοιχείων έχει το ‘Skewness’ και το ‘Aspect Ratio’. Όπως προτείνεται από το Ansys Fluent για πιο σταθερή και πραγματική λύση για το ‘Skewness’ επιθυμητές τιμές πρέπει να είναι μικρότερες του 0,0, ενώ για το ‘Aspect Ratio’ πρέπει να είναι μικρότερες του 12. Τα χαρακτηριστικά του τελικού πλέγματος φαίνονται στον **Πίνακα 3.1**. Ο όρος ‘Skewness’ αντιπροσωπεύει το ρυθμό μεταβολής του μεγέθους των στοιχείων, ενώ ο όρος ‘Aspect Ratio’ αντιπροσωπεύει τις αναλογίες διαστάσεων του κάθε στοιχείου.

Χαρακτηριστικά	Τιμές		
	min	average	max
Ποιότητα στοιχείων	0.22	0.83	0.99999
Skewness	$3.888 \cdot 10^{-2}$	0.2358	0.7999
Aspect Ratio	1.1603	1.864	10.227

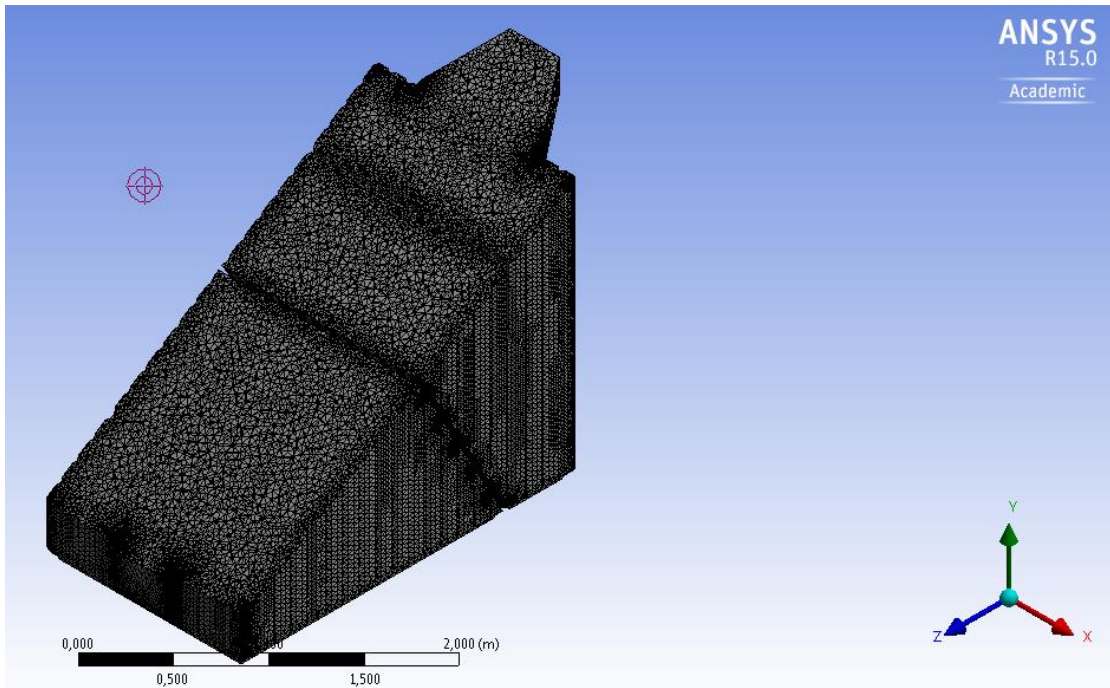
Πίνακας 3-1: Χαρακτηριστικά Πλέγματος



Εικόνα 3.20: Παρουσίαση τελικού πλέγματος (1)



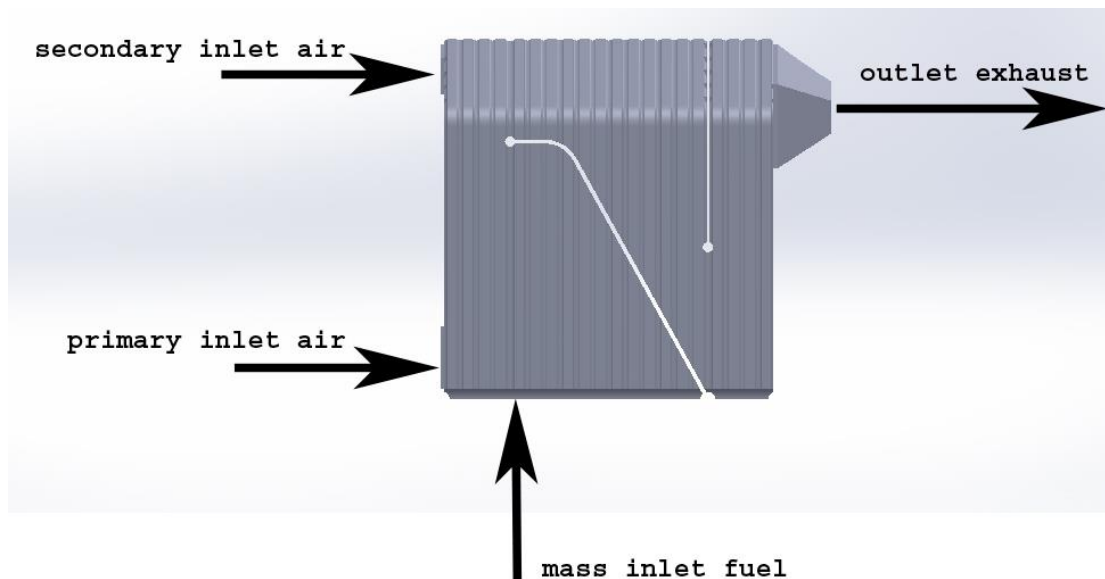
Εικόνα 3.21: Παρουσίαση τελικού πλέγματος (2)



Εικόνα 3.22: Παρουσίαση τελικού πλέγματος (3)

3.3 Οριακές Συνθήκες

Στο συγκεκριμένο πρόβλημα για την οξειδωση του καυσίμου χρησιμοποιήθηκε πρωτεύον και δευτερεύον ρεύμα αέρα. Η ποσότητα του πρωτεύοντος και δευτερεύοντος ρεύματος αέρα είναι ίδια. Όπως φαίνεται στην **Εικόνα 3.23** το καύσιμο εισάγεται κάτω αριστερά στη γεωμετρία του λέβητα, ενώ τα καυσαέρια βγαίνουν πάνω δεξιά. Για την εισαγωγή των σωματιδίων άνθρακα χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Lagrangian. Το πρωτεύον ρεύμα αέρα εισάγεται κάτω αριστερά στη γεωμετρία του λέβητα, ενώ το δευτερεύον πάνω αριστερά. Ο ρόλος του πρωτεύοντος ρεύματος αέρα είναι η καύση του στερεού καυσίμου, ώστε να απελευθερωθούν τα πτητικά, ενώ του δευτερεύοντος είναι η καύση των πτητικών.



Εικόνα 3.23: Αποτύπωση Οριακών συνθηκών

3.3.1 Ιδιότητες καυσίμου

Ως καύσιμο επιλέχθηκαν στερεά σωματίδια άνθρακα, μεσαίων πτητικών, όπου οι ιδιότητες του φαίνονται στον Πίνακα 3.2. Τα πτητικά του καυσίμου είναι η ένωση

$\text{CH}_{3.086}\text{O}_{0.131}$. Το καύσιμο αποτελείται από 64% στερεό άνθρακα 28% πτητικά, ενώ το υπόλοιπο 8% είναι τέφρα και αδρανή στοιχεία.

Ειδική θερμοχωρητικότητα (C_p) [J/kg·K]	1000
Πυκνότητα (kg/m^3)	1300
Θερμοκρασία αποπτητικοποίησης (K)	400
Κλάσμα μάζας πτητικών (%)	28
Κλάσμα μάζας στερεού άνθρακα (%)	64
React. Heat Fraction absorbed by Solid (%)	30
Devolatilization Model (s^{-1})	50
Θερμογόνος Δύναμη άνθρακα (MJ/kg)	32.789
Θερμική αγωγιμότητα ($\text{w/m}\cdot\text{K}$)	0.33

Πίνακας 3-2: Ιδιότητες καυσίμου

Για το συγκεκριμένο πρόβλημα θεωρήθηκε λέβητας με ισχύ ίση με 2MW και η απόδοση του λέβητα θεωρήθηκε ίση με 90%, αφού είναι αδιαβατικός. Στην **Εξίσωση 3.1** φαίνεται πως υπολογίστηκε η παροχή καυσίμου.

$$\dot{m}_{fuel} = \frac{P}{n \cdot Hu_{fuel}} = 0.06777 \text{ kg/s} \quad (3.1)$$

Όπου

\dot{m}_{fuel} : Παροχή καυσίμου (kg/s)

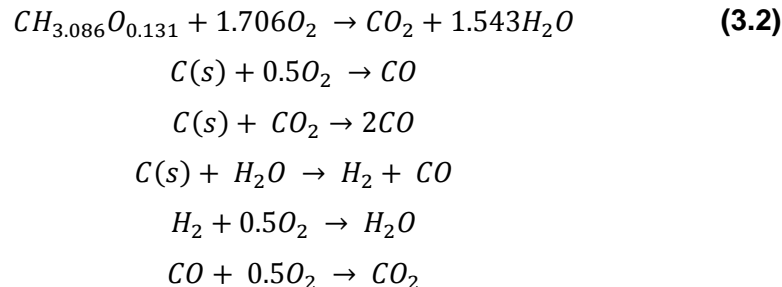
P : Ισχύς λέβητα (MW)

n : Απόδοση λέβητα

Hu_{fuel} : Θερμογόνος δύναμη καυσίμου (MJ/kg)

3.3.2 Υπολογισμός στοιχειομετρικά απαιτούμενου ξηρού αέρα

Για το συγκεκριμένο πρόβλημα χρησιμοποιήθηκαν 6 αντιδράσεις, οι οποίες φαίνονται παρακάτω:



Σύμφωνα με την Αντίδραση **3.2** για 1 mol $CH_{3.086}O_{0.131}$ χρειάζονται 1.706 mol O_2 . Αντίστοιχα, σε μονάδες μάζας 0.017216633 kg $CH_{3.086}O_{0.131}$ χρειάζονται 0.054592 kg O_2 .

Το απαιτούμενο οξυγόνο για τη στοιχειομετρική καύση 1 kg $CH_{3.086}O_{0.131}$ υπολογίζεται ως

$$\frac{0.054532}{0.017216633} = 3.170877 \frac{\text{kg } O_2}{\text{kg } CH_{3.086}O_{0.131}}$$

Άρα, η ποσότητα ξηρού αέρα που απαιτείται για στοιχειομετρική καύση 1 kg $CH_{3.086}O_{0.131}$ υπολογίζεται ως:

$$\mu_{LOT_CH_{3.086}O_{0.131}} = \frac{3.170877}{0.233} = 13.609 \frac{kg \text{ \textit{\alpha\textit{e\textit{r\textit{a}}}}} }{kg CH_{3.086}O_{0.131}}$$

Ο απαιτούμενος ξηρός αέρας για τη στοιχειομετρική καύση 1 kg άνθρακα είναι $\mu_{LOT_C} = 11.48 \frac{kg \text{ \textit{α\textit{e\textit{r\textit{a}}}}} }{kg \text{ \textit{\text{α\textit{n}\textit{t}\textit{h}\textit{r}\textit{a}\textit{k}\textit{a}}}}}$. Το καύσιμο που χρησιμοποιήθηκε στη συγκεκριμένη εργασία αποτελείται από 64% άνθρακα και 28% πηκτικά. Άρα ο στοιχειομετρικά απαιτούμενος ξηρός αέρας (μ_{LOT}) υπολογίζεται ως:

$$\mu_{LOT_tot} = 0.64 \cdot \mu_{LOT_C} + 0.28 \cdot \mu_{LOT_CH_{3.086}O_{0.131}} \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} \mu_{LOT_tot} &= 0.64 \cdot 11.48 + 0.28 \cdot 13.609 \\ &= 11.1577266 \frac{kg \text{ \textit{α\textit{e\textit{r\textit{a}}}}} }{kg \text{ \textit{κα\textit{υ}\textit{σ}\textit{ί}\textit{μ}\textit{ο}\textit{υ}}} \end{aligned}$$

3.3.3 Οριακές συνθήκες καυσίμου

Στον Πίνακα 3.3 φαίνονται οι οριακές συνθήκες που επιλέχθηκαν για τη παροχή καυσίμου.

Συνολική παροχή καυσίμου (kg/s)	0.06777
Ελάχιστη Διάμετρος σωματιδίων (cm)	0.5
Μέγιστη Διάμετρος σωματιδίων (cm)	1.5
Μέση Διάμετρος σωματιδίων (cm)	1
Spread Diameter	3.5
Αριθμός ρευμάτων	10

Πίνακας 3-3: Οριακές συνθήκες καυσίμου

3.3.4 Οριακές συνθήκες αέρα

Στην **Εξίσωση 3.4** φαίνεται πως υπολογίστηκε η απαραίτητη ποσότητα αέρα, ώστε να επιτευχθεί η καύση.

$$\dot{m}_{air_tot} = \lambda \cdot \mu_{LOT_tot} \cdot m_{fuel} \quad (3.4)$$

Όπου,

\dot{m}_{air_tot} : συνολική παροχή αέρα (kg/s)

λ : περίσσεια αέρα

Για αναλογία πρωτεύοντος και δευτερεύοντος ρεύματος αέρα 50%

$$\dot{m}_{primary_air} = \dot{m}_{secondary_air} = 0.5 \cdot \dot{m}_{air_tot} \quad (3.5)$$

Οι οριακές συνθήκες για το πρωτεύον και δευτερεύον ρεύμα αέρα φαίνονται στους **Πίνακες 3.4** και **3.5**, αντίστοιχα.

Πρωτεύον ρεύμα αέρα

Intensity and viscosity ratio (%)	5%
Intensity and Hydraulic Diameter (m)	0.5
Species	0.23 O ₂ και 0.77 N ₂

Πίνακας 3-4: Οριακές συνθήκες για πρωτεύον ρεύμα αέρα

Δευτερεύον ρεύμα αέρα

Intensity and viscosity ratio (%)	5%
Intensity and Hydraulic Diameter (m)	0.5
Species	0.23 O ₂ και 0.77 N ₂

Πίνακας 3-5: Οριακές συνθήκες για δευτερεύον ρεύμα αέρα

Έχοντας υπολογιστεί οι παροχές του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος ρεύματος αέρα, μπορούν να υπολογιστούν και οι αντίστοιχες ταχύτητες, όπως φαίνεται στις **Εξισώσεις 3.6** και **3.7**.

$$v_{primary_air} = \frac{\dot{m}_{primary_air}}{\rho_{air} \cdot A_{primary_air}} \quad (3.6)$$

$$v_{secondary_air} = \frac{\dot{m}_{secondary_air}}{\rho_{air} \cdot A_{secondary_air}} \quad (3.7)$$

Όπου,

$v_{primary_air}$: ταχύτητα εισόδου πρωτεύοντος ρεύματος αέρα (m/s)

$v_{secondary_air}$: ταχύτητα εισόδου δευτερεύοντος ρεύματος αέρα (m/s)

ρ_{air} : πυκνότητα αέρα (kg/m³)

$A_{primary_air}$: εμβαδό διατομής εισόδου πρωτεύοντος ρεύματος αέρα (m²)

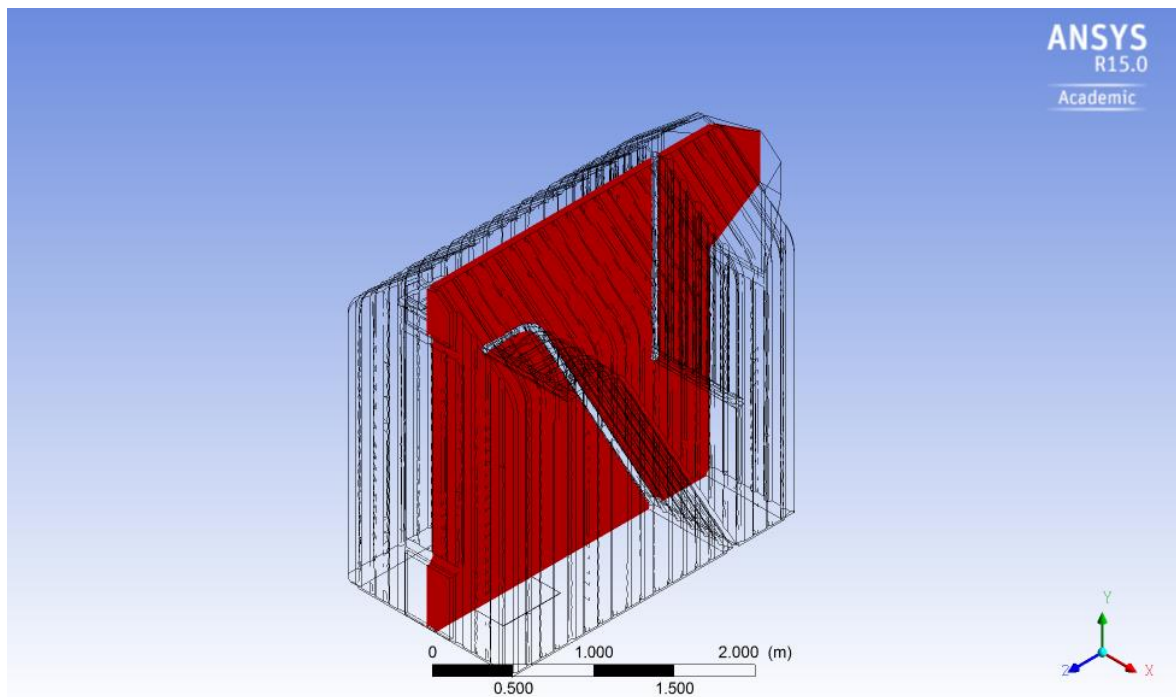
$A_{secondary_air}$: εμβαδό διατομής εισόδου δευτερεύοντος ρεύματος αέρα (m²)

3.4 Καθορισμός Δεδομένων για επίλυση στο Setup του Fluent

Σε αυτό το κομμάτι ορίστηκαν όλα τα δεδομένα τα οποία συνεισφέρουν στην αριθμητική επίλυση των μερικών διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν το πρόβλημα. Αρχικά, ορίστηκε ανάλυση σταθερής κατάστασης και ενεργοποιήθηκαν τα μοντέλα 'Viscous-Realizable k-ε/Standard Wall Functions', 'Energy' και 'Species Transport'. Στην επιλογή 'Materials', δημιουργήθηκε το καύσιμο, τα πηκτικά του, όλα τα παράγωγα της καύσης και ορίστηκαν οι αντιδράσεις. Στη συνέχεια, ορίστηκαν τα σημεία από τα οποία θα γίνει η είσοδος του καυσίμου, καθώς και οι οριακές του συνθήκες από την επιλογή 'Injection'. Στην επιλογή 'Boundary Condition', ορίστηκαν οι εισοδοί, η έξοδος οι οριακές συνθήκες του αέρα και τα τοιχώματα του λέβητα. Το μοντέλο έτρεξε για περίπου 700 επαναλήψεις, μέχρι να σταθεροποιηθεί η λύση και στη συνέχεια ενεργοποιήθηκε το μοντέλο 'Discrete Phase' και 'Radiation'. Για 'Pressure – Velocity Coupling' ορίστηκε η μέθοδος 'Simple'. Στη Χωρική Διακριτοποίηση (Spatial Discretization) για τη Πίεση ορίστηκε η μέθοδος 'PRESTO', για την ορμή και την ενέργεια η μέθοδος 'Quick', ενώ για όλα τα υπόλοιπα ορίστηκε η μέθοδος 'Second Order Upwind'. Οι συντελεστές 'Χαλάρωσης' (Under Relaxation Factors) κυμάνθηκαν από 0.4 – 0.6. Τέλος, ορίστηκαν οι αρχικές συνθήκες για επίλυση οι οποίες υπολογίζονται αυτόματα από τον επιλυτή του Fluent, κάτι που συνίσταται για προβλήματα σταθερής κατάστασης και ορίστηκε επίπεδο σύγκλισης 10⁻⁵.

4. Αποτελέσματα

Στο συγκεκριμένο Κεφάλαιο θα παρατεθούν και θα αναλυθούν τα αποτελέσματα σχετικά με τη ροή, την καύση, τη θερμοκρασία, τα παράγωγα της καύσης, τα στερεά σωματίδια του καυσίμου και τα πτητικά. Για λόγους συντομίας σχεδιάστηκε μία γεωμετρία δύο διαστάσεων όμοια με αυτή του λέβητα, σαν μία τομή στον άξονα YZ, όπου έγιναν διάφορες παραμετροποιήσεις. Από αυτές επιλέχθηκαν κάποιες που παρουσίαζαν ιδιαίτερο ενδιαφέρον και θα παρουσιαστούν σ' αυτό το κεφάλαιο στη γεωμετρία τριών διαστάσεων. Οι παραμετροποιήσεις αυτές αφορούν την περίσσεια αέρα, τη θερμοκρασία αέρα, καθώς και τη θερμοκρασία εισαγωγής του καυσίμου. Τα περισσότερα αποτελέσματα θα παρουσιαστούν στη τομή του λέβητα, που περνάει από τη μέση του, στον άξονα YZ, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 4.1**. Η συγκεκριμένη τομή είναι η πιο αντιπροσωπευτική, ώστε να μελετηθούν και να αναλυθούν τα αποτελέσματα.



Εικόνα 4.1: Τομή λέβητα για παρουσίαση Αποτελεσμάτων

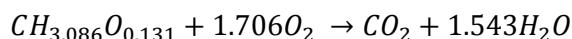
4.1 Επίδραση προθέρμανσης του αέρα καύσης

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα με εισαγωγή καυσίμου στους 400K, περίσσεια αέρα 26% και θερμοκρασία αέρα στους 300 και 500K. Στη συνέχεια θα γίνει σύγκριση αποτελεσμάτων για προθερμασμένο και μη προθερμασμένο αέρα.

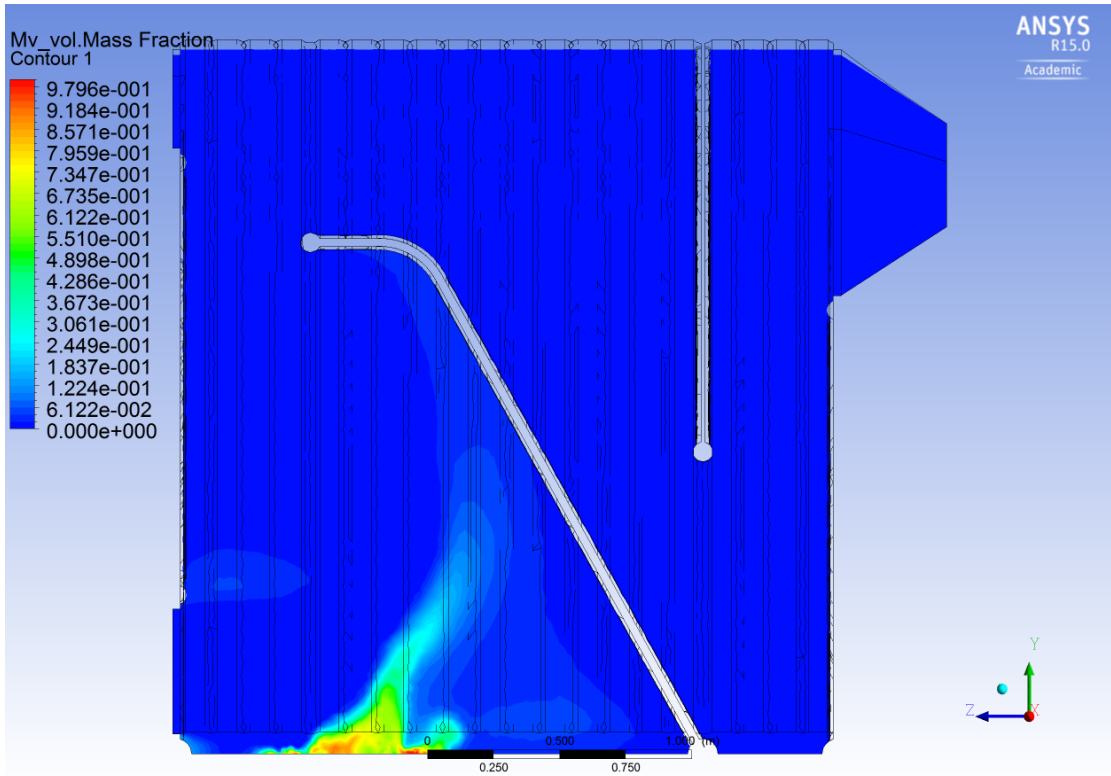
4.1.1 Αποτελέσματα για θερμοκρασία αέρα στους 300K

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα για $T_{\text{fuel}}=400\text{K}$, $\lambda=1.26$ και $T_{\text{air}}=300\text{K}$. Τα αποτελέσματα αυτά αφορούν τη συγκέντρωση των πτητικών, του CO_2 , του H_2O , του CO , του H_2 , καθώς και της συγκέντρωσης του O_2 και του N_2 .

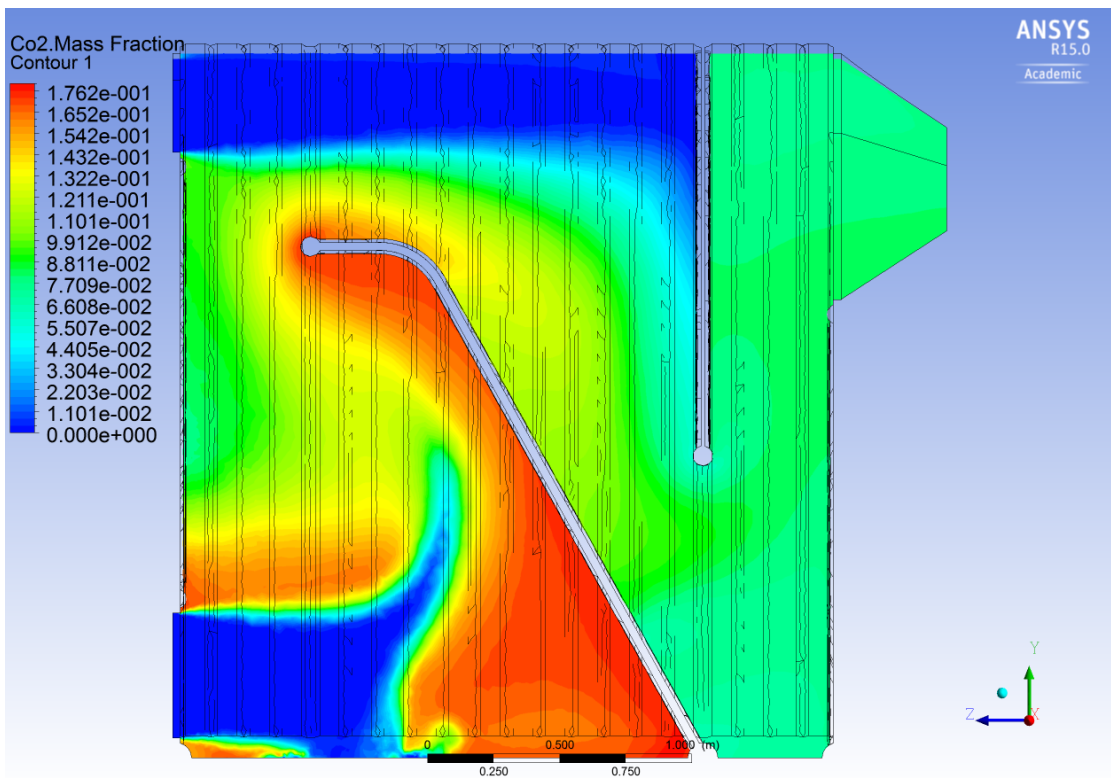
Στη καύση με περίσσεια αέρα, έχουμε πλήρη καύση του στερεού καυσίμου και των πτητικών, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 4.2**. Στη περίπτωση αυτή ο υδρογονάνθρακας (που στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι η ένωση των πτητικών $\text{CH}_{3.086}\text{O}_{0.131}$) δύναται να οξειδωθεί πλήρως και παράγεται CO_2 και H_2O , όπως φαίνεται και στη παρακάτω αντίδραση που χρησιμοποιήθηκε.



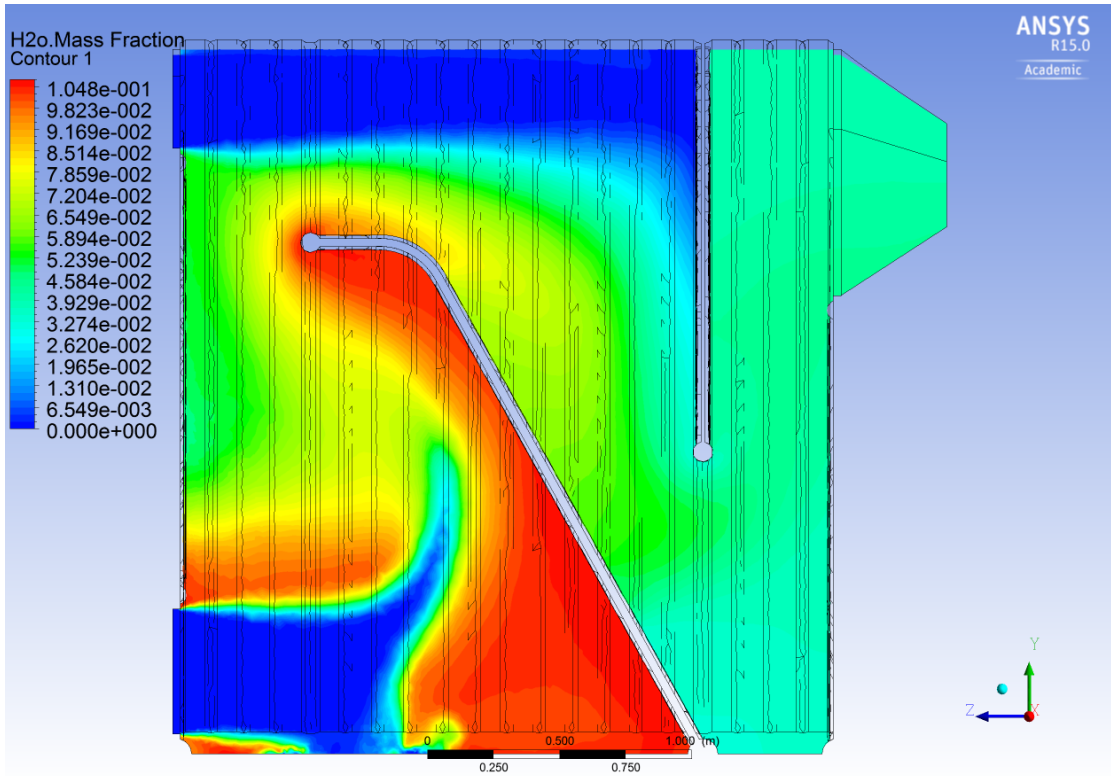
Η συγκέντρωση του CO_2 και του H_2O φαίνεται στις **Εικόνες 4.3** και **4.4**, αντίστοιχα. Οι μέγιστες συγκεντρώσεις CO_2 και H_2O παρουσιάζονται στις περιοχές που καίγονται τα πτητικά και που υπάρχει μέγιστη θερμοκρασία, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 4.5**.



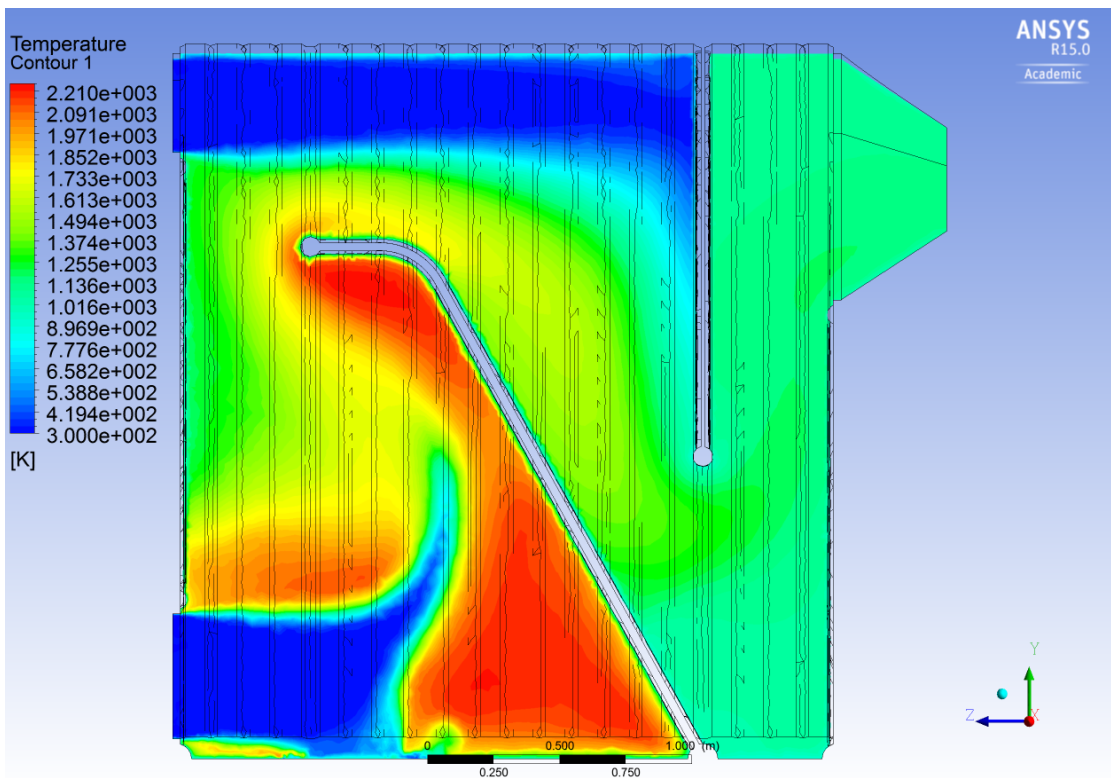
Εικόνα 4.2: Κλάσμα μάζας πηητικών για $T_{air}=300K$, $T_{fuel}=400K$, και $\lambda=1.26$



Εικόνα 4.3: Κλάσμα μάζας CO₂ για $T_{air}=300K$, $T_{fuel}=400K$, και $\lambda=1.26$

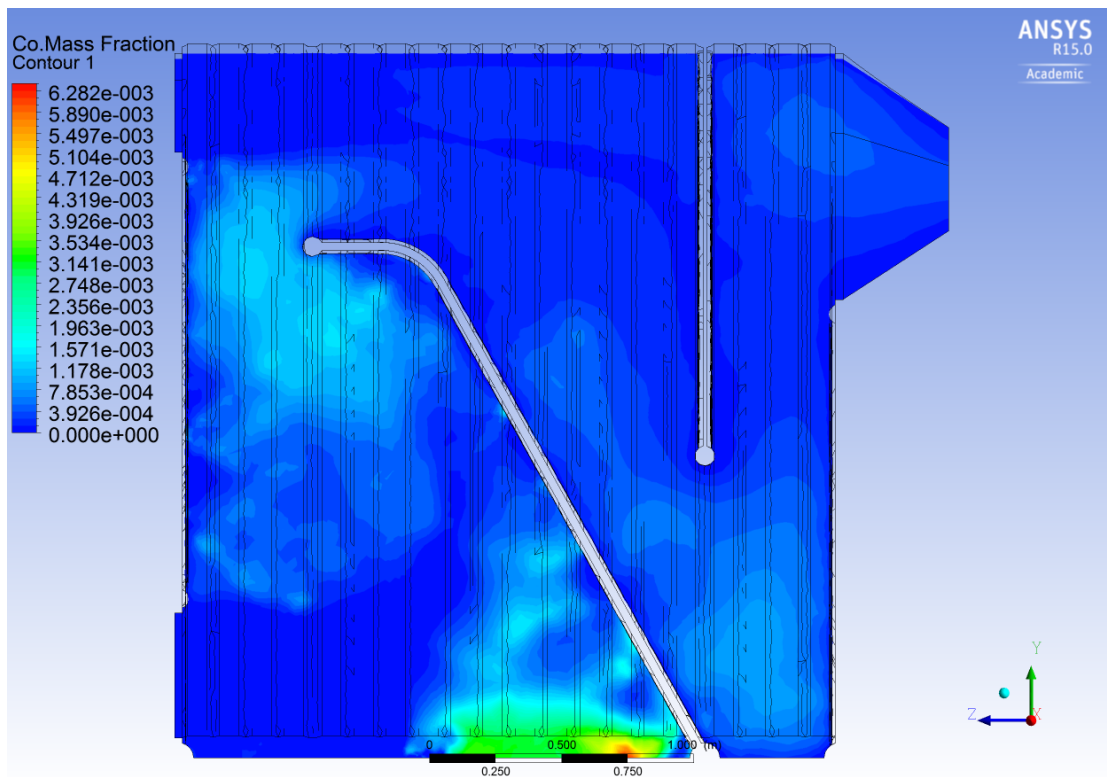
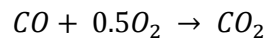
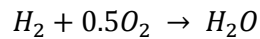
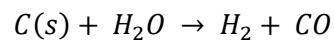
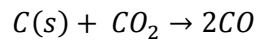
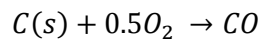
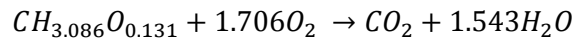


Εικόνα 4.4: Κλάσμα μάζας H₂O για T_{air}=300K, T_{fuel}=400K και λ=1.26

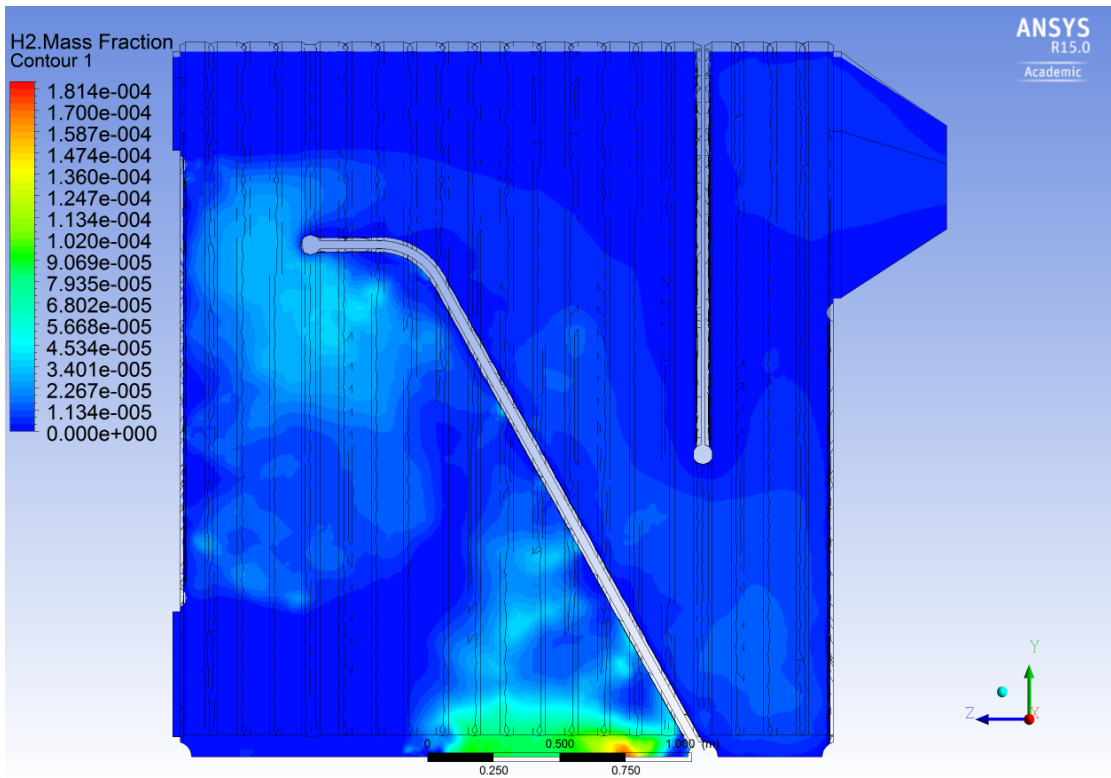


Εικόνα 4.5: Θερμοκρασία για T_{air}=300K, T_{fuel}=400K και λ=1.26

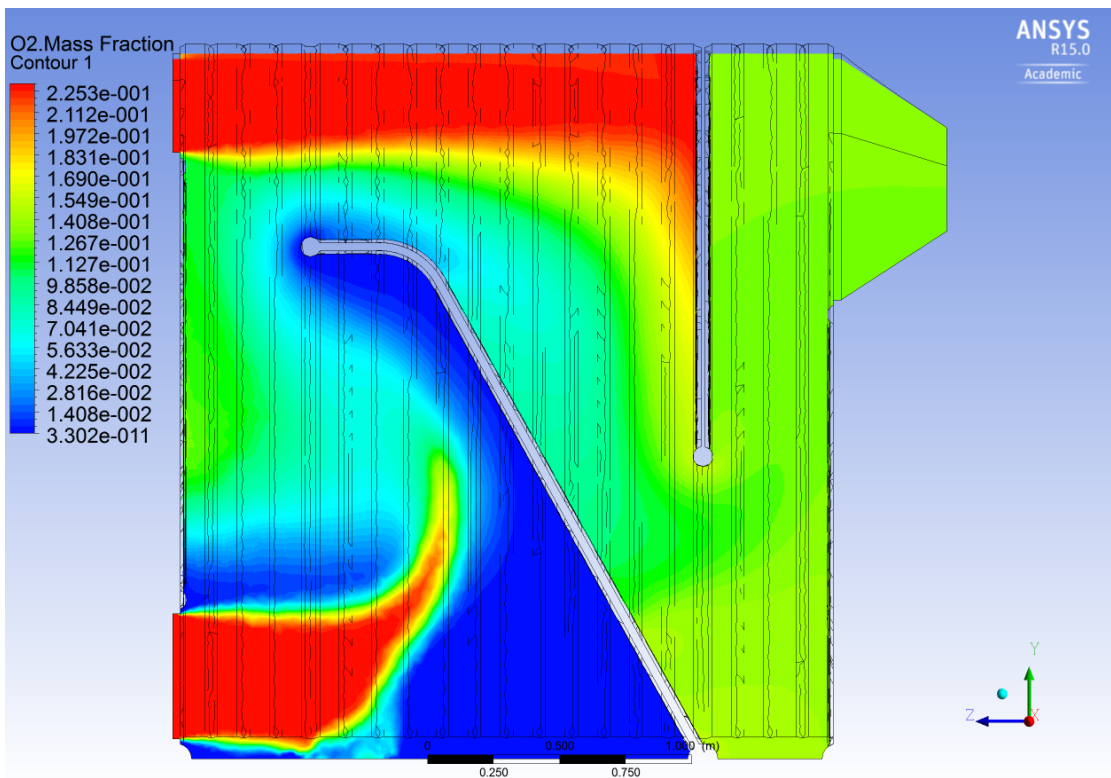
Στη πλήρη καύση εμφανίζονται μικρές συγκεντρώσεις CO και H₂, αφού υπάρχει αρκετό οξυγόνο, ώστε να μετατραπούν σε CO₂ και H₂O. Η συγκέντρωση του CO και του H₂ φαίνεται στις **Εικόνες 4.6** και **4.7**, αντίστοιχα. Οι συγκεντρώσεις αυτές εμφανίζονται στις περιοχές που υπάρχει CO₂ και H₂O, αφού αποτελούν το ενδιάμεσο στάδιο παραγωγής τους από τη καύση του άνθρακα, όπως φαίνεται και στις παρακάτω αντιδράσεις που χρησιμοποιήθηκαν. Τέλος, το οξυγόνο καίγεται μερικώς και υπάρχει σε περίσσεια, ενώ το άζωτο παραμένει αδρανές, όπως φαίνεται στις **Εικόνες 4.8** και **4.9**, αντίστοιχα.



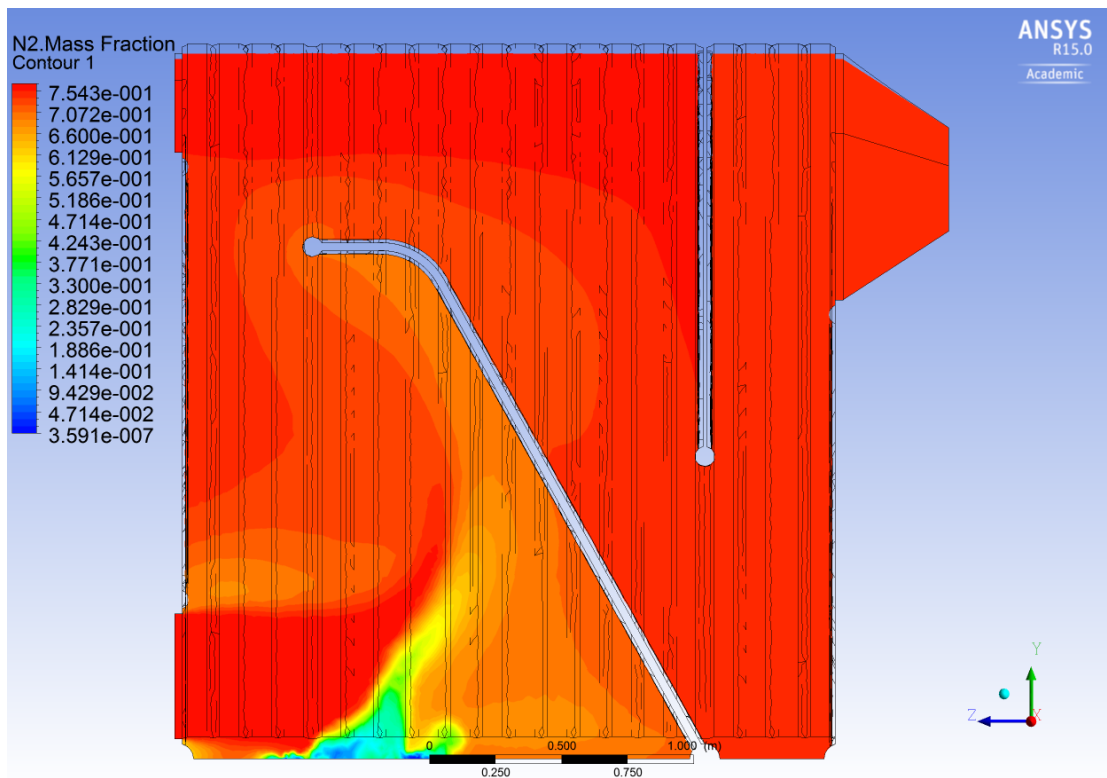
Εικόνα 4.6: Κλάσμα μάζας CO για T_{air}=300K, T_{fuel}=400K και λ=1.26



Εικόνα 4.7: Κλάσμα μάζας H₂ για T_{air}=300K, T_{fuel}=400K και λ=1.26



Εικόνα 4.8: Κλάσμα μάζας O₂ για T_{fuel}=400K, T_{air}=300K και λ=1.26



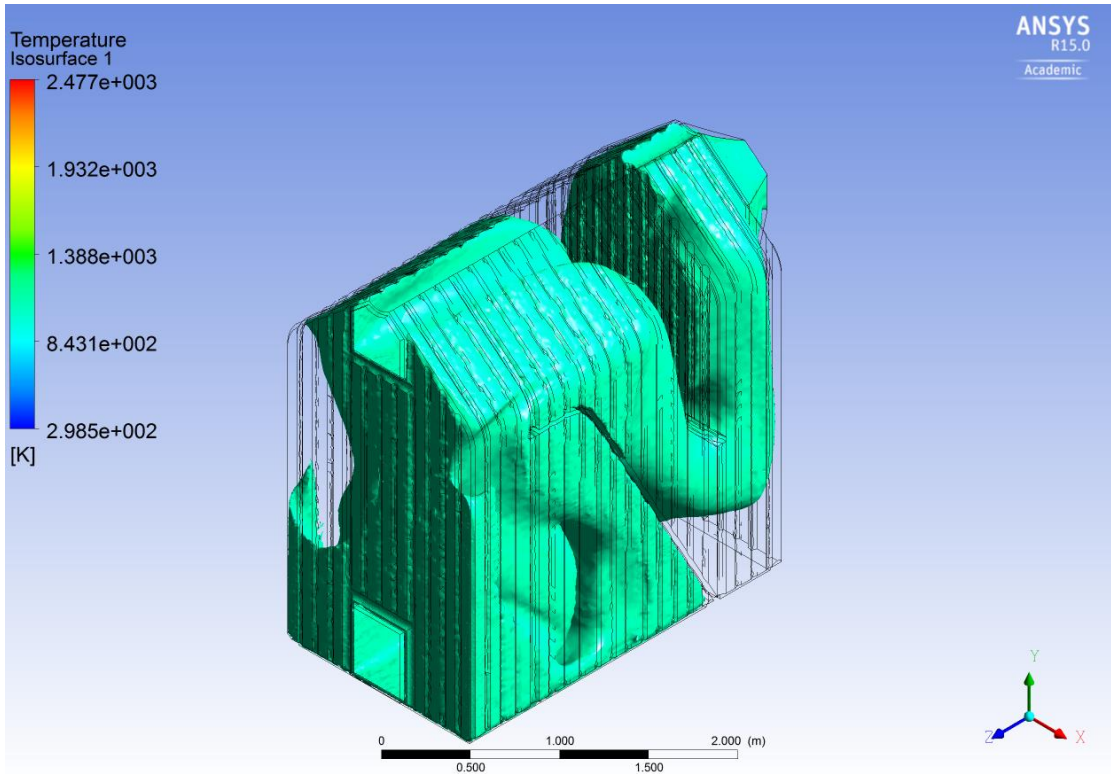
Εικόνα 4.9: Κλάσμα μάζας N_2 για $T_{fuel}=400K$, $T_{air}=300K$ και $\lambda=1.26$

Για την καλύτερη απεικόνιση των αποτελεσμάτων έγινε χρήση φασμάτων σε τρισδιάστατη μορφή για την παρουσίαση ενδεικτικών τιμών των παραμέτρων. Στις **Εικόνες 4.10 – 4.13** φαίνεται η σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας για 1100K, 1300K, 1800K και 2200K. Η μέγιστη θερμοκρασία σημειώνεται στην περιοχή όπου το καύσιμο καίγεται πλήρως, ενώ η θερμοκρασία που παρατηρείται στο μεγαλύτερο μέρος του λέβητα είναι 1800K.

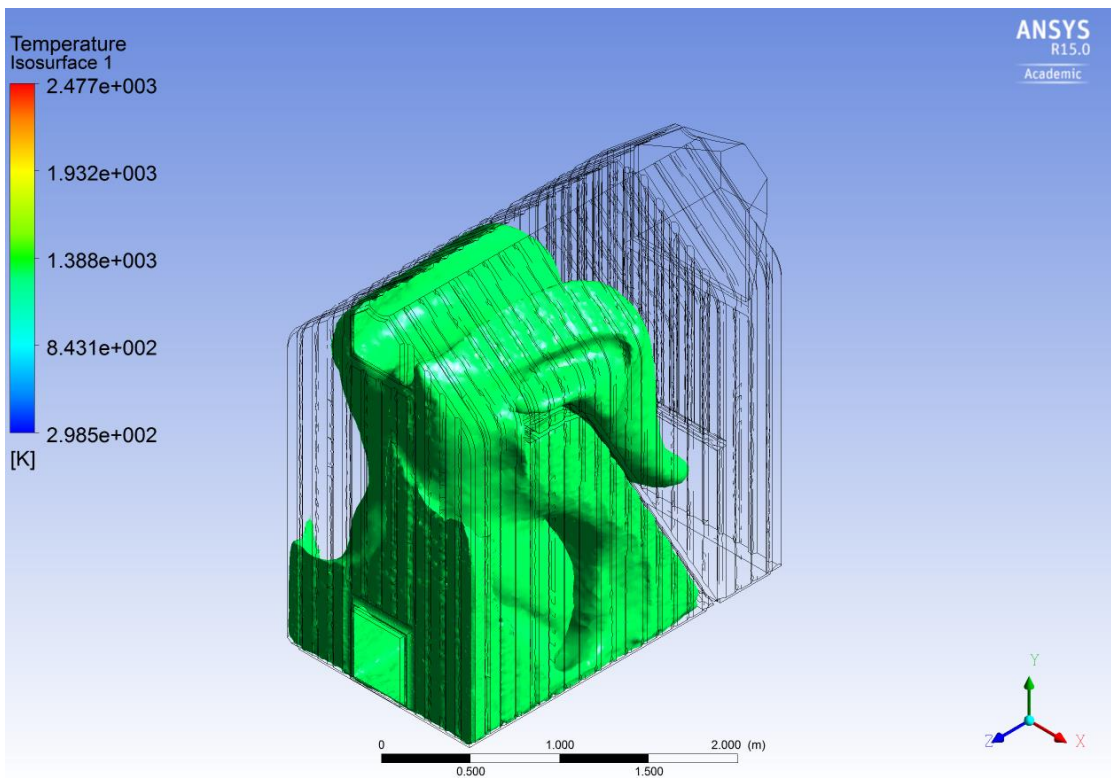
Στις **Εικόνες 4.14 – 4.17** φαίνεται η σταδιακή μείωση του O_2 για κλάσμα μάζας 0.23, 0.16, 0.1 και 0.04. Παρατηρείται ότι το οξυγόνο εισέρχεται στο λέβητα με ποσοστό 23% και σταδιακά αντιδρώντας με το καύσιμο καίγεται.

Στις **Εικόνες 4.18 – 4.20** φαίνεται η σταδιακή μείωση του CO_2 για κλάσμα μάζας 0.15, 0.1 και 0.05. Στις περιοχές όπου εισέρχεται το καύσιμο και ξεκινά να καίγεται, παράγεται CO_2 με κλάσμα μάζας 0.05. Στη συνέχεια, όταν το καύσιμο καεί πλήρως παρουσιάζονται οι μέγιστες συγκεντρώσεις CO_2 , ενώ το κλάσμα μάζας στην έξοδο είναι 0.15.

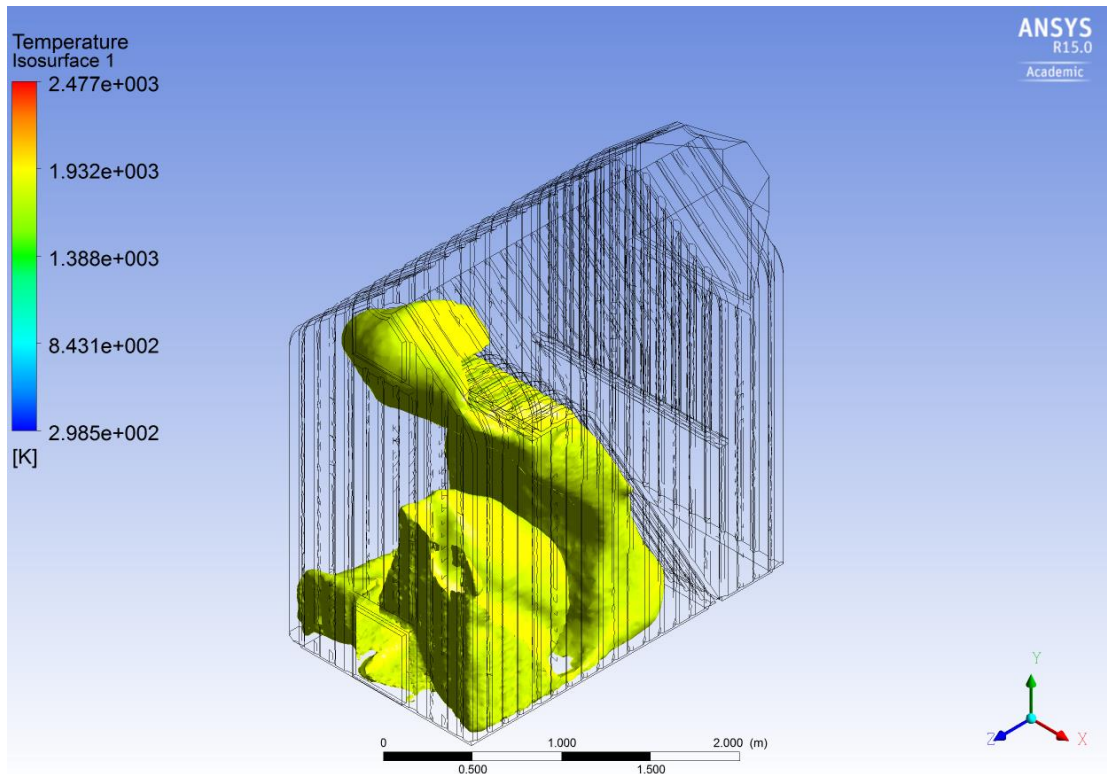
Τέλος, στις **Εικόνες 4.21 – 4.23** φαίνεται η σταδιακή μείωση των πτητικών για κλάσμα μάζας 0.2, 0.02 και 0.002. Παρατηρείται πως όταν τα πτητικά απελευθερώνονται το κλάσμα μάζας τους είναι 0.2 και στη συνέχεια φαίνεται πως καίγονται σταδιακά.



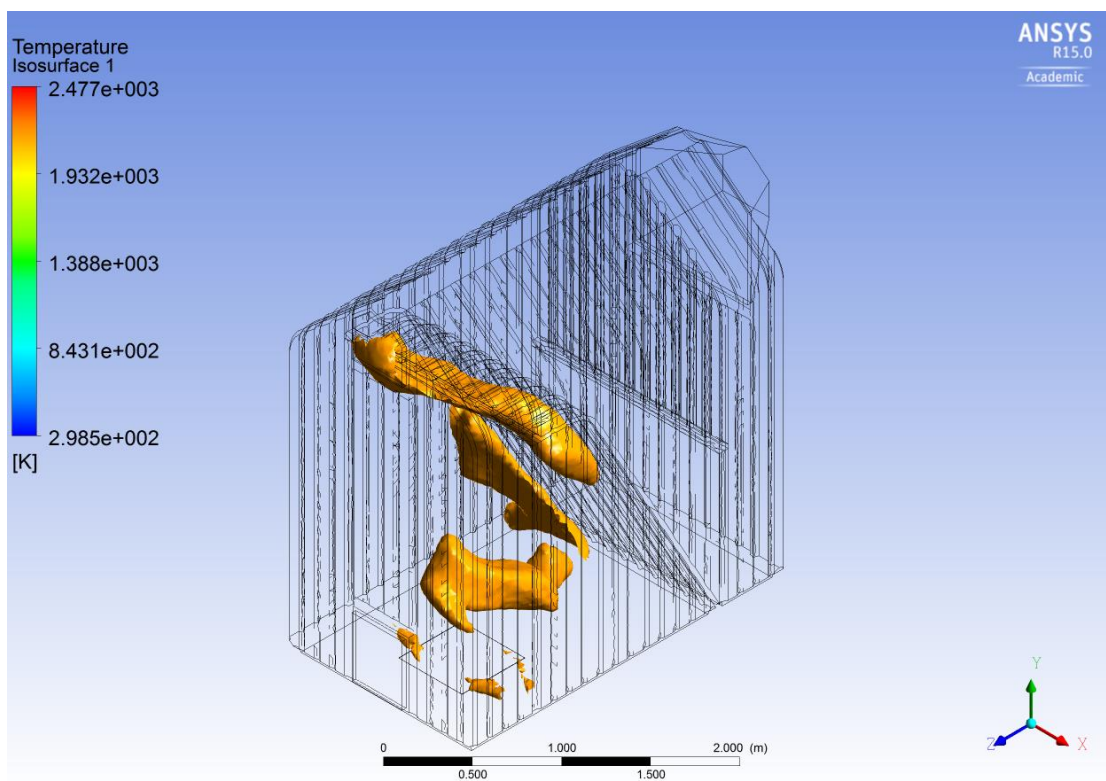
Εικόνα 4.10: Περιοχές για $T=1100\text{K}$ για $T_{\text{fuel}}=400\text{K}$, $T_{\text{air}}=300\text{K}$ και $\lambda=1.26$



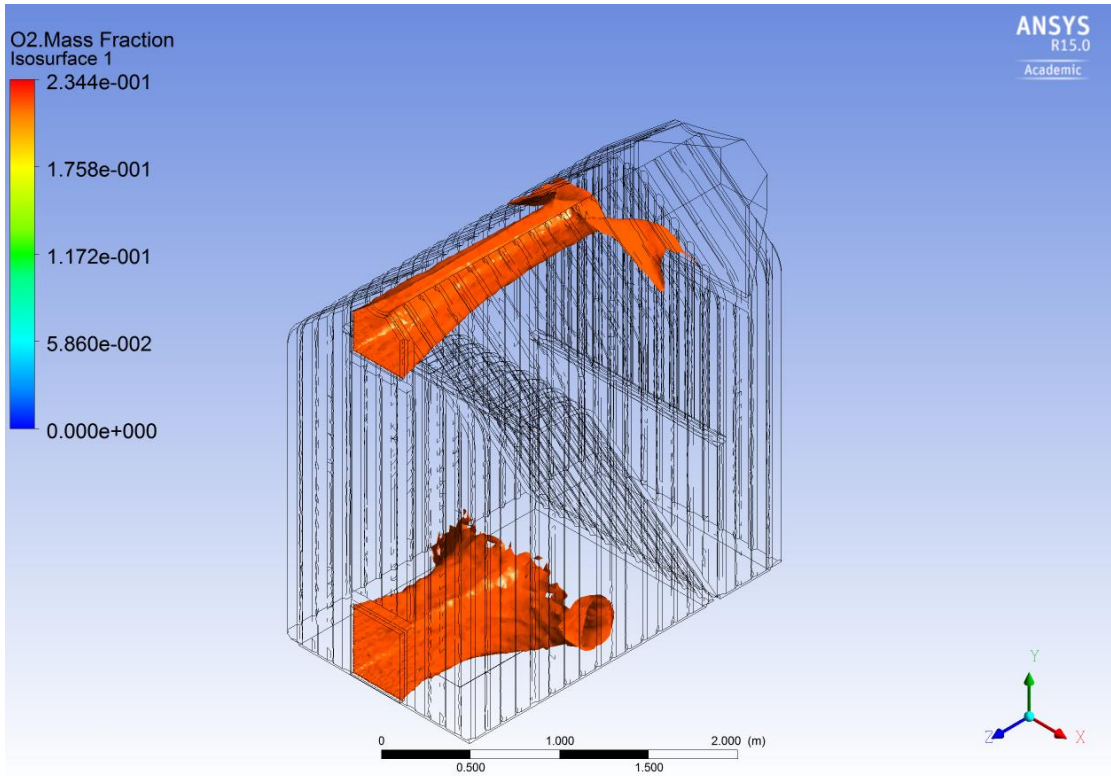
Εικόνα 4.11: Περιοχές για $T=1300\text{K}$ για $T_{\text{fuel}}=400\text{K}$, $T_{\text{air}}=300\text{K}$ και $\lambda=1.26$



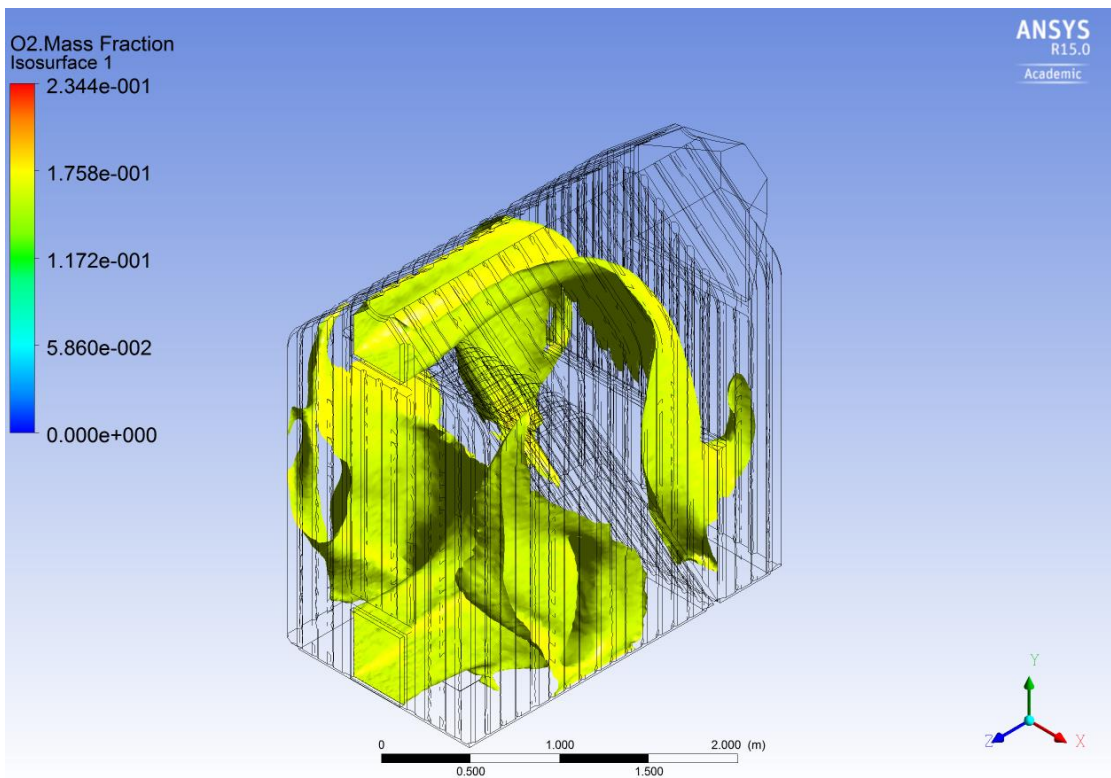
Εικόνα 4.12: Περιοχές για $T=1800\text{K}$ για $T_{\text{fuel}}=400\text{K}$, $T_{\text{air}}=300\text{K}$ και $\lambda=1.26$



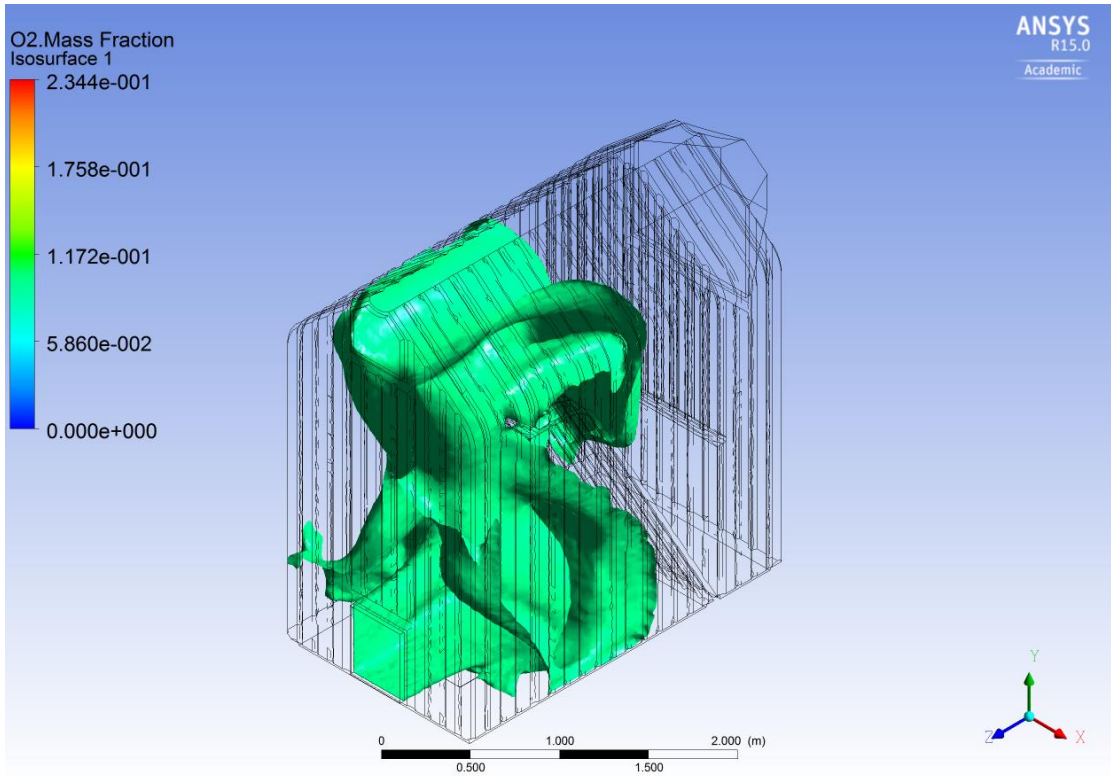
Εικόνα 4.13: Περιοχές για $T=2200\text{K}$ για $T_{\text{fuel}}=400\text{K}$, $T_{\text{air}}=300\text{K}$ και $\lambda=1.26$



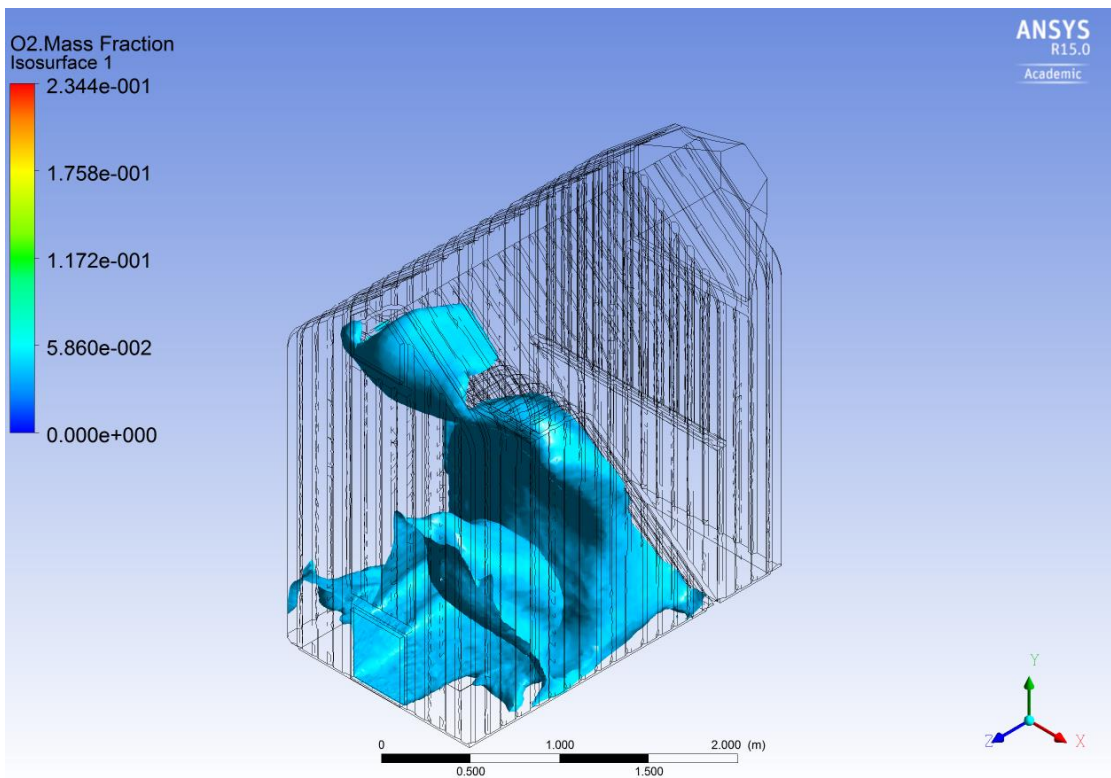
Εικόνα 4.14: Περιοχές για κλάσμα μάζας O₂ 0.23 για $T_{fuel}=400K$, $T_{air}=300K$ και $\lambda=1.26$



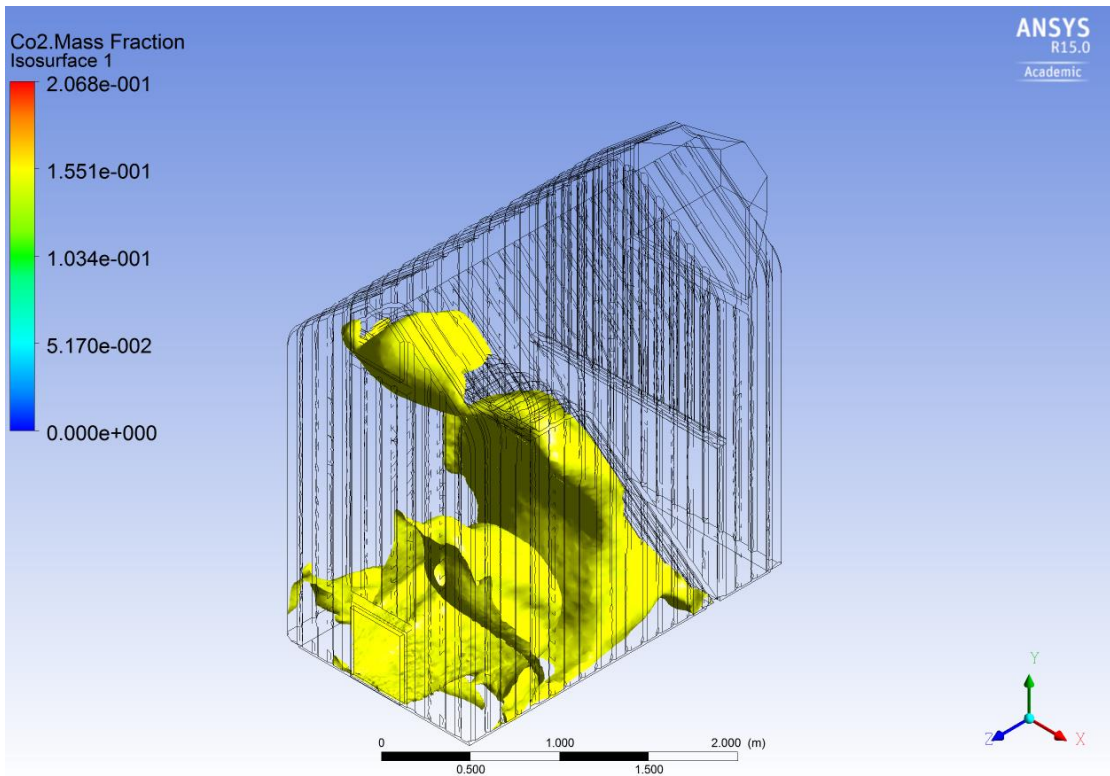
Εικόνα 4.15: Περιοχές για κλάσμα μάζας O₂ 0.16 για $T_{fuel}=400K$, $T_{air}=300K$ και $\lambda=1.26$



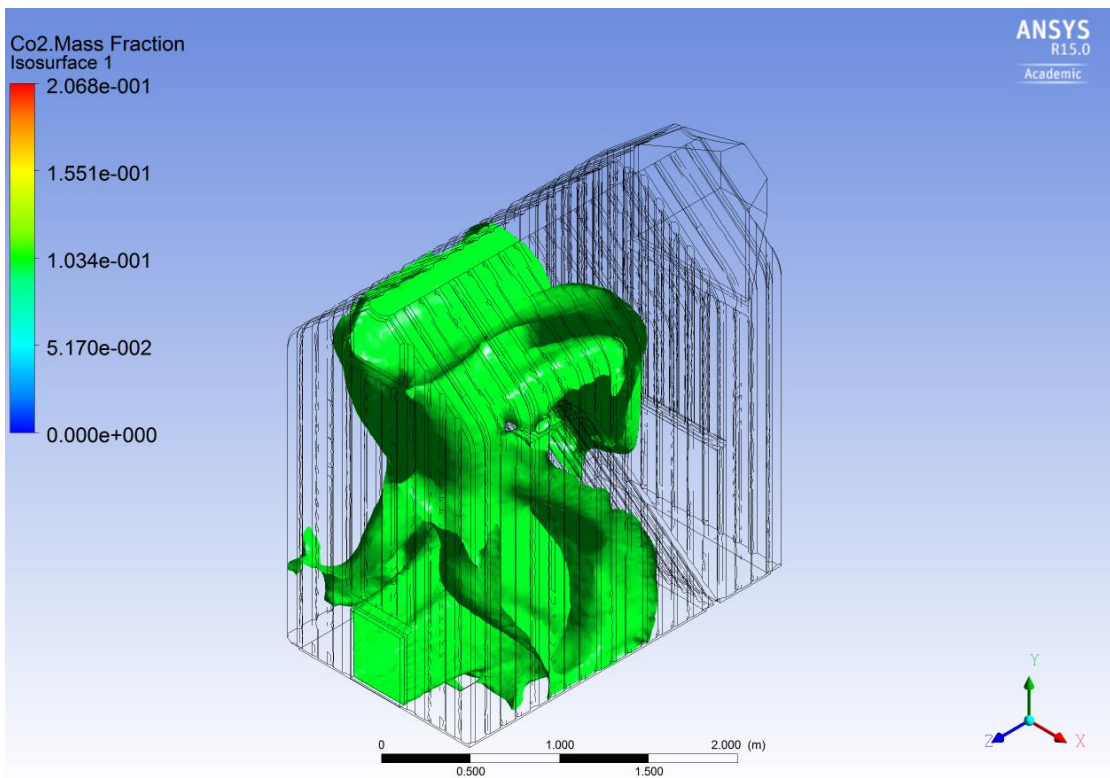
Εικόνα 4.16: Περιοχές για κλάσμα μάζας O₂ 0.1 για $T_{fuel}=400K$, $T_{air}=300K$ και $\lambda=1.26$



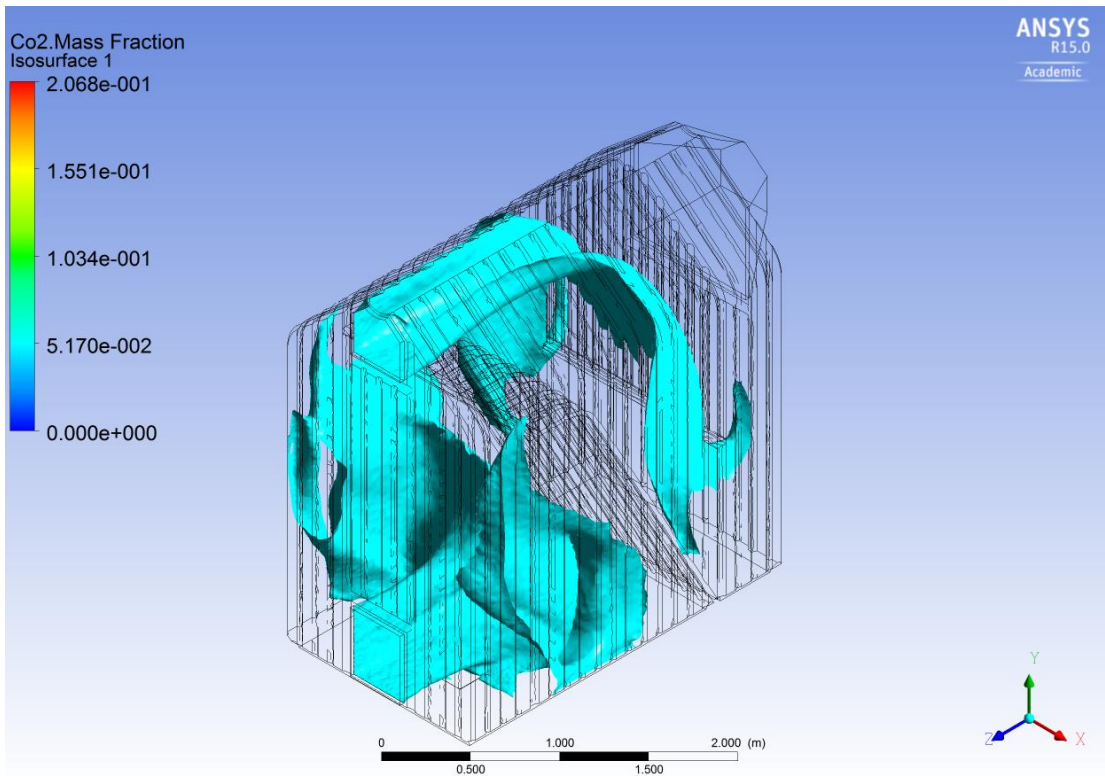
Εικόνα 4.17: Περιοχές για κλάσμα μάζας O₂ 0.04 για $T_{fuel}=400K$, $T_{air}=300K$ και $\lambda=1.26$



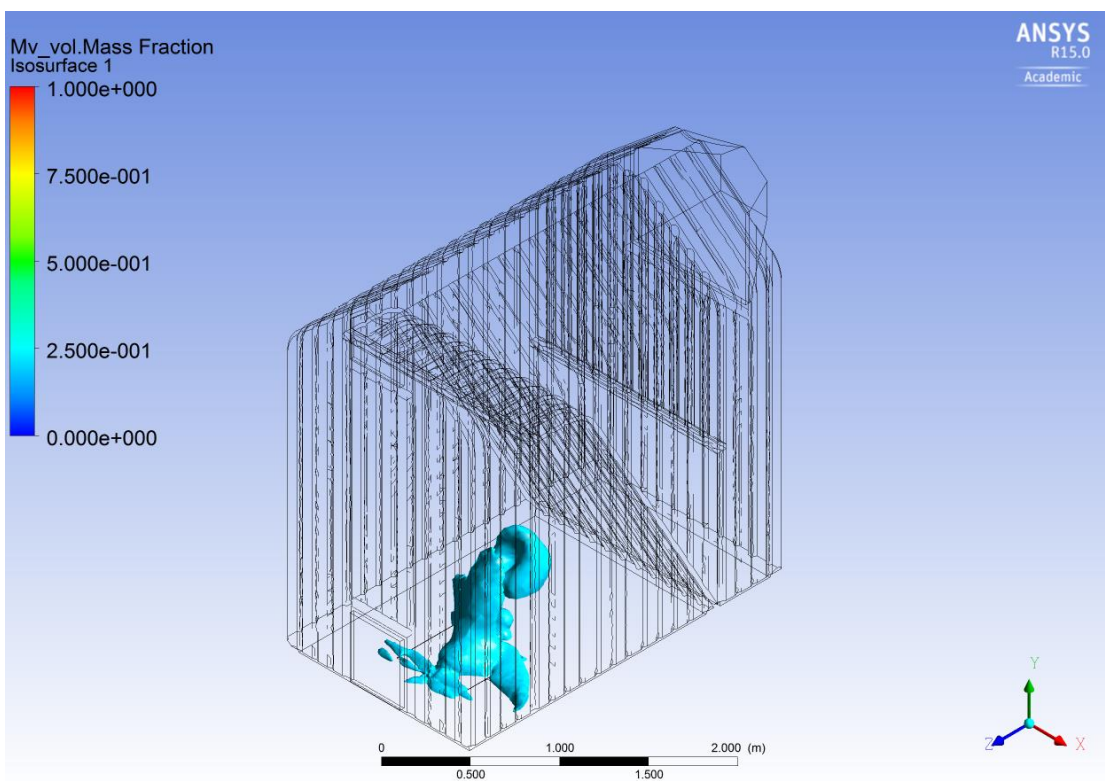
Εικόνα 4.18: Περιοχές για κλάσμα μάζας CO_2 0.15 για $T_{\text{fuel}}=400\text{K}$, $T_{\text{air}}=300\text{K}$ και $\lambda=1.26$



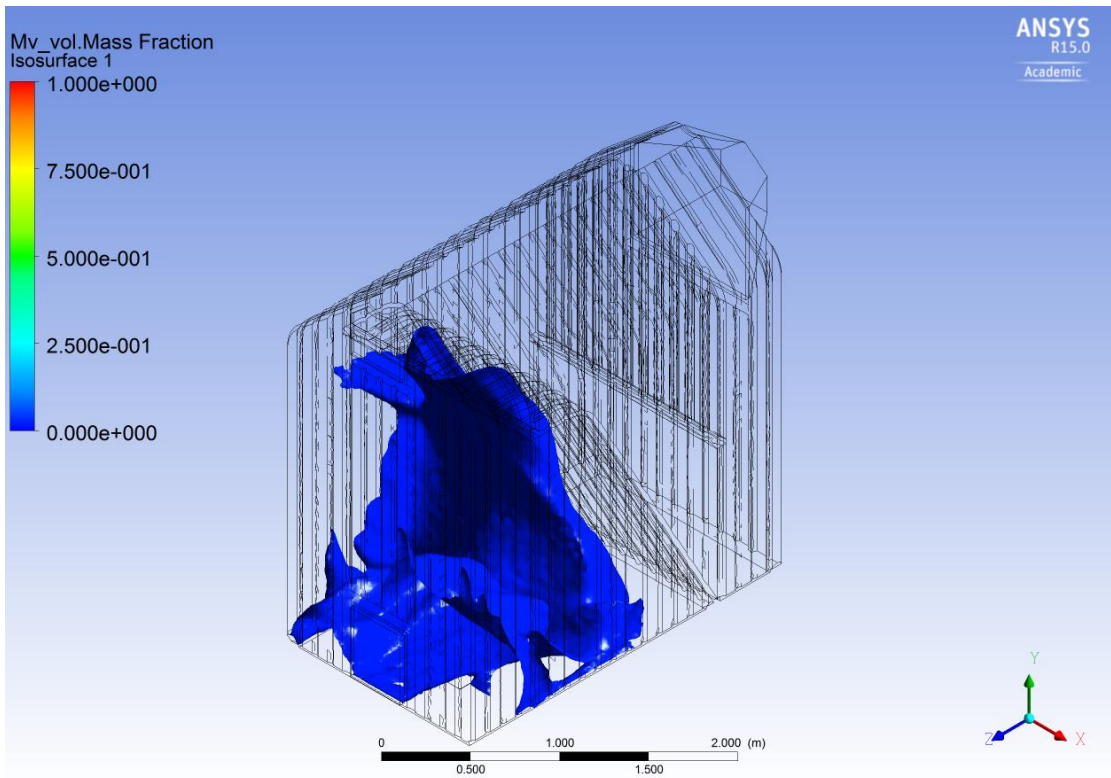
Εικόνα 4.19: Περιοχές για κλάσμα μάζας CO_2 0.1 για $T_{\text{fuel}}=400\text{K}$, $T_{\text{air}}=300\text{K}$ και $\lambda=1.26$



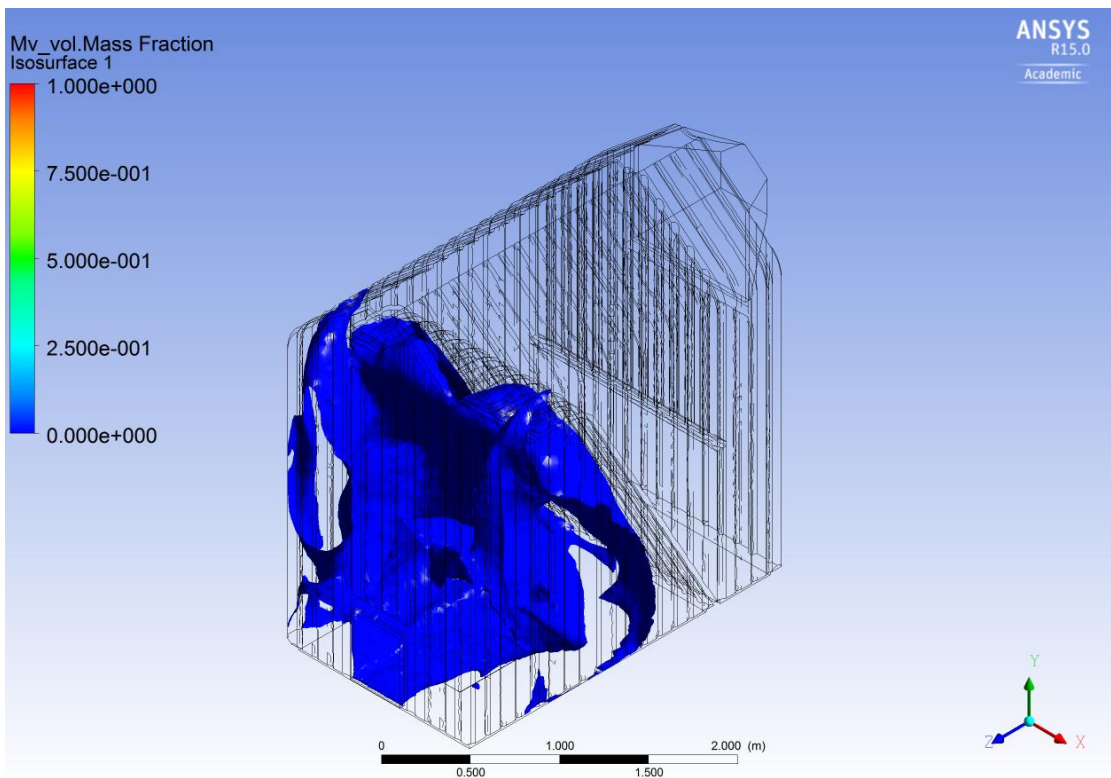
Εικόνα 4.20: Περιοχές για κλάσμα μάζας CO₂ 0.05 για T_{fuel}=400K, T_{air}=300K και λ=1.26



Εικόνα 4.21: Περιοχές για κλάσμα μάζας πηητικών 0.2 για T_{fuel}=400K, T_{air}=300K και λ=1.26



Εικόνα 4.22: Περιοχές για κλάσμα μάζας πηθικών 0.02 για $T_{fuel}=400K$, $T_{air}=300K$ και $\lambda=1.26$

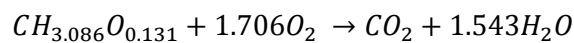


Εικόνα 4.23: Περιοχές για κλάσμα μάζας πηθικών 0.002 για $T_{fuel}=400K$, $T_{air}=300K$ και $\lambda=1.26$

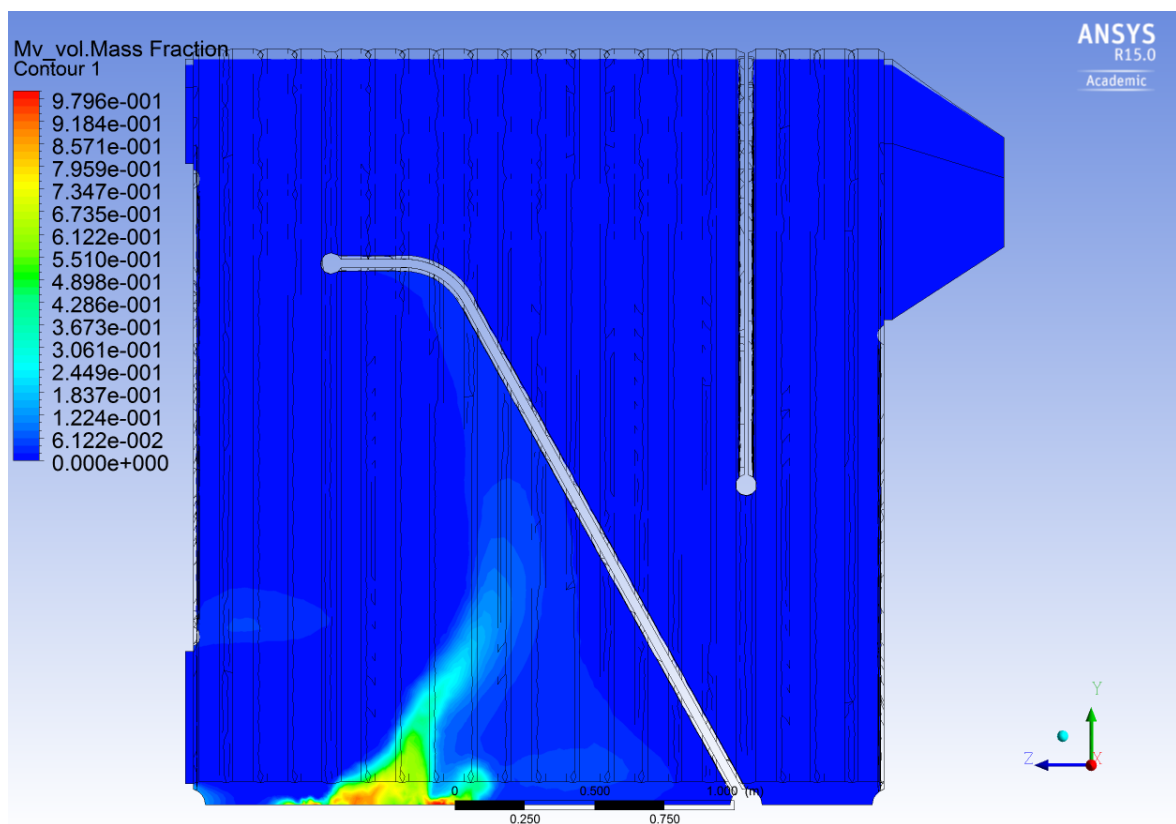
4.1.2 Αποτελέσματα για προθερμασμένο αέρα στους 500K

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα για $T_{\text{fuel}}=400\text{K}$, $\lambda=1.26$ και $T_{\text{air}}=500\text{K}$. Τα αποτελέσματα αυτά αφορούν τη συγκέντρωση των πτητικών, του CO_2 , του H_2O , του CO , του H_2 , καθώς και της θερμοκρασίας του O_2 και του N_2 .

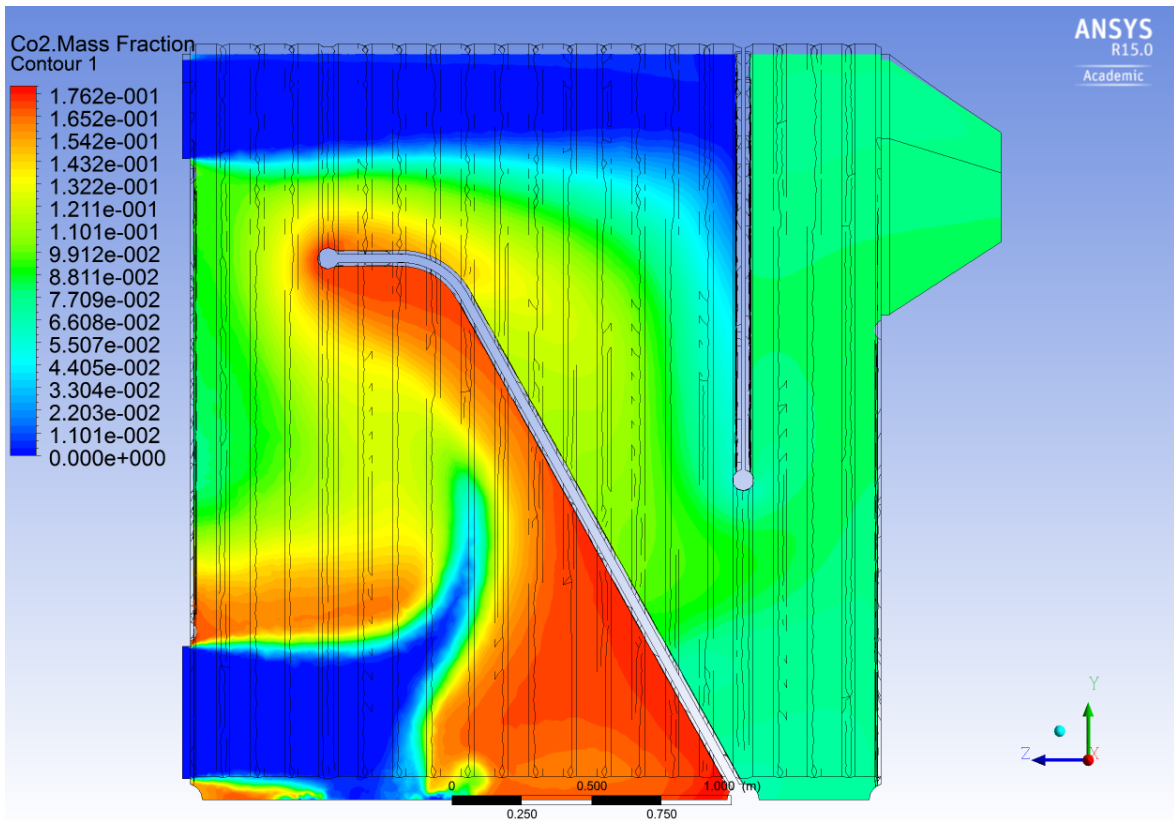
Στη καύση με περίσσεια αέρα, έχουμε πλήρη καύση του στερεού καυσίμου και των πτητικών, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 4.24**. Στη περίπτωση αυτή ο υδρογονάνθρακας (που στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι η ένωση των πτητικών $\text{CH}_{3.086}\text{O}_{0.131}$) δύναται να οξειδωθεί πλήρως και παράγεται CO_2 και H_2O , όπως φαίνεται και στη παρακάτω αντίδραση που χρησιμοποιήθηκε.



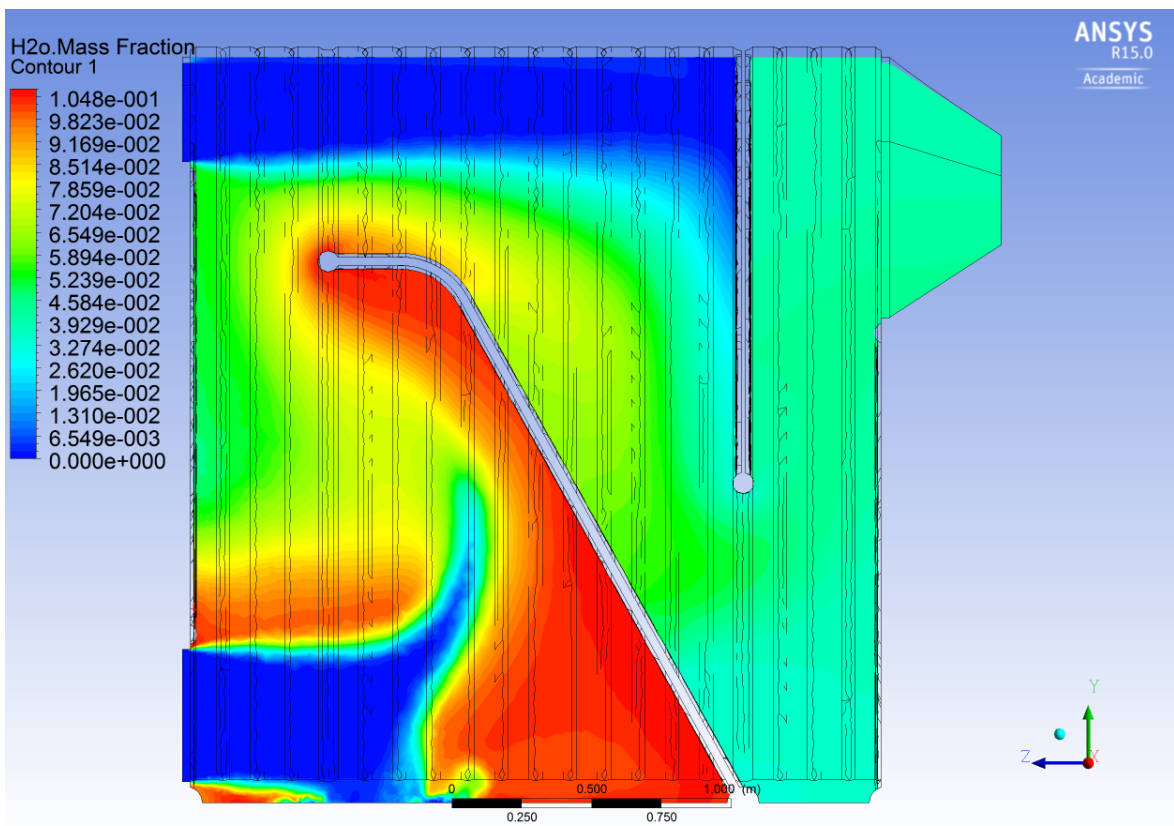
Η συγκέντρωση του CO_2 και του H_2O φαίνεται στις **Εικόνες 4.25** και **4.26**, αντίστοιχα. Οι μέγιστες συγκεντρώσεις CO_2 και H_2O παρουσιάζονται στις περιοχές που καίγονται τα πτητικά και που υπάρχει μέγιστη θερμοκρασία, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 4.27**.



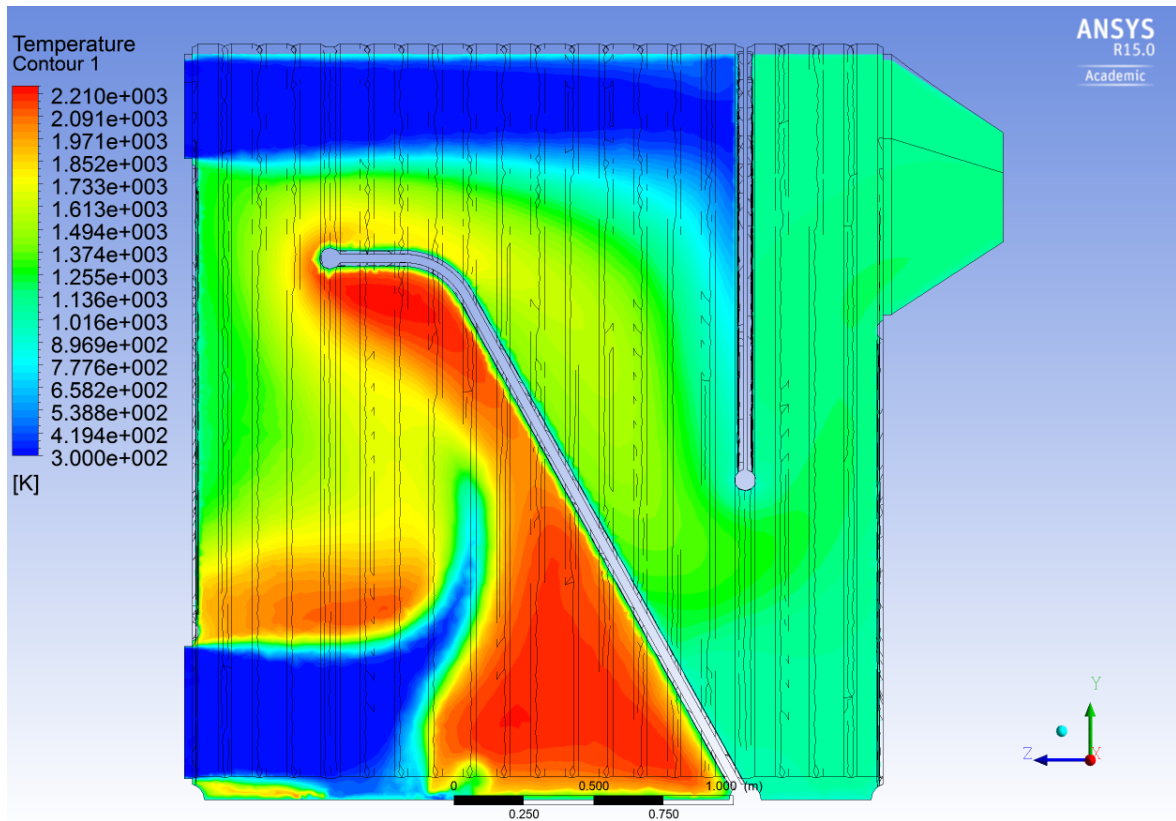
Εικόνα 4.24: Κλάσμα μάζας πτητικών για $T_{\text{fuel}}=400\text{K}$, $T_{\text{air}}=500\text{K}$ και $\lambda=1.26$



Εικόνα 4.25: Κλάσμα μάζας CO₂ για T_{fuel}=400K, T_{air}=500K και λ=1.26

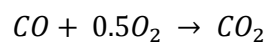
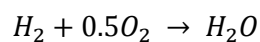
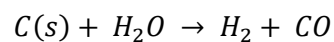
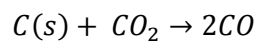
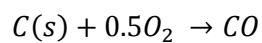
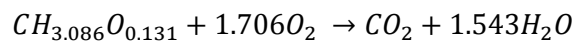


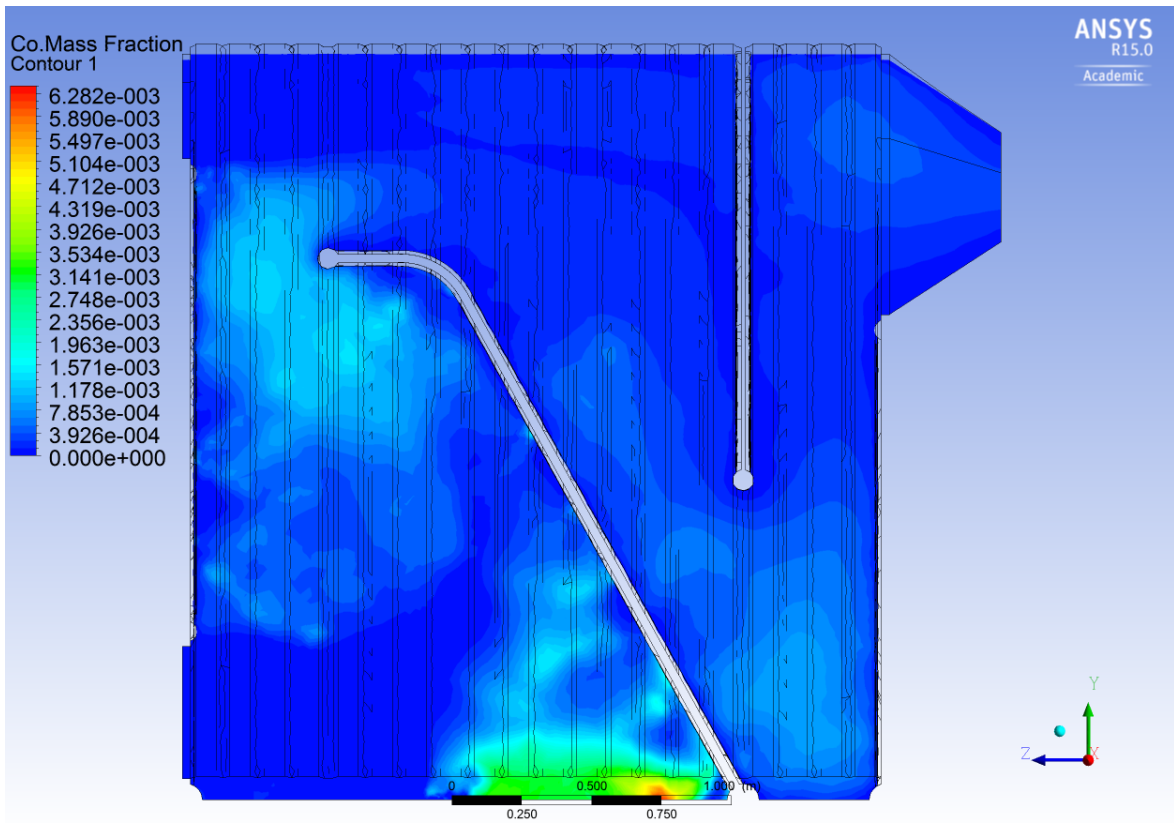
Εικόνα 4.26: Κλάσμα μάζας H₂O για T_{fuel}=400K, T_{air}=500K και λ=1.26



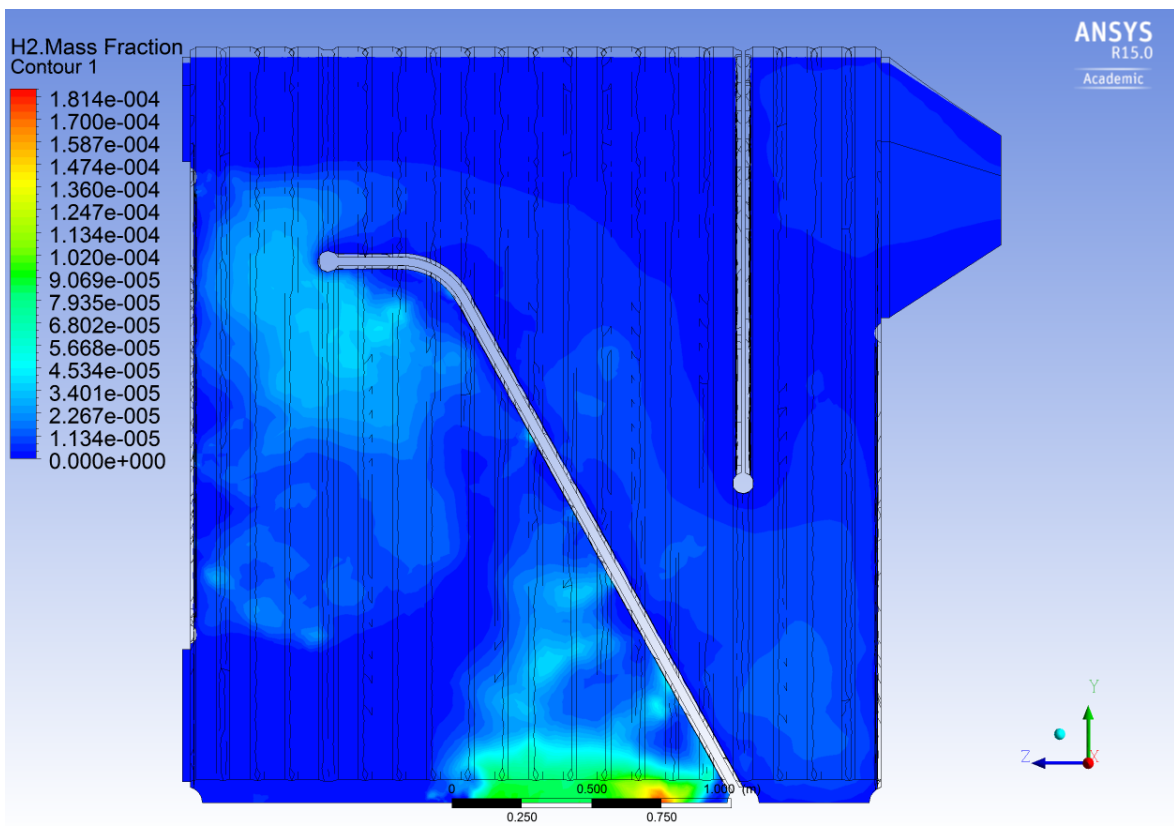
Εικόνα 4.27: Θερμοκρασία για $T_{\text{fuel}}=400\text{K}$, $T_{\text{air}}=500\text{K}$ και $\lambda=1.26$

Στη πλήρη καύση εμφανίζονται μικρές συγκεντρώσεις CO και H_2 , αφού υπάρχει αρκετό οξυγόνο, ώστε να μετατραπούν σε CO_2 και H_2O . Η συγκέντρωση του CO και του H_2 φαίνεται στις **Εικόνες 4.28** και **4.29**, αντίστοιχα. Οι συγκεντρώσεις αυτές εμφανίζονται στις περιοχές που υπάρχει CO_2 και H_2O , αφού αποτελούν το ενδιάμεσο στάδιο παραγωγής τους από τη καύση του άνθρακα, όπως φαίνεται και στις παρακάτω αντιδράσεις που χρησιμοποιήθηκαν. Τέλος, το οξυγόνο καίγεται μερικώς και υπάρχει σε περίσσεια, ενώ το άζωτο παραμένει αδρανές, όπως φαίνεται στις **Εικόνες 4.30** και **4.31**, αντίστοιχα.

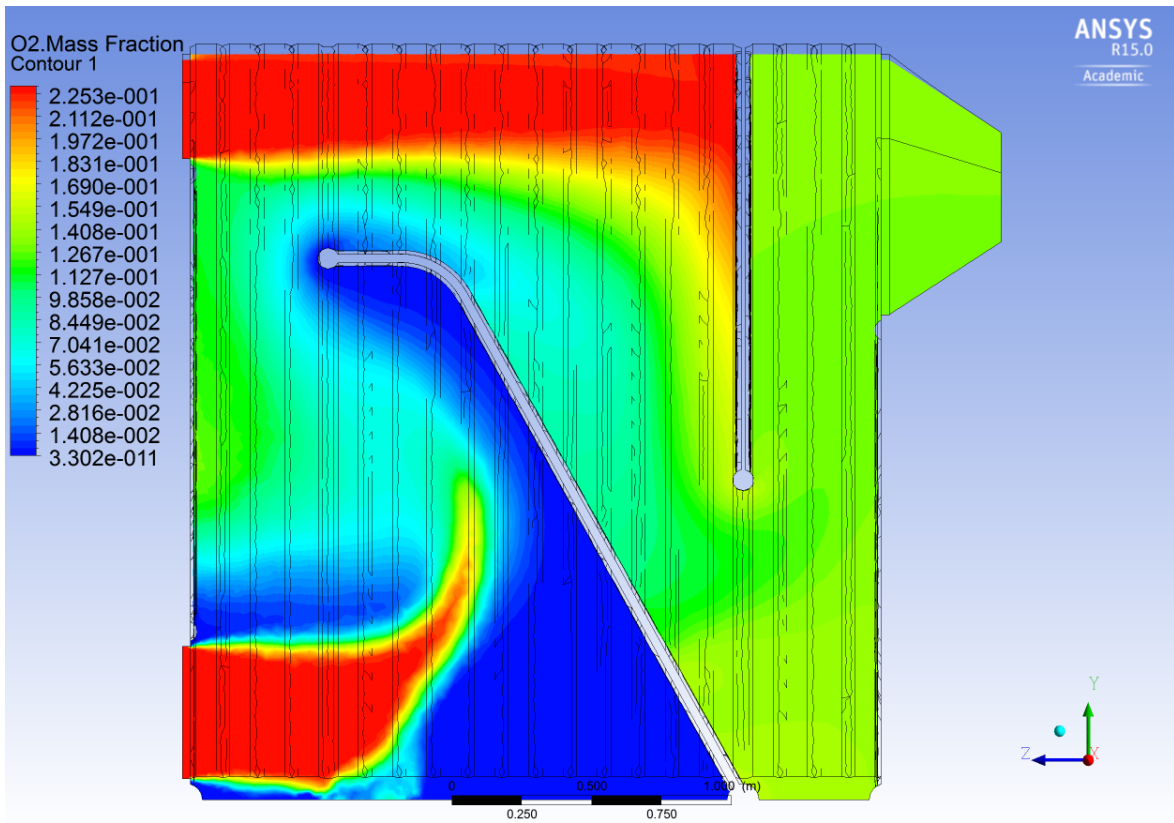




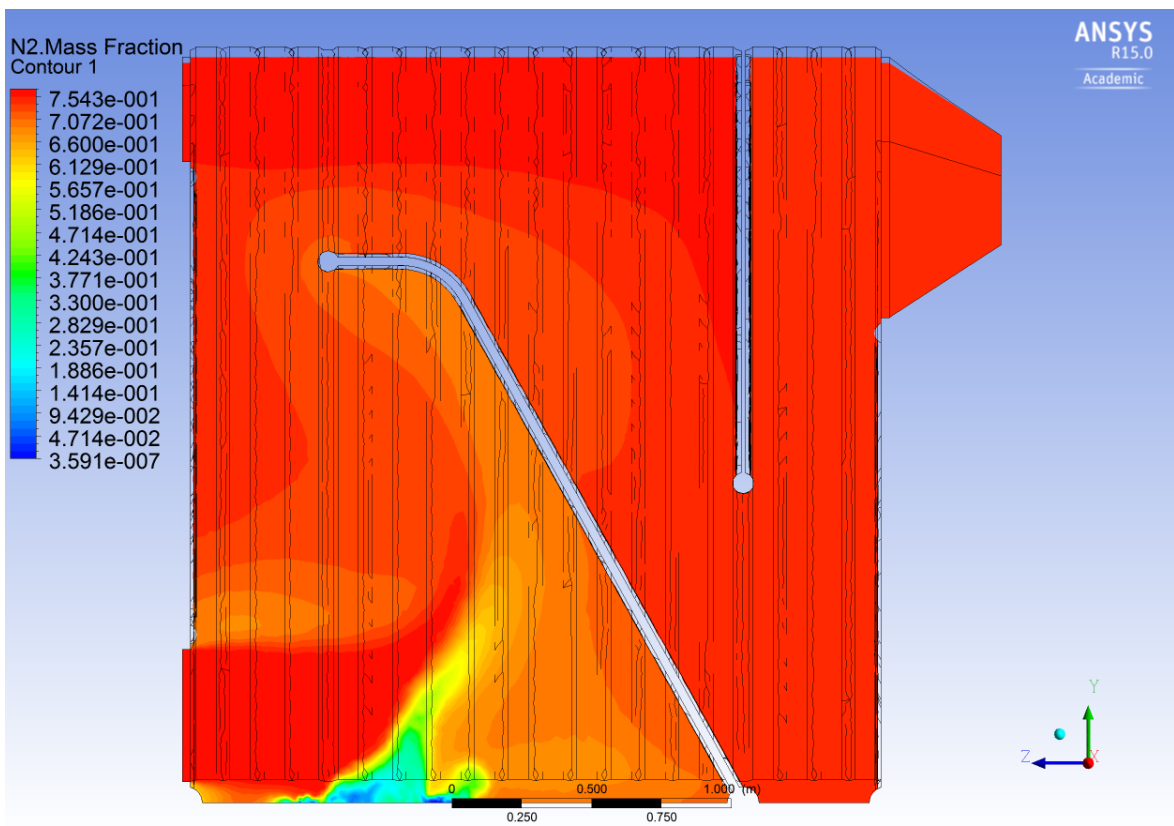
Εικόνα 4.28: Κλάσμα μάζας CO για $T_{fuel}=400K$, $T_{air}=500K$ και $\lambda=1.26$



Εικόνα 4.29: Κλάσμα μάζας H₂ για $T_{fuel}=400K$, $T_{air}=500K$ και $\lambda=1.26$



Εικόνα 4.30: Κλάσμα μάζας O₂ για T_{fuel}=400K, T_{air}=500K και λ=1.26



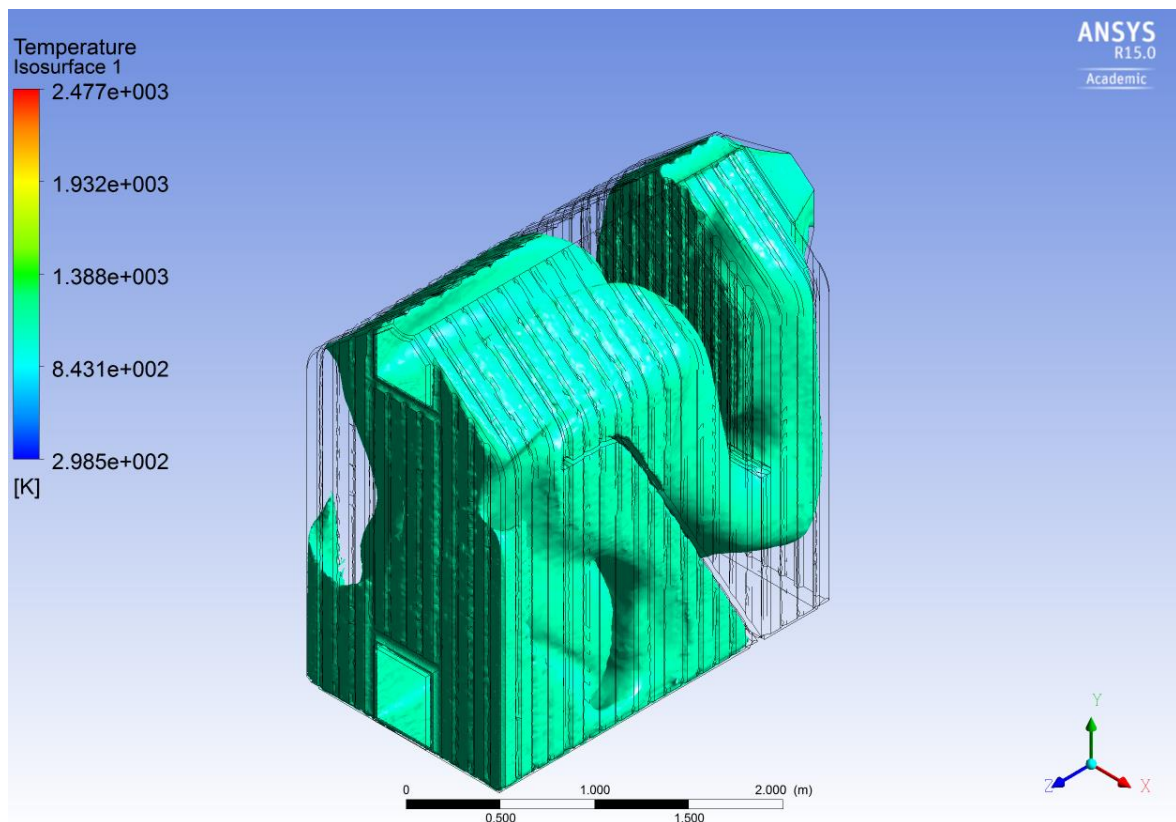
Εικόνα 4.31: Κλάσμα μάζας N₂ για T_{fuel}=400K, T_{air}=500K και λ=1.26

Για την καλύτερη απεικόνιση των αποτελεσμάτων έγινε χρήση φασμάτων σε τρισδιάστατη μορφή για την παρουσίαση ενδεικτικών τιμών των παραμέτρων. Στις **Εικόνες 4.32 – 4.35** φαίνεται η σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας για 1100K, 1300K, 1800K και 2200K. Η μέγιστη θερμοκρασία σημειώνεται στην περιοχή όπου το καύσιμο καίγεται πλήρως, ενώ η θερμοκρασία που παρατηρείται στο μεγαλύτερο μέρος του λέβητα είναι 1800K.

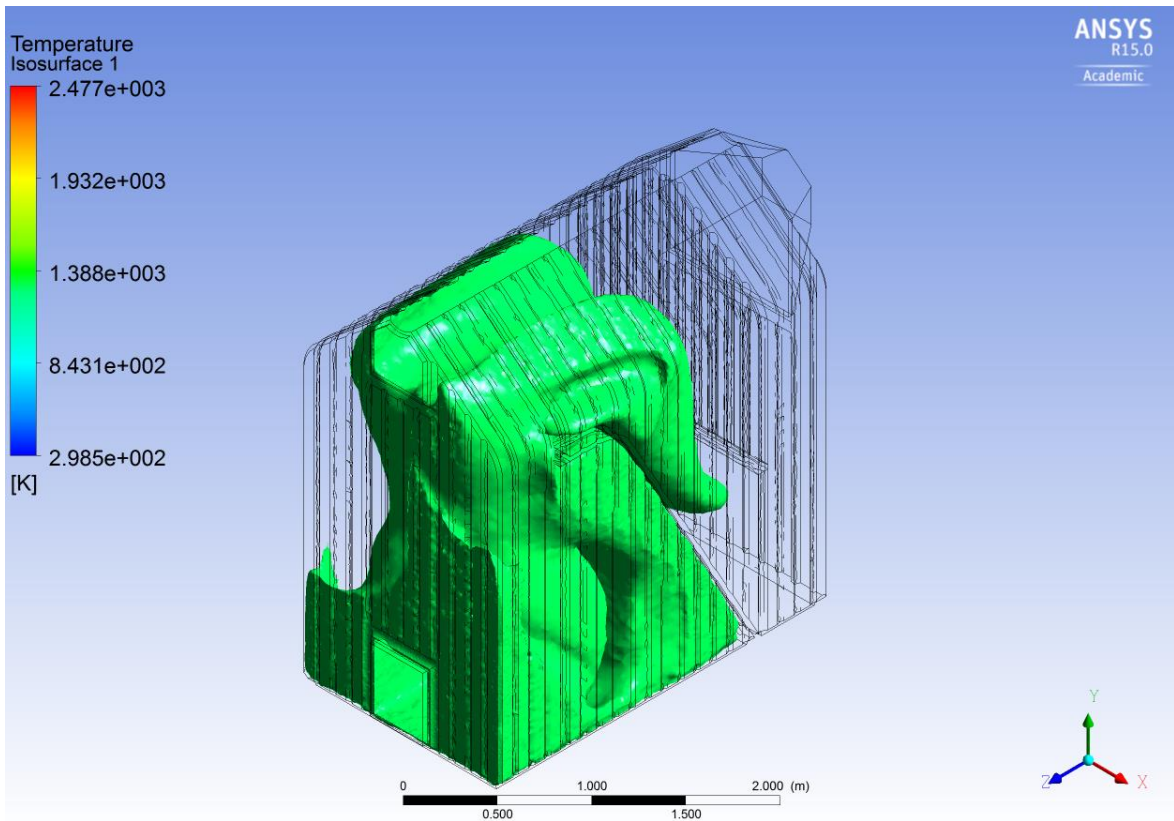
Στις **Εικόνες 4.36 – 4.39** φαίνεται η σταδιακή μείωση του O_2 για κλάσμα μάζας 0.23, 0.16, 0.1 και 0.04. Παρατηρείται ότι το οξυγόνο εισέρχεται στο λέβητα με ποσοστό 23% και σταδιακά αντιδρώντας με το καύσιμο καίγεται.

Στις **Εικόνες 4.40 – 4.42** φαίνεται η σταδιακή παραγωγή του CO_2 για κλάσμα μάζας 0.15, 0.1 και 0.05. Στις περιοχές όπου εισέρχεται το καύσιμο και ξεκινά να καίγεται, παράγεται CO_2 με κλάσμα μάζας 0.05. Στη συνέχεια, όταν το καύσιμο καεί πλήρως παρουσιάζονται οι μέγιστες συγκεντρώσεις CO_2 , ενώ το κλάσμα μάζας στην έξοδο είναι 0.15.

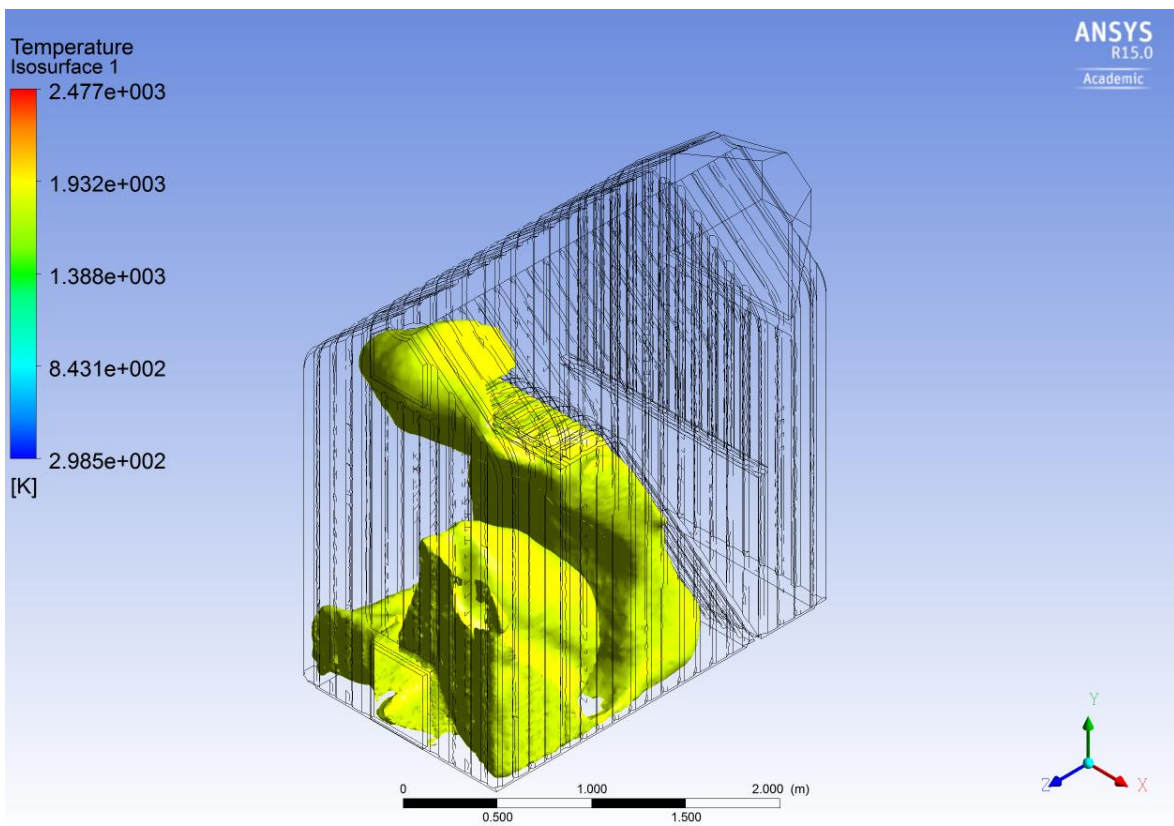
Τέλος, στις **Εικόνες 4.43 – 4.45** φαίνεται η σταδιακή μείωση των πτητικών για κλάσμα μάζας 0.2, 0.02 και 0.002. Παρατηρείται πως όταν τα πτητικά απελευθερώνονται το κλάσμα μάζας τους είναι 0.2 και στη συνέχεια φαίνεται πως καίγονται σταδιακά.



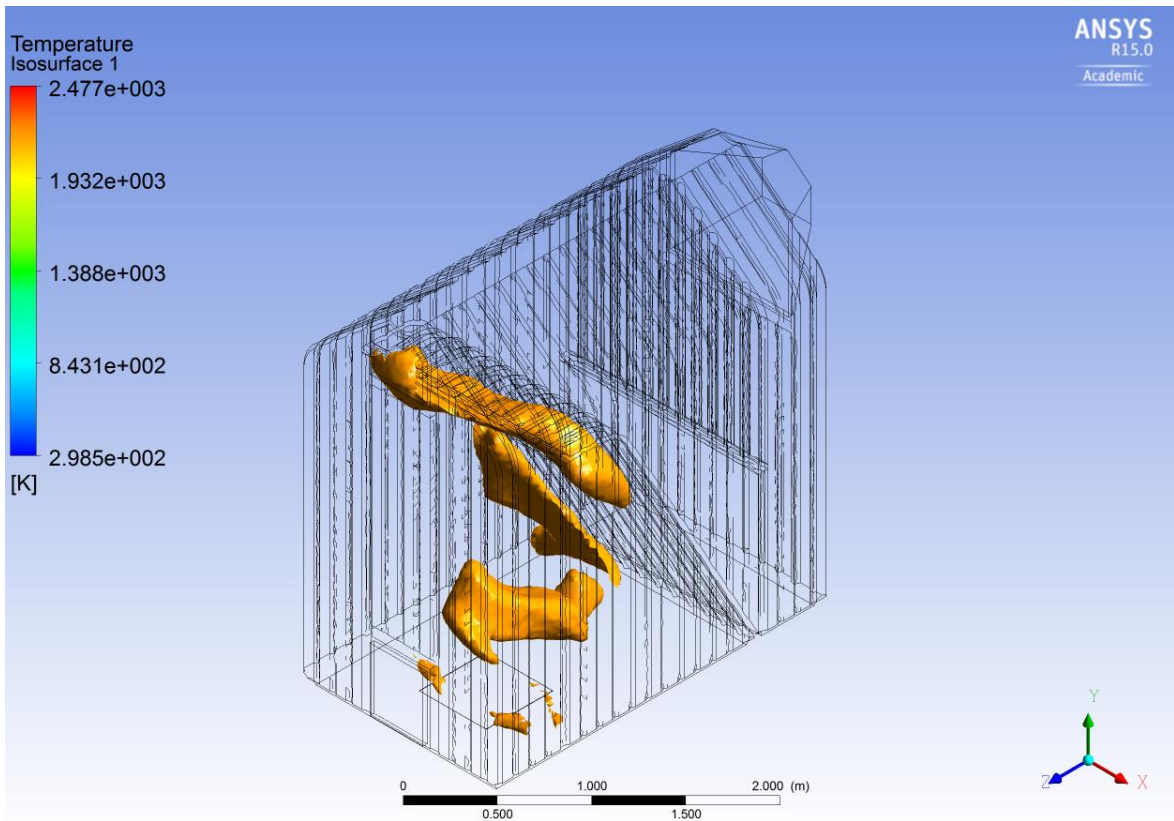
Εικόνα 4.32: Περιοχές για $T=1100K$ για $T_{fuel}=400K$, $T_{air}=500K$ και $\lambda=1.26$



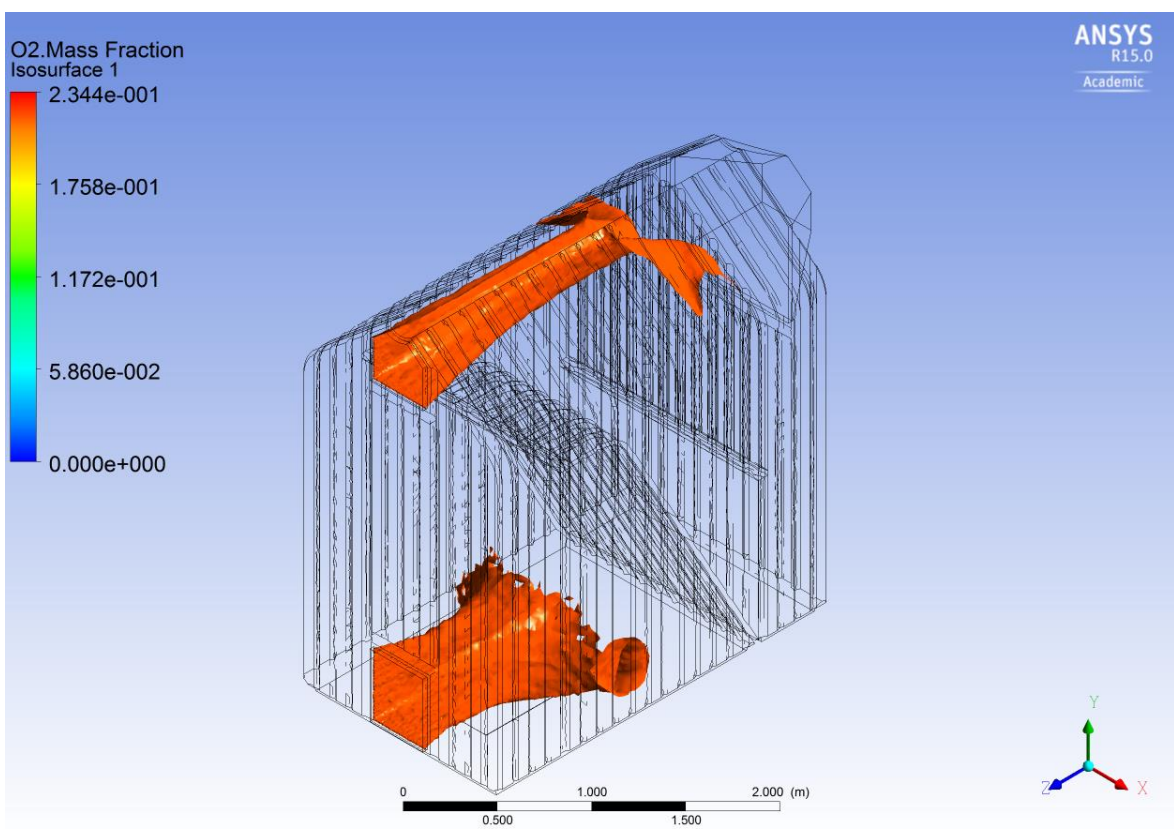
Εικόνα 4.33: Περιοχές για $T=1300\text{K}$ για $T_{\text{fuel}}=400\text{K}$, $T_{\text{air}}=500\text{K}$ και $\lambda=1.26$



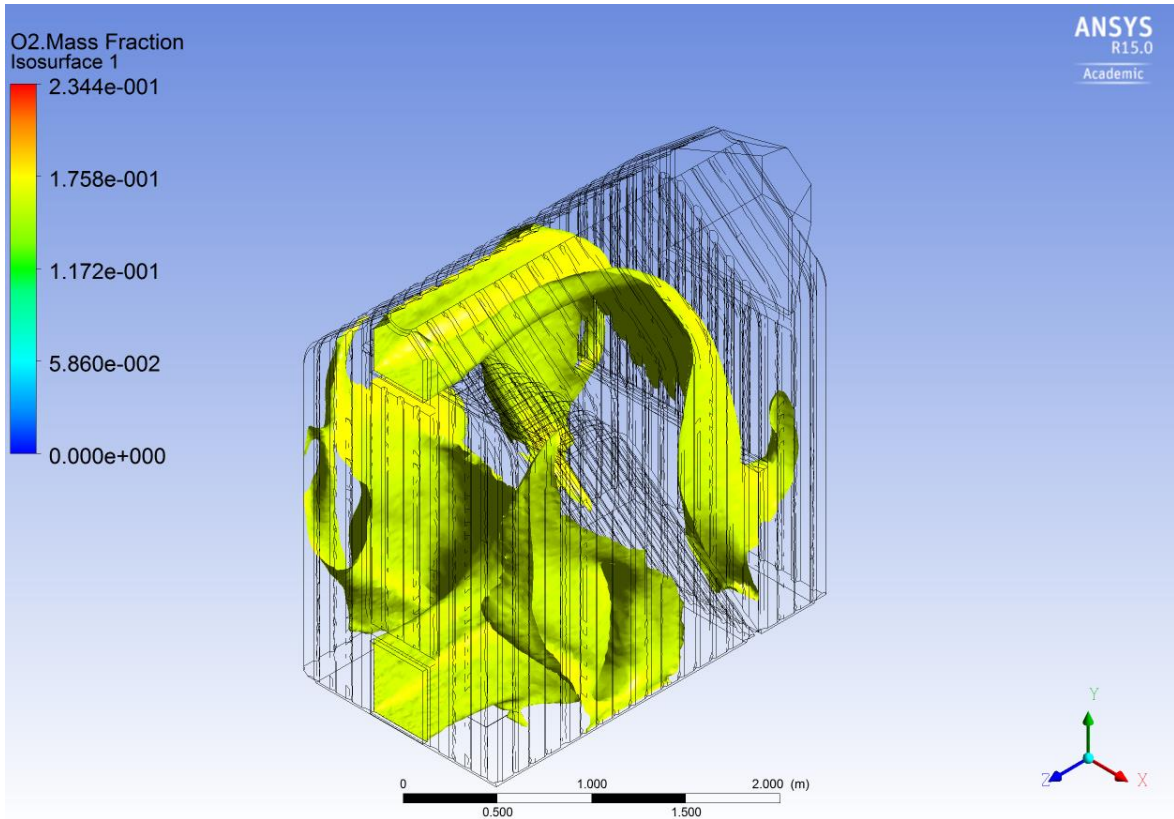
Εικόνα 4.34: Περιοχές για $T=1800\text{K}$ για $T_{\text{fuel}}=400\text{K}$, $T_{\text{air}}=500\text{K}$ και $\lambda=1.26$



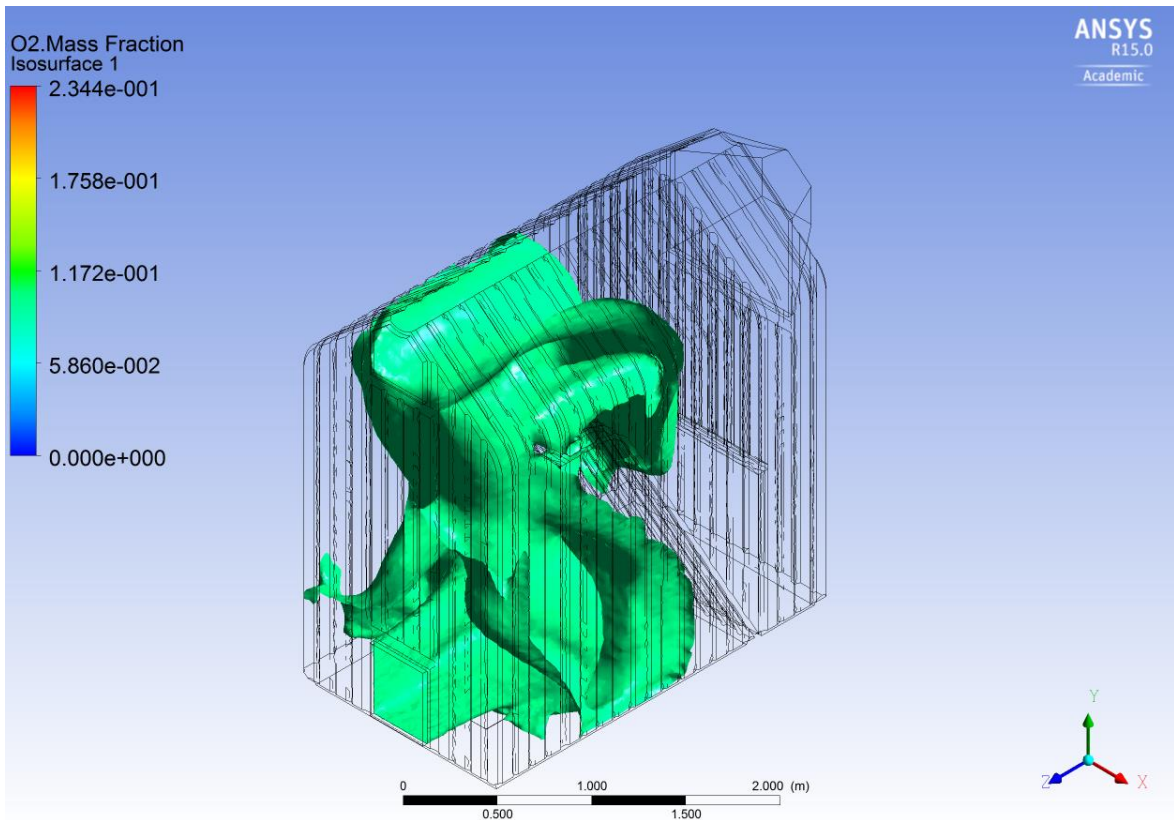
Εικόνα 4.35: Περιοχές για $T=1800\text{K}$ για $T_{\text{fuel}}=400\text{K}$, $T_{\text{air}}=500\text{K}$ και $\lambda=1.26$



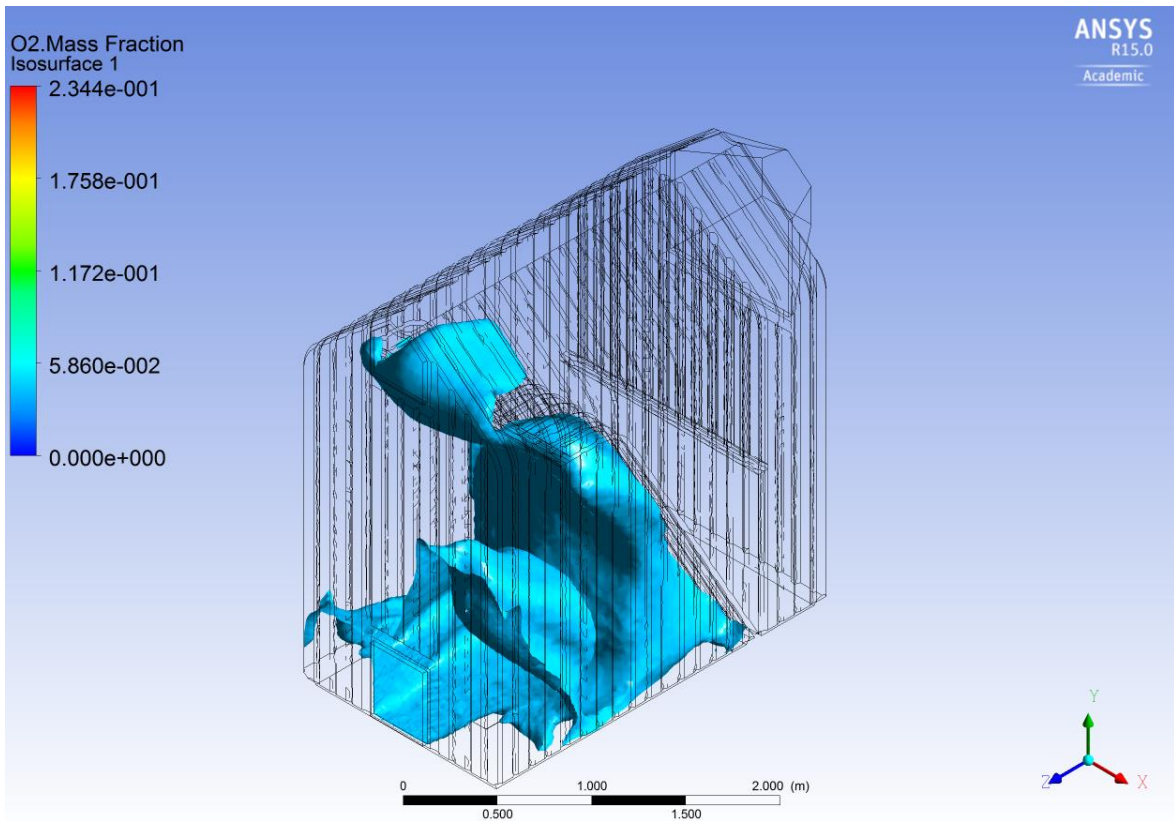
Εικόνα 4.36: Περιοχές για κλάσμα μάζας O_2 0.23 για $T_{\text{fuel}}=400\text{K}$, $T_{\text{air}}=500\text{K}$ και $\lambda=1.26$



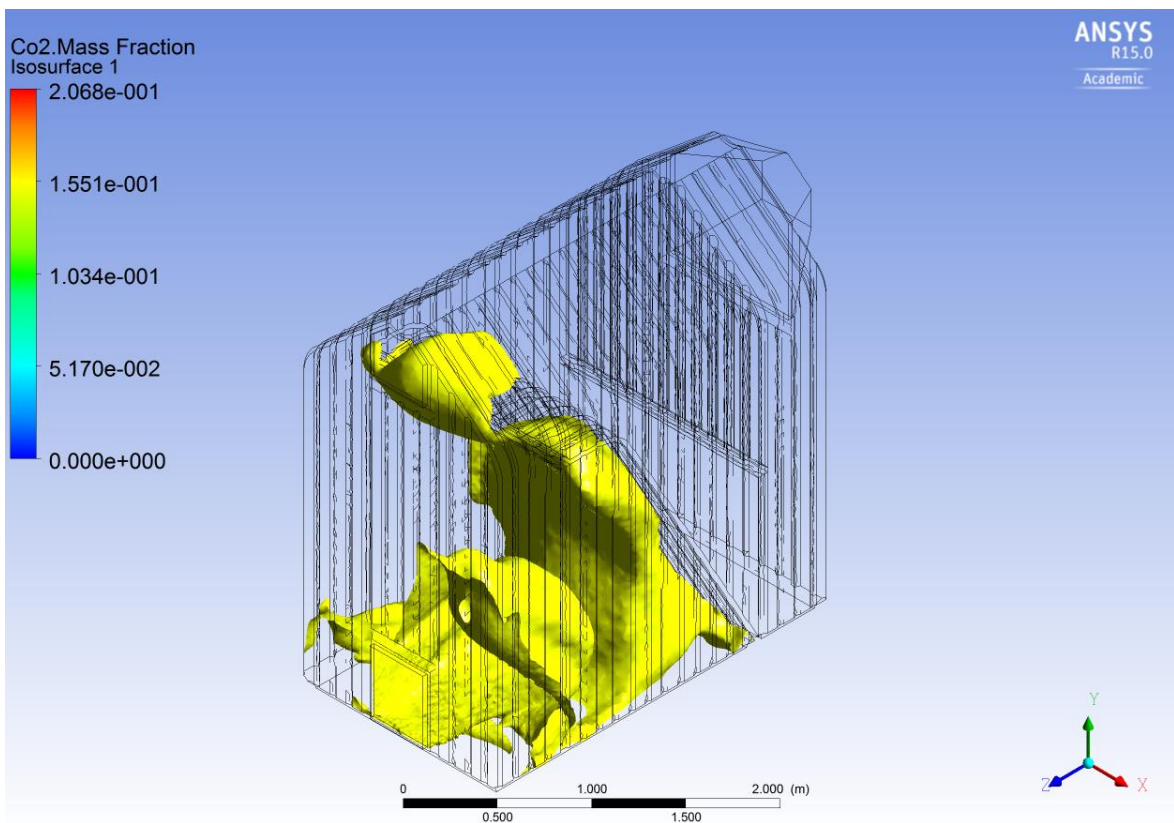
Εικόνα 4.37: Περιοχές για κλάσμα μάζας O_2 0.16 για $T_{fuel}=400K$, $T_{air}=500K$ και $\lambda=1.26$



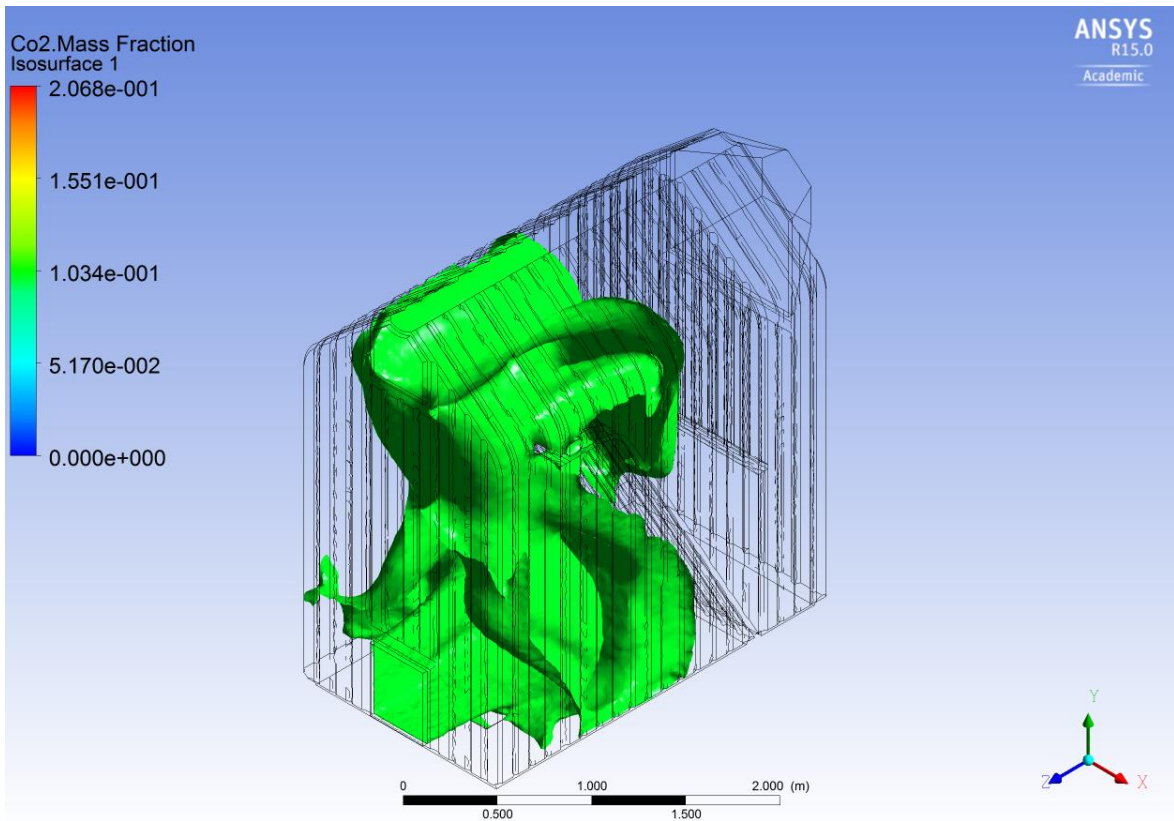
Εικόνα 4.38: Περιοχές για κλάσμα μάζας O_2 0.1 για $T_{fuel}=400K$, $T_{air}=500K$ και $\lambda=1.26$



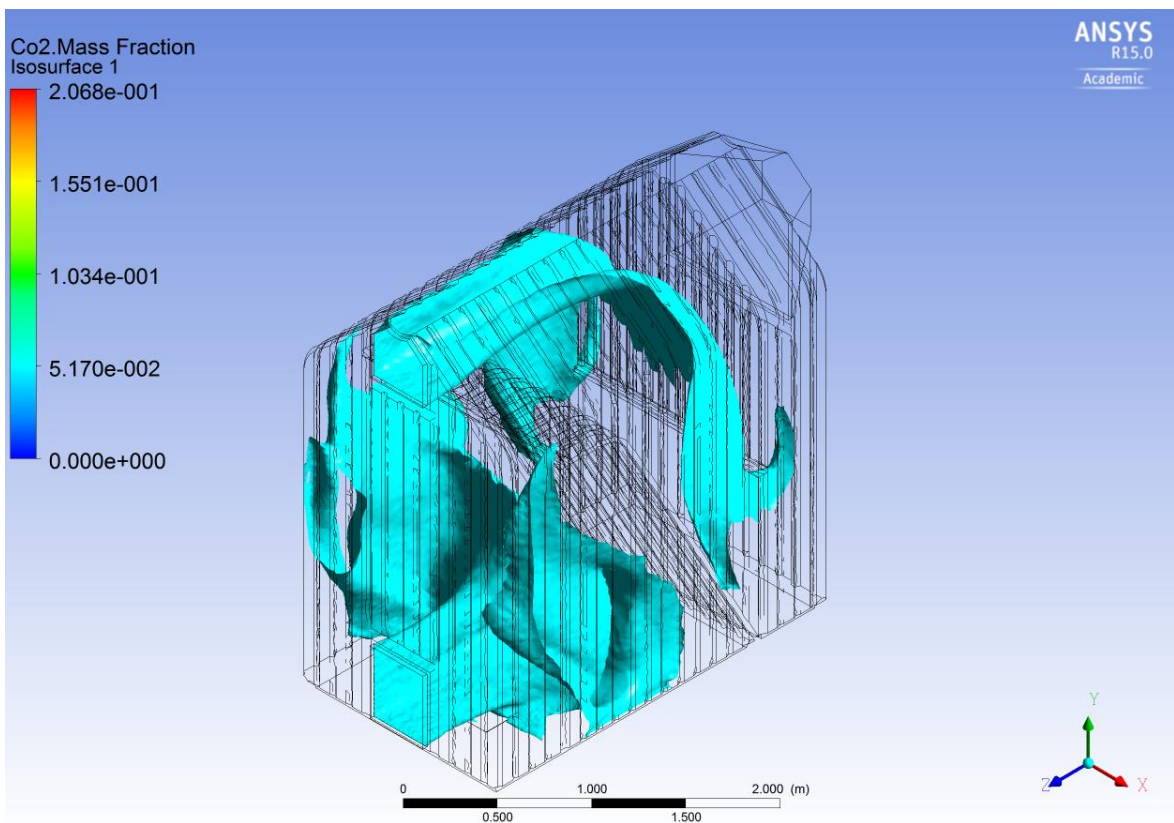
Εικόνα 4.39: Περιοχές για κλάσμα μάζας O_2 0.04 για $T_{fuel}=400K$, $T_{air}=500K$ και $\lambda=1.26$



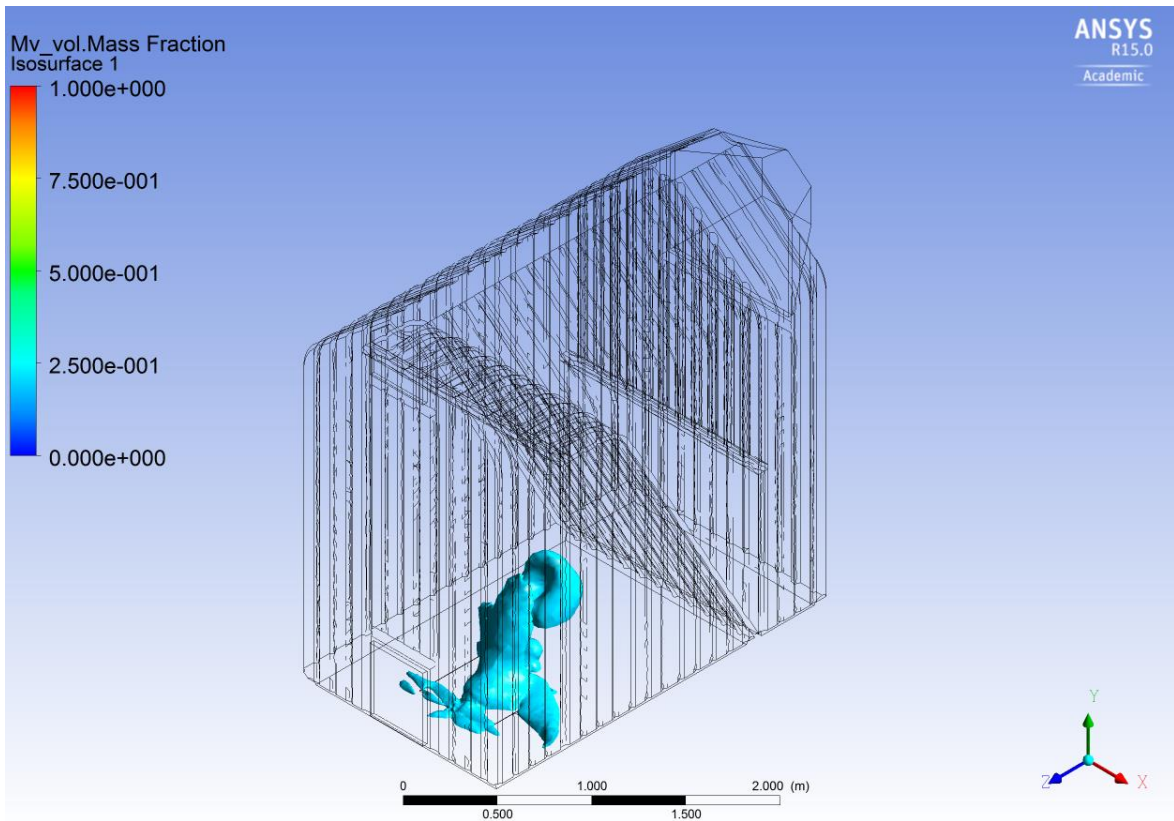
Εικόνα 4.40: Περιοχές για κλάσμα μάζας CO_2 0.15 για $T_{fuel}=400K$, $T_{air}=500K$ και $\lambda=1.26$



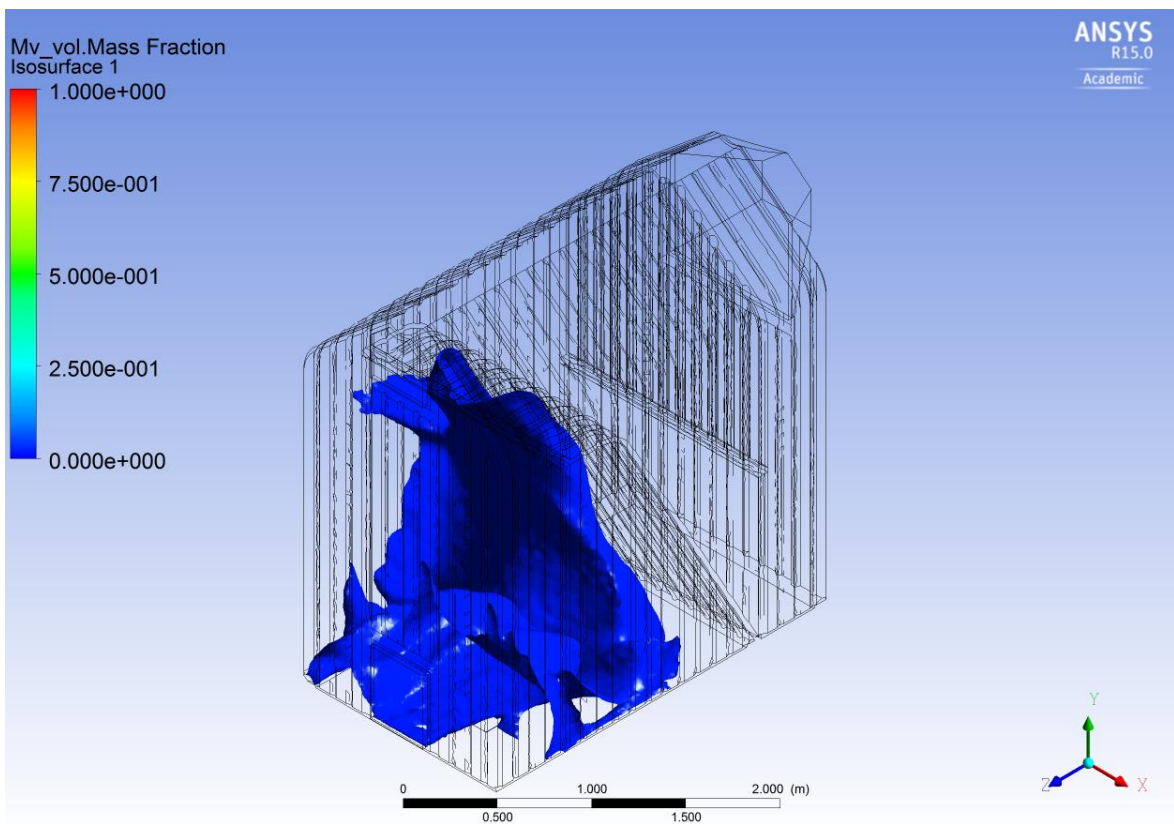
Εικόνα 4.41: Περιοχές για κλάσμα μάζας CO₂ 0.1 για $T_{fuel}=400K$, $T_{air}=500K$ και $\lambda=1.26$



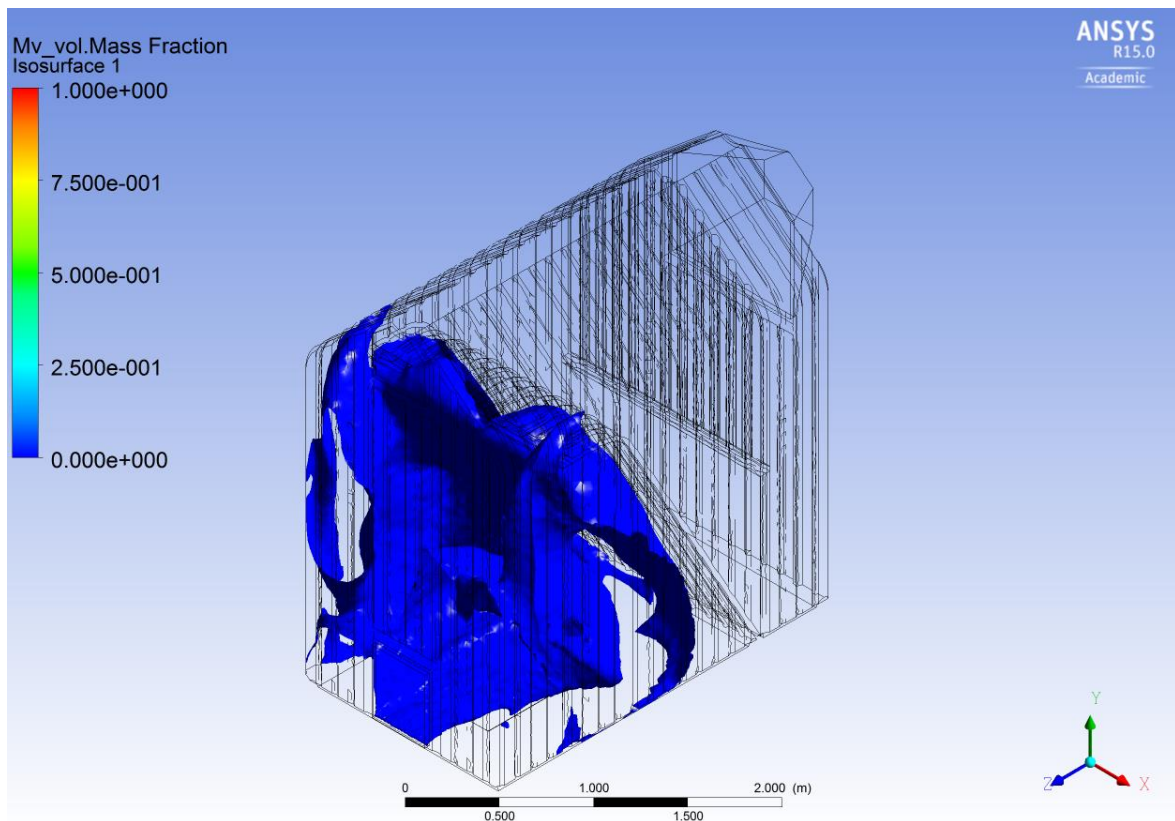
Εικόνα 4.42: Περιοχές για κλάσμα μάζας CO₂ 0.05 για $T_{fuel}=400K$, $T_{air}=500K$ και $\lambda=1.26$



Εικόνα 4.43: Περιοχές για κλάσμα μάζας πτητικών 0.2 για $T_{fuel}=400K$, $T_{air}=500K$ και $\lambda=1.26$



Εικόνα 4.44: Περιοχές για κλάσμα μάζας πτητικών 0.02 για $T_{fuel}=400K$, $T_{air}=500K$ και $\lambda=1.26$



Εικόνα 4.45: Περιοχές για κλάσμα μάζας πτητικών 0.002 για $T_{fuel}=400K$, $T_{air}=500K$ και $\lambda=1.26$

4.1.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων για μη προθερμασμένο και προθερμασμένο αέρα

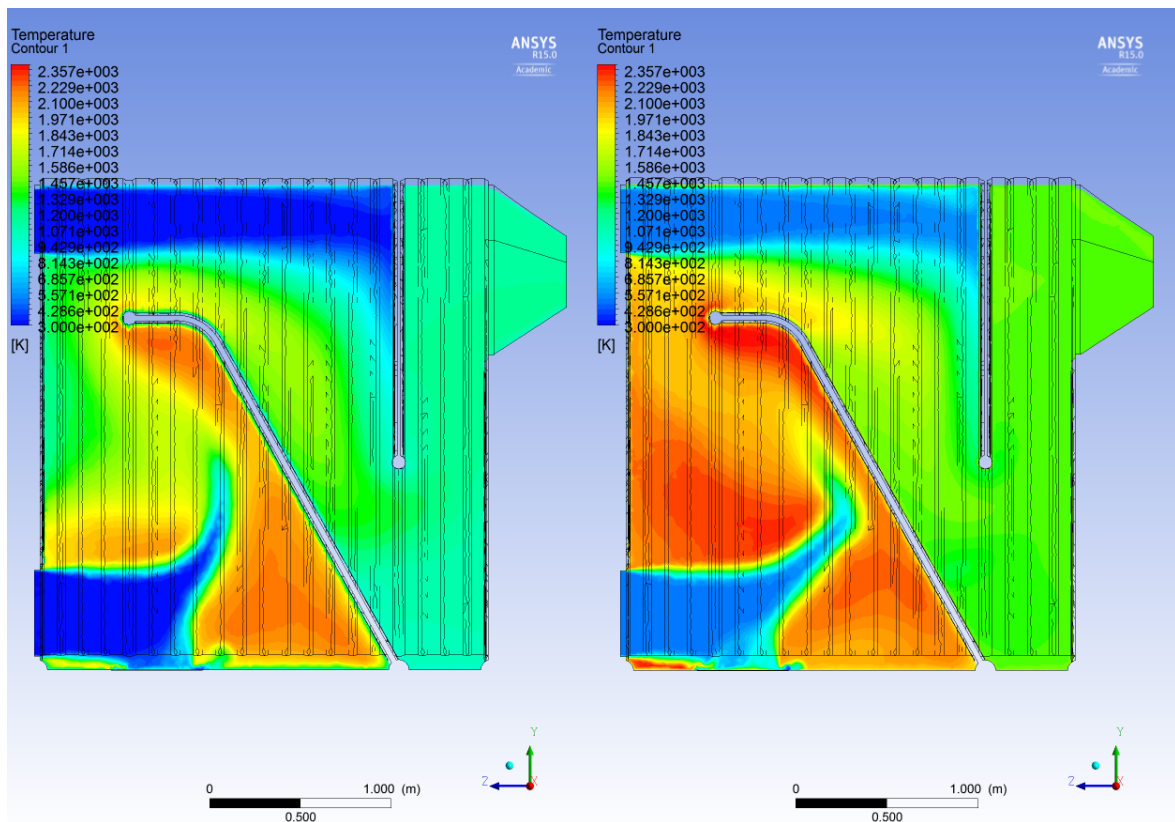
Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα παρουσιαστούν και θα αναλυθούν τα συγκριτικά αποτελέσματα για μη προθερμασμένο αέρα (300K) και προθερμασμένο αέρα (500K). Τα αποτελέσματα αυτά αφορούν τη θερμοκρασία, τη συγκέντρωση πτητικών του CO₂ και του H₂O.

Όπως ήταν αναμενόμενο, στη περίπτωση του προθερμασμένου αέρα σημειώνεται μεγαλύτερη θερμοκρασία και στη περιοχή που πραγματοποιείται η καύση, αλλά και γενικά στον λέβητα. Η κατανομή της θερμοκρασίας φαίνεται στην **Εικόνα 4.46**. Η μέγιστη θερμοκρασία που παρατηρείται για μη προθερμασμένο αέρα είναι 2370K, ενώ για προθερμασμένο αέρα είναι 2653K.

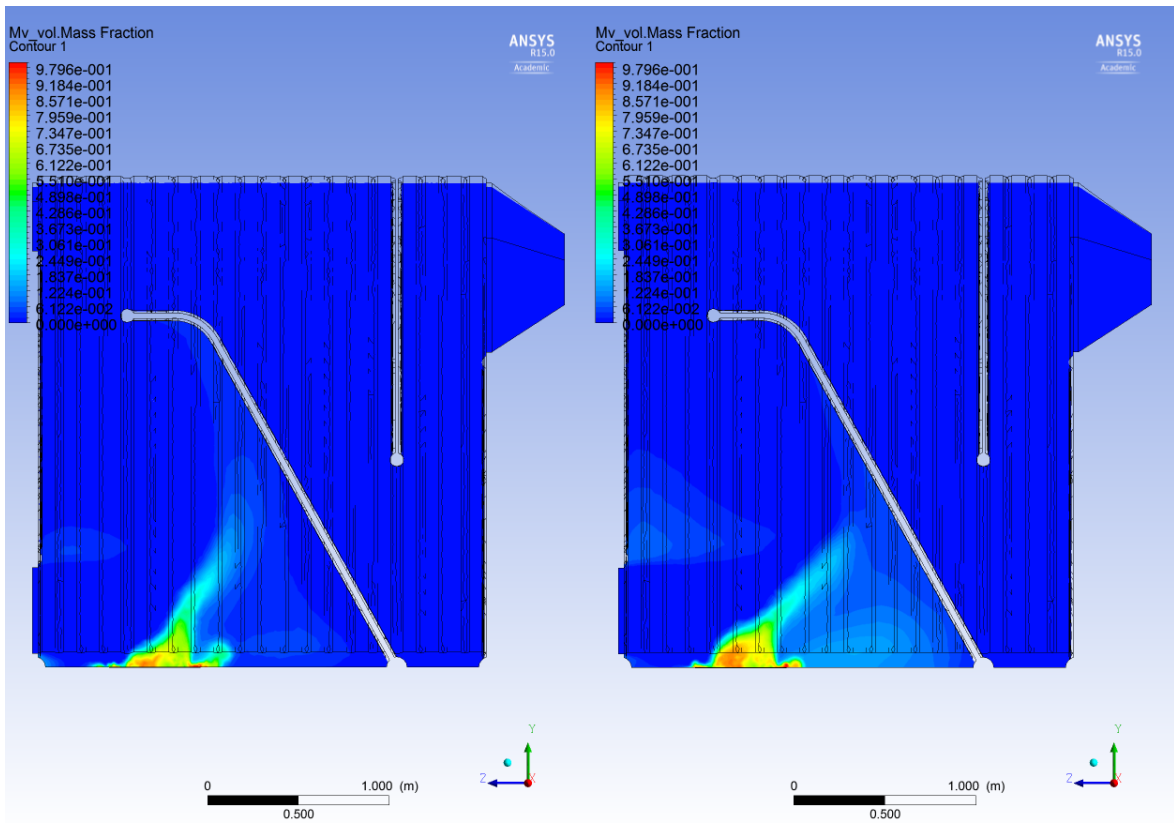
Το καύσιμο που επιλέχθηκε, ξεκινά να απελευθερώνει τα πτητικά του στους 400K. Συνεπώς, στη περίπτωση του προθερμασμένου αέρα, τα πτητικά απελευθερώνονται πιο γρήγορα. Έτσι εξηγείται η σχετικά πιο αργή καύση των πτητικών στη περίπτωση του προθερμασμένου αέρα, αφού τα πτητικά απελευθερώνονται πιο γρήγορα, αλλά αντιδρούν με την ίδια ποσότητα οξυγόνου. Η συγκέντρωση των πτητικών φαίνεται στην **Εικόνα 4.47**.

Στις περιοχές που τα πτητικά καίγονται πλήρως, παρουσιάζονται οι μέγιστες συγκεντρώσεις του CO₂ και του H₂O. Η μέγιστη συγκέντρωση CO₂ και H₂O παρουσιάζεται σε διαφορετικά σημεία για τις δύο περιπτώσεις και αυτό οφείλεται στο διαφορετικό τρόπο που καίγονται τα πτητικά, όπως εξηγήθηκε παραπάνω. Παρατηρείται ότι υπάρχουν περιοχές όπου το κλάσμα μάζας του CO και του H₂ είναι μικρότερα όταν ο αέρας εισάγεται

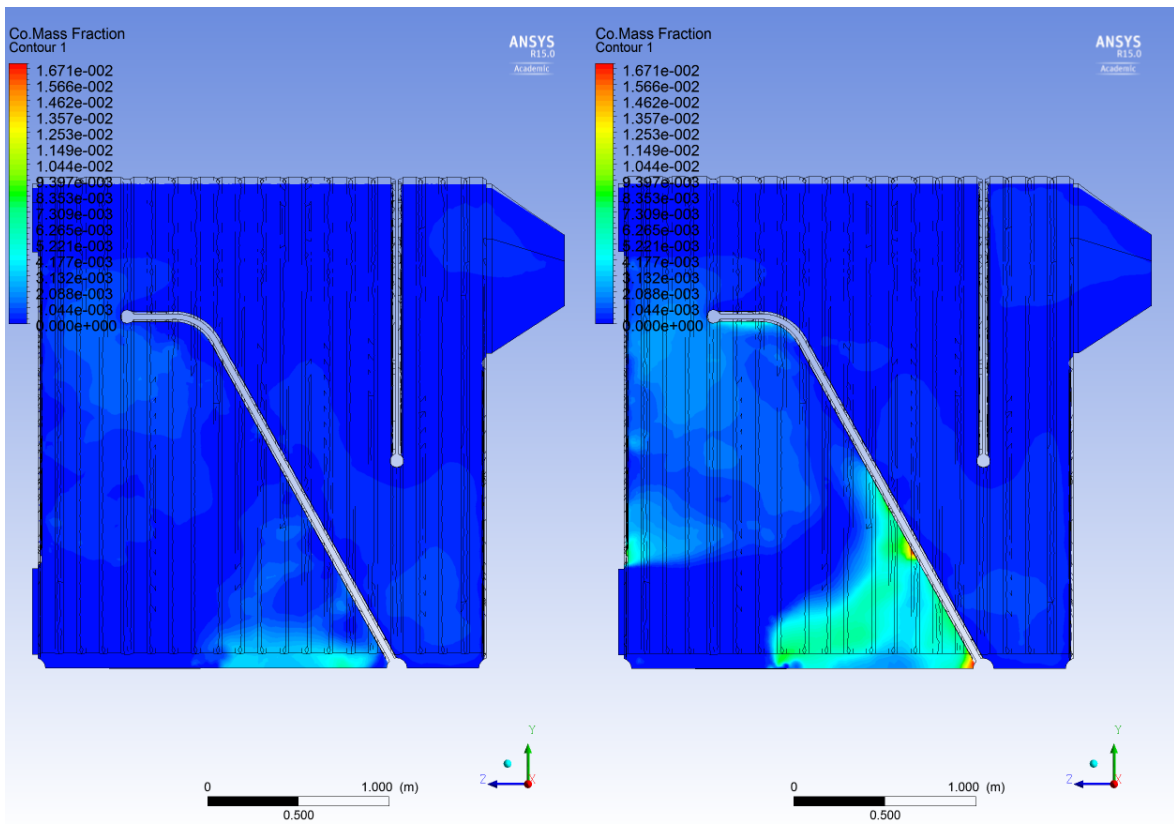
στους 300K από ότι όταν η θερμοκρασία εισαγωγής του αέρα είναι στους 500K. Αυτό εξηγείται διότι σε εκείνες τις περιοχές έχει μετατραπεί το καύσιμο ήδη σε CO₂ και H₂O, καθώς παράγεται CO₂ πιο γρήγορα για αέρα εισαγωγής στους 300K. Η συγκέντρωση του CO και του H₂ φαίνονται στις **Εικόνες 4.48** και **4.49**, αντίστοιχα. Επίσης φαίνεται ότι στους 500K η παραγωγή του CO₂ και του H₂O γίνεται σε μεταγενέστερο επίπεδο στο εσωτερικό του λέβητα. Το ίδιο φαινόμενο παρατηρείται και κατά την εισαγωγή του δευτερεύοντος ρεύματος αέρα. Εν τέλει, στην έξοδο φαίνεται ότι το κλάσμα μάζας του CO₂ και του H₂O έχουν αμελητέες διαφορές. Η σύγκριση του CO₂ και του H₂O φαίνεται στις **Εικόνες 4.50** και **4.51**, αντίστοιχα.



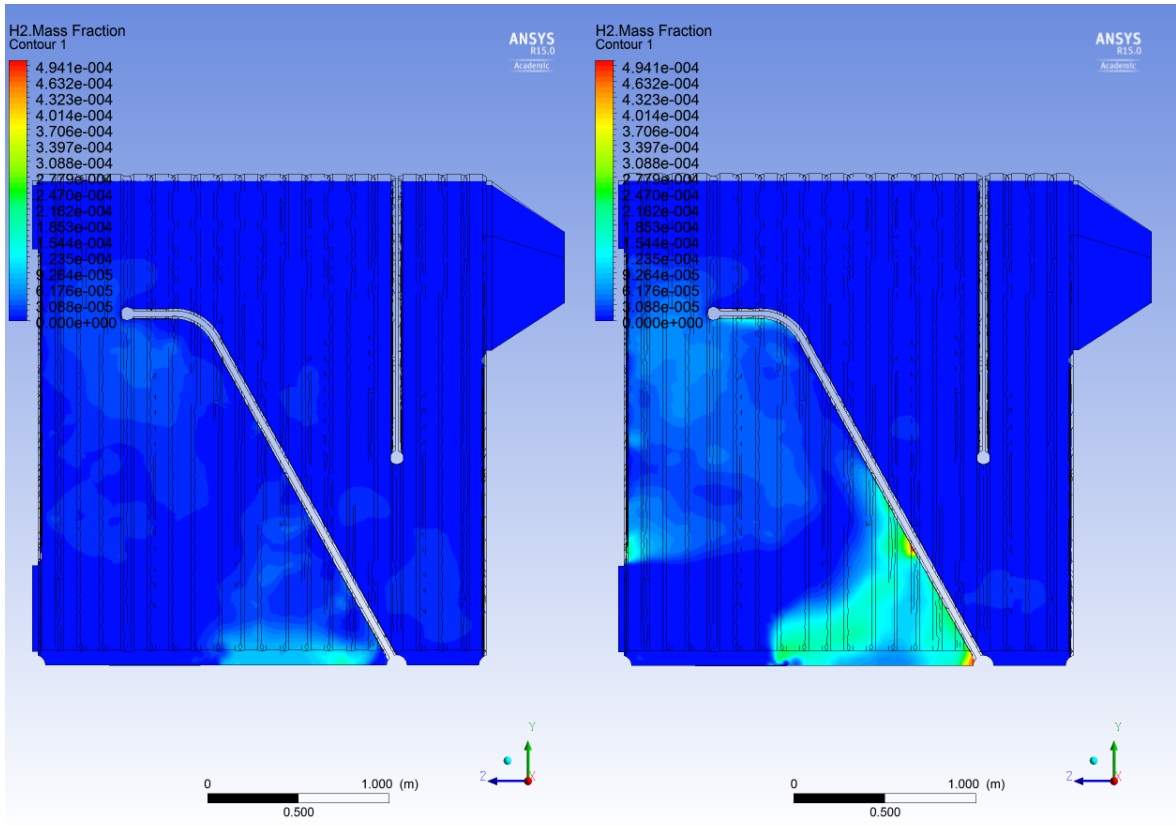
Εικόνα 4.46: Συγκριτικά αποτελέσματα θερμοκρασίας για T_{air}=300K (αριστερά) και T_{air}=500K (δεξιά)



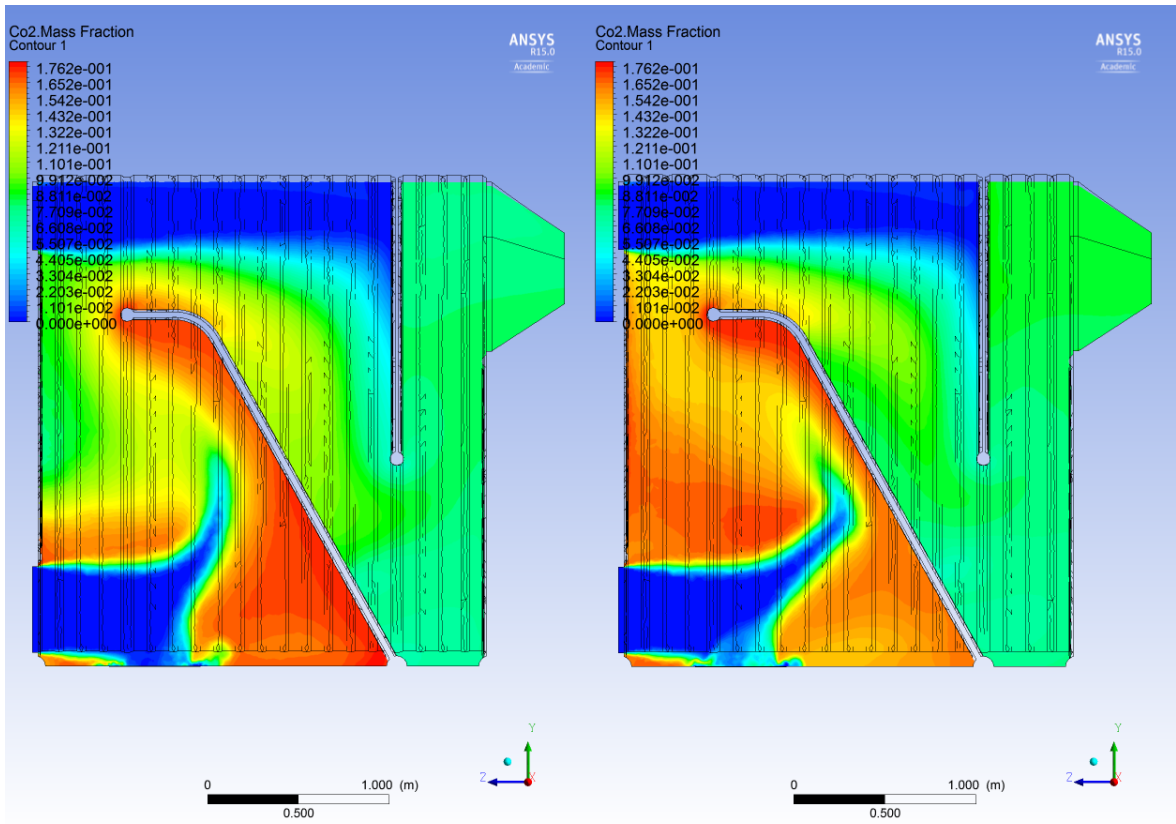
Εικόνα 4.47: Συγκριτικά αποτελέσματα συγκέντρωσης πηθικών για $T_{air}=300K$ (αριστερά) και $T_{air}=500K$ (δεξιά)



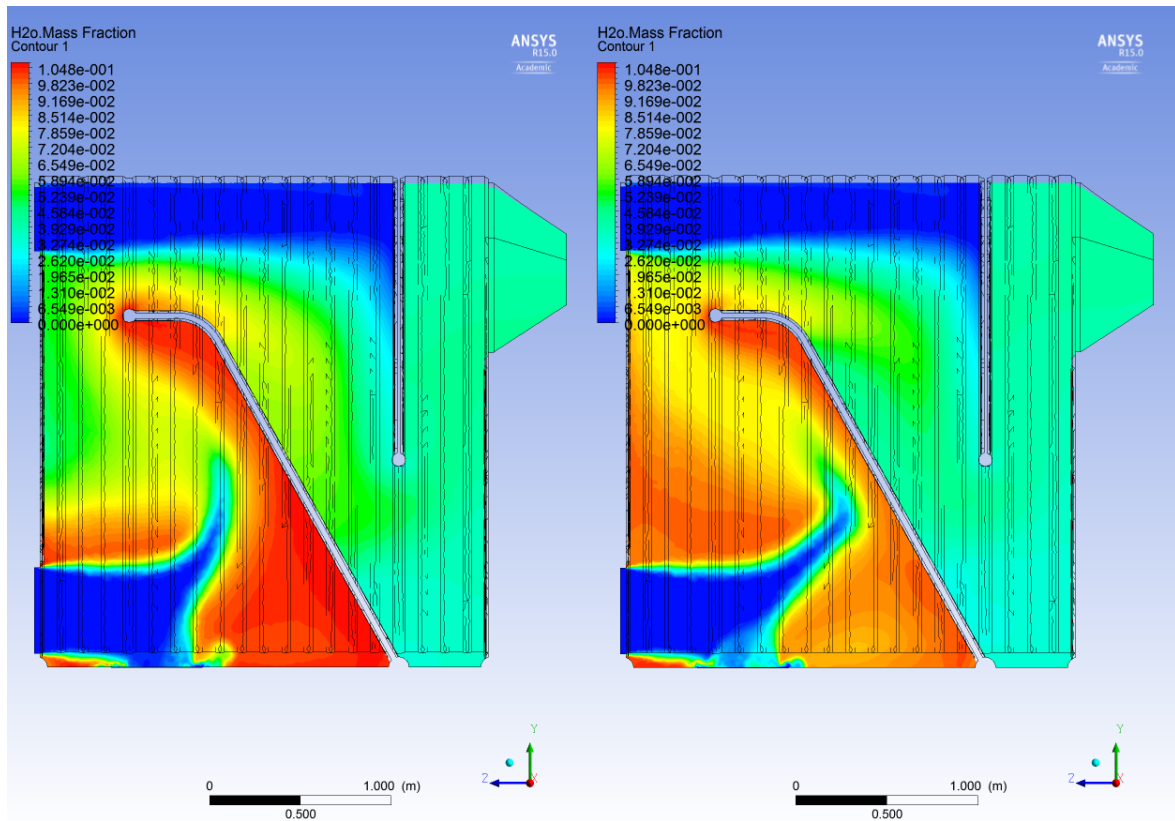
Εικόνα 4.48: Συγκριτικά αποτελέσματα συγκέντρωσης CO για $T_{air}=300K$ (αριστερά) και $T_{air}=500K$ (δεξιά)



Εικόνα 4.49: Συγκριτικά αποτελέσματα συγκέντρωσης H₂ για T_{air}=300K (αριστερά) και T_{air}=500K (δεξιά)



Εικόνα 4.50: Συγκριτικά αποτελέσματα συγκέντρωσης CO₂ για T_{air}=300K (αριστερά) και T_{air}=500K (δεξιά)



Εικόνα 4.51: Συγκριτικά αποτελέσματα συγκέντρωσης H₂O για T_{air}=300K (αριστερά) και T_{air}=500K (δεξιά)

4.2 Επίδραση θερμοκρασίας του καυσίμου

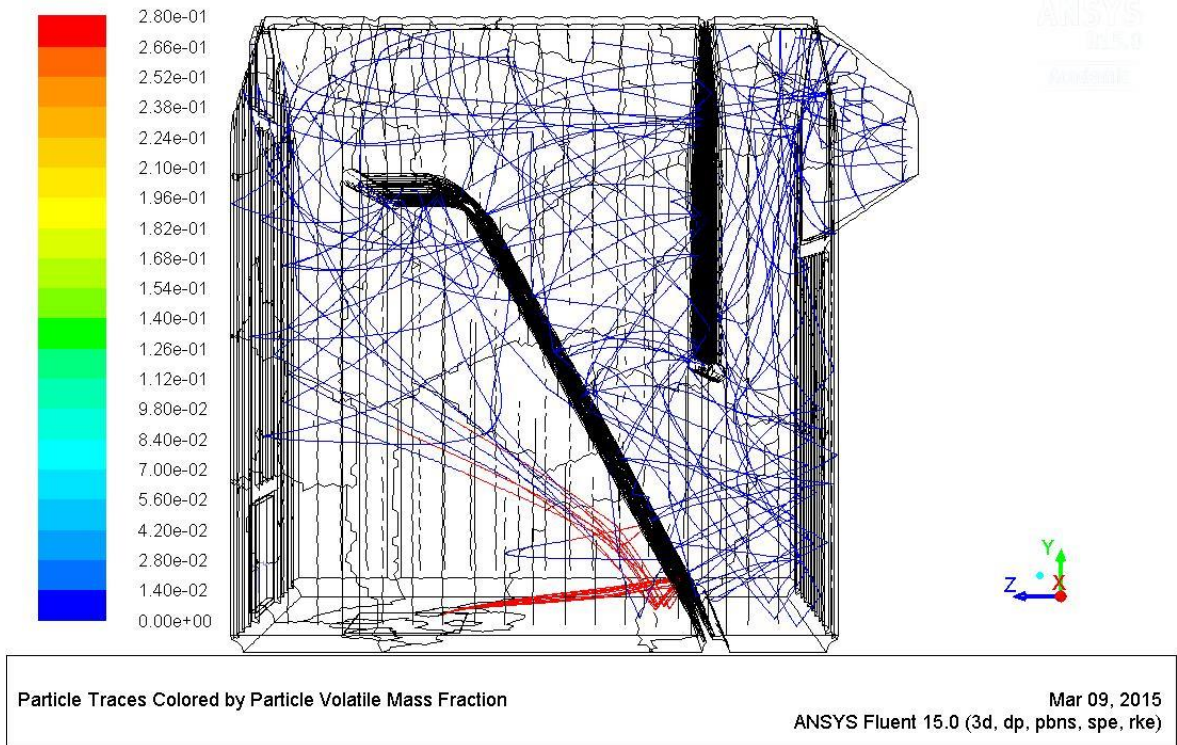
Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθεί η επίδραση για καύσιμο που εισέρχεται στους 300K, αέρα στους 300K και $\lambda=1.26$, συγκρίνοντάς το με τα αποτελέσματα για καύσιμο που εισέρχεται στους 400K. Η θερμοκρασία αποπτητικοποίησης του καυσίμου είναι ίση με 400K, οπότε βασική διαφορά των 2 περιπτώσεων είναι ότι τα πτητικά στη μία περίπτωση (400K) απελευθερώνονται αμέσως, ενώ στην άλλη όχι. Επίσης, στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει παρακολούθηση των σωματιδίων (Particle Tracking). Για λόγους συντομίας, η παρακολούθηση αυτή έγινε μόνο σε αυτό το κεφάλαιο και επιλέχθηκε το συγκεκριμένο, γιατί τα σωματίδια παρουσίαζαν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον.

4.2.1 Παρακολούθηση Σωματιδίων (Particle Tracking)

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της παρακολούθησης σωματιδίων γνωστή και ως particle tracking, με στόχο την παρακολούθηση της ροής ενός αριθμού σωματιδίων. Η μοντελοποίηση της μεταφοράς σωματιδίων είναι ένα πολυφασικό μοντέλο, όπου τα σωματίδια παρακολουθούνται μέσα στη ροή με Lagrangian τρόπο αντί να μοντελοποιούνται ως μια επιπλέον Eulerian φάση. Η παρακολούθηση διεξάγεται σχηματίζοντας ένα σύνολο από συνήθεις διαφορικές εξισώσεις στο χρόνο για κάθε σωματίδιο, συμπεριλαμβανομένων εξισώσεων θέσης, ταχύτητας, θερμοκρασίας και μάζας. Ακολούθως, αυτές οι εξισώσεις ολοκληρώνονται χρησιμοποιώντας μια απλή

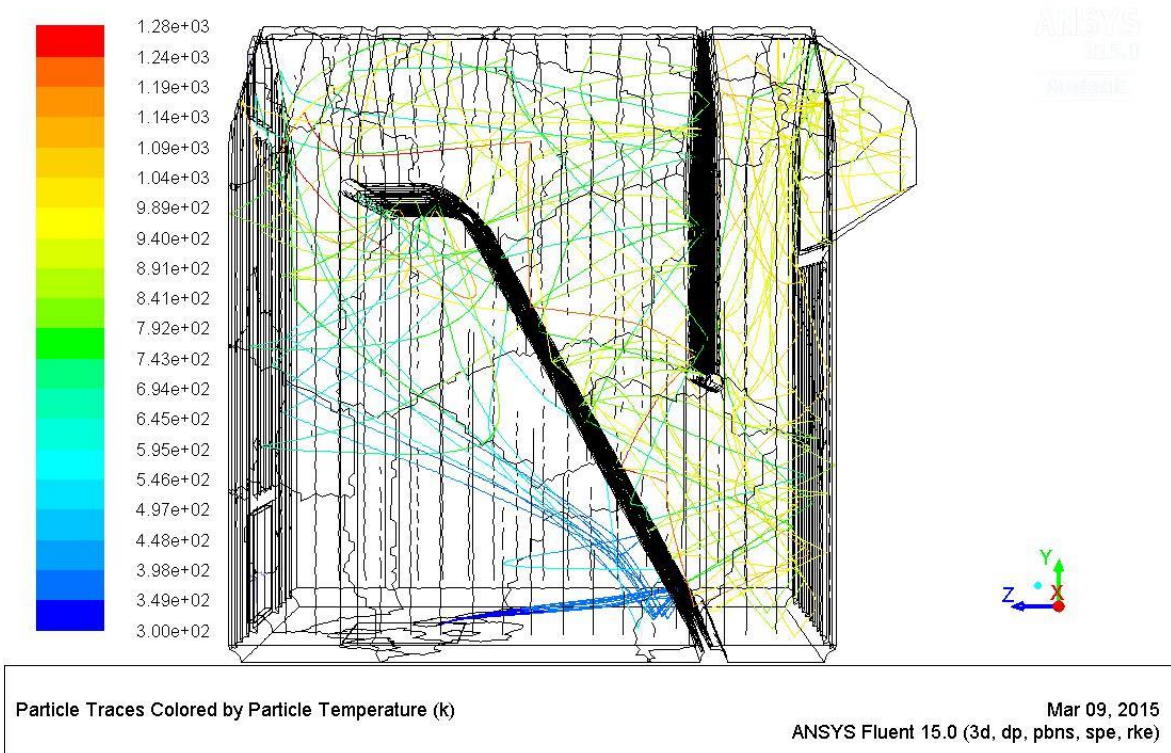
μέθοδο ολοκλήρωσης ώστε να υπολογιστεί η συμπεριφορά των σωματιδίων καθώς διασχίζουν τη ροή.

Για την εισαγωγή των στερεών σωματιδίων καυσίμου ορίστηκαν 10 σημεία (streams), όπου από το κάθε σημείο εισέρχονται 10 σωματίδια (σύνολο 100 σωματίδια). Για καλύτερη παρουσίαση των αποτελεσμάτων παρακολουθήθηκαν τα σωματίδια ενός stream, άρα συνολικά 10 σωματίδια. Το Ansys Fluent παρακολουθεί ένα σωματίδιο από την είσοδο του μέχρι την έξοδο, ανεξάρτητα αν αυτό καεί, μετατραπεί σε πτητικά ή στάχτη. Στην **Εικόνα 4.52** φαίνεται το κλάσμα μάζας των πτητικών των σωματιδίων.



Εικόνα 4.52: Κλάσμα μάζας πτητικών των σωματιδίων

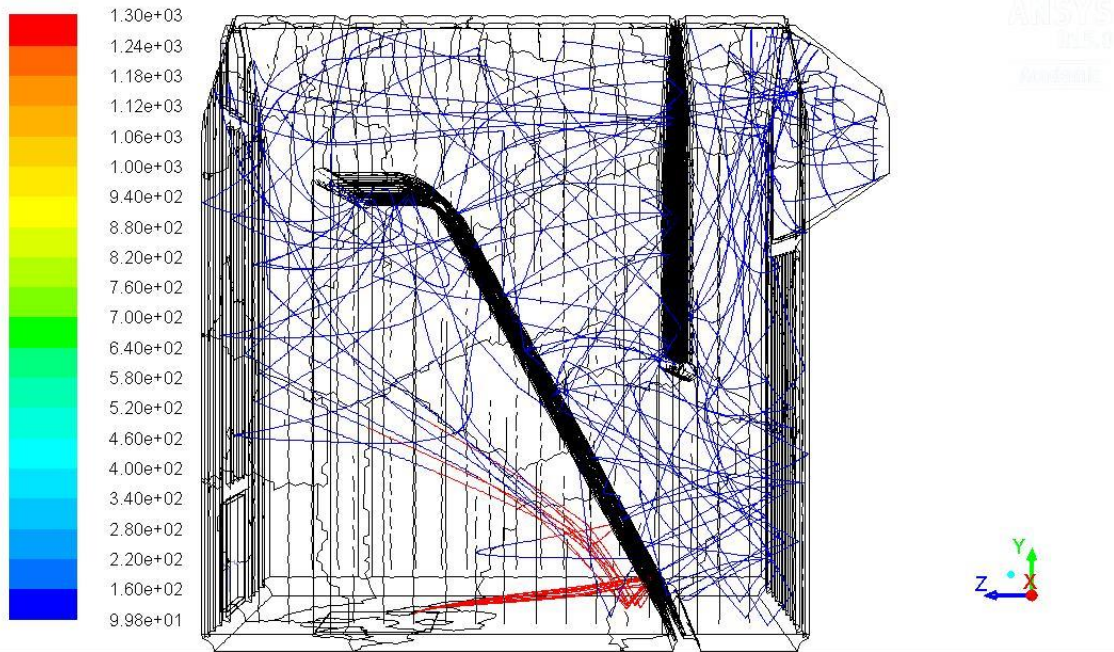
Το καύσιμο αποτελείται από πτητικά κατά 28%, γι' αυτό και το κλάσμα μάζας των πτητικών στην αρχή είναι 0.28. Στη συνέχεια, όταν η θερμοκρασία φτάσει τους 400 K, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 4.53**, τα πτητικά απελευθερώνονται και καίγονται.



Εικόνα 4.53: Θερμοκρασία σωματιδίων

Στο συγκεκριμένο καύσιμο ο στερεός άνθρακας έχει πυκνότητα 1300 kg/m^3 , όπως φαίνεται στην **Εικόνα 4.54**. Στη συνέχεια, μόλις η θερμοκρασία φτάσει τους 400K , απελευθερώνονται τα πτητικά και η πυκνότητα μειώνεται. Επίσης, για το μέγεθος των σωματιδίων επιλέχθηκε η κατανομή Rosin – Rammler για διαμέτρους σωματιδίων $0,5$ έως $1,5\text{cm}$. Τα σωματίδια του συγκεκριμένου stream εισέρχονται με διάμετρο $0,7\text{cm}$. Η αύξηση της διαμέτρου εξηγείται λόγω απελευθέρωσης των πτητικών και φαίνεται στην **Εικόνα 4.55**.

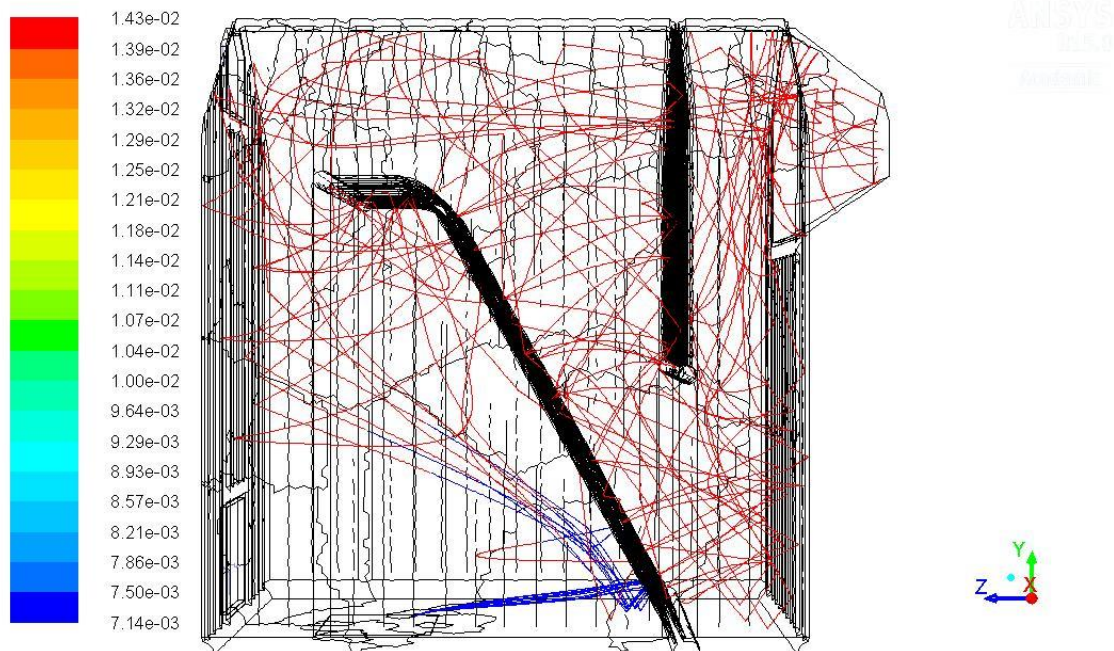
Για τη μοντελοποίηση των σωματιδίων, το Ansys Fluent χρησιμοποιεί κάποιους Νόμους (Laws). Στο συγκεκριμένο πρόβλημα, στο μοντέλο καύσης που χρησιμοποιήθηκε, ενεργοποιούνται από το Ansys οι Νόμοι 1,4,5. Ο Νόμος 1 (Law1: Inert Heating) ενεργοποιείται όταν η θερμοκρασία του σωματιδίου είναι μικρότερη από τη θερμοκρασία πτητικοποίησης. Ο νόμος 4 (Law4: Devolatilization) ενεργοποιείται όταν η θερμοκρασία του σωματιδίου φθάσει στη θερμοκρασία πτητικοποίησης. Μόλις απελευθερωθούν τα πτητικά ενεργοποιείται ο Νόμος 5 (Law5: Surface Reaction) και αφορά τη καύση του στερεού καυσίμου. Η ενεργοποίηση αυτών των Νόμων φαίνεται στην **Εικόνα 4.56**, ενώ στην **Εικόνα 4.57** φαίνεται η ενεργοποίηση του Law 4 σε μεγέθυνση, για ένα σωματίδιο.



Particle Traces Colored by Particle Density (kg/m³)

Mar 09, 2015
ANSYS Fluent 15.0 (3d, dp, pbns, spe, rke)

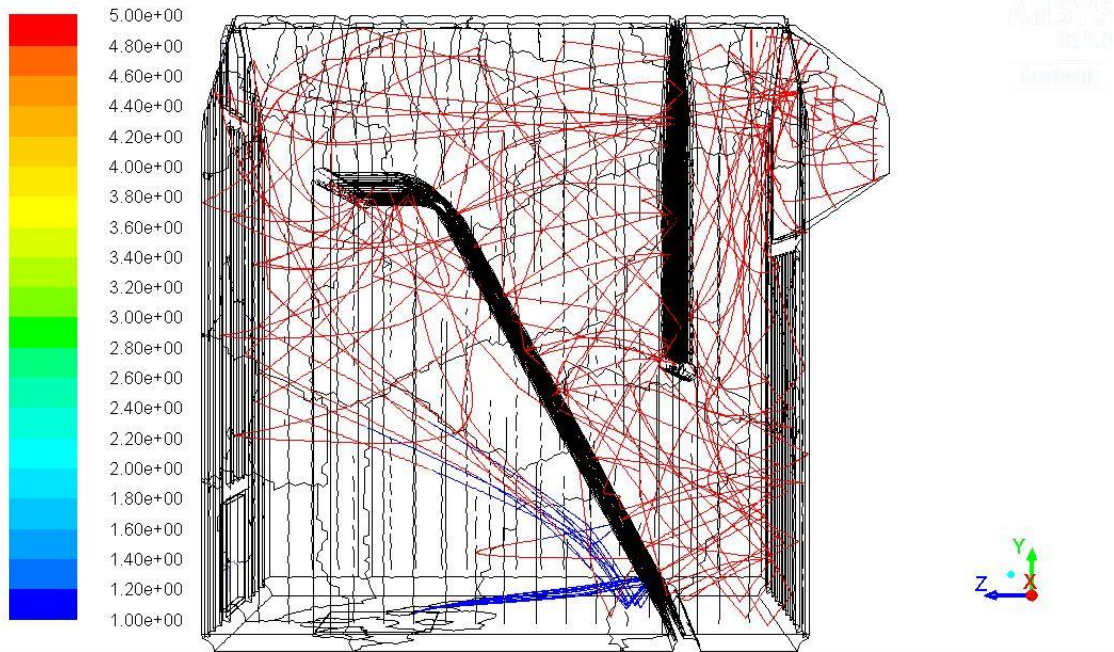
Εικόνα 4.54: Πυκνότητα σωματιδίων



Particle Traces Colored by Particle Diameter (m)

Mar 09, 2015
ANSYS Fluent 15.0 (3d, dp, pbns, spe, rke)

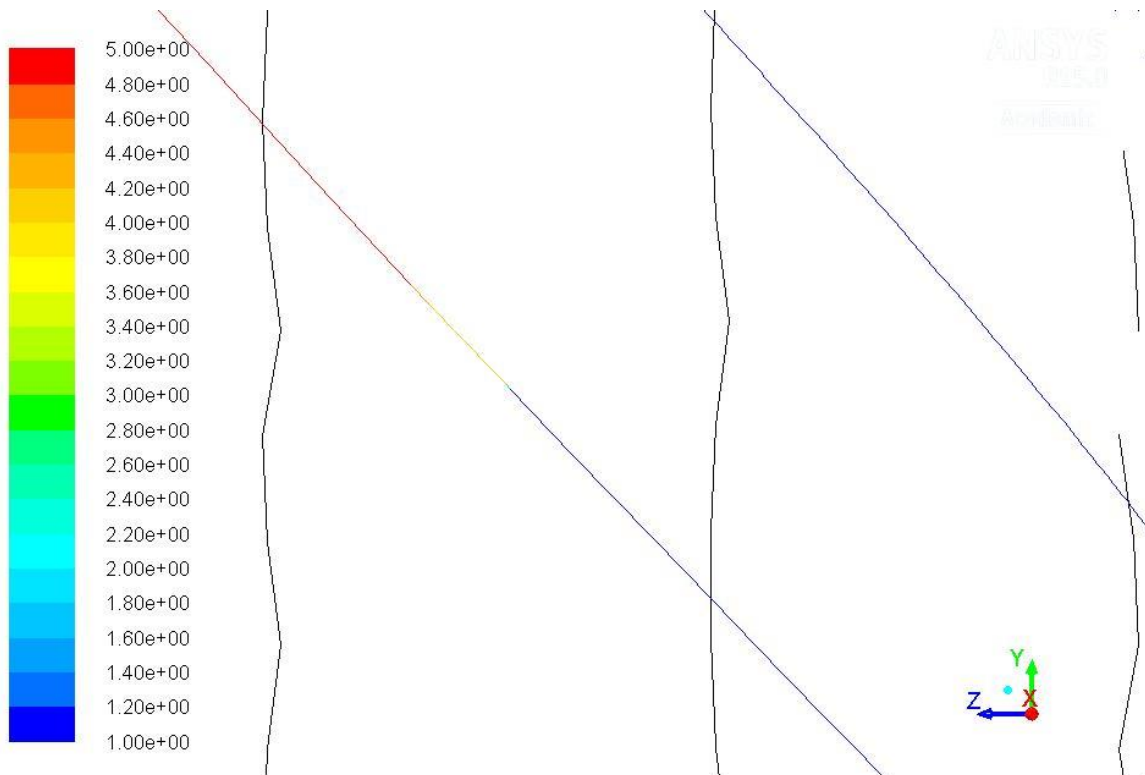
Εικόνα 4.55: Διάμετρος σωματιδίων



Particle Traces Colored by Particle Law Index

Mar 09, 2015
ANSYS Fluent 15.0 (3d, dp, pbns, spe, rke)

Εικόνα 4.56: Ενεργοποίηση Νόμων για τα σωματίδια



Particle Traces Colored by Particle Law Index

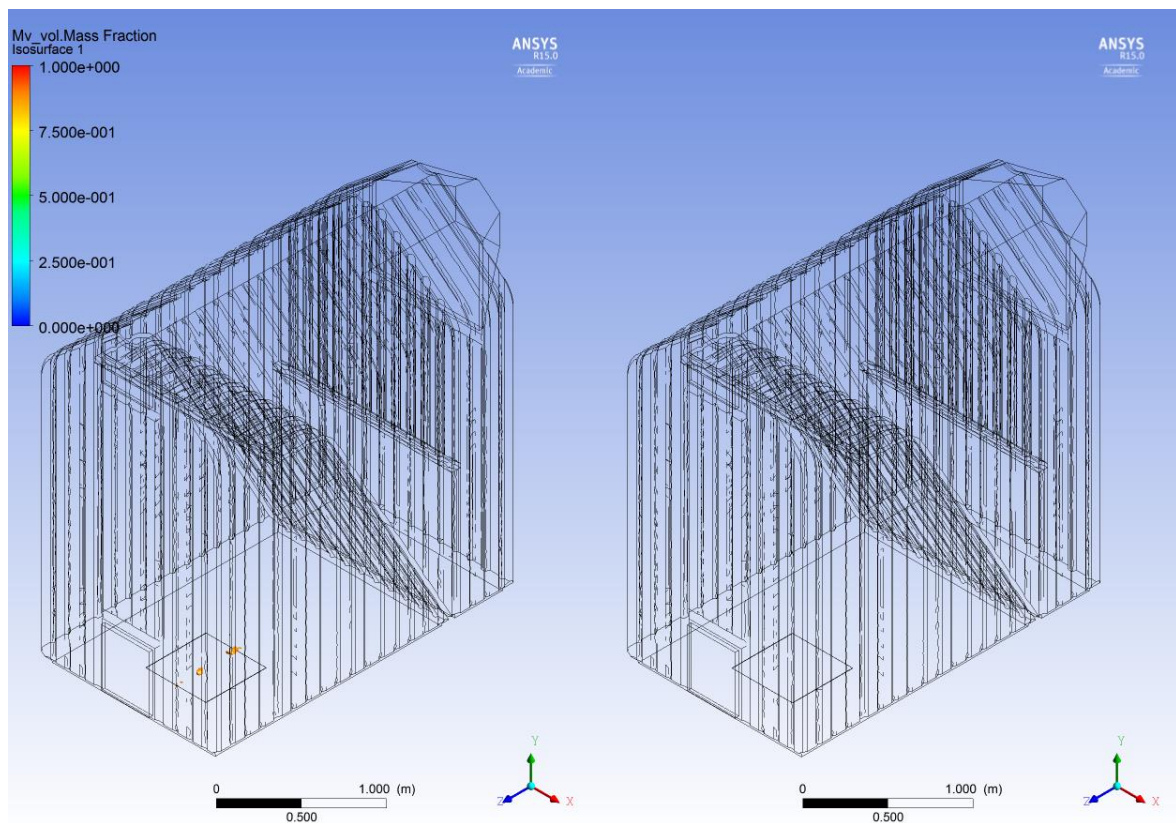
Mar 11, 2015
ANSYS Fluent 15.0 (3d, dp, pbns, spe, rke)

Εικόνα 4.57: Μεγέθυνση για τη παρουσίαση του Law 4

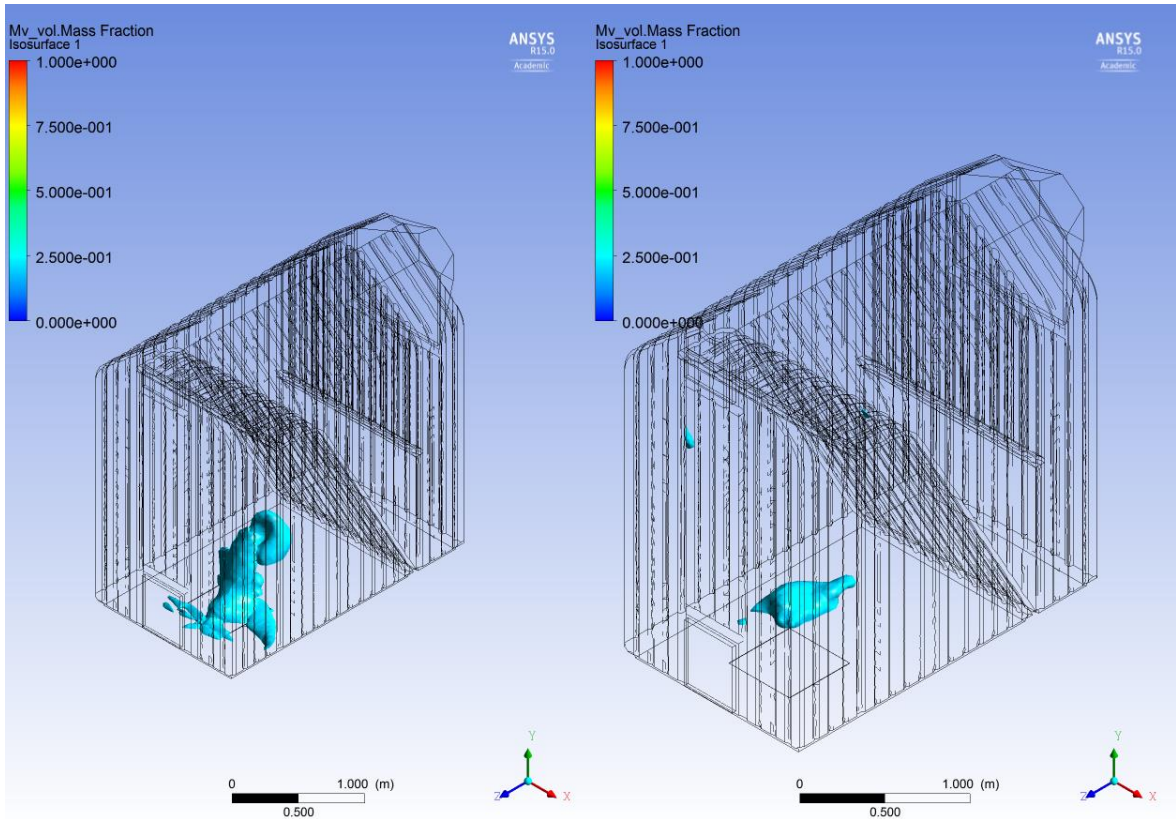
4.2.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων για θερμοκρασία εισαγωγής καυσίμου στους 400K και 300K

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναλυθεί η επίδραση της θερμοκρασίας εισαγωγής του καυσίμου. Για να επιτευχθεί αυτή η ανάλυση, θα συγκριθεί η περίπτωση με θερμοκρασία εισαγωγής καυσίμου στους 300K και 400K, με θερμοκρασία αέρα $T_{air}=300K$ και $\lambda=1.26$. Για την καλύτερη απεικόνιση των αποτελεσμάτων, η σύγκριση των 2 περιπτώσεων θα γίνει με τη μορφή 'Isosurface'.

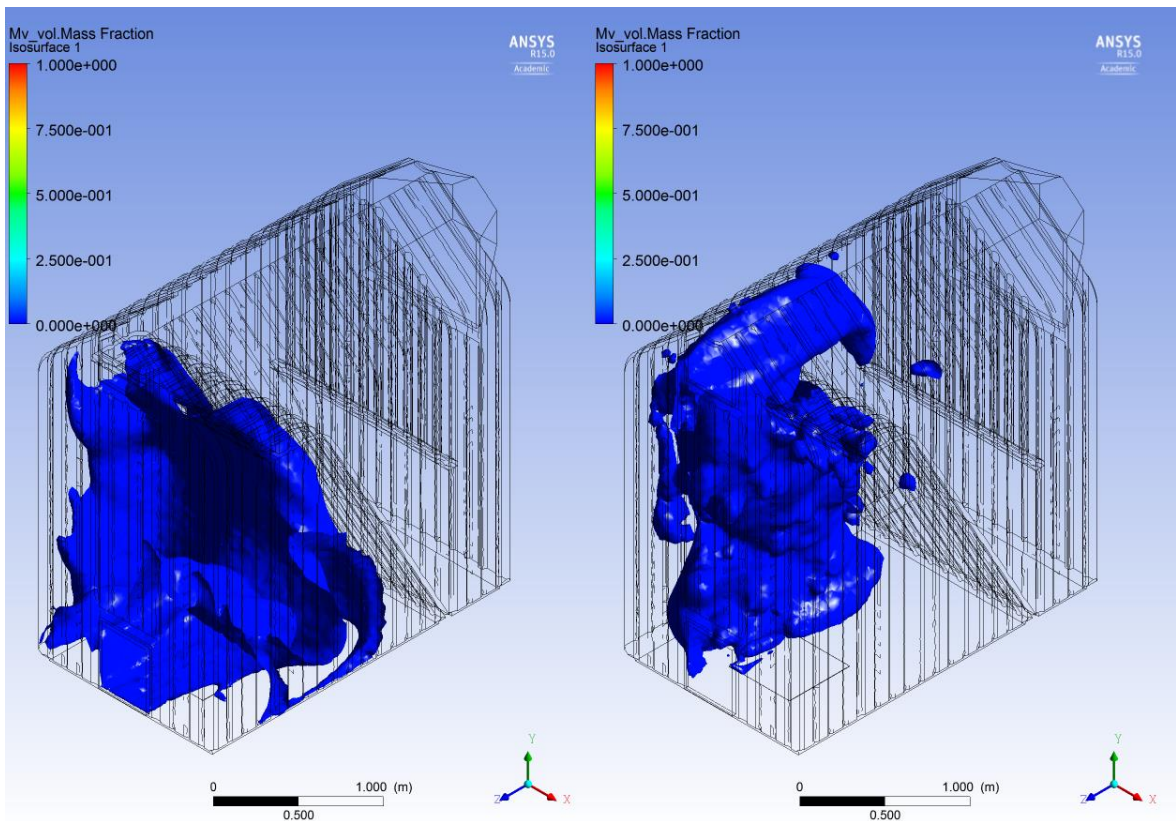
Στην **Εικόνα 4.58** φαίνεται η κατανομή των πτητικών για κλάσμα μάζας ίσο με 1 για 400K (αριστερά) και 300K (δεξιά). Στην περίπτωση που το καύσιμο εισέρχεται στους 400K, τα πτητικά απελευθερώνονται απ' ευθείας με την εισαγωγή τους, ενώ στη περίπτωση που το καύσιμο εισέρχεται στους 300K δεν υπάρχει κάποια περιοχή που τα πτητικά απελευθερώνονται πλήρως. Στην **Εικόνα 4.59** φαίνεται και για τις δύο περιπτώσεις μία ενδιάμεση τιμή κλάσματος μάζας, ίση με 0.22. Παρατηρείται ότι στη περίπτωση που το καύσιμο εισέρχεται στους 300K, το καύσιμο έχει παρασυρθεί από τον αέρα μέχρι να απελευθερώσει τα πτητικά και απελευθερώνει τα πτητικά του πιο πίσω. Τέλος, στην **Εικόνα 4.60** φαίνεται η κατανομή των πτητικών για κλάσμα μάζας σχεδόν ίσο με 0.



Εικόνα 4.58: Σύγκριση για $T_{fuel}=400K$ (αριστερά) και $T_{fuel}=300$ (δεξιά) για κλάσμα μάζας πτητικών ίσο με 1

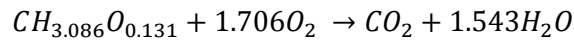


Εικόνα 4.59: Σύγκριση για $T_{fuel}=400K$ (αριστερά) και $T_{fuel}=300$ (δεξιά) για κλάσμα μάζας πτητικών ίσο με 0.22

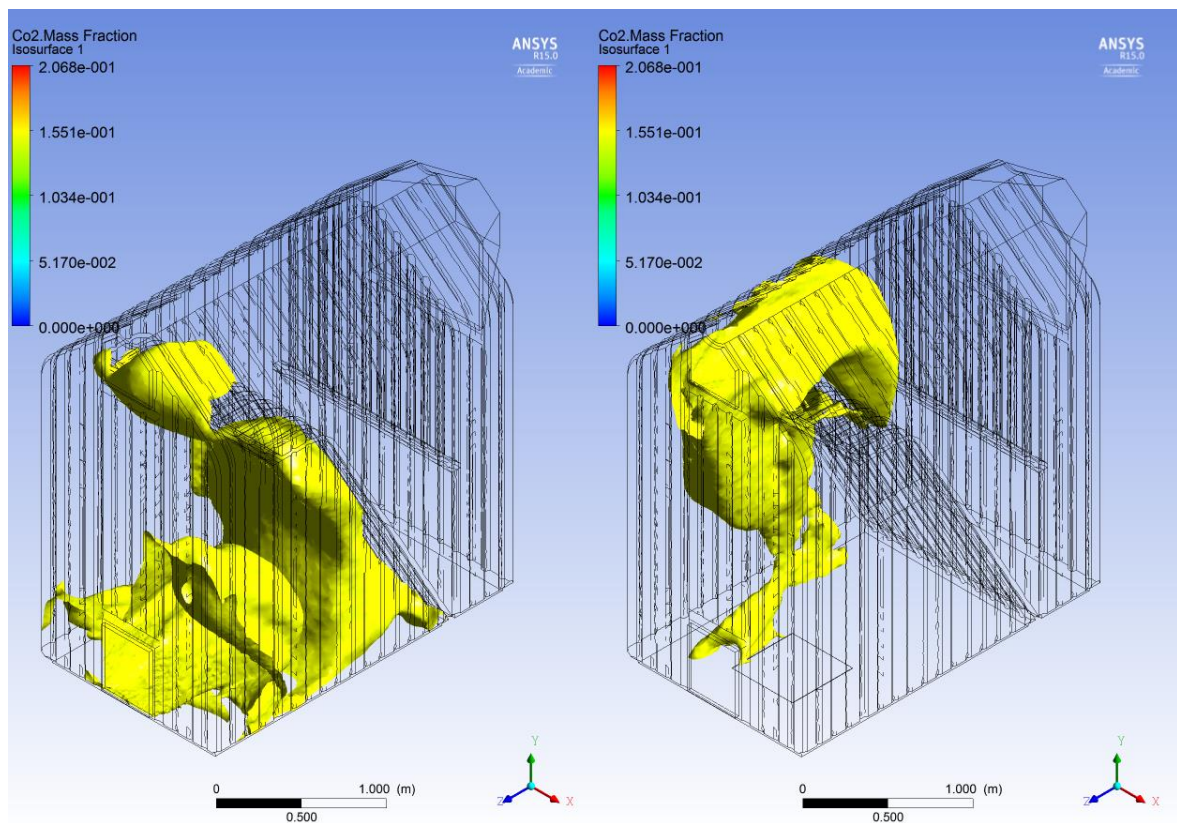


Εικόνα 4.60: Σύγκριση για $T_{fuel}=400K$ (αριστερά) και $T_{fuel}=300$ (δεξιά) για κλάσμα μάζας πτητικών σχεδόν ίσο με 0

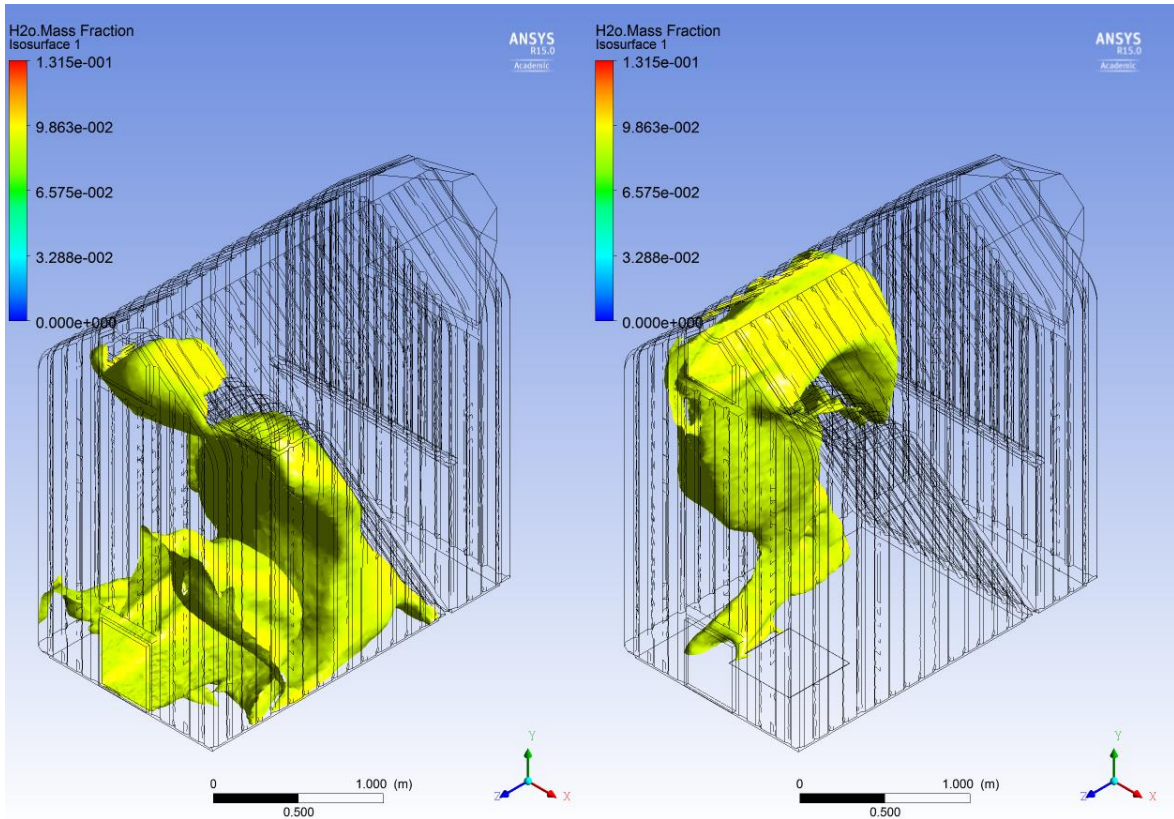
Στις περιοχές όπου το κλάσμα μάζας των πτητικών είναι ίσο με 0, τα πτητικά έχουν καεί πλήρως και σε εκείνες τις περιοχές παρουσιάζεται η μέγιστη συγκέντρωση CO₂ και H₂O, όπως φαίνεται και από στην παρακάτω αντίδραση που χρησιμοποιήθηκε.



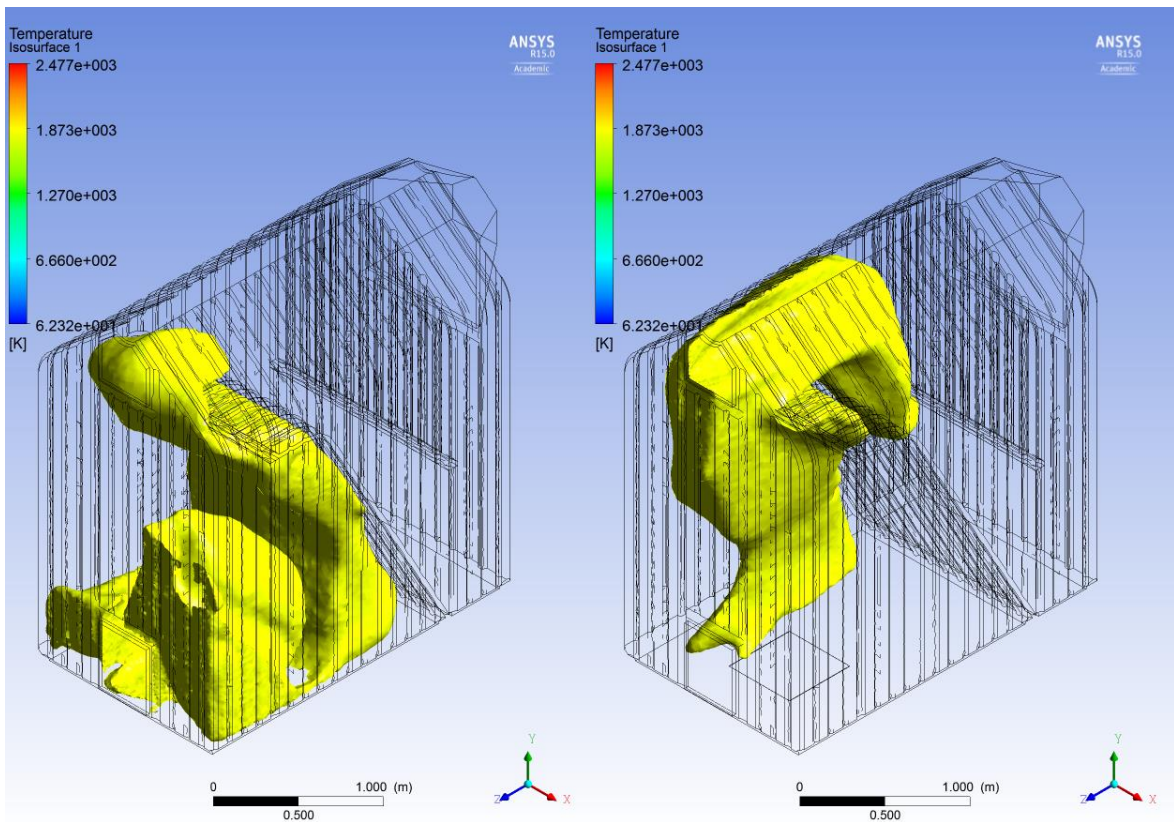
Για μέγιστη συγκέντρωση CO₂ το κλάσμα είναι 0.15, ενώ για H₂O το κλάσμα μάζας είναι ίσο με 0.1. Οι συγκεντρώσεις αυτές εμφανίζονται στις περιοχές που τα πτητικά καίγονται πλήρως και φαίνονται στις **Εικόνες 4.61** και **4.62** για CO₂ και H₂O, αντίστοιχα. Η θερμοκρασία που σημειώνεται στις περιοχές αυτές φαίνεται στην **Εικόνα 4.63**, ενώ η μέγιστη θερμοκρασία φαίνεται στην **Εικόνα 4.64**. Για καύσιμο που εισέρχεται στους 300K, η μέγιστη θερμοκρασία που σημειώνεται είναι ίση με 2250K, ενώ για καύσιμο που εισέρχεται στους 400K, η μέγιστη θερμοκρασία που σημειώνεται είναι ίση με 2370K.



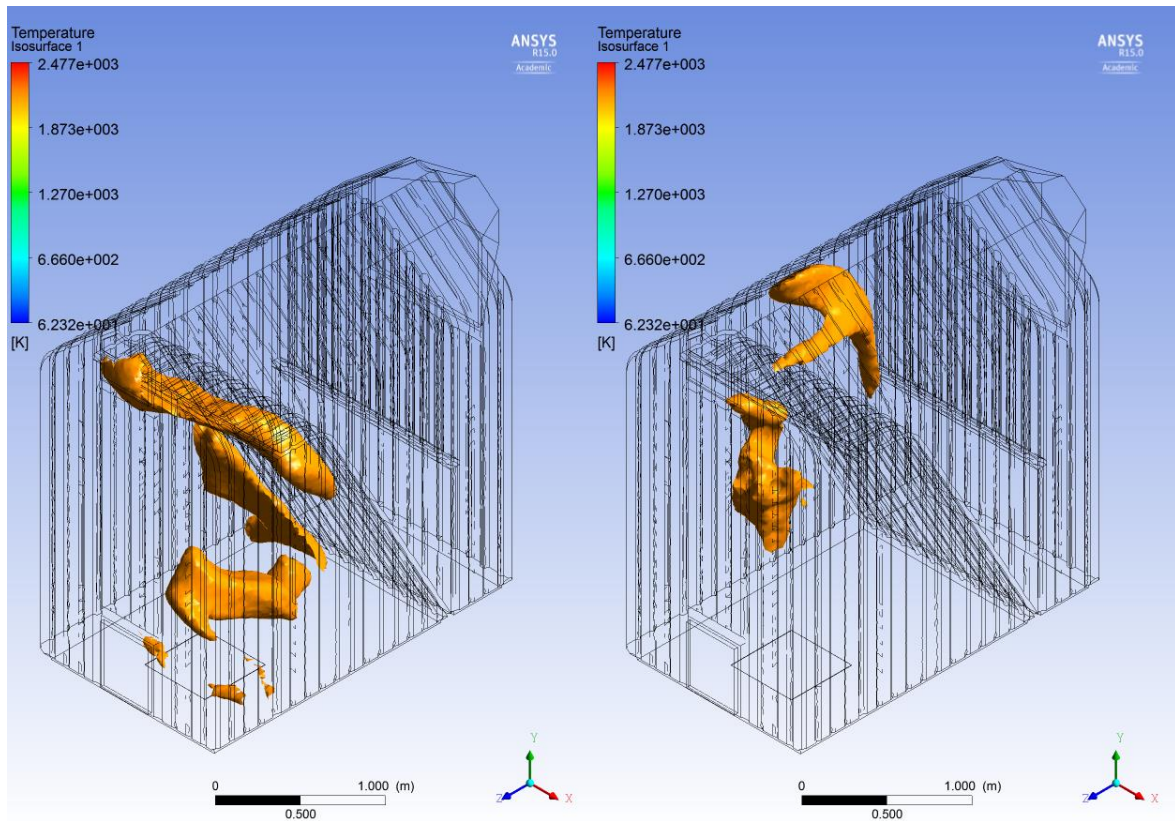
Εικόνα 4.61: Σύγκριση για T_{fuel}=400K (αριστερά) και T_{fuel}=300 (δεξιά) για κλάσμα μάζας CO₂ ίσο με 0.15



Εικόνα 4.62: Σύγκριση για $T_{fuel}=400K$ (αριστερά) και $T_{fuel}=300$ (δεξιά) για κλάσμα μάζας H_2O ίσο με 0.1



Εικόνα 4.63: Σύγκριση για $T_{fuel}=400K$ (αριστερά) και $T_{fuel}=300$ (δεξιά) για θερμοκρασία ίση με 1800K



Εικόνα 4.64: Σύγκριση για $T_{fuel}=400K$ (αριστερά) και $T_{fuel}=300$ (δεξιά) για θερμοκρασία ίση με $2200K$

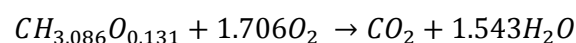
4.3 Επίδραση περίσσειας αέρα

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθεί η επίδραση της περίσσειας αέρα για καύσιμο που εισέρχεται στους $400K$, αέρα στους $300K$ και $\lambda=1$, συγκρίνοντάς το με τα αποτελέσματα για $\lambda=1.26$ και $\lambda=1.7$. Στο επόμενο κεφάλαιο θα παρουσιαστούν και θα αναλυθούν τα αποτελέσματα για στοιχειομετρική καύση, ενώ στη συνέχεια θα παρουσιαστούν συγκριτικά αποτελέσματα για στοιχειομετρική καύση και για καύση με περίσσεια αέρα.

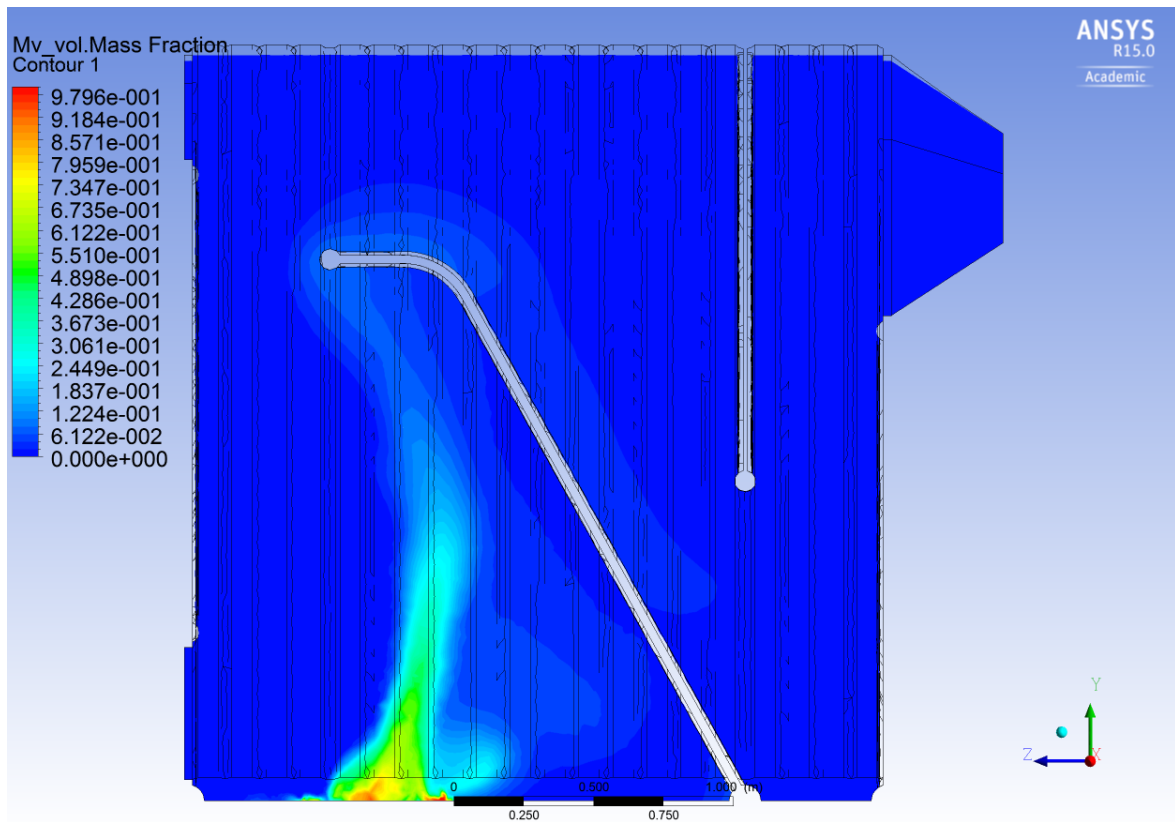
4.3.1 Αποτελέσματα για στοιχειομετρική καύση

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα για $T_{fuel}=400K$, $T_{air}=500K$ και $\lambda=1$. Τα αποτελέσματα αυτά αφορούν τη συγκέντρωση των πτητικών, του CO_2 , του H_2O , του CO , του H_2 , καθώς και της συγκέντρωσης του O_2 και του N_2 .

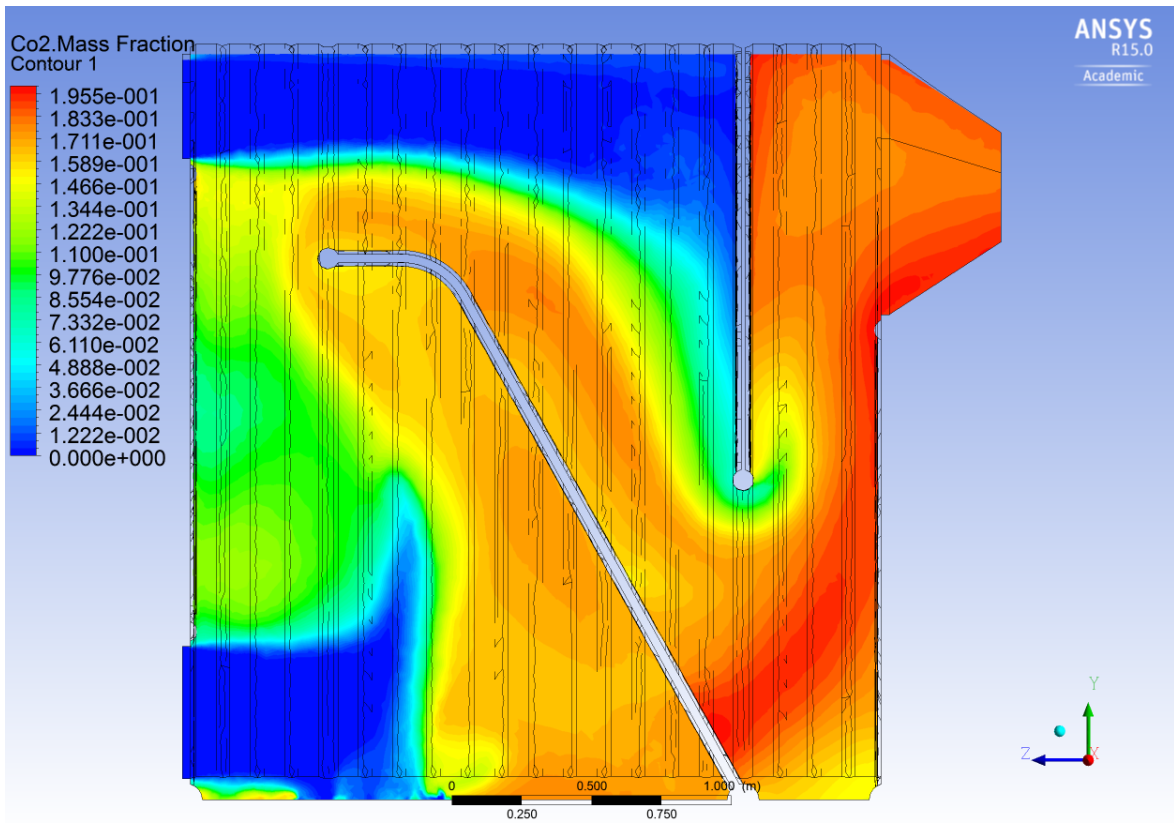
Στη στοιχειομετρική καύση, έχουμε πλήρη καύση του οξυγόνου, καθώς και του στερεού καυσίμου και των πτητικών, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 4.65**. Στη περίπτωση αυτή ο υδρογονάνθρακας (που στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι η ένωση των πτητικών $CH_{3.086}O_{0.131}$) δύναται να οξειδωθεί πλήρως και παράγεται CO_2 και H_2O , όπως φαίνεται και στη παρακάτω αντίδραση που χρησιμοποιήθηκε.



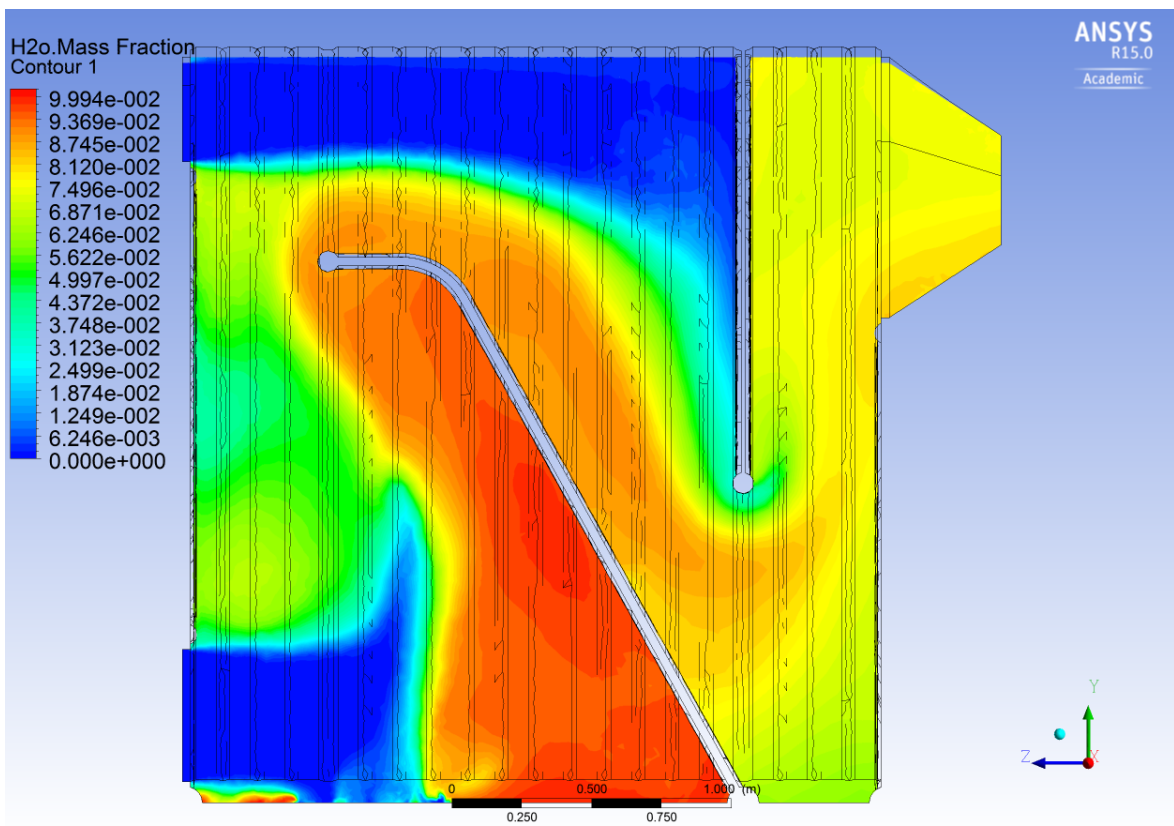
Η συγκέντρωση του CO₂ και του H₂O φαίνεται στις **Εικόνες 4.66** και **4.67**, αντίστοιχα. Οι μέγιστες συγκεντρώσεις CO₂ και H₂O παρουσιάζονται στις περιοχές που καίγονται τα πτητικά και που υπάρχει μέγιστη θερμοκρασία, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 4.5**.



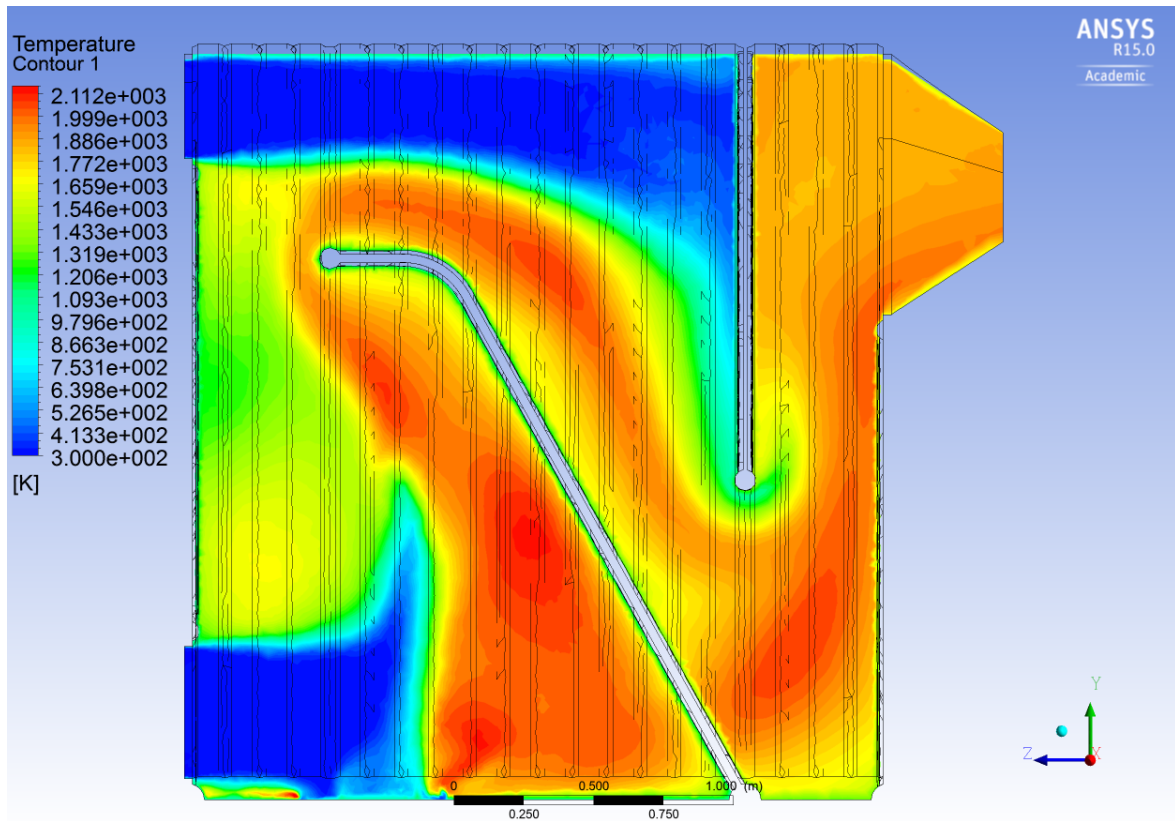
Εικόνα 4.65: Κλάσμα μάζας πτητικών για $T_{fuel}=400K$, $T_{air}=300K$ και $\lambda=1$



Εικόνα 4.66: Κλάσμα μάζας CO₂ για T_{fuel}=400K, T_{air}=300K και λ=1

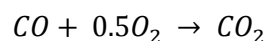
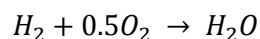
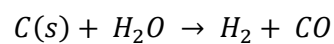
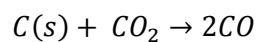
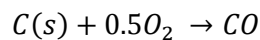
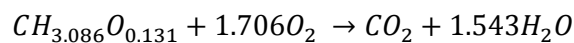


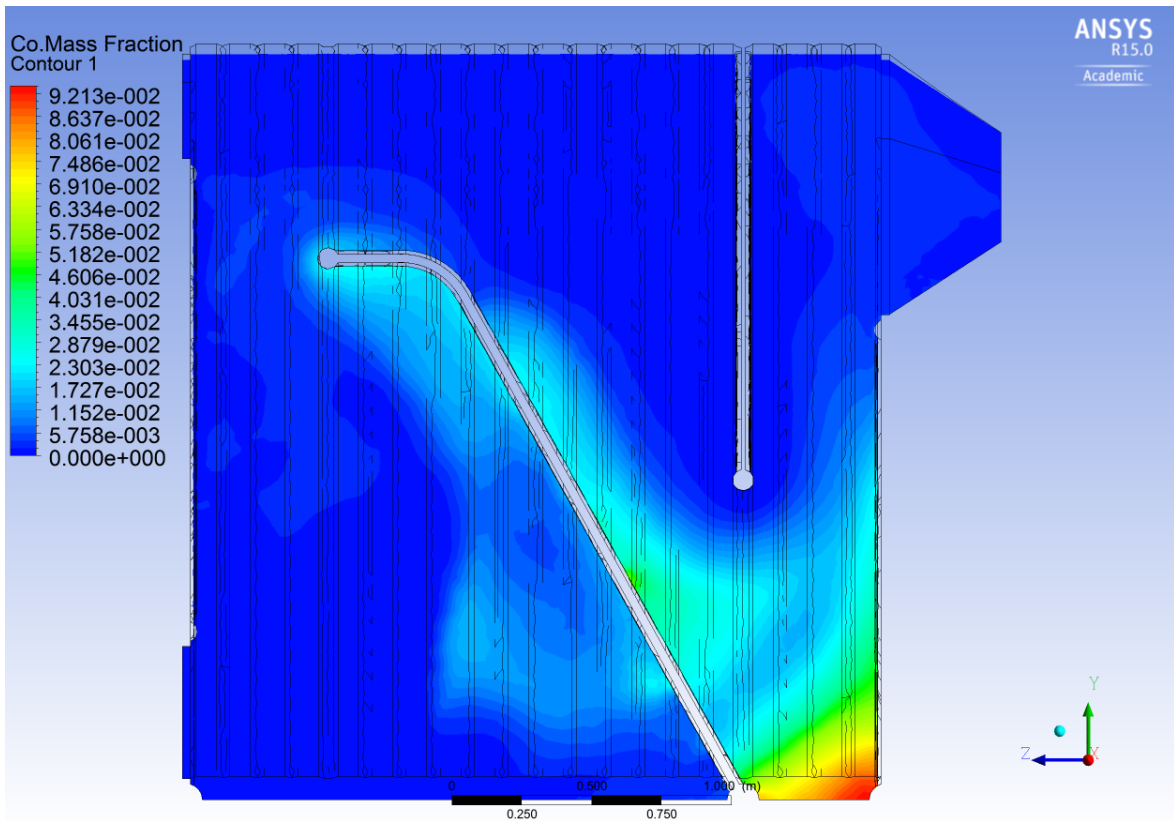
Εικόνα 4.67: Κλάσμα μάζας H₂O για T_{fuel}=400K, T_{air}=300K και λ=1



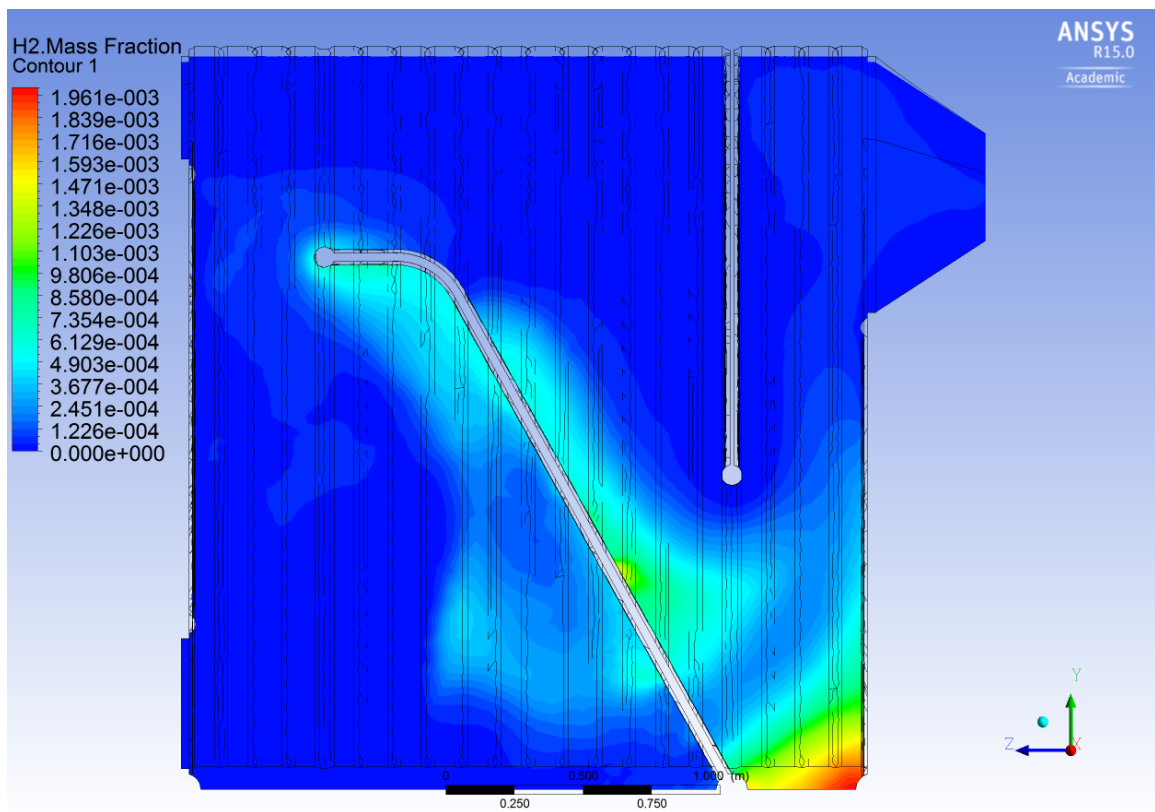
Εικόνα 4.68: Θερμοκρασία για $T_{\text{fuel}}=400\text{K}$, $T_{\text{air}}=300\text{K}$ και $\lambda=1$

Στη πλήρη καύση εμφανίζονται μικρές συγκεντρώσεις CO και H_2 , αφού υπάρχει αρκετό οξυγόνο, ώστε να μετατραπούν σε CO_2 και H_2O . Η συκέντρωση του CO και του H_2 φαίνεται στις **Εικόνες 4.69** και **4.70**, αντίστοιχα. Οι συγκεντρώσεις αυτές εμφανίζονται στις περιοχές που υπάρχει CO_2 και H_2O , αφού αποτελούν το ενδιάμεσο στάδιο παραγωγής τους από τη καύση του άνθρακα, όπως φαίνεται και στις παρακάτω αντιδράσεις που χρησιμοποιήθηκαν. Τέλος, το οξυγόνο καίγεται μερικώς και υπάρχει σε περίσσεια, ενώ το άζωτο παραμένει αδρανές, όπως φαίνεται στις **Εικόνες 4.71** και **4.72**, αντίστοιχα.

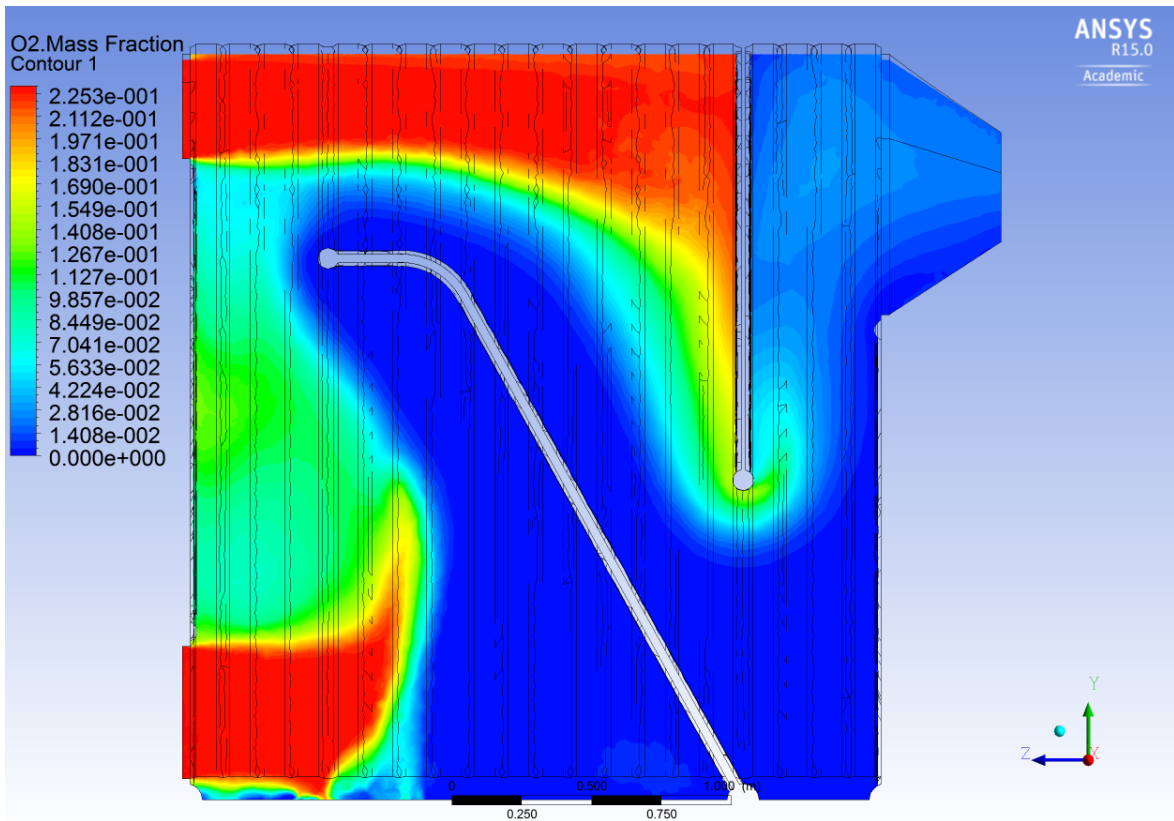




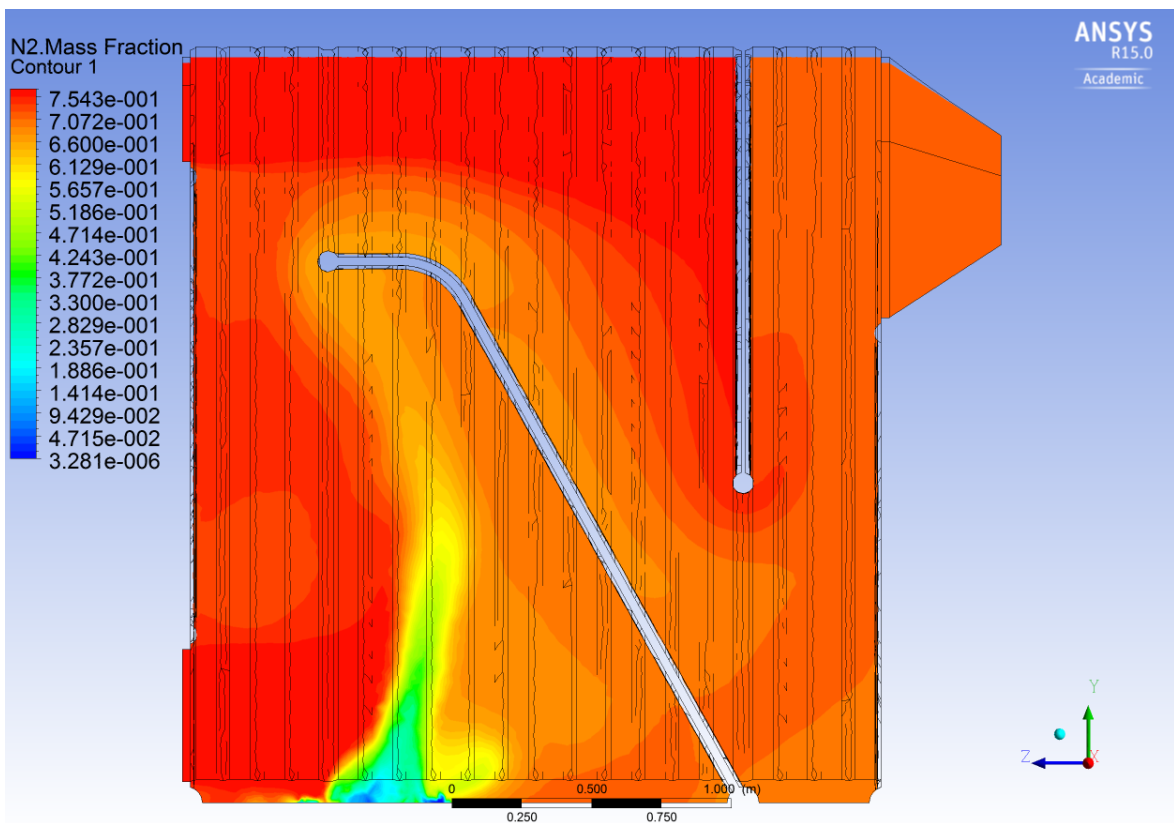
Εικόνα 4.69: Κλάσμα μάζας CO για $T_{fuel}=400K$, $T_{air}=300K$ και $\lambda=1$



Εικόνα 4.70: Κλάσμα μάζας H_2 για $T_{fuel}=400K$, $T_{air}=300K$ και $\lambda=1$



Εικόνα 4.71: Κλάσμα μάζας O_2 για $T_{fuel}=400K$, $T_{air}=300K$ και $\lambda=1$



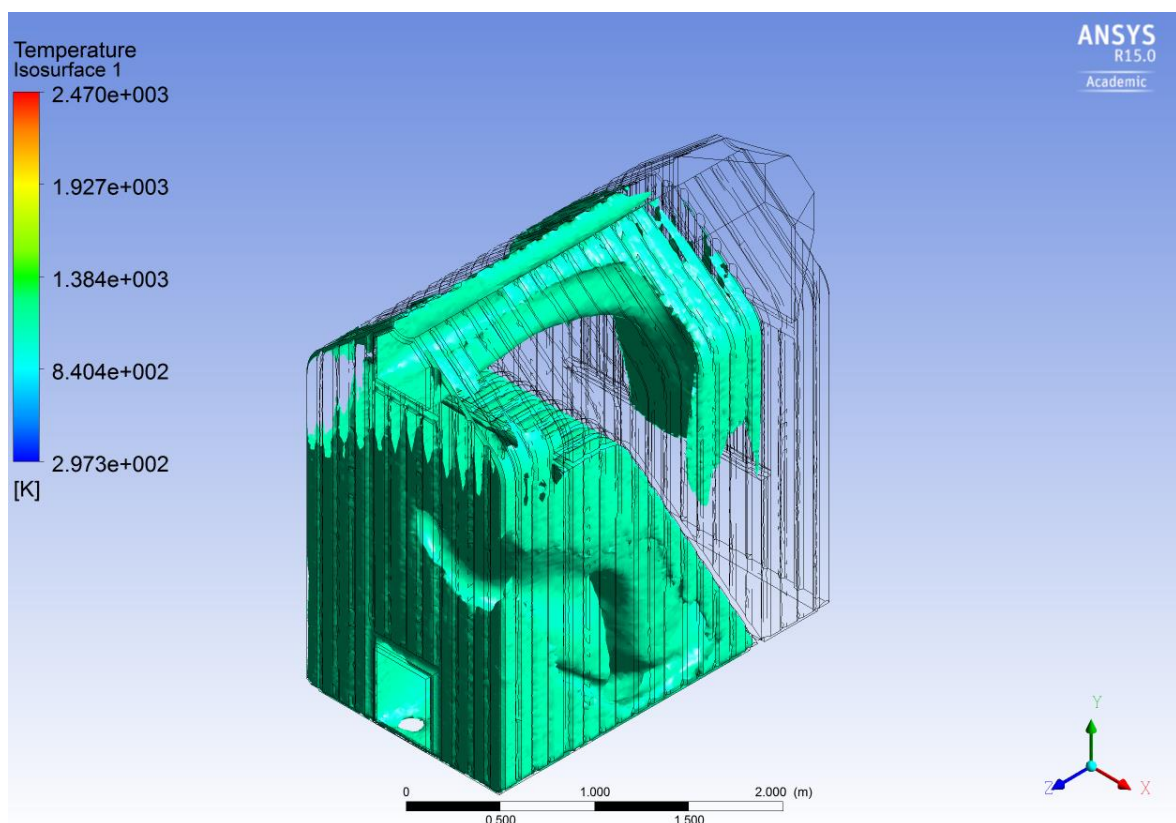
Εικόνα 4.72: Κλάσμα μάζας N_2 για $T_{fuel}=400K$, $T_{air}=300K$ και $\lambda=1$

Για την καλύτερη απεικόνιση των αποτελεσμάτων έγινε χρήση φασμάτων σε τρισδιάστατη μορφή για την παρουσίαση ενδεικτικών τιμών των παραμέτρων. Στις **Εικόνες 4.73 – 4.76** φαίνεται η σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας για 1100K, 1300K, 1800K και 2200K. Η μέγιστη θερμοκρασία σημειώνεται στην περιοχή όπου το καύσιμο καίγεται πλήρως, ενώ η θερμοκρασία που παρατηρείται στο μεγαλύτερο μέρος του λέβητα είναι 1800K.

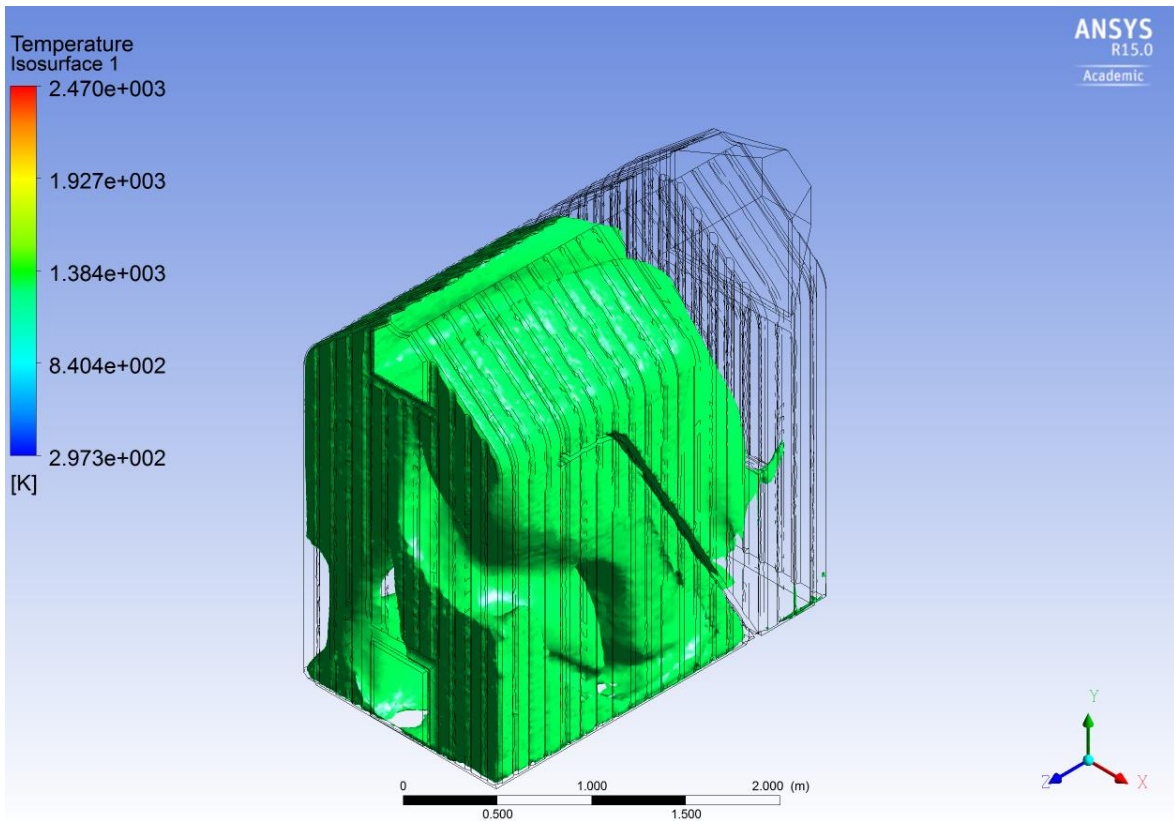
Στις **Εικόνες 4.77 – 4.80** φαίνεται η σταδιακή μείωση του O_2 για κλάσμα μάζας 0.23, 0.16, 0.1 και 0.04. Παρατηρείται ότι το οξυγόνο εισέρχεται στο λέβητα με ποσοστό 23% και σταδιακά αντιδρώντας με το καύσιμο καίγεται.

Στις **Εικόνες 4.81 – 4.83** φαίνεται η σταδιακή παραγωγή του CO_2 για κλάσμα μάζας 0.15, 0.1 και 0.05. Στις περιοχές όπου εισέρχεται το καύσιμο και ξεκινά να καίγεται, παράγεται CO_2 με κλάσμα μάζας 0.05. Στη συνέχεια, όταν το καύσιμο καεί πλήρως παρουσιάζονται οι μέγιστες συγκεντρώσεις CO_2 , ενώ το κλάσμα μάζας στην έξοδο είναι 0.15.

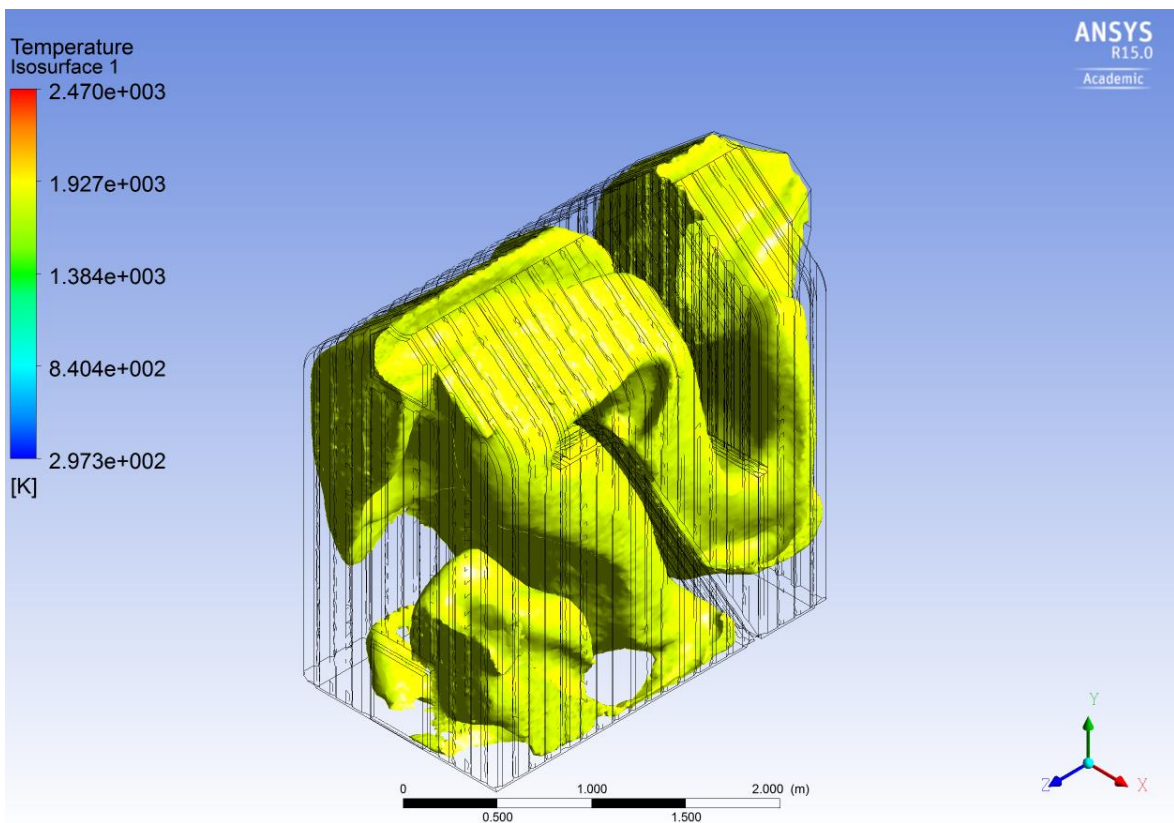
Τέλος, στις **Εικόνες 4.84 – 4.86** φαίνεται η σταδιακή μείωση των πτητικών για κλάσμα μάζας 0.2, 0.02 και 0.002. Παρατηρείται πως όταν τα πτητικά απελευθερώνονται το κλάσμα μάζας τους είναι 0.2 και στη συνέχεια φαίνεται πως καίγονται σταδιακά.



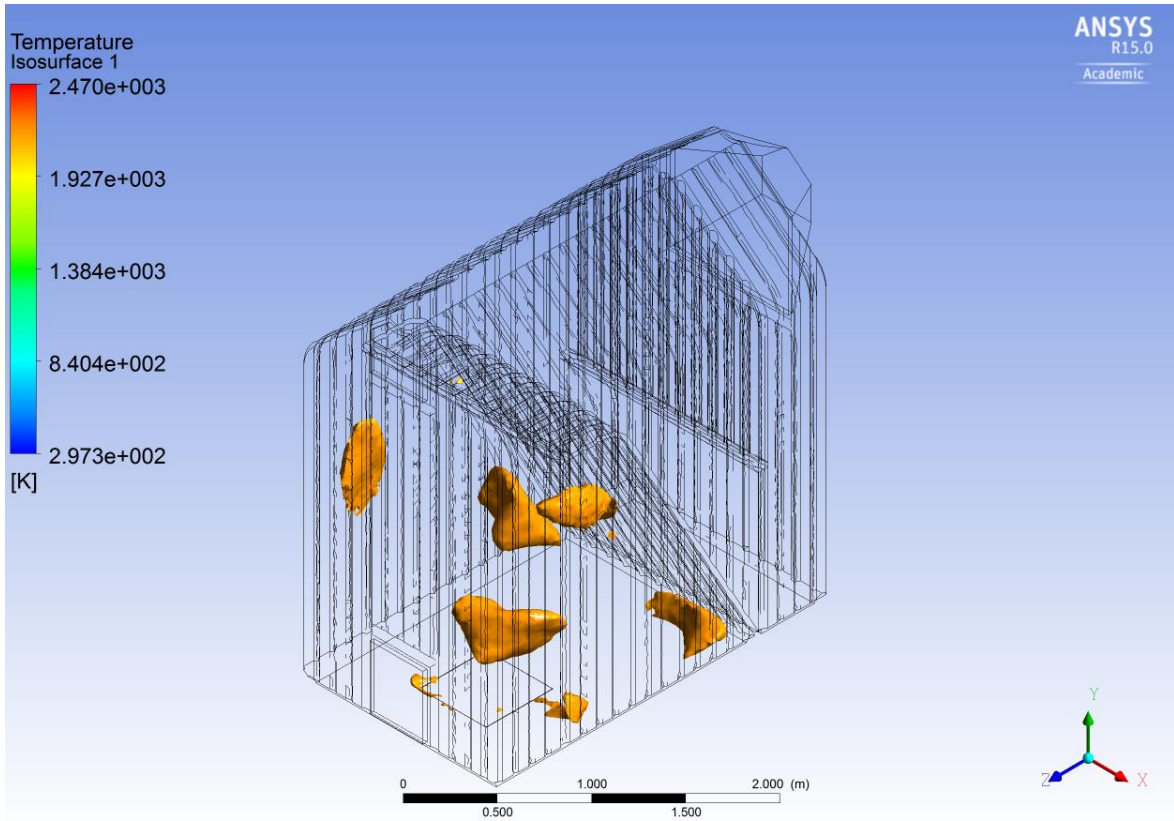
Εικόνα 4.73: Περιοχές για $T=1100K$ για $T_{fuel}=400K$, $T_{air}=300K$ και $\lambda=1$



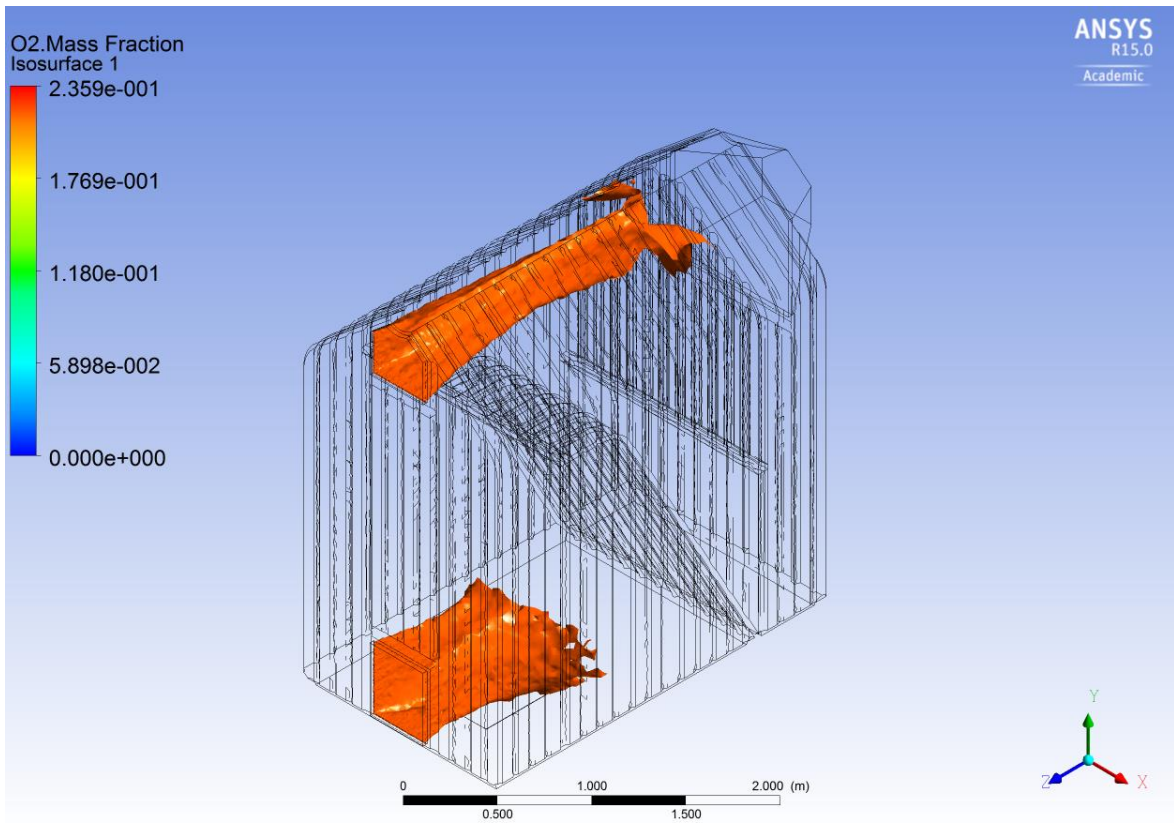
Εικόνα 4.74: Περιοχές για $T=1300\text{K}$ για $T_{\text{fuel}}=400\text{K}$, $T_{\text{air}}=300\text{K}$ και $\lambda=1$



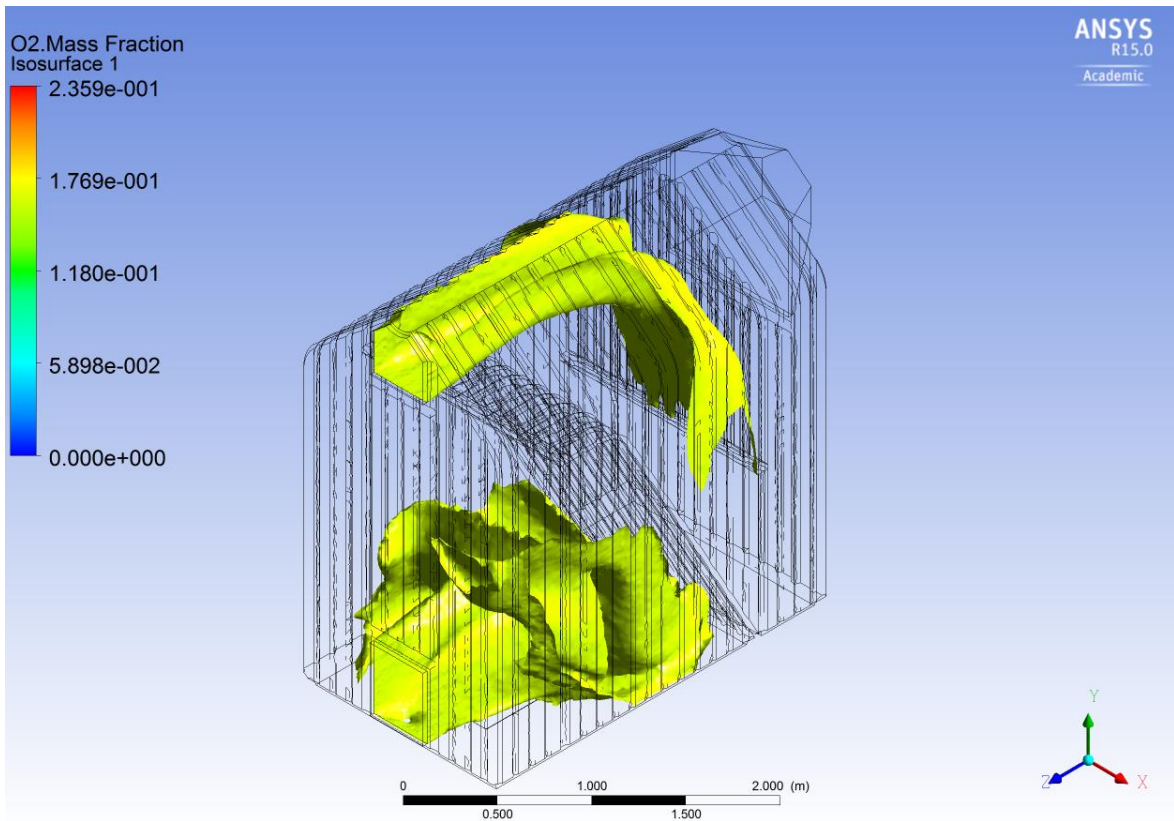
Εικόνα 4.75: Περιοχές για $T=1800\text{K}$ για $T_{\text{fuel}}=400\text{K}$, $T_{\text{air}}=300\text{K}$ και $\lambda=1$



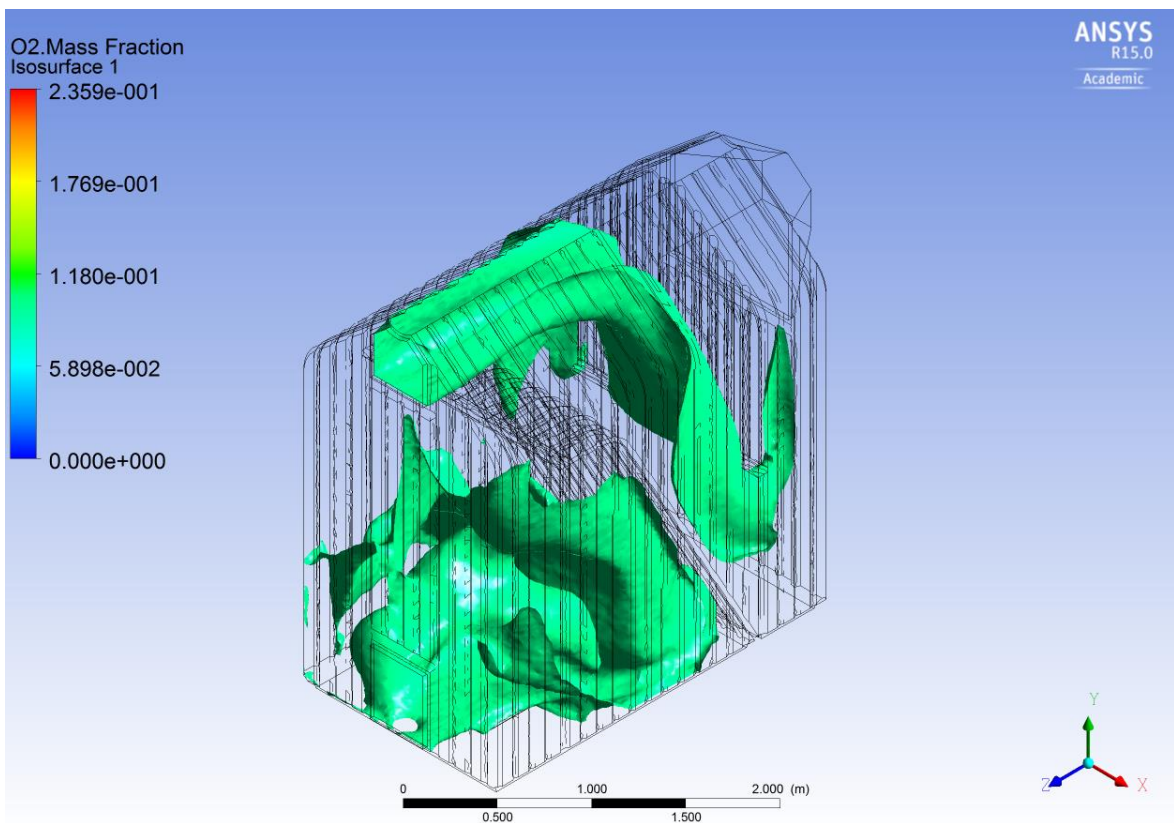
Εικόνα 4.76: Περιοχές για $T=2200\text{K}$ για $T_{\text{fuel}}=400\text{K}$, $T_{\text{air}}=300\text{K}$ και $\lambda=1$



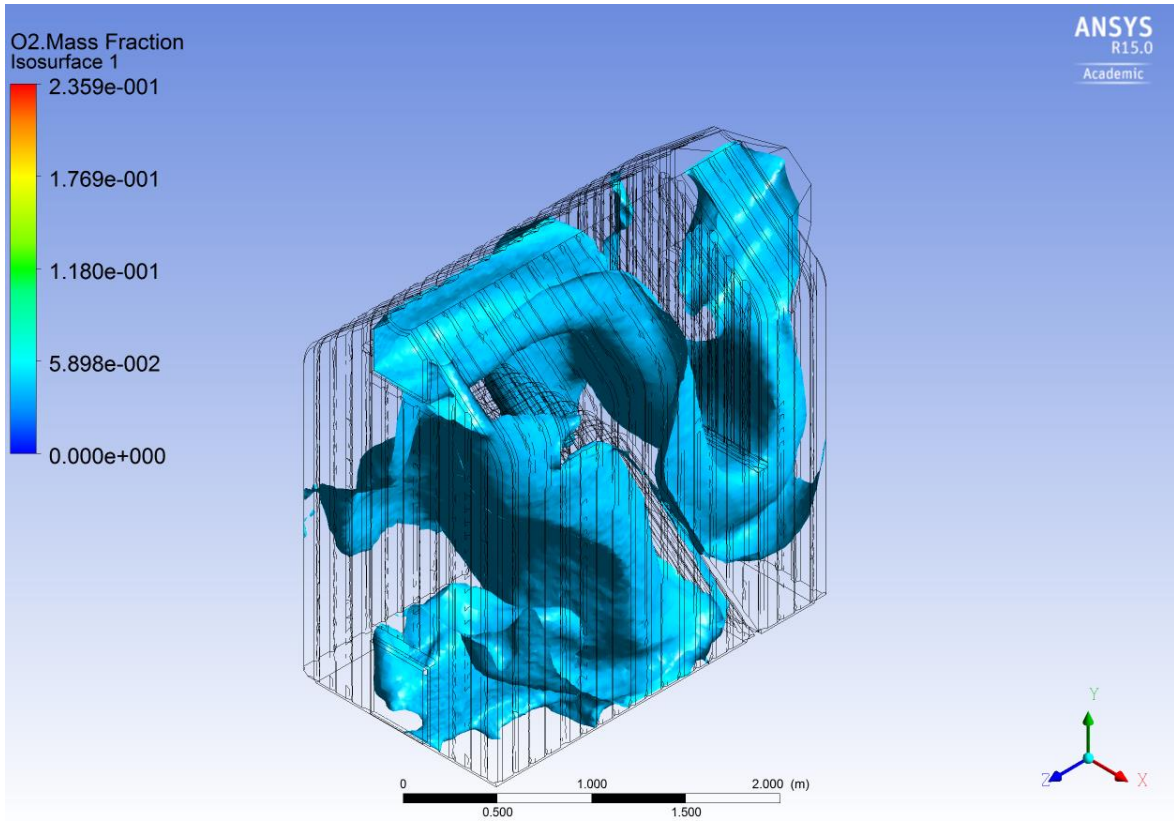
Εικόνα 4.77: Περιοχές για κλάσμα μάζας O_2 0.23 για $T_{\text{fuel}}=400\text{K}$, $T_{\text{air}}=300\text{K}$ και $\lambda=1$



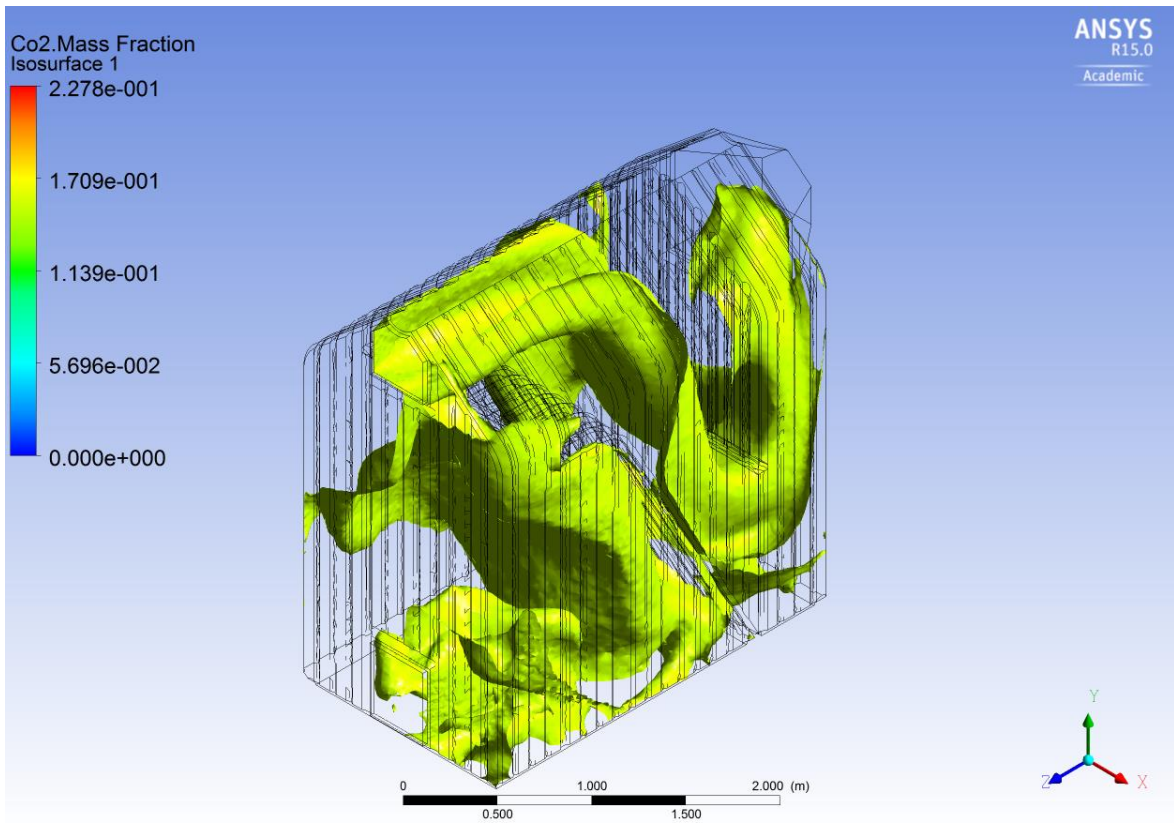
Εικόνα 4.78: Περιοχές για κλάσμα μάζας O_2 0.16 για $T_{fuel}=400K$, $T_{air}=300K$ και $\lambda=1$



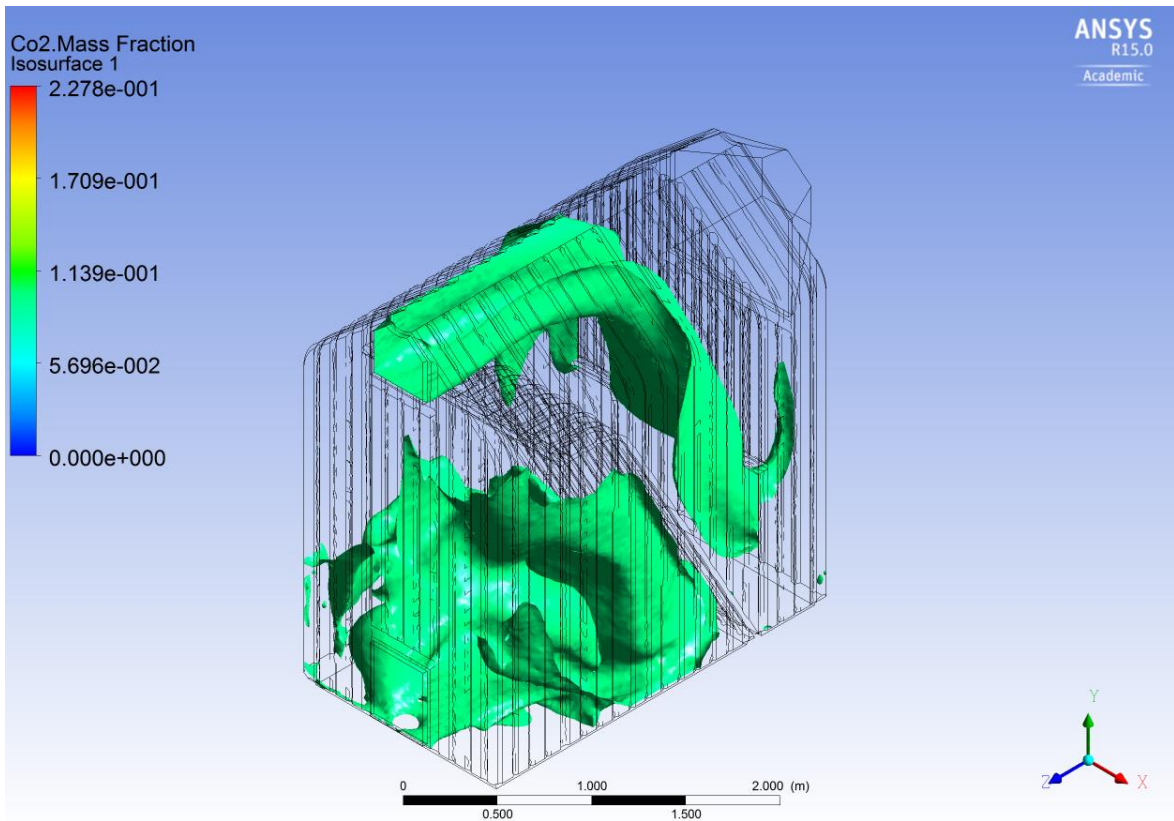
Εικόνα 4.79: Περιοχές για κλάσμα μάζας O_2 0.1 για $T_{fuel}=400K$, $T_{air}=300K$ και $\lambda=1$



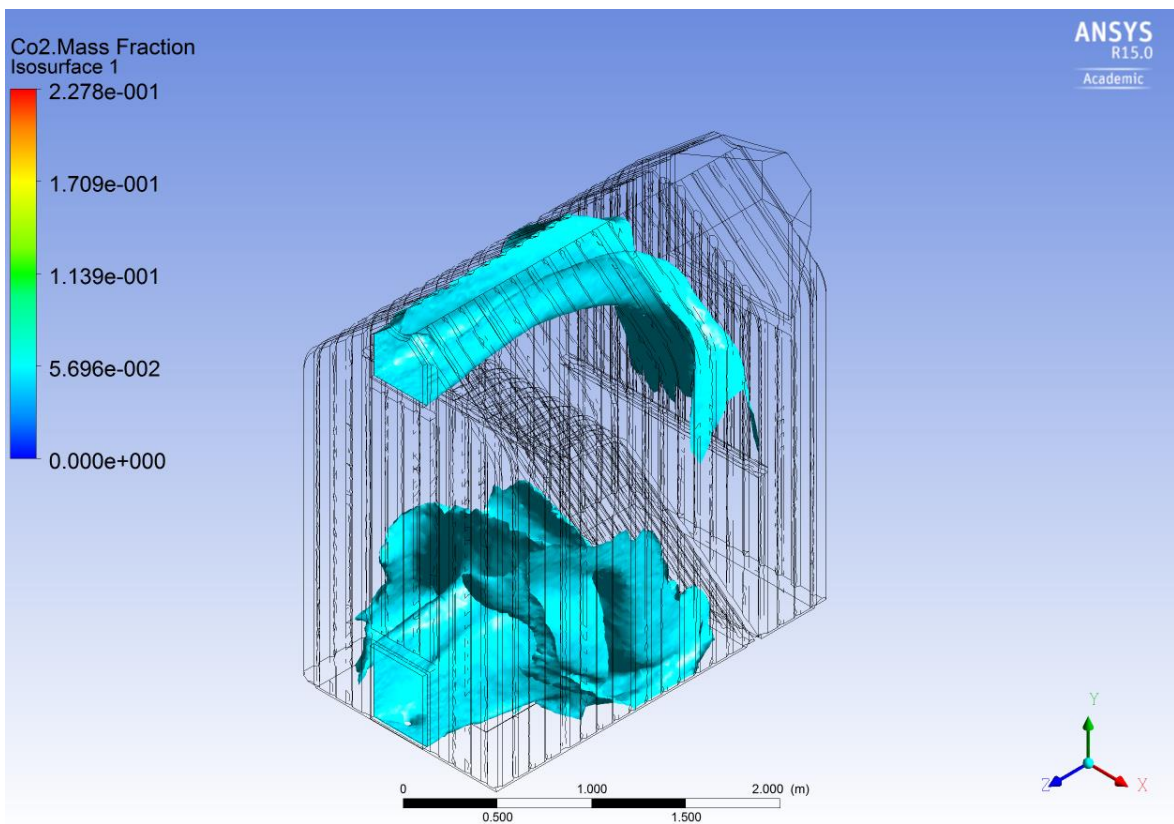
Εικόνα 4.80: Περιοχές για κλάσμα μάζας O_2 0.04 για $T_{fuel}=400K$, $T_{air}=300K$ και $\lambda=1$



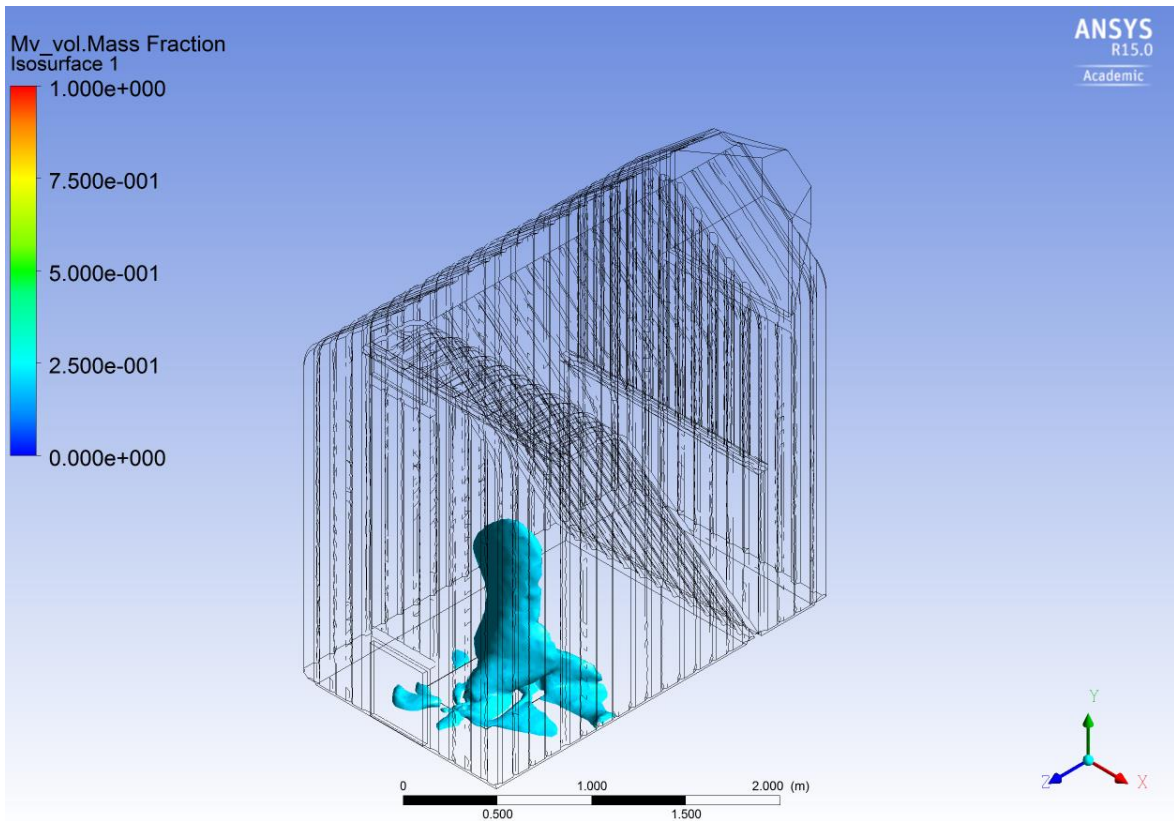
Εικόνα 4.81: Περιοχές για κλάσμα μάζας CO_2 0.15 για $T_{fuel}=400K$, $T_{air}=300K$ και $\lambda=1$



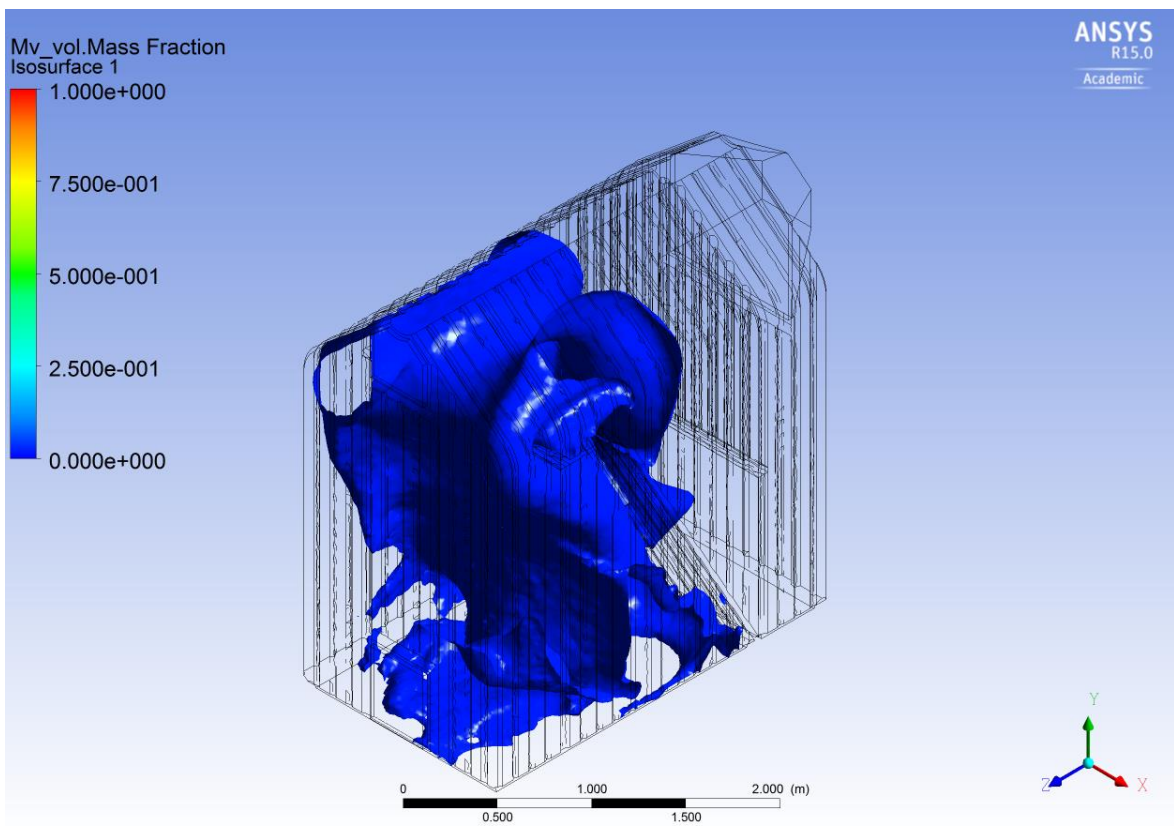
Εικόνα 4.82: Περιοχές για κλάσμα μάζας CO₂ 0.1 για T_{fuel}=400K, T_{air}=300K και λ=1



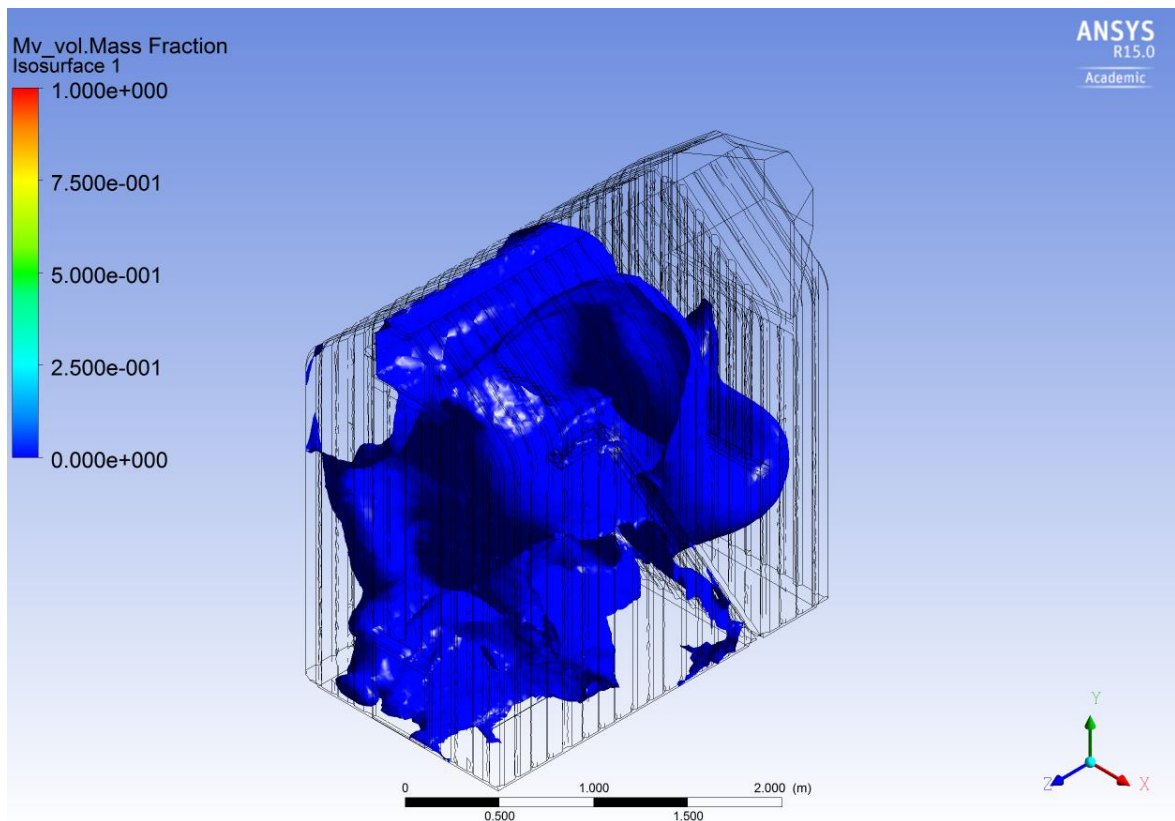
Εικόνα 4.83: Περιοχές για κλάσμα μάζας CO₂ 0.05 για T_{fuel}=400K, T_{air}=300K και λ=1



Εικόνα 4.84: Περιοχές για κλάσμα μάζας πτητικών 0.2 για $T_{fuel}=400K$, $T_{air}=300K$ και $\lambda=1$



Εικόνα 4.85: Περιοχές για κλάσμα μάζας πτητικών 0.02 για $T_{fuel}=400K$, $T_{air}=300K$ και $\lambda=1$

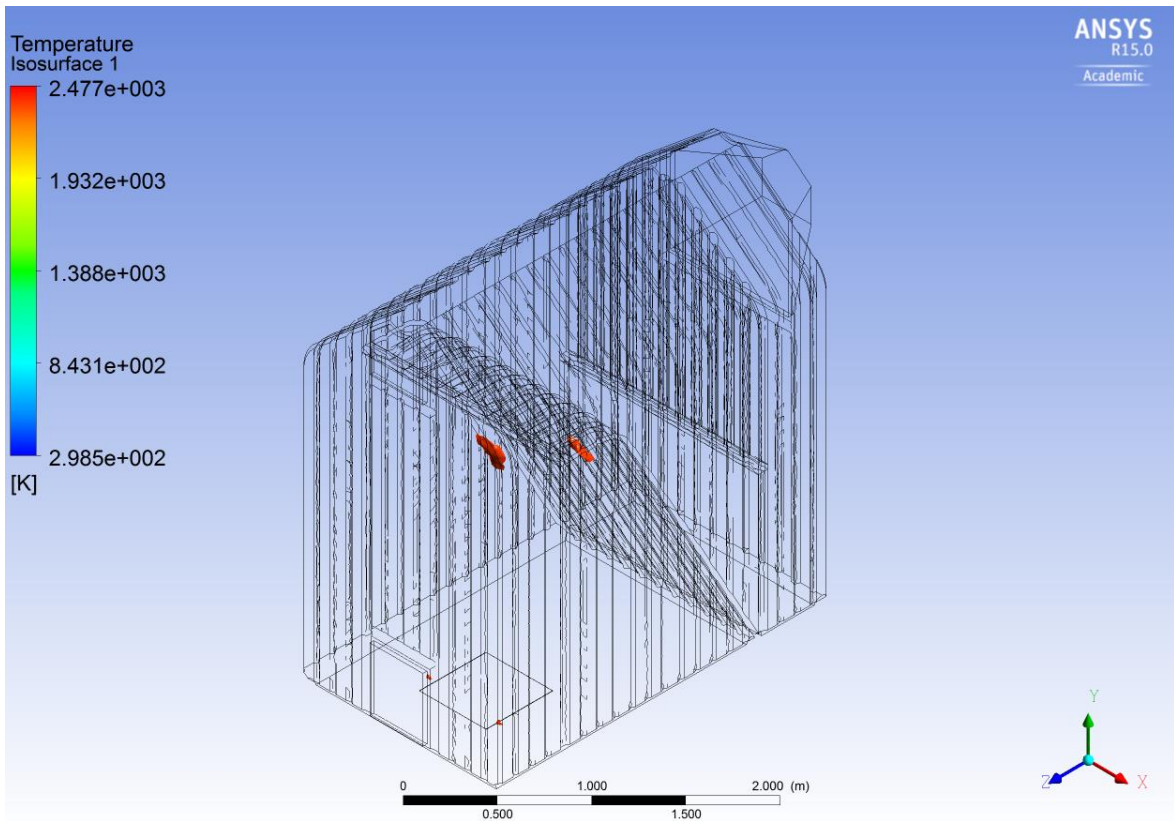


Εικόνα 4.86: Περιοχές για κλάσμα μάζας πηητικών 0.002 για $T_{fuel}=400K$, $T_{air}=300K$ και $\lambda=1$

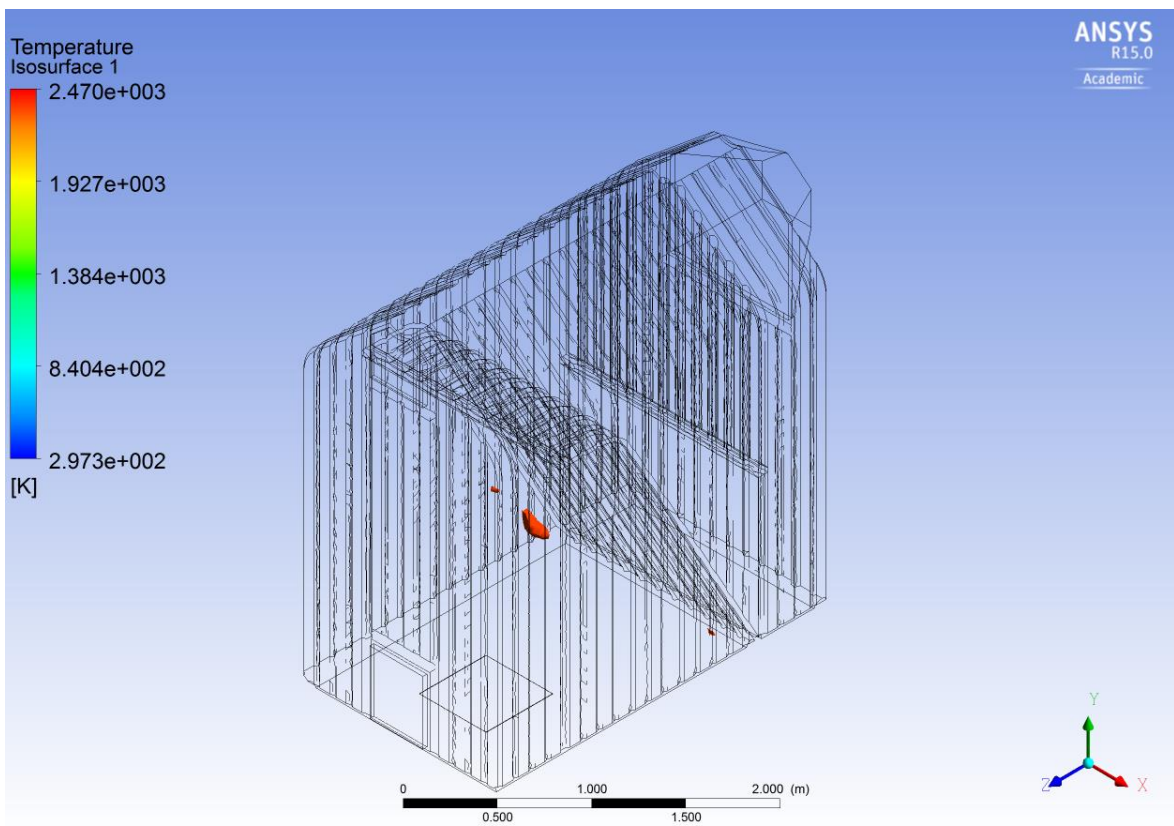
4.3.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων για στοιχειομετρική καύση και καύση με περίσσεια αέρα

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα συγκριθούν και θα αναλυθούν τα αποτελέσματα για στοιχειομετρική καύση και για καύση με περίσσεια αέρα ($\lambda=1.26$ και $\lambda=1.7$). Η σύγκριση αυτή αφορά τη θερμοκρασία, τη συγκέντρωση των πηητικών, του O_2 , του CO , του H_2 , του CO_2 και του H_2O .

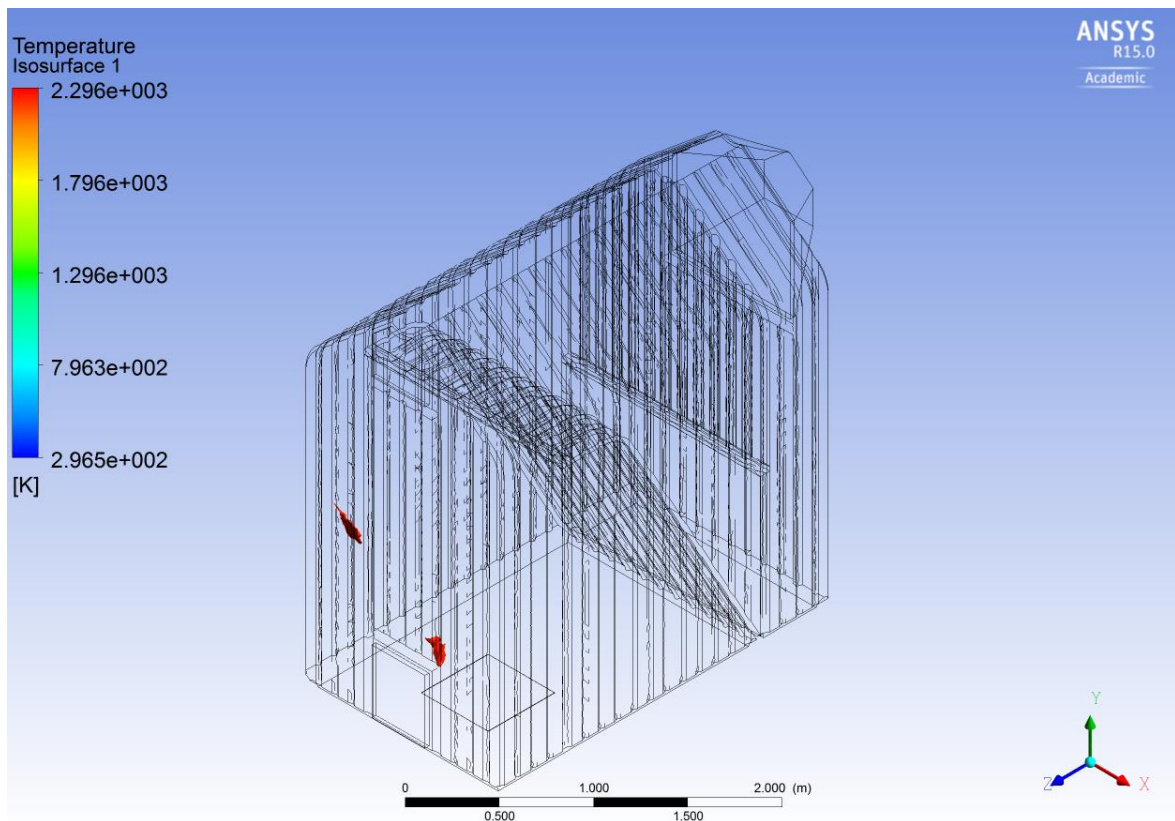
Στη στοιχειομετρική καύση παρουσιάζεται η μέγιστη αδιαβατική θερμοκρασία καύσης, η οποία είναι ίση με 2390K. Για $\lambda=1.26$ η μέγιστη αδιαβατική θερμοκρασία είναι ίση με 2370K, ενώ για $\lambda=1.7$ είναι ίση με 2250K. Οι περιοχές όπου εμφανίζεται η μέγιστη θερμοκρασία για $\lambda=1$, $\lambda=1.26$ και $\lambda=1.7$ φαίνονται στις **Εικόνες 4.87**, **4.88** και **4.89**, αντίστοιχα.



Εικόνα 4.87: Μέγιστη αδιαβατική θερμοκρασία καύσης (2390K) για $\lambda=1$



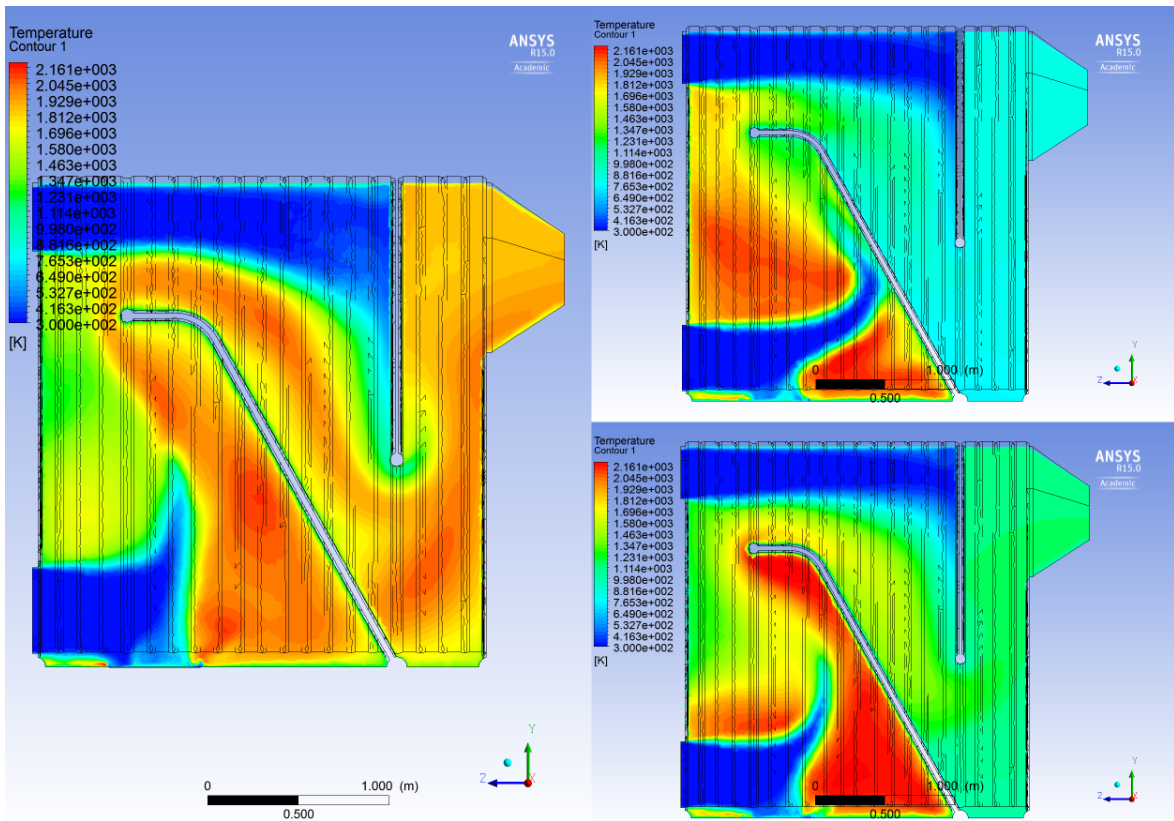
Εικόνα 4.88: Μέγιστη αδιαβατική θερμοκρασία καύσης (2370K) για $\lambda=1.26$



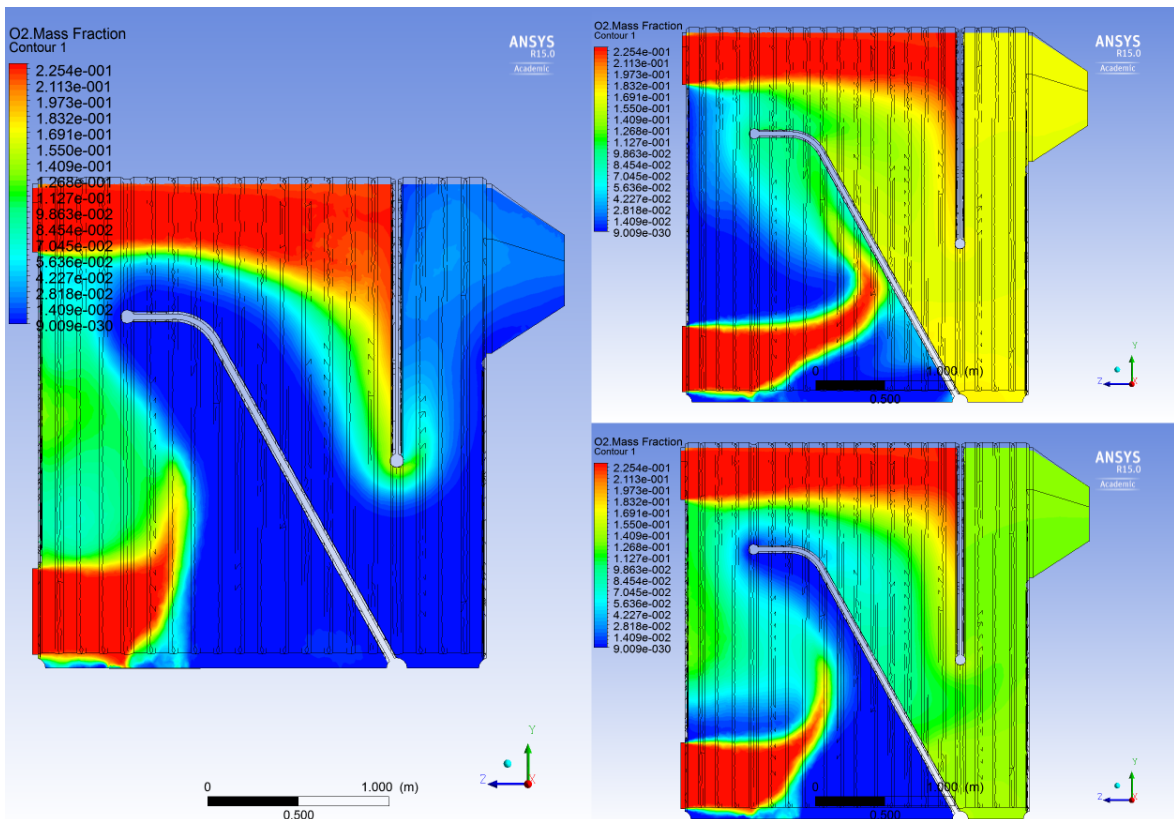
Εικόνα 4.89: Μέγιστη αδιαβατική θερμοκρασία καύσης (2250K) για $\lambda=1.7$

Στην **Εικόνα 4.90** φαίνεται συγκριτικά η κατανομή της θερμοκρασίας σε τομή που περνά από τη μέση του λέβητα στον άξονα YZ. Παρατηρείται ότι στις περιπτώσεις με περίσσεια αέρα, οι μεγαλύτερες θερμοκρασίες σημειώνονται κοντά στην περιοχή που εισέρχεται το καύσιμο, αφού υπάρχει αρκετό οξυγόνο, ώστε να καεί πλήρως απ' ευθείας. Στη περίπτωση της στοιχειομετρικής καύσης, το καύσιμο καίγεται πιο αργά και παρατηρούνται ομαλότερες μεταβολές της θερμοκρασίας.

Στην **Εικόνα 4.91** φαίνεται συγκριτικά η συγκέντρωση του O_2 για $\lambda=1$, $\lambda=1.26$ και $\lambda=1.7$. Στη περίπτωση της στοιχειομετρικής καύσης το οξυγόνο του πρωτεύοντος ρεύματος αέρα καίγεται πιο γρήγορα, ενώ το συνολικό οξυγόνο καίγεται πλήρως, αφού το κλάσμα μάζας στην έξοδο είναι σχεδόν ίσο με μηδέν.

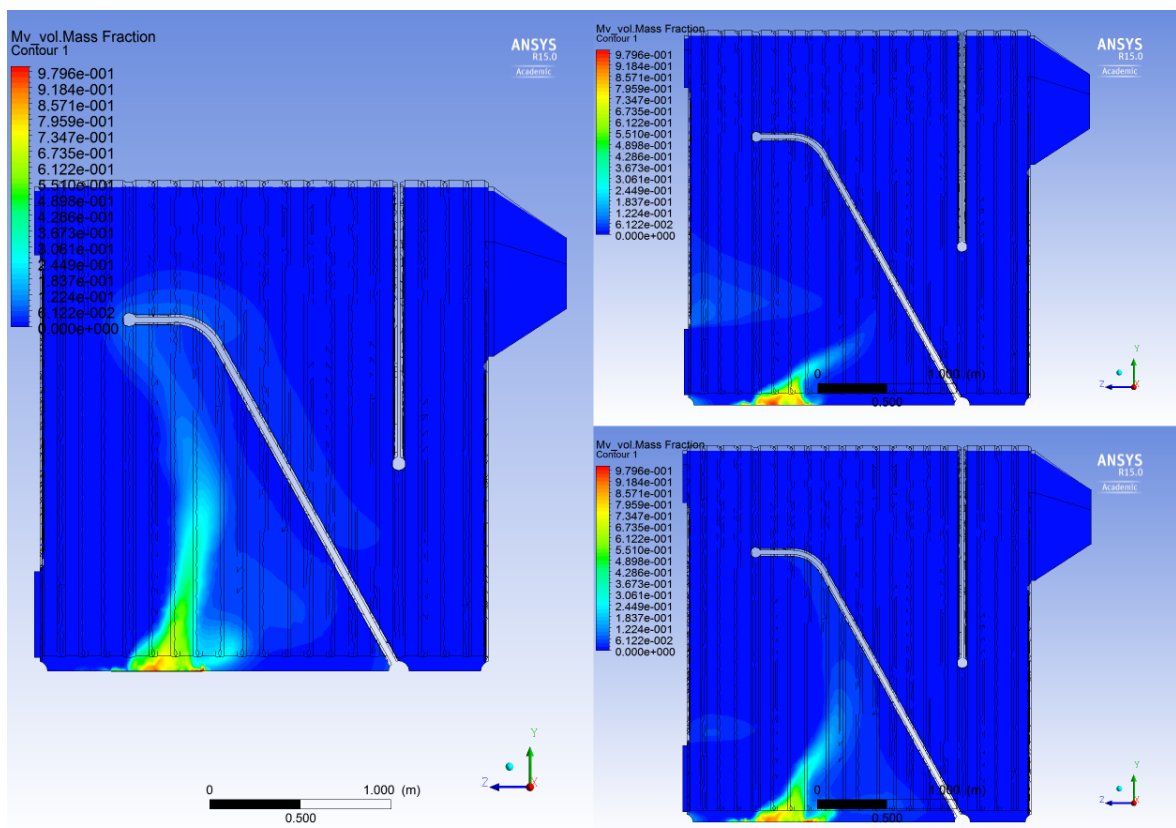


Εικόνα 4.90: Συγκριτικά αποτελέσματα θερμοκρασίας για $\lambda=1$ (αριστερά), $\lambda=1.26$ (κάτω δεξιά) και $\lambda=1.7$ (πάνω δεξιά)

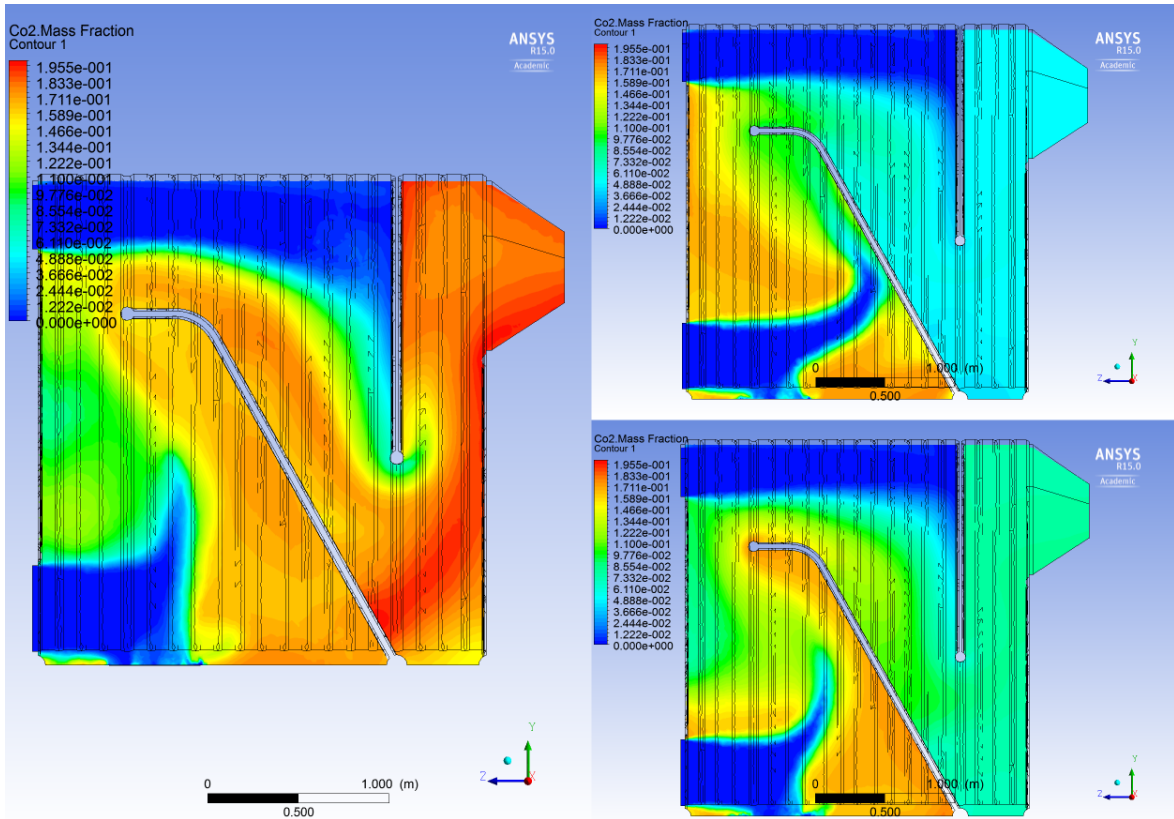


Εικόνα 4.91: Συγκριτικά αποτελέσματα O₂ για $\lambda=1$ (αριστερά), $\lambda=1.26$ (κάτω δεξιά) και $\lambda=1.7$ (πάνω δεξιά)

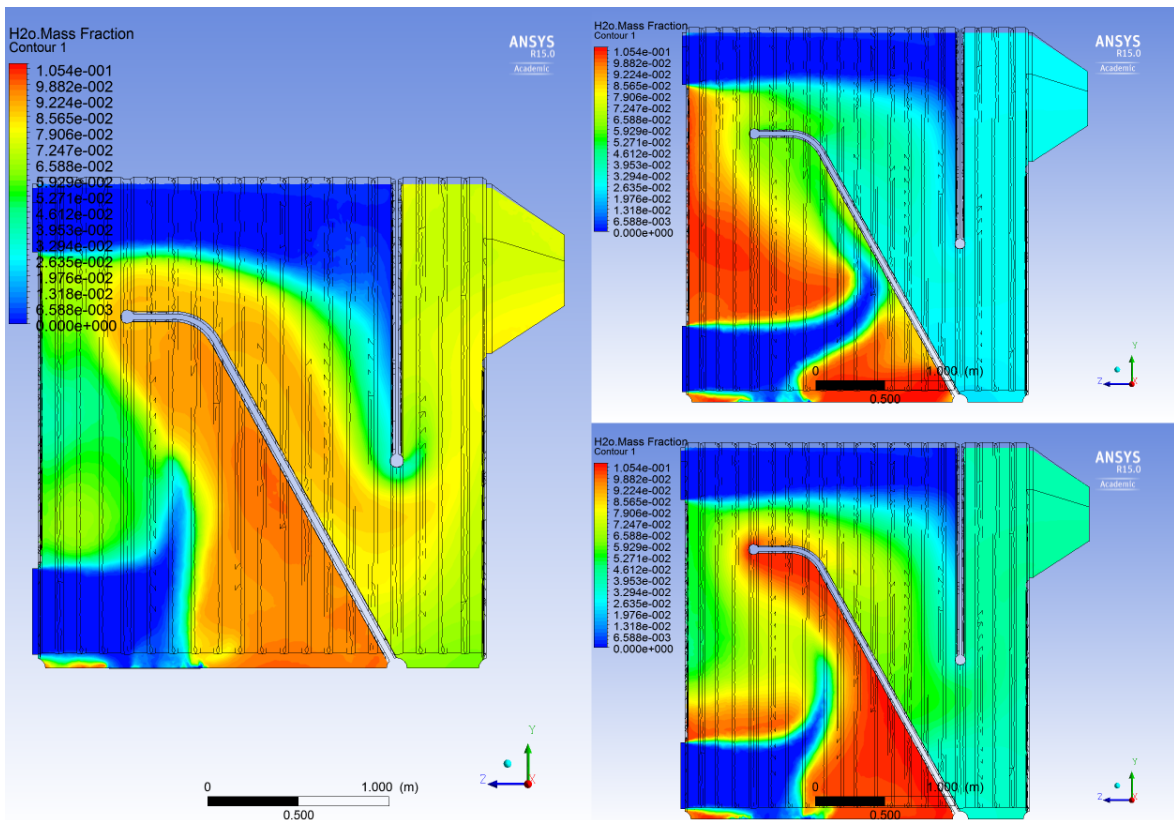
Η θερμοκρασία που το καύσιμο απελευθερώνει τα πτητικά του είναι ίση με 400K. Και στις 3 περιπτώσεις το καύσιμο εισάγεται στους 400K, οπότε μόλις εισέρχεται, τα πτητικά απελευθερώνονται απευθείας. Όπως είναι αναμενόμενο, όσο μεγαλύτερη είναι περίσσεια αέρα, τόσο πιο γρήγορα καίγονται τα πτητικά, αφού υπάρχει περισσότερο οξυγόνο για να γίνει η αντίδραση. Τα συγκριτικά αποτελέσματα για το κλάσμα μάζας των πτητικών, φαίνονται στην **Εικόνα 4.92**. Στις περιοχές που τα πτητικά καίγονται πλήρως παρουσιάζονται οι μέγιστες συγκεντρώσεις CO₂ και H₂O, αντίστοιχα. Στη στοιχειομετρική καύση παρουσιάζονται μεγαλύτερες συγκεντρώσεις CO₂ και H₂O, ενώ τα σημεία που παρουσιάζονται οι μέγιστες συγκεντρώσεις για τις τρεις περιπτώσεις διαφέρουν, γιατί τα πτητικά καίγονται με διαφορετικό τρόπο, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Τα συγκριτικά αποτελέσματα για τη συγκέντρωση του CO₂ και του H₂O φαίνονται στις **Εικόνες 4.93** και **4.94**.



Εικόνα 4.92: Συγκριτικά αποτελέσματα πτητικών για $\lambda=1$ (αριστερά), $\lambda=1.26$ (κάτω δεξιά) και $\lambda=1.7$ (πάνω δεξιά)



Εικόνα 4.93: Συγκριτικά αποτελέσματα CO₂ για λ=1 (αριστερά), λ=1.26 (κάτω δεξιά) και λ=1.7 (πάνω δεξιά)



Εικόνα 4.94: Συγκριτικά αποτελέσματα H₂O για λ=1 (αριστερά), λ=1.26 (κάτω δεξιά) και λ=1.7 (πάνω δεξιά)

5. Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία σχεδιάστηκε εκ του μηδενός ένας λέβητας για παραγωγή ζεστού νερού ή ατμού. Για τη σχεδίαση της χρησιμοποιήθηκαν υπολογιστικά και σχεδιαστικά πακέτα. Ο όγκος της εργασίας ήταν ιδιαίτερα μεγάλος και τα προβλήματα που προέκυψαν ήταν αρκετά.

Το μεγαλύτερο πρόβλημα ήταν η έλλειψη εμπειρίας στη βελτιστοποίηση και στο σχεδιασμό ενός λέβητα, η οποία έγινε αντιληπτή σε όλο το εύρος της εργασίας. Από το σχεδιαστικό μέχρι το υπολογιστικό κομμάτι έγιναν λάθη, τα οποία με την εμπειρία που αποκτήθηκε μπορούν να αποφευχθούν στο μέλλον. Από την άλλη, η εμπειρία στη σχεδίαση ενός λέβητα εκ του μηδενός είναι ανεκτίμητη. Αυτό σε συνδυασμό με τη γνώριμία μας με όλο το εύρος των υπολογιστικών και σχεδιαστικών προγραμμάτων, τα οποία περνώντας ο καιρός γινόταν όλο και πιο εύχρηστα, δίνει σε εμάς μια αξιόπαινη παρακαταθήκη.

Τα συμπεράσματα που βγαίνουν από αυτή την εργασία είναι πολλά. Σχετικά με την επίδραση της θερμοκρασίας του αέρα παρατηρήθηκε ότι στη περίπτωση προθερμασμένου αέρα σημειώθηκαν μεγαλύτερες θερμοκρασίες στο λέβητα. Επίσης, παρουσιάστηκε γρηγορότερη απελευθέρωση των πτητικών, αλλά συνολικά πιο αργή καύση. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα και τη πιο αργή παραγωγή CO₂ και H₂O.

Σχετικά με την επίδραση της θερμοκρασίας εισαγωγής του καυσίμου παρατηρήθηκε ότι στη περίπτωση που το καύσιμο εισέρχεται στους 400K αντί για 300K, σημειώθηκαν μεγαλύτερες θερμοκρασίες. Επίσης, παρουσιάστηκε γρηγορότερη απελευθέρωση πτητικών και γρηγορότερη καύση του καυσίμου. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα τη γρηγορότερη παραγωγή CO₂ και H₂O.

Τέλος, από τη παραμετρική ανάλυση της περίσσειας αέρα, παρατηρήθηκε ότι για στοιχειομετρική καύση σημειώθηκαν οι μεγαλύτερες θερμοκρασίες, ενώ όσο μεγαλύτερη ήταν η περίσσεια αέρα, τόσο μικρότερες θερμοκρασίες σημειώθηκαν. Σχετικά με τη συγκέντρωση του O₂, παρατηρήθηκε ότι στη στοιχειομετρική καύση έχουμε πλήρη καύση του O₂, σε αντίθεση με τις άλλες δύο περιπτώσεις που έχουμε περίσσεια αέρα. Τέλος, σημειώθηκε πιο αργή καύση του καυσίμου και πιο αργή παραγωγή CO₂ και H₂O.

Εν κατακλείδι ως περαιτέρω εργασία προτείνονται τα εξής:

- Μελέτη συστήματος νερού για παραγωγή ατμού
- Μελέτη για την εύρεση κατάλληλου υλικού για το λέβητα
- Μελέτη επίδρασης υγρασίας του καυσίμου
- Μελέτη ρύπων
- Πειραματική μελέτη της διάταξης
- Τεχνοοικονομική μελέτη

Βιβλιογραφία

1. **EN 14961:2010** . *Solid biofuels - Fuel Specification and classes*. January 2010. p. 52. Vols. Part 1 - General requirements CEN (European Committee for Standardization).
2. **FprEN 14961:2010. Solid biofuels - Fuel Specification and classes. Part 4 - Wood chips for non-industrial use**. March 2010. p. 10.
3. **EN 14961: 2009**. *Solid biofuels - fuel specification and classes*. May 2009. Vols. Part 2 - Wood pellets for non industrial-use.
4. **EN 14961:2009**. *Solid biofuels - fuel specification and classes*. May 2009. Vols. Part 3 Wood briquettes for non-industrial use.
5. **EN 14961:2009**. *Solid biofuels - fuel specification and classes*. May 2009. Vols. Part 4 - Wood chips for non-industrial use.
6. **EN 14961: 2009**. *Solid biofuels - fuel specification and classes*. May 2009. Vols. Part 5 - Wood logs for non-industrial use.
7. **EN 14961: 2009**. *Solid biofuels - fuel specification and classes*. May 2009. Vols. Part 6 - Non-woody pellets for non industrial use.
8. **S. Kalligeros, A. Chatziathanasiou, M. Christou, P. Grammelis, F. Zannikos, G. Anastopoulos, Y. Zannikou**. *Standardization of solid biofuels*. Chania : s.n., 2009.
9. **Dalianis C, Panoutsou C**. *Energy Potential of agricultural residues in EU*. 1995.
10. **European Environmental Agency**. *How much bioenergy can Europe produce without harming the environment?* 2006.
11. **Allen J, Browne M, Hunter A, Boyd J, Palmer H**. *Logistics management and costs of biomass fuel supply*. 1996.
12. **Martin Junginger, Jinke van Dam, Simonetta Zarrilli, Fatin Ali Mohamed, Didier Marchal, Andre Faaij**. *Opportunities and barriers for international bioenergy*. May 2010.
13. **UN**. *Commodity trade statistics database*. [Online] [Cited: 8 4, 2011.] <http://comtrade.un.org/db/default.aspx>.
14. **Eurostat**. *Data explorer*. [Online] [Cited: 8 4, 2011.] http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/statistics/search_database.
15. **B., Viking**. *Trading of wood chips in the Baltic Sea region*. 2011.
16. **Bradley D, Kranzl L, Diesenreiter F, Nelson R, Hess J**. *Bio-trade & bioenergy success stories*. 2011.
17. **Sikkema R, Steiner M, Junginger M, Hiegl W, Hansen M, Faaij A**. *The European wood pellet markets*.
18. **P., Grammelis**. *Solid Biofuels for Energy: A Lower Greenhouse Gas Alternative*. s.l. : Springer Edition, 2011.
19. **Robinson AL, Junker H, Buckley SG, Sclipa G, Baxter LL**. *Interactions between coal and biomass when cofiring*. August 1998.

20. **Damstedt B, Pederson JM, Hansen D, Knighton T, Jones J, Christensen C, Baxter L.** *Biomass cofiring impacts on flame structure and emissions.* 2007.
21. **Lu H, Robert W, Peirce G, Ripa B, Baxter LL.** *Comprehensive study of biomass particle combustion.* 2008. pp. 2826-2839.
22. **Lu H, Ip L-T, Mackrory A, Werrett L, Scott J, Tree D, Baxter L.** *Particle-surface temperature measurements with multicolor band pyrometry.* 2009. pp. 243-255.
23. **Ip LT, Baxter LL, Mackrory AJ, Tree DR.** *Surface temperature and time-dependent measurements of black liquor droplet combustion.* 2008. pp. 1926–1931.
24. **Wang S, Baxter L.** *Fly ash and concrete.* 2006. pp. 48-49.
25. **Wang S, Baxter L, Fonseca F.** *Biomass fly ash in concrete: SEM, EDX and ESEM analysis.* 2008. pp. 372–379.
26. **Wang SZ, Baxter L.** *Comprehensive study of biomass fly ash in concrete: Strength, microscopy, kinetics and durability.* 2007. pp. 1165–1170.
27. **Van Loo S, Koppejan J.** *Handbook of biomass combustion and co-firing.* London : s.n., 2008.
28. **H K Versteeg, W Malalasekera.** *An introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method.* Loughborough : s.n., March 1995. ISBN 0-582-21884-5.
29. **T.-H. Shih, W. W. Liou, A. Shabbir, Z. Yang, and J. Zhu.** *A New k-ε Eddy-Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows - Model Development and Validation.* 1995.
30. **Hinze, J. O.** *Turbulence.* New York : McGraw-Hill Publishing Co, 1975.
31. **15.0, Ansys Fluent.** *Theory Guide.*
32. **Reynolds, W. C.** *Fundamentals of turbulence for turbulence modeling and simulation.* 1987.
33. **B. F. Magnussen, B. H. Hjertager.** *On mathematical models of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion.* 1976.
34. **Smith, I. W.** *The Combustion Rates of Coal Chars: A Review.* 1982. pp. 1045–1065.
35. **A. D. Gosman, E. Ioannides.** *Aspects of computer simulation of liquid-fuelled combustors.* 1983. pp. 482–490.
36. **Lefebvre, A. H.** *Atomization and Sprays.* s.l. : Hemisphere Publishing Corporation, 1989.
37. **P.-K. Wu, L.-K. Tseng, and G. M. Faeth.** *Primary Breakup in Gas/Liquid Mixing Layers for Turbulent Liquids.* 1995. pp. 295–317.
38. **Yunus A. Cengel, Michael A. Boles.** *Θερμοδυναμική για Μηχανικούς.* [επιμ.] Ν. Σαχινίδου. [μεταφρ.] Παναγιώτης Ε. Τσιακάρας. 3η Έκδοση. s.l. : Εκδόσεις Τζιόλα, 1998. Τόμ. Α. ISBN 960-7219-65-1.
39. **Yunus A. Cengel, Michael A. Boles.** *Θερμοδυναμική για Μηχανικούς.* [επιμ.] Ν. Σαχινίδου. [μεταφρ.] Παναγιώτης Ε. Τσιακάρας. 3η Έκδοση. s.l. : Εκδόσεις Τζιόλα, 1998. Τόμ. Β. ISBN 960-7219-74-0.

40. **Cengel, Yunus A.** *Μεταφορά Θερμότητας: Μια Πρακτική Προσέγγιση.* [μεταφρ.] Παναγιώτης Ε. Τσικάρας. s.l. : Εκδόσεις Τζιόλα, 2005. ISBN 690-418-063-0.
41. **Παπαγεργίου, Ν.** *Ατμοπαραγωγή Ι: Γενικές Αρχές.* s.l. : Εκδόσεις Συμεών, 1991. ISBN 960-7888-61-8.
42. **Παπαγεωργίου, Ν.** *Ατμοπαραγωγή ΙΙ: Εμβάθυνση.* s.l. : Εκδόσεις Συμεών, 1991. ISBN 690-7888-35-9.
43. **Γούλας, Απόστολος Κ.** *Μηχανική Ρευστών.* s.l. : Εκδόσεις Γιαχούδη.
44. **Τσαγγαρής, Σωκράτης.** *Μηχανική των Ρευστών.* Αθήνα : Εκδόσεις Συμεών, 2005. ISBN 960-7888-55-3.
45. **Turns, Stephen R.** *An Introduction to Combustion: Concepts and Applications.* 3rd Edition. s.l. : Mc Graw - Hill International Edition, 2012. ISBN 978-007-108687-5.