



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ
ΣΠΟΥΔΩΝ**

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ 2016-2018

**Υπολογιστική Διερεύνηση Πολυσυστατικής και Αντιδρώσας
Ροής σε Καυστήρα Συστροφής**

Μεταπτυχιακή Εργασία

Διακίδης Γιάννης

Επιβλέπουσα: Φούντη Μαρία, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Τριμελής Επιτροπή:

Μπούρης Δημήτριος, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ριζιώτης Βασίλειος, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Φούντη Μαρία, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την καθηγήτρια Μαρία Φούντη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε δίνοντας μου την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα ιδιαίτερος ενδιαφέρον θέμα και τη δυνατότητα να βασιστώ στην τεχνογνωσία του Εργαστηρίου Ετερογενών Μιγμάτων και Καύσης (ΕΜΣΚ) κάνοντας χρήση πειραματικών δεδομένων προγενέστερης πειραματικής δουλειάς.

Επίσης, ευχαριστώ θερμότατα τα μέλη ΕΔΙΠ του εργαστηρίου, Δημήτρη Κατσουρίνη και Διονύση Κολαΐτη για την στήριξη, τον κόπο και την διαρκή τους καθοδήγηση χωρίς την οποία δεν θα είχε ολοκληρωθεί η παρούσα εργασία.

Περιεχόμενα	
Περίληψη.....	4
Abstract	5
1. Εισαγωγή.....	6
1.1 Βιομηχανικοί Καυστήρες	6
1.2 Σκοπός της Εργασίας.....	9
2. Καυστήρες Συστροφής.....	10
2.1 Γενικά Χαρακτηριστικά	10
2.2 Εφαρμογές	11
2.3 Αριθμός Συστροφής (Swirl Number)	14
3. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	16
3.1 Πειραματική Διερεύνηση Καυστήρων Συστροφής	16
3.2 Υπολογιστικές Προσομοιώσεις Καυστήρων Συστροφής.....	21
4. Πειραματικές Μετρήσεις στον Καυστήρα Συστροφής του Εργαστηρίου ΕΜΣΚ	23
4.1 Γενικά Χαρακτηριστικά	23
4.2 Μετρητικές Διατάξεις.....	25
4.3 Αποτελέσματα Μετρήσεων	26
5. Κώδικας Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής ANSYS CFX.....	30
5.1 Μοντελοποίηση Τύρβης.....	31
5.2 Μοντελοποίηση Θερμικής Ακτινοβολίας.....	32
5.3 Μοντελοποίηση Καύσης	33
6. Πιστοποίηση Υπολογιστικών Αποτελεσμάτων	35
6.1 Μονοστατική μη-αντιδρώσα ροή.....	35
6.2 Πολυσυστατική μη-αντιδρώσα ροή.....	48
6.3 Πολυσυστατική αντιδρώσα ροή	56
6.4 Γενικά Χαρακτηριστικά Αναπτυσσόμενου Πεδίου Ροής.....	65
7. Προσομοίωση Καυστήρα Συστροφής	70
7.1 Υπολογιστικό Χωρίο	70
7.2 Υπολογιστικά Αποτελέσματα.....	70
8. Γενικά Συμπεράσματα-Προτάσεις Μελλοντικής Διερεύνησης	74
Βιβλιογραφία.....	76

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως θέμα την υπολογιστική μελέτη του ροϊκού και θερμικού πεδίου που προκύπτει κατά την ψυχρή και θερμή λειτουργία εργαστηριακού καυστήρα συστροφής. Η μοντελοποίηση πραγματοποιήθηκε μέσω του υπολογιστικού πακέτου Ansys CFX Version 17.0 και προέκυψε ως αποτέλεσμα μιας σειράς παραμετρικών διερευνήσεων. Αρχικά, επιχειρήθηκε να καταλήξουμε στο πλέον κατάλληλο μοντέλο τύρβης για την υπόψη ροή. Γι' αυτό τον σκοπό ξεκινήσαμε από την προσομοίωση της ψυχρής λειτουργίας του καυστήρα και ύστερα από την σύγκριση με πειραματικές τιμές για την ακτινική κατανομή της ολικής ταχύτητας ροής αέρα και αέρα-μεθανίου καταλήξαμε στο πλέον επαρκές (**RNG k-ε**).

Έχοντας μοντελοποιήσει τη τύρβη συνεχίσαμε με την μελέτη της αντιδρώσας ροής μεθανίου αέρα και την παραμετρική διερεύνηση με στόχο την εύρεση του μηχανισμού καύσης (**διβηματικός**), του μοντέλου καύσης (**EDM**) και του μοντέλου ακτινοβολίας (**P1**) τα οποία ταιριάζουν περισσότερο στην προσομοίωση της υπόψη ροής για τις δεδομένες συνθήκες λειτουργίας. Απώτερος σκοπός των πειραματικών διερευνήσεων ήταν η δόμηση ενός αξιόπιστου υπολογιστικού μοντέλου ώστε να μπορέσουμε αφενός να κατανοήσουμε σε μεγαλύτερο βάθος τα ροϊκά και θερμικά χαρακτηριστικά της τυρβώδους καύσης και αφετέρου να αποκτήσουμε ένα αξιόπιστο εργαλείο για τη διεξαγωγή σχετικών υπολογιστικών «πειραμάτων».

Σε αυτό το πλαίσιο, αφού αξιολογήσαμε ποσοτικά μέσω της εύρεσης των συνολικών μέσων σφαλμάτων την ικανότητα πρόβλεψης του μοντέλου μας, προχωρήσαμε στην περιγραφή των κυριότερων χαρακτηριστικών του ροϊκού πεδίου των φλογών μεθανίου μαζί με την μορφή του θερμικού πεδίου συμπεριλαμβανομένων και των αερίων εκπομπών CO και CO₂. Η μειωμένη δυνατότητα του μοντέλου να προσεγγίσει την αντιδρώσα ροή μας στέρησε την δυνατότητα να προβούμε σε μία αναλυτική ποσοτικά περιγραφή των παρατηρούμενων φαινομένων. Έχοντας όμως κατά νου πως ποιοτικά το μοντέλο είναι επαρκές αξιοποιήσαμε τις δυνατότητες του για να παρουσιάσουμε μια κατά το δυνατόν σφαιρική άποψη της αλληλεπίδρασης ροϊκού και θερμικού πεδίου μέσω σχετικών απεικονίσεων. Επομένως, καταλήξαμε σε χρήσιμα συμπεράσματα για την κατανομή του καυσίμου στη διατομή του καυστήρα, τις περιοχές αντίδρασης και σταθεροποίησης της φλόγας, αυτές της μέγιστης θερμοκρασίας και σε πολλά άλλα ενδιαφέροντα πλην όμως βασικά χαρακτηριστικά τέτοιου είδους ροών.

Το επόμενο βήμα πέραν από την πιστοποίηση του υπολογιστικού μοντέλου με βάση τα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα (ροές αέρα και μεθανίου-αέρα) ήταν η διενέργεια υπολογιστικών «πειραμάτων» ώστε να αξιολογήσουμε την επίδραση παραμέτρων όπως η ισχύς λειτουργίας και ο αριθμός συστροφής. Έχοντας γνώση της σχετικής ακρίβειας του υπολογιστικού μοντέλου για την μη αντιδρώσα ροή (μέσο σφάλμα γύρω στο 30%) και των προβλημάτων σύγκλισης που προέκυψαν κατά την επίλυση της αντιδρώσας περιοριστήκαμε στην παρουσίαση του ροϊκού πεδίου του διφασικού μίγματος μεθανίου-αέρα για δύο περιπτώσεις. Στην πρώτη διπλασιάσαμε την ισχύ λειτουργίας του καυστήρα (από 5 σε 10 kW) και στη δεύτερη διπλασιάσαμε τον λόγο αέρα-καυσίμου ($\lambda = 2$) επιβάλλοντας εμμέσως την αύξηση της συστροφής. Το αποτέλεσμα ήταν η περιγραφή του στροβίλου και της ζώνης ανακυκλοφορίας που επάγεται από αυτόν καθώς και παρατηρήσεις σχετικά με την κατανομή του καυσίμου.

Abstract

This thesis aims to simulate computationally the fluid and thermal characteristics of the developed field during the reactive and non-reactive operation of a laboratory swirl burner. The modeling was conducted with the use of finite volume method through the commercial package ANSYS CFX Version 17 and the final model was set up as a result of a series of parametric studies. First, it was attempted to find the most appropriate turbulence model for this type of flow. To this aim, we simulated the cold flow of air and stoichiometric mixture of methane-air, validated the numerical results with the use of experimental data of radial distribution of total velocity and opted for the most suitable model (**RNG k- ϵ**).

Having modeled turbulence based on cold-flow data, we proceeded studying the reactive flow of stoichiometric mixture of methane-air, so as to determine: the combustion mechanism (**two-step**), the combustion model (**EDM**) and radiation model (**P1**) which suit best to the current operation conditions of the burner. The final goal of these parametric studies was to conclude to a reliable computational model of methane flames so as to get a deeper insight into the characteristics of turbulent combustion and to be able to conduct numerical “experiments”.

The validation was implemented computing the total mean percentage error of axial distribution of temperature, its radial distribution, and the composition fields (O_2 , CO , CO_2 concentrations). The results indicated that our model cannot predict accurately in quantitative terms the measured data but follows quite well their trends. This observation motivated us to take advantage of the model so as to shed more light on the interplay between the thermal and fluid field of methane flames. Therefore, we came to conclusions about fuel distribution, flame stabilization, reaction zone and several other fundamental characteristics of these flows.

The next step after model’s validation was the conduction of numerical “experiments” in terms of burner’s thermal power and air to fuel ratio (λ). Based on the accuracy of our model along with its better convergence on the cold flow simulation (total mean error around 30%) compared to reactive, we considered two cold-flow cases of methane-air mixture. At the first one, we doubled the thermal power of the burner (from 5 kW to 10 kW) and at the second one we doubled the air to fuel ratio (from 1 to 2) imposing in this way implicitly higher swirl. The outcome was the detailed description of the vortex, of the recirculation zone and remarks about fuel distribution at the surface of burner’s nozzle as well.

1. Εισαγωγή

1.1 Βιομηχανικοί Καυστήρες

Εκτός από τους λέβητες τύπου ρευστοποιημένης κλίνης ανακυκλοφορίας (circulating fluidized bed), όλοι οι υπόλοιποι χρησιμοποιούν καυστήρες ως κύρια πηγή ενέργειας. Οι καυστήρες είναι κύρια στοιχεία σε συστήματα όπως οι λέβητες και οι φούρνοι (furnaces) επηρεάζοντας τόσο τις ροϊκές συνθήκες όσο και αυτές της καύσης με βάση τη διάταξη και τα ιδιαίτερα κατασκευαστικά τους χαρακτηριστικά. Έτσι, όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό η απόδοση τους καθορίζει την οικονομικότητα και την αξιοπιστία των ανωτέρω συστημάτων.

Οι καυστήρες διακρίνονται σε πολλούς τύπους με βάση όμως τις αρχές λειτουργίας τους μπορούν γενικά να ομαδοποιηθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- Καυστήρες τύπου συστροφής.
- Καυστήρες ευθείας ή παράλληλης ροής.

Οι καυστήρες συστροφής χρησιμοποιούν ένα σύνολο από πτερύγια κατεύθυνσης (guiding vanes) μέσω των οποίων προσδίδεται στον αέρα η στροβιλώδης κίνηση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας ζώνης ανακυκλοφορίας, η οποία εκτός των άλλων επιταχύνει τη διαδικασία ανάμιξης οξειδωτικού και καυσίμου. Αντίθετα, στους καυστήρες παράλληλης ροής όπως προδίδει και η ονομασία τους, αέρας και καύσιμο ρέουν το ένα παράλληλα προς το άλλο. Ο τύπος αυτός βρίσκεται εφαρμογή σε λέβητες γωνιακής ή εφαπτομενικής καύσης (corner or tangential fired boilers) και γι αυτό είναι γνωστοί και ως εφαπτομενικοί καυστήρες (tangential burners).

Οι καυστήρες συστροφής, των οποία τη λειτουργία θα προσπαθήσουμε να διερευνήσουμε στην παρούσα εργασία, είναι πολύ διαφορετικοί από τους ευθείς σε πολλούς τομείς: σχεδιασμού-κατασκευής, αεροδυναμικών μεγεθών και μορφής της φλόγας. Επομένως, σε αυτή την ενότητα θα επιχειρήσουμε μια συνοπτική εισαγωγή σχετική με τα γενικά μορφολογικά χαρακτηριστικά των δύο αυτών μεγάλων κατηγοριών, θα καταδείξουμε τις μεταξύ τους διαφορές και θα διεξέλθουμε εν συντομία τις επιμέρους κατηγοριοποιήσεις στις οποίες διακρίνονται.

Γενικά, ο σχεδιασμός των καυστήρων αποσκοπεί στην επίτευξη καλών χαρακτηριστικών λειτουργίας όπως:

1. Κατάλληλα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά (ροϊκό πεδίο) στην έξοδο του καυστήρα ώστε να επιτευχθεί καλή έναυση μαζί με ευσταθή και αποδοτική καύση.
2. Καλός έλεγχος του φορτίου λειτουργίας (good load control).
3. Ελεγχόμενη εκπομπή NOx σύμφωνα με τους περιβαλλοντικούς κανονισμούς.
4. Αξιοπίστη και ασφαλής λειτουργία.
5. Συμβατότητα με το σύστημα κονιορτοποίησης (pulverizing system) και τον φούρνο στη περίπτωση των συστημάτων έναυσης με πηγή καυσίμου τον λιθάνθρακα.

1.1.1 Καυστήρες συστροφής

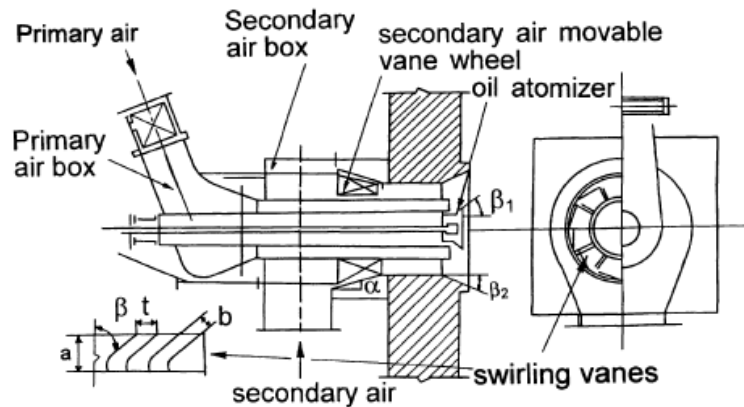
Αυτοί οι καυστήρες διακρίνονται στους εξής τύπους: σπειροειδείς καυστήρες (volute burners), αξονικής προσαγωγής αέρα (axial vane burners) και εφαπτομενικών πτερυγίων (tangential vane burners).

Axial vane burners	Tangential vane burners	Volute burners
Double channel outside-mixing axial vane burners	Direct or parallel flow primary air with adjustable vane	Axial vane-volute burners
Tangential-axial guide vane burners	Swirling primary air and movable stabilizer	Volute and multi-volute burners
Movable axial vane burners		Volute-central cone burners
Tangential guide vane burners		Volute burners

Εικόνα 1. Γενική κατηγοριοποίηση των καυστήρων συστροφής [11].

Πτερυγίων αξονικής κατεύθυνσης

Σε αυτή την περίπτωση σχεδιασμού (Εικόνα 2) η δευτερεύουσα παροχή αέρα αποκτά τον απαραίτητο στροβιλισμό μέσω πτερυγίων αξονικής κυκλοφορίας. Η κύρια παροχή, από την άλλη πλευρά, μπορεί να είναι είτε παράλληλη προς τον άξονα του καυστήρα είτε να έχει και αυτή συστροφή.

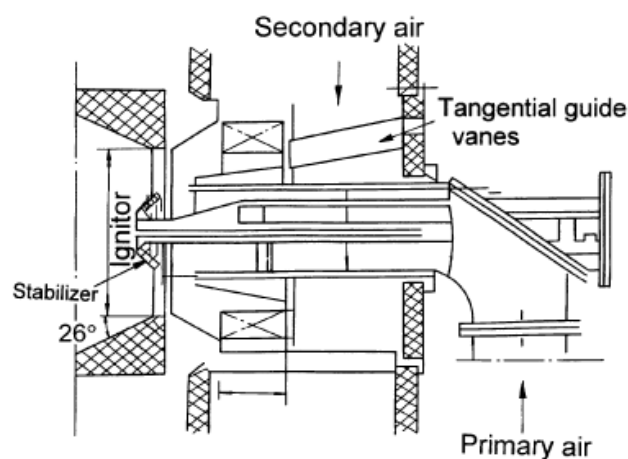


Εικόνα 2. Καυστήρας συστροφής με πτερύγια αξονικής κατεύθυνσης και κύρια παροχή αέρα χωρίς συστροφή [11].

Αυτού του τύπου οι καυστήρες βρίσκουν εφαρμογή κατά κύριο λόγο στη καύση λιγνίτη και ασφαλτούχου λιθάνθρακα (bituminous coal) με πηκτικό περιεχόμενο άνω του 25% και θερμογόνου δύναμης υψηλότερης των 16.8 MJ/kg. Από πλευράς σχεδιασμού σημαντικό ρόλο στην απόδοση του καυστήρα διαδραματίζει η γωνία β των πτερυγίων μέσω των οποίων κατευθύνεται η δευτερεύουσα παροχή. Ειδικότερα, μεγάλη γωνία συνεπάγεται και ισχυρή αντίσταση από τον αέρα. Εκτός από την γωνία μετακινώντας την κεφαλή με τα πτερύγια (axial vane wheel) μπορούμε να ρυθμίσουμε τον λόγο ευθείας και στροβιλώδους ροής και κατά συνέπεια να επηρεάσουμε ένα σημαντικό μέγεθος της δευτερεύουσας παροχής όπως είναι η ένταση στροβιλισμού (swirl intensity).

Πτερυγίων εφαπτομενικής κατεύθυνσης

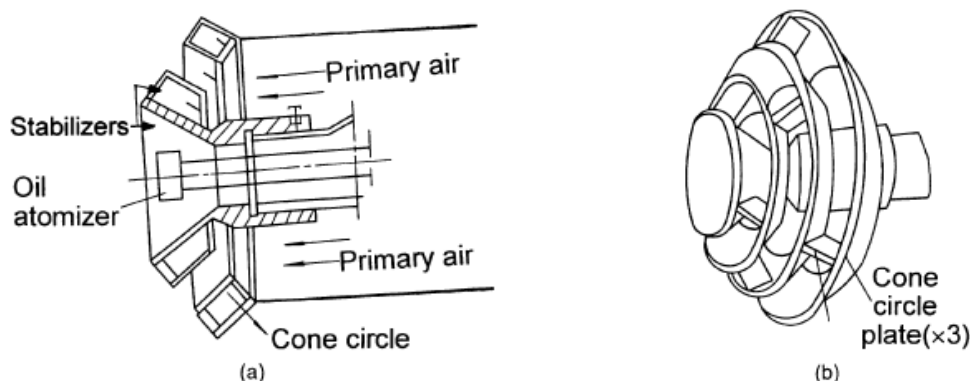
Στους καυστήρες συστροφής με πτερύγια εφαπτομενικής κατεύθυνσης (Εικόνα 3) η δευτερεύουσα παροχή εισέρχεται μέσω μιας σειράς προσαρμόσιμων πτερυγίων. Η ένταση στροβιλισμού εκτός από κατάλληλη ρύθμιση των παροχών μπορεί να τροποποιηθεί όπως και στην προηγούμενη κατηγορία μέσω της γωνίας των πτερυγίων, τα οποία συνήθως ποικίλλουν μεταξύ 8 και 16.



Εικόνα 3. Καυστήρας συστροφής με πτερύγια εφαπτομενικής κατεύθυνσης χωρίς συστροφή της κύριας παροχής αέρα [11].

Ανάλογα με την ύπαρξη στροβιλισμού της κύριας ροής αέρα, αυτού του τύπου οι καυστήρες συστροφής υποδιαιρούνται σε δύο επιμέρους κατηγορίες:

Σε καυστήρες όπου η κύρια παροχή του αέρα δεν υπόκειται σε συστροφή, διέρχεται μέσω του κεντρικού αγωγού και η αντίσταση της ροής είναι μικρή (Εικόνα 3) και σε μοντέλα στα οποία προβλέπεται συστροφή και στη κύρια παροχή (Εικόνα 4). Τα τελευταία ήταν από τα πρώτα που αναπτυχθήκαν για καύση λιθάνθρακα και χρησιμοποιήθηκαν ευρέως στη βιομηχανία. Τυπικά η ισχύς λειτουργίας τους ποικίλλει μεταξύ 15 και 80 MW. Ο κεντρικός αγωγός, μέσω του οποίου μεταφέρεται η κύρια παροχή αέρα και κονιορτοποιημένου λιθάνθρακα καταλήγει στα εφαπτομενικά πτερύγια και τον σταθεροποιητή (stabilizer) όπως φαίνεται παρακάτω.

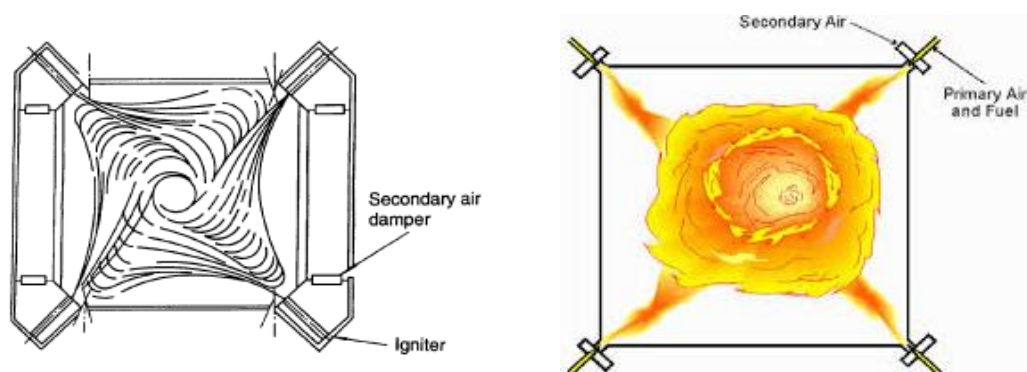


Εικόνα 4. (a) Το κεντρικό ακροφύσιο ενός καυστήρα με αγωγούς εφαπτομενικής κατεύθυνσης και (b) ο κωνικός σταθεροποιητής φλόγας [11].

Εδώ, η έκταση της ζώνης ανακυκλοφορίας η οποία δημιουργείται πίσω από τον σταθεροποιητή μπορεί να ρυθμιστεί με την μπρος-πίσω μετακίνηση του. Τέλος, η δευτερεύουσα παροχή αέρα οδηγείται μέσω των εφαπτομενικών προς τον άξονα του καυστήρα πτερυγίων στο δακτύλιο γύρω από το κεντρικό ακροφύσιο. Η ορμή του αέρα ο οποίος οδηγείται μέσω αυτής της διαδρομής μπορεί να ρυθμιστεί όπως και σε όλους τους προηγούμενους τύπους καυστήρων συστροφής ανάλογα με την γωνία στην οποία είναι τοποθετημένα τα πτερύγια.

1.1.2 Καυστήρες ευθείας ή παράλληλης ροής

Στη περίπτωση χρησιμοποίησης τους σε φούρνους λόγω της διάταξης τους αυτού του τύπου οι καυστήρες αναφέρονται συνηθέστερα ως εφαπτομενικού ή γωνιακού τύπου (tangentially fired burners/ corner burners). Συγκεκριμένα, καύσιμο και αέρας εκχέονται εφαπτομενικά σε ένα νοητό κύκλο μεταξύ των τεσσάρων γωνιών του φούρνου. Αυτού του τύπου τα συστήματα καύσης χρησιμοποιούνται συνηθέστερα σε λέβητες οι οποίοι έχουν ως κύρια πηγή καυσίμου λιθάνθρακα ενώ συμπληρωματικά για τις ανάγκες εκκίνησης ή σε χαμηλά φορτία λειτουργίας τίθενται σε λειτουργία καυστήρες πετρελαίου. Επίσης, επιπλέον ακροφύσια είναι τοποθετημένα στις γωνίες και εξασφαλίζουν την αναγκαία συμπληρωματική παροχή αέρα η οποία απαιτείται για την καύση (Εικόνα 5).

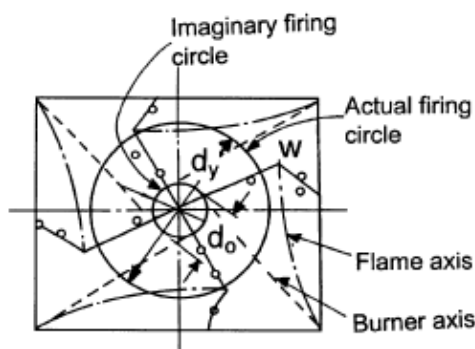


Εικόνα 5. Κάτοψη της διάταξης ενός καυστήρα εφαπτομενικού ή γωνιακού τύπου και εικονική αποτύπωση της δημιουργούμενης φλόγας [11].

Με αυτού του τύπου τους καυστήρες δεν θα ασχοληθούμε στην παρούσα εργασία παρ' όλα αυτά όμως για λόγους πληρότητας της παρουσίασης των δύο μεγάλων κατηγοριών καυστήρων θα αναφέρουμε εν συντομία τα κύρια χαρακτηριστικά λειτουργίας τους.

Αρχή λειτουργίας

Όπως ειπώθηκε καυστήρες όπως της Εικόνας 5 χρησιμοποιούνται ευρέως σε μεγάλο και μέτριου μεγέθους λέβητες οι οποίοι καίνε λιθάνθρακα ή πετρέλαιο. Η κύρια παροχή αέρα μεταφέρει το κονιορτοποιημένο κάρβουνο. Παράλληλα, στο δυσστατικό αυτό μίγμα εισέρχονται θερμά αέρια από την περιοχή της καύσης και απορροφάται ακτινοβολία από την φλόγα στο θάλαμο με αποτέλεσμα η θερμοκρασία του μίγματος να αυξάνει και να επιτυγχάνεται ακολούθως η ανάφλεξη του κονιορτοποιημένου λιθάνθρακα. Η δευτερεύουσα παροχή εισέρχεται επίσης από τα επιπλέον ακροφύσια. Το ροϊκό πεδίο το οποίο αναπτύσσεται εξαιτίας της εφαπτομενικής ροής προς έναν νοητό κύκλο με κέντρο το κέντρο του φούρνου φαίνεται πιο παραστατικά στην Εικόνα 6.



Εικόνα 6. Η αεροδυναμική ενός καυστήρα εφαπτομενικού ή γωνιακού τύπου. Στο σχήμα έχουν αποτυπωθεί οι: d_0 (imaginary circle), d_y (real circle) και οι ροϊκές γραμμές της μέγιστης εφαπτομενικής ταχύτητας [11].

Στην παραπάνω εικόνα αποτυπώνεται η ιδανική διαδρομή του μίγματος αέρα καυσίμου και η πορεία του μέσα στον φούρνο (ροϊκές γραμμές). Τυπικά ο άξονας του ρεύματος καυσίμου-αέρα σχεδιάζεται ώστε να εφάπτεται στον φανταστικό κύκλο με διάμετρο d_0 . Έχοντας όμως υπόψη πως στις γωνίες του φούρνου είναι τοποθετημένα περισσότερα του ενός ακροφύσια η μεταξύ τους αλληλεπίδραση οδηγεί στη δημιουργία ενός στροβίλου με διάμετρο d_y μεγαλύτερη της ιδεατής d_0 . Συγκεκριμένα η d_y ορίζεται από τον περιγεγραμμένο κύκλο προς τις ροϊκές γραμμές οι οποίες αναπαριστούν τις μέγιστες εφαπτομενικές ταχύτητες του μίγματος στον φούρνο. Ολοκληρώνοντας τη σύντομη αυτή αναφορά γίνεται αντιληπτό πως τα παραπάνω δεν αποτελούν παρά μια απλοποιημένη προσέγγιση του προκύπτοντος ροϊκού πεδίου αφού στην πράξη οι ασυμμετρίες τόσο την τοποθέτηση των περυγίων όσο και στην γωνία εισόδου του μίγματος καυσίμου-αέρα στον φούρνο δημιουργούν έναν εφαπτομενικό κύκλο του οποίου το σχήμα τελικά προσομοιάζει περισσότερο αυτό μίας έλλειψης.

1.2 Σκοπός της Εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η προσομοίωση του ροϊκού και θερμικού πεδίου καυστήρα συστροφής σε ψυχρή και θερμή λειτουργία. Η μοντελοποίηση πραγματοποιήθηκε μέσω του υπολογιστικού πακέτου Ansys CFX Version 17.0 και σε πρώτη φάση επιχειρήθηκε να εξακριβώσουμε: το αραιότερο και συνάμα ικανοποιητικό πλέγμα για τις ανάγκες των μελλοντικών προσομοιώσεων μαζί με την εκλογή του πλέον ενδεδειγμένου μοντέλου τύρβης για την υπό εξέταση ροή-αριθμό συστροφής. Με βάση αυτές τις διερευνήσεις που αφορούν την ψυχρή λειτουργία του καυστήρα, σε δεύτερη φάση, συμπληρώσαμε το υπολογιστικό μας μοντέλο καταλήγοντας στον κατάλληλο μηχανισμό καύσης, στο μοντέλο καύσης και ακτινοβολίας ώστε να προσεγγίσουμε το φαινόμενο της τυρβώδους καύσης όπως αυτή προκύπτει σε φλόγες μεθανίου με συστροφή.

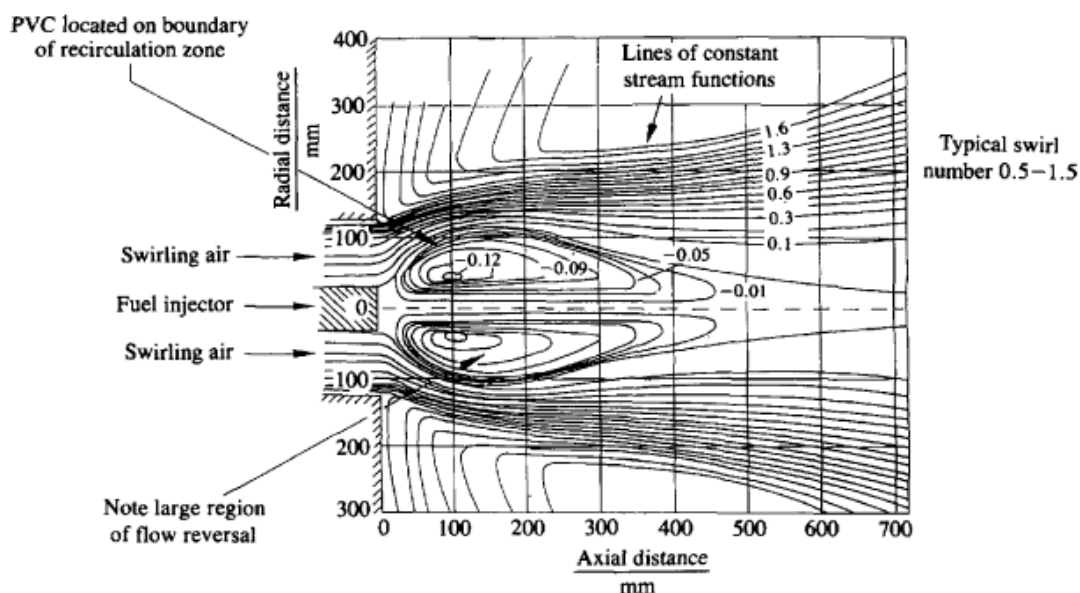
Στόχος μας όμως, εκτός από τη πιστοποίηση των υπολογιστικών μας επιλογών ήταν η αξιοποίηση του υπολογιστικού μοντέλου στο οποίο καταλήξαμε ώστε να διερευνήσουμε την λειτουργία του καυστήρα μεταβάλλοντας παραμέτρους όπως: η ισχύς λειτουργίας και η στοιχειομετρική αναλογία του προς καύση μίγματος. Έτσι, με τη βοήθεια κατάλληλα επιλεγμένων υπολογιστικών πειραμάτων-δοκιμών επιδιώξαμε να διευκρινίσουμε έστω και σε ποιοτικό επίπεδο την επίπτωση των προηγούμενων παραμέτρων στη διαμόρφωση του ροϊκού πεδίου.

2. Καυστήρες Συστροφής

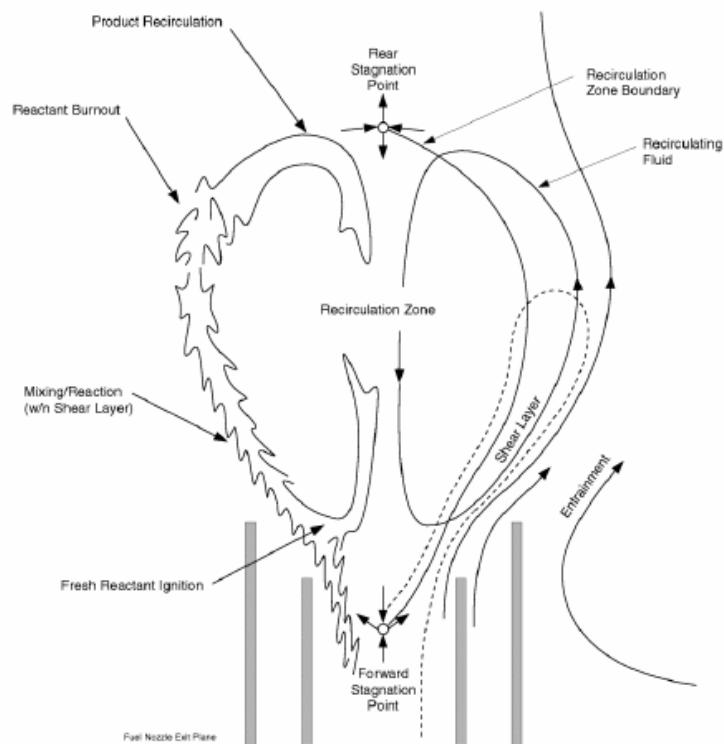
2.1 Γενικά Χαρακτηριστικά

Από τη στιγμή που το καύσιμο εκχέεται στη ροή του αέρα υφίσταται ο κίνδυνος εάν η ταχύτητα του δεν είναι μεγάλη να οδηγήσει στη σβέση της φλόγας. Ένας πιθανός μηχανισμός για την σταθεροποίηση της με πολλά άλλα παράπλευρα πλεονεκτήματα όπως θα δούμε ακροθιγώς παρακάτω είναι αυτός της συστροφής.

Οι φλόγες συστροφής λοιπόν, οι οποίες προκύπτουν είτε με την πρόσδωση εφαπτομενικής ταχύτητας σε κάποιο από τα ρευστά του προς ανάφλεξη μίγματος είτε μέσω κατάλληλης διαμόρφωσης της κατάληξης συνήθως του κεντρικού αγωγού στο ακροφύσιο του καυστήρα (bluff body flame-holder) καταλήγουν στη δημιουργία μιας περιοχής χαμηλής πίεσης στον άξονα της ροής. Αυτή ακριβώς η κατανομή πίεσης κατά την ακτινική διεύθυνση παράγει μία ζώνη ανακυκλοφορίας γνωστή και ως Central Recirculation Zone (CRZ). Η περιοχή αυτή διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη εξέλιξη της καύσης γιατί αφενός δρα ως μια αποθήκη θερμότητας, αφού κυκλικά μεταφέρονται τα θερμά προϊόντα της καύσης από τις περιοχές κατάντη της ροής στην περιοχή της φλόγας προθερμαίνοντας το «φρέσκο» μίγμα και αφετέρου παρέχει τη λεγόμενη αεροδυναμική εμπλοκή (aerodynamic blockage) μειώνοντας τοπικά την ταχύτητα της ροής. Η επιβράδυνση της ροής πρακτικά σημαίνει πως υπάρχουν σημεία όπου η ταχύτητα της ροής ταυτίζεται με την ταχύτητα της φλόγας με αποτέλεσμα η τελευταία να σταθεροποιείται.

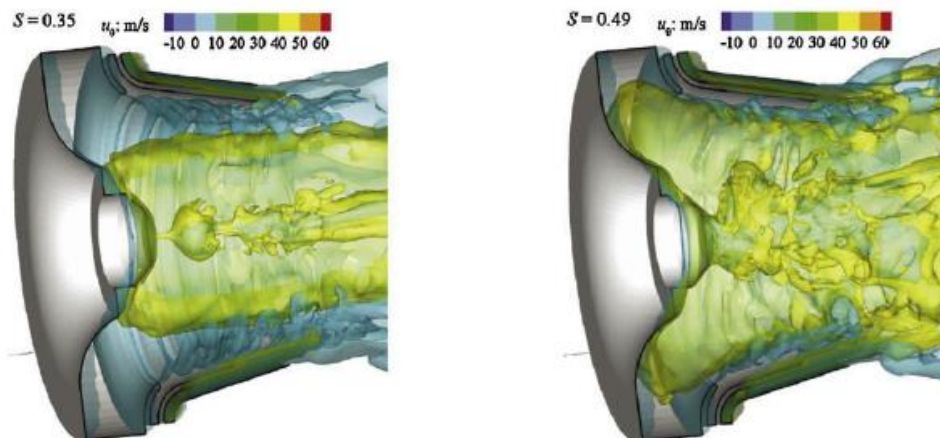


Εικόνα 7. Χωρική κατανομή των ροϊκών γραμμών στην οποία φαίνεται η τυπική ζώνη ανακυκλοφορίας σε συνθήκες ελεύθερης ισοθερμοκρασιακής ροής με αριθμό συστροφής $S = 1.57$. Το κέντρο του στροβίλου (PVC) βρίσκεται στο σύνορο μεταξύ των στρωμάτων διάτμησης και της ζώνης ανακυκλοφορίας [15].



Εικόνα 8. Σχηματική απεικόνιση του στροβίλου σε ροϊκό πεδίο καυστήρα συστροφής [41].

Ακολουθώς, οι αξονικές και εφαπτομενικές ταχύτητες του πεδίου δημιουργούν τον χαρακτηριστικό στρόβιλο των Εικόνων (9α)-(9β) του οποίου η συμπεριφορά ανάλογα με τις αστάθειες στα στρώματα διάτμησης τον καθιστούν ευεπίφορο σε κατάρρευση (vortex breakdown mechanism) και την κίνηση του χρονικά μεταβαλλόμενη. Η κίνηση του κέντρου του στροβίλου η οποία αποτελεί ένα έντονα δυναμικό φαινόμενο είναι γνωστή και ως Precessing vortex core (PVC).



Εικόνα 9. Στιγμαϊές ισο-επιφάνειες των εφαπτομενικών ταχυτήτων $u_\theta = 10$ και 50 m/s. (α) χαμηλός αριθμός συστροφής και (β) υψηλός αριθμός συστροφής [53].

2.2 Εφαρμογές

Οι καυστήρες συστροφής χρησιμοποιούνται εν γένει σε μία πληθώρα εφαρμογών και αντίστοιχες διατάξεις στις οποίες επιζητούμε να εκμεταλλευτούμε τα θετικά αεροδυναμικά τους χαρακτηριστικά (δημιουργία ζώνης ανακυκλοφορίας) με απώτερο στόχο πιο ευσταθή και πιο αποδοτική καύση με

λιγότερες εκπομπές NOx. Επομένως, σε κάθε σχεδόν εφαρμογή όπου υπεισέρχεται η καύση δυναμικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Στη βιβλιογραφία έχει αναφερθεί η χρήση τους σε:

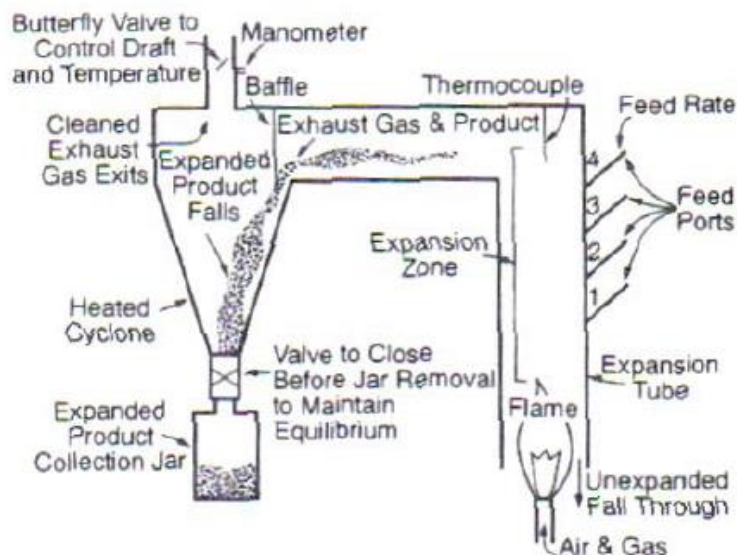
- Λέβητες.
- Κινητήρες Diesel.
- Αεριοστροβίλοι.
- Βιομηχανικοί φούρνοι.

Ενδεικτικά, στη συνέχεια παραθέτουμε δύο από τις βασικότερες χρήσεις τους σε αεριοστροβίλους και σε βιομηχανικό φούρνο. Ειδικότερα, η απόφαση να περιγράψουμε την ενσωμάτωση ενός τέτοιου καυστήρα στη βιομηχανία διόγκωσης περλίτη έγκειται στη προέλευση της εργαστηριακής μας διάταξης.

2.2.1 Βιομηχανία διόγκωσης περλίτη

Ο περλίτης είναι ένα επιφανειακό πέτρωμα το οποίο εξορύσσεται και επεξεργάζεται σχετικά απλά από την άποψη τόσο του απαιτούμενου εξοπλισμού όσο και της πολυπλοκότητας των διαδικασιών κατεργασίας που λαμβάνουν χώρα. Η αρχική του επεξεργασία περιλαμβάνει διαδικασίες όπως: η θραύση του σε κόκκους με χρήση ειδικών σπαστήρων, η ξήρανση, η λειοτρίβηση και ο διαχωρισμός του ανάλογα με την κοκκομετρία του (κοκκομετρική διαβάθμιση). Με δεδομένο πως το ορυκτό αυτό χρησιμοποιείται σχεδόν πάντα σε διογκωμένη μορφή, στη βιομηχανία υπόκειται επεξεργασίας ανάλογα με το μέγεθος των κόκκων του ώστε να αποκτήσει την κατάλληλη τιμή μάζας ανά μονάδα όγκου (φαινόμενη πυκνότητα) που απαιτεί η εκάστοτε εφαρμογή για την οποία προορίζεται.

Γι' αυτό τον σκοπό, ο θρυμματισμένος περλίτης μεταφέρεται σε κάθετους φούρνους που αποτελούνται από έναν ανοξείδωτο σωλήνα με καυστήρα στη βάση και φλόγα κατ' αντιστροφή της τροφοδοσίας (Δεδελούδης, 2006). Οι κόκκοι περνούν με μεγάλη ταχύτητα από τους ειδικούς κλιβάνους με τη βοήθεια κατάλληλου αναρροφητή. Έτσι επιτυγχάνεται στιγμιαία πύρωση χωρίς τήξη και συρρίκνωση. Κατά τη διόγκωση, το ρεύμα του αέρα μεταφέρει στον κυκλώνα τα ελαφρύτερα σωματίδια. Τα βαρύτερα παραμένουν χαμηλά στη θερμή ζώνη, έως ότου διογκωθούν και ανυψωθούν με το ρεύμα του αέρα.



Εικόνα 10. Σχηματική απεικόνιση εργαστηριακού κάθετου φούρνου διόγκωσης περλίτη (Barker and Harris, 1990).

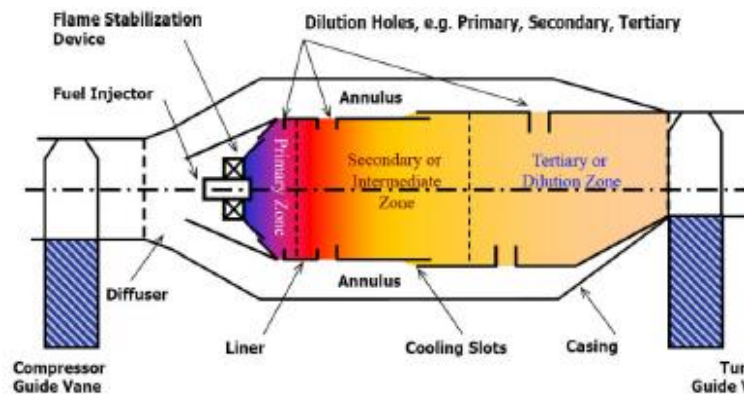
Οι παράμετροι λειτουργίας του κάθετου φούρνου διόγκωσης οι οποίες άπτονται των ενδιαφερόντων του μηχανικού και αποδεικνύονται κρίσιμες για τις τελικές ιδιότητες του υλικού είναι οι ακόλουθες:

- Ροές μίγματος καυσίμου-αέρα: επηρεάζουν τη θερμοκρασία και τη προσδιδόμενη ενέργεια.
- Αναρρόφηση αέρα: επηρεάζει το ύψος στο οποίο θα αρχίσει η διόγκωση και τον χρόνο παραμονής του περλίτη στο φούρνο.

- Θέση τροφοδοσίας: επηρεάζει τον χρόνο πτώσης προς την φλόγα και κάνει πιο αργή τη διαδικασία «μαλάκυνσης» του περλίτη (χοντρόκοκκοι περλίτες: τροφοδοσία ψηλά και λεπτόκοκκοι περλίτες: τροφοδοσία χαμηλά).
- Ρυθμός τροφοδοσίας: επηρεάζει τον χρόνο παραμονής του υλικού στο φούρνο, καθώς και την προσροφούμενη ενέργεια ανά μάζα περλίτη.
- Θέσεις damper: επηρεάζουν τη θερμοκρασία του ρεύματος μετά τον φούρνο καθώς και τη διαδικασία κυκλωνισμού.

2.2.2 Αεριοστρόβιλοι

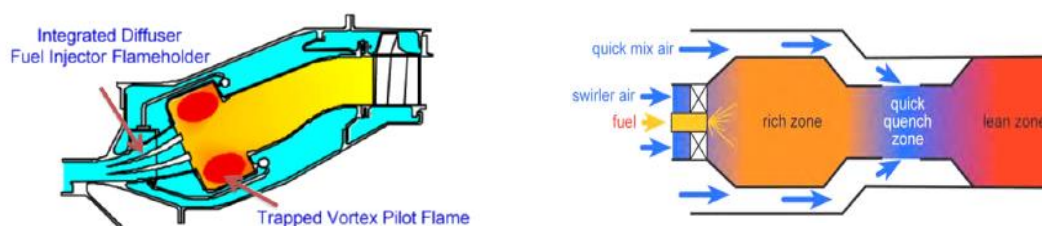
Οι αεριοστρόβιλοι χρησιμοποιούνται σήμερα ευρέως για να καλύψουν πληθώρα ενεργειακών αναγκών από εφαρμογές αεριοπρόωθησης μέχρι επίγεια παραγωγή ενέργειας. Στη σημερινή εποχή εξαιτίας των αυστηρών περιβαλλοντικών κανονισμών το ενδιαφέρον του σχεδιασμού στράφηκε στη μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων κυρίως NOx και κατ' επέκταση στην μελέτη της ροής στον θάλαμο καύσης.



Εικόνα 11. Γενική διάταξη του θαλάμου καύσης αεριοστρόβιλου [18].

Μέχρι σήμερα η πλειοψηφία των αεριοστρόβιλων αναπτυσσόταν λειτουργώντας με φλόγες διάχυσης εξαιτίας της ευστάθειας και της ευελιξίας που παρείχαν στην επιλογή καυσίμου. Σε μία τέτοιου τύπου φλόγα πάντα θα υπάρχουν περιοχές στοιχειομετρικής αναλογίας ανεξάρτητα από τη συνολική στοιχειομετρία του μίγματος. Το βασικό τους όμως μειονέκτημα είναι οι εκπομπές NOx εξαιτίας των υψηλών θερμοκρασιών οι οποίες αναπτύσσονται στην πρωτεύουσα ζώνη (primary zone).

Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος μεταξύ άλλων έχει προταθεί και η ιδέα χρήσης συστημάτων τα οποία λειτουργούν με φτωχές σε καύσιμο φλόγες προανάμιξης (lean premixed combustion) έτσι ώστε να μειωθεί η θερμοκρασία της φλόγας και η συνδεδεμένη με αυτή παραγωγή οξειδίων του αζώτου. Η πρόκληση όμως η οποία ανακύπτει σε αυτή την περίπτωση είναι η τάση της φλόγας ειδικά σε χαμηλούς λόγους ισοδυναμίας να επιστρέφει προς τον αγωγό καυσίμου (flame flashback) καταπονώντας τον θερμικά. Έχοντας υπόψη μας τις συνέπειες της συστολής προς την κατεύθυνση βελτίωσης της απόδοσης και της ευστάθειας της καύσης (Ενότητα 2.1) ήταν επόμενο να έρθουν στο προσκήνιο του σχεδιασμού συστήματα που εκμεταλλεύονται τις ευεργετικές της επιδράσεις ώστε να βελτιωθεί εν γένει η διαχείριση φτωχών μιγμάτων βλ. LDI (Lean Direct Injection) για εφαρμογές: αεριοπρόωθησης ή RQL (Rich-Burn/Quick-Quench/Lean-Burn) συστήματα. Στην Εικόνα 12 φαίνονται δύο διαφορετικής φιλοσοφίας συστήματα αεριοστρόβιλων τα οποία όμως περιλαμβάνουν την συστολή στην πρωτεύουσα ζώνη ώστε να βελτιώσουν την ανάμιξη του μίγματος και να μειώσουν τις εκπομπές.



Εικόνα 12. Σχηματική αναπαράσταση ενός (α) trapped vortex combustor και ενός (β) Rich-Burn, Quick-Mix, Lean-Burn combustor [18].

2.3 Αριθμός Συστροφής (Swirl Number)

Ο βαθμός συστροφής σε μία ροή ποσοτικοποιείται συνήθως από την αδιάστατη παράμετρο S η οποία είναι γνωστή και ως αριθμός συστροφής της ροής. Ο αριθμός αυτός χρησιμοποιείται για τον χαρακτηρισμό αυτού του είδους των ροών και πιο συγκεκριμένα έχει καθιερωθεί ως συμβατικό όριο για την κατηγοριοποίηση των ροών ως υψηλής συστροφής αν $S > 0.6$ και χαμηλής αν $S < 0.6$.

2.3.1 Θεωρητικός υπολογισμός

Ο αριθμός αυτός ορίστηκε από τους Chigier και Beer [15] ως:

$$S_0 = \frac{G_\theta}{RG_x} \quad (1)$$

όπου G_θ είναι η αξονική παροχή της εφαπτομενικής ορμής, G_x είναι η αξονική παροχή της αξονικής ορμής και R είναι η εξωτερική ακτίνα του καυστήρα.

Οι δύο ποσότητες G_θ και G_x εκφράζονται ως:

$$G_\theta = \int_0^R (Wr) \rho U 2\pi r dr = k_1 \quad (2)$$

$$G_x = \int_0^R 2\pi r \rho U^2 dr + \int_0^R 2\pi r p dr = k_2 \quad (3)$$

όπου U , W και p είναι: η αξονική συνιστώσα της ταχύτητας, η εφαπτομενική συνιστώσα της ταχύτητας και η στατική πίεση αντίστοιχα και k_1 , k_2 είναι σταθερές για την περίπτωση ελεύθερης ροής με συστροφή.

Η στατική πίεση μπορεί να προσεγγιστεί από τις τιμές της εφαπτομενικής ταχύτητας, οπότε η Εξίσωση (3) απλοποιείται στην

$$G_x = 2\pi \int_0^R \rho r \left(U^2 - \frac{1}{2} W^2 \right) dr \quad (4)$$

Συνεπώς, συνάγεται μία άλλη μορφή του αριθμού συστροφής η εξής:

$$S'_0 = \frac{\int_0^R r^2 U W dr}{R \int_0^R r \left[U^2 - (1/2) W^2 \right] dr} \quad (5)$$

η οποία έχει χρησιμοποιηθεί από πολλούς ερευνητές [45].

Οι Chigier και Beer [15] υπολόγισαν επίσης την ακτινική κατανομή της πίεσης με βάση την ακτινική κατανομή της εφαπτομενικής ταχύτητας ολοκληρώνοντας την εξίσωση:

$$\frac{dp}{dr} = \rho \frac{W^2}{r} \quad (6)$$

Για υψηλές τιμές συστροφής, διαπιστώθηκε καλή συμφωνία μεταξύ της σχέσης και των πειραματικών τιμών. Για χαμηλό όμως S η εκτίμηση της Εξίσωσης (6) δεν είναι ικανοποιητική εξαιτίας της τριβής η οποία δεν μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα.

Η στατική πίεση είναι ένα μέγεθος το οποίο εξαρτάται έντονα από την γεωμετρία του καυστήρα και η μέτρηση της είναι δύσκολο να γίνει. Επομένως, σύμφωνα με τους Beer και Chigier [12], Martin [37] και Weber και Dugue [54] η αξονική παροχή της αξονικής ορμής G_x υπολογίζεται επαρκώς ικανοποιητικά ακόμα και αν παραλείψουμε τον όρο της στατικής πίεσης από την Εξίσωση 3. Άρα, ο αριθμός συστροφής που ορίστηκε στην (1) συνήθως γράφεται χωρίς μεγάλη απώλεια ακρίβειας ως:

$$S = \frac{G_\theta}{2\pi R \int_0^R \rho U^2 r dr} = \frac{\int_0^R U W r^2 dr}{R \int_0^R U^2 r dr} \quad (7)$$

Η σχέση (7) σε σύγκριση με τον ορισμό της S_0 ή και της S_0' υπερτερεί λόγω μεγαλύτερου φυσικού νοήματος διότι καταλήγουμε ο αριθμός συστροφής να είναι ευθέως ανάλογος με τον λόγο της μέσης ογκομετρικής εφαπτομενικής προς αξονική ταχύτητα.

2.3.2 Γεωμετρικός υπολογισμός

Με δεδομένη πολλές φορές την αδυναμία εύρεσης πειραματικών δεδομένων (κατανομές ταχύτητας και στατικής πίεσης) ώστε να υπολογιστεί ο αριθμός συστροφής έχουν αναπτυχθεί διάφορες γεωμετρικές σχέσεις βάσει των οποίων γίνεται συχνά εκτίμηση της τιμής του. Οι σχέσεις αυτές περιορίζονται προφανώς από τον τύπο του καυστήρα για τον οποίο προορίζονται να δώσουν πρόβλεψη είναι όμως σχετικά αξιόπιστες και μας δίνουν μία πρώτη εικόνα για την εξάρτηση του S από σχεδιαστικές παραμέτρους ενδιαφέροντος όπως είναι για παράδειγμα η γωνία των πτερυγίων κατεύθυνσης ως προς τον κεντρικό άξονα του καυστήρα. Στην παρούσα ενότητα θα περιοριστούμε στην παρουσίαση δύο από τις πιο διαδεδομένες σχέσεις για τον χαρακτηρισμό της ροής σε καυστήρα.

Σχέση Claypole και Syred [33]

Αν έχουμε τέλεια ανάμιξη και θεωρήσουμε πως η ορμή διατηρείται τότε ο αριθμός συστροφής υπολογίζεται από τη σχέση:

$$S_g = \frac{r_0 \pi r_e}{A_i} \left[\frac{\tan \text{gential flow}}{\text{total flow}} \right]^2 \quad (8)$$

με

r_e : η ακτίνα εξόδου του καυστήρα.

A_i : το συνολικό εμβαδό της διατομής των εφαπτομενικών πτερυγίων.

Σχέση Cheng, R.K (1995) και Nogenmyr, K.J. et al (2009)

$$S_g = (2/3) \tan \alpha \left(\frac{1 - R^3}{1 - R^2 + \left[m^2 (1/R^2 - 1)^2 \right] R^2} \right) \quad (9)$$

με

α : η γωνία που σχηματίζουν τα πτερύγια ως προς τον κεντρικό άξονα του καυστήρα.

R : ο λόγος των ακτίνων του κεντρικού αγωγού προς τον δακτυλιωτό αγωγό του καυστήρα.

m : ο λόγος των μαζικών παροχών του κεντρικού αγωγού προς αυτήν που εισέρει εφαπτομενικά στον άξονα του καυστήρα.

3. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

3.1 Πειραματική Διερεύνηση Καυστήρων Συστροφής

Οι καυστήρες συστροφής ανάλογα με το μέγεθος τους διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες. Η πρώτη αποτελείται από μεγάλης έκτασης συστήματα όπως είναι οι βιομηχανικοί καυστήρες. Στη δεύτερη ανήκουν οι καυστήρες υπό κλίμακα (scaled-down combustors) [52,43], οι οποίοι είναι αντίγραφα των πραγματικών εγκαταστάσεων και προσφέρονται για δοκιμές ώστε να εκτιμηθεί η απόδοση των συστημάτων που αναπαριστούν. Η κατηγορία αυτή αν και ιδιαίτερα χρήσιμη για μετρήσεις και για αξιολόγηση της επίδρασης πολλών σχεδιαστικών παραμέτρων [10-48] δεν ενδείκνυται γενικά για μελέτες επί του θερμικού και ροϊκού πεδίου συστροφής για λόγους πρακτικούς (πρόσβασης, περιορισμένου εύρους συνθηκών λειτουργίας και καυσίμων, μοντελοποίησης) και κόστους.

Γι' αυτό τον σκοπό χρησιμοποιούνται οι εργαστηριακοί καυστήρες (laboratory swirl burners) οι οποίοι έχοντας διατηρήσει τα κυριότερα χαρακτηριστικά των πραγματικών και όντας εξοπλισμένοι με κατάλληλες διαμορφώσεις οι οποίες επιτρέπουν την οπτική ή μη πρόσβαση στον θάλαμο καύσης διευκολύνουν την συλλογή δεδομένων και άρα αποτελούν το κατ' εξοχήν εργαλείο για σχεδιασμό και ανάλυση. Εξαιτίας αυτών των λόγων στην ενότητα που ακολουθεί θα παρουσιάσουμε συνοπτικά τα βιβλιογραφικά δεδομένα σχετικά με τα αεροδυναμικά και θερμικά χαρακτηριστικά του αναπτυσσόμενου πεδίου ροής εργαστηριακών καυστήρων συστροφής. Για να είναι μάλιστα πιο εύληπτες οι διαφοροποιήσεις που παρατηρήθηκαν στις υπάρχουσες μελέτες η παρουσίαση θα γίνει ανά τύπο καυστήρα. Έχοντας εξηγήσει τους λόγους που μας οδήγησαν στην μελέτη αυτού του μεγέθους καυστήρων συστροφής μέχρι και το τέλος της Ενότητας 3.1 όπου γίνεται αναφορά σε καυστήρες αυτή θα ισοδυναμεί με κάποιον από τους τύπους των εργαστηριακών που απαντήθηκαν σε πειραματικές δοκιμές: Tecflam, Sydney, Turbomeca, Dual Swirl.

Εργαστηριακοί καυστήρες συστροφής

Για να διατηρήσουμε την βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετική με την μελέτη της παρούσας εργασίας η αναφορά μας θα περιοριστεί σε καυστήρες ελεύθερης ροής οι οποίοι χρησιμοποιούν καύσιμα σε αέρια μορφή αποφεύγοντας την αναφορά σε αυτούς που λειτουργούν με spray [36-14] ή προ εξατμισμένα καύσιμα [17-8]. Η περίπτωση της ελεύθερης ροής, δηλαδή εκείνης η οποία εξερχόμενη από το ακροφύσιο του καυστήρα δεν αναπτύσσεται σε κάποιο θάλαμο καύσης αλλά στο περιβάλλον, για καύση είτε προανάμιξης είτε διάχυσης έχει τύχει διερεύνησης σε καυστήρες δύο τύπων: Tecflam και Sydney. Συγκεντρωτικά οι αναφορές για αυτού του τύπου τις διερευνήσεις βρίσκονται στον Πίνακα 1. Εκεί ο αναγνώστης μπορεί να βρει πινακοποιημένα ανά βιβλιογραφική αναφορά την διαμόρφωση του καυστήρα η οποία χρησιμοποιήθηκε, τις μεθοδολογίες μέτρησης, τη χημεία της καύσης (προανάμιξης ή μη) καθώς και τα μεγέθη τα οποία αναλύθηκαν.

Τύπος καυστήρα συστροφής	Είδη Μετρήσεων	Είδη Καυσίμων	Αποτελέσματα
Tecflam [30]	LDV	NP/PP: N.G	F-TA
Tecflam [31]	LDV, LIF, Raleigh	NP/PP: N.G	F-TA, S-C/T
Tecflam [49]	LDV	P: N.G	F-TA, F-TR
Tecflam [42]	CTA, LDV, LIF, PIV	P: N.G	F-TA, S-C/T
Tecflam [46]	CL, LIF	P: N.G	S-C/T
Sydney [4]	LDV	NP/PP: N.G (SM 1/2), N.G-air (SMA 1/2/3), N.G-H ₂ (SMH 1/2/3)	F-TA
Sydney [5]	LDV	NP/PP: N.G	F-TR
Sydney [6]	LDV, Mie, Shadowgraph	NP/PP: N.G (SM 1/2), N.G-air (SMA 1/2/3), N.G-H ₂ (SMH 1/2/3)	F-TR
Sydney [39]	LIF, Raman, Rayleigh	NP/PP: N.G (SM 1/2), N.G-air (SMA 1/2/3), N.G-H ₂ (SMH 1/2/3)	S-C/T
Sydney [25]	LDV, LIF, Raman, Raleigh	NP/PP: N.G (SM 1/2)	F-TA, S-C/T
Sydney [38]	LDV, LIF, Raman, Raleigh	NP/PP: N.G (SM 1/2), N.G-air (SMA 1/2/3), N.G-H ₂ (SMH 1/2/3)	F-TA, S-C/T

Πίνακας 1. Σύνοψη πειραματικών διερευνήσεων ελεύθερης φλόγας.

Συντομογραφίες αποτελεσμάτων

F-TA: flow-field/time averaged.

F-TR: flow-field/time resolved.

S-C/T: scalar field (περιλαμβάνει: θερμοκρασία, λόγο μίξης, συγκεντρώσεις).

Συντομογραφίες καυσίμων

NP/PP: non-premixed or partially at point of injection (φλόγες αερίων).

P: premixed at point of injection (φλόγες αερίων).

N.G: natural gas.

Συντομογραφίες μετρήσεων

CL: Chemiluminescence.

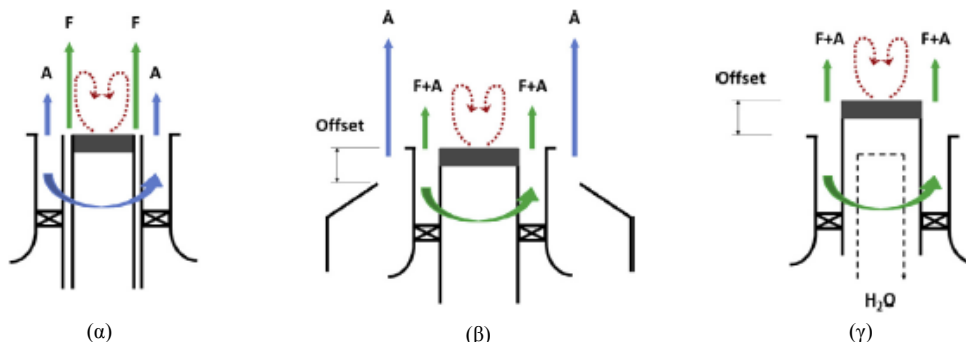
LDV: Laser Doppler Velocimetry.

LIF: Laser Induced Florescence.

PIV: Particle Image Velocimetry.

Διαμορφώσεις καυστήρων Tecflam

Αυτού του τύπου οι καυστήρες παρ' ότι έχουν χρησιμοποιηθεί για πειραματικές μελέτες περιορισμένης ροής [40,13] οι πρώτες χρήσεις τους που εντοπίζονται στη βιβλιογραφία αφορούν ελεύθερο πεδίο [30-31]. Οι κύριες παραλλαγές ως προς τα βασικά μορφολογικά τους χαρακτηριστικά αποτυπώνονται στην Εικόνα 13. Πολύ γενικά λοιπόν, το καύσιμο μπορεί να εισέρχεται στον καυστήρα μέσω ενός κεντρικού αγωγού περιβαλλόμενο από ρεύμα αέρα το οποίο ρέει περιφερειακά και βρίσκεται σε κατάσταση συστροφής (Εικόνα 13α [30,31]) ή αέρας και καύσιμο μπορεί να έχουν προαναμιχθεί, να συμμετέχουν σε ροή συστροφής γύρω από τον κεντρικό αγωγό (central bluff body) και επιπλέον ρεύμα αέρα να τροφοδοτείται σε ευθύγραμμη ροή (Εικόνα 13β [49]). Σε άλλες πειραματικές εργασίες η προηγούμενη διάταξη έχει τροποποιηθεί με την αφαίρεση του πρόσθετου ρεύματος αέρα και την αξιοποίηση του τυφλού κεντρικού αγωγού σε ρόλο σταθεροποιητή της φλόγας όντας πιο εκτεταμένος. Σε αυτή την περίπτωση μάλιστα (Εικόνα 13γ [42]) έχει αναφερθεί ψύξη του κεντρικού αγωγού με νερό ώστε να είναι εφικτός ο αποτελεσματικότερος έλεγχος των προκύπτουσών συνοριακών συνθηκών του υπό μελέτη ροϊκού και θερμικού πεδίου.



Εικόνα 13. Τυπικές διαμορφώσεις Tecflam καυστήρων που απαντώνται στη βιβλιογραφία για την μελέτη ελεύθερης ισοθερμοκρασιακής και αντιδρώσας ροής.

Συνοριακές συνθήκες και πεδίο ροής

Η επιλογή κάθε μίας από τις παραπάνω διαμορφώσεις επηρεάζει όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό το πεδίο ροής και κατ' επέκταση τις συνοριακές συνθήκες (κατανομή ταχυτήτων) που τυπικά αποτελούν είσοδο για τις αντίστοιχες αριθμητικές διερευνήσεις. Ως συνέχεια λοιπόν, της παραπάνω σύντομης ανασκόπησης στη μορφολογία των Tecflam θα παρουσιάσουμε σε αδρές γραμμές την εικόνα του πεδίου ροής και τις επιπτώσεις του στην εξαγωγή των κατάλληλων συνοριακών συνθηκών.

Όταν η συστροφή εισάγεται μόνο στο ρεύμα του αέρα Εικόνα 13α περιοχές ανακυκλοφορίας/μηδενισμού της ταχύτητας (stagnation) φαίνεται να ξεκινούν ανάντη της ροής στα $x = 18\text{mm}$ ($x/D = 0.3$) [30], και να επεκτείνονται έως τα $x = 120\text{mm}$ ($x/D = 2$). Η πρόκληση μοντελοποίησης τέτοιων ροών έγκειται στο ότι τα δεδομένα για το πεδίο ταχύτητας τα οποία τυπικά προσφέρονται ως είσοδος για τους αριθμητικούς υπολογισμούς έχουν μετρηθεί στα $x = 6\text{mm}$ ($x/D = 0.1$) [30] πολύ κοντά δηλαδή σε περιοχές έντονης αστάθειας (vortex breakdown regions) με κίνδυνο την εισαγωγή αποκλίσεων στις μετρήσεις μας. Για προαναμεμιγμένα καύσιμα τα απαραίτητα δεδομένα για τις συνοριακές συνθήκες συλλέγονται ανάντη της ροής στα $x = 1\text{mm}$ και γενικά αφορούν τις μέσες τιμές των συνιστωσών της ταχύτητας: $\langle u \rangle$, $\langle v \rangle$, $\langle w \rangle$, των διακυμάνσεων τους $\langle u' \rangle$, $\langle v' \rangle$, $\langle w' \rangle$ και των δύο συνιστωσών για τις διατμητικές τάσεις.

Σε περιπτώσεις ροής όπως της Εικόνας 13β η διαμόρφωση του καυστήρα επηρεάζει έντονα που θα εμφανιστεί το στρώμα διάτμησης (shear layers region) καθώς και τις κλίμακες μήκους (μικρότερες κατά 30%) που παρατηρούνται στο επίπεδο εξόδου του καυστήρα ως προς την ακτινική διεύθυνση. Τα ευρήματα αυτά όπως είναι φυσικό περιπλέκουν τον προσδιορισμό των συνοριακών συνθηκών ($x = 1\text{mm}$) για καύση στους Tecflam. Ειδικότερα, το προκύπτον πεδίο ροής είναι έντονα ανισότροπο και γίνεται σαφές πως η πιθανή χρήση μοντέλων τύρβης που υποθέτουν ισότροπη τύρβη (απλό k-ε) είναι προβληματική τουλάχιστον σε επίπεδο συνοριακών συνθηκών εισόδου [49].

Θερμικό πεδίο / flame structure

Τα συμπεράσματα από την σύνοψη των πειραματικών δοκιμών σε Tecflam ολοκληρώνονται με την σκιαγράφηση των θερμικών χαρακτηριστικών του πεδίου ροής με κύρια εργαλεία τις μετρήσεις θερμοκρασίας, εκπομπών και της ίδιας της μορφολογίας της φλόγας.

Ισοθερμοκρασιακές δοκιμές με φυσικό αέριο το οποίο εκχέεται από τον κεντρικό αγωγό (Εικόνα 13α) επιβεβαιώνει ότι η ανάμιξη καυσίμου-αέρα επιτυγχάνεται πολύ γρήγορα ύστερα από την έξοδο από το ακροφύσιο και γίνεται πλήρης στα $x = 10\text{-}20\text{mm}$. Σε περιπτώσεις αντιδρωσών ροών, μετρήσεις θερμοκρασίας και OH-LIF σε διάφορα επίπεδα αποκαλύπτουν την γρήγορη εμφάνιση (ανάτη) ενός έντονα στροβιλώδους πεδίου ροής το οποίο έχει το χαρακτηριστικό σχήμα της φυσαλίδας περιβαλλόμενο από καμπύλα στρώματα διάτμησης, απότομες κλίσεις της θερμοκρασίας και έντονη τυρβώδη ανάμιξη [17]. Οι μελέτες αυτές αποκαλύπτουν ότι οι μέγιστες θερμοκρασίες εντοπίζονται σχετικά μακριά από το επίπεδο εξόδου του καυστήρα στα $x = 25\text{mm}$ ($x/D = 0.5$) και βρίσκονται σε γειτνίαση με τις προαναφερθείσες κεντρικά τοποθετημένες περιοχές αναστροφής της ροής.

Άλλες δοκιμές σε προαναμεμιγμένες φλόγες CH_4 -αέρα έχουν καταλήξει σε συνεχή μέτωπα φλόγας τα οποία όμως χαρακτηρίζονται από ρυτιδισμούς (wrinkles). Τέλος, η πιθανότητα αναστροφής της φλόγας (flashback) σε φλόγες προανάμιξης έχει επίσης διερευνηθεί και έχει παρατηρηθεί να συμβαίνει σε κρίσιμους αριθμούς συστροφής οι οποίοι αυξάνουν παράλληλα με την τιμή του αριθμού Reynolds [42].

Διαμορφώσεις καυστήρων Sydney

Πρόκειται για τον δεύτερο τύπο καυστήρα ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για την μελέτη του πεδίου ροής ελεύθερης φλόγας και για τον οποίο υπάρχουν διαθέσιμα βιβλιογραφικά δεδομένα. Χαρακτηριστικό αυτού του τύπου είναι πως η μορφολογία του είναι υπεύθυνη για την ανάπτυξη συστροφής η οποία όπως θα δούμε είναι ανεξάρτητη από τον αριθμό Reynolds [51]. Συγκεκριμένα, σε αντίθεση με τους Tecflam, στους Sydney δεν υπάρχουν ακτινικά τοποθετημένα πτερύγια υπεύθυνα για την οδήγηση του αέρα αλλά η εισαγωγή της συστροφής επιτυγχάνεται διαμέσου εφαπτομενικών θυρών (tangential ports).

Πιο παραστατικά στην Εικόνα 14 παρουσιάζονται δύο βασικές παραλλαγές αυτού του καυστήρα. Πολύ γενικά, ο Sydney διαθέτει έναν κεντρικό κοίλο αγωγό διαμέτρου 50mm ο οποίος επιτρέπει την παροχή του καυσίμου διαμέσου διόδου διαμέτρου 3.6mm. Οι δύο αυτοί κύλινδροι περιβάλλονται από έναν μεγαλύτερο δακτύλιο πλάτους 5mm μέσω του οποίου εισρέει η κύρια παροχή αέρα (primary air stream) δημιουργώντας έτσι με βάση τις προαναφερθείσες διαστάσεις λόγο εμπλοκής (blockage ratio) στο επίπεδο εξόδου του καυστήρα γύρω στο 69% [4]. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να τονίσουμε πως όπως φαίνεται στις Εικόνες 14α, 14β μόνο ο αέρας που περιβάλλει την κεντρική δακτυλιωτή διάταξη επιτυγχάνει συστροφή, γεγονός το οποίο είναι εφικτό διαμέσου των εφαπτομενικών θυρών οι οποίες βρίσκονται ανάτη της ροής. Έχοντας μία εικόνα για τα κύρια μορφολογικά χαρακτηριστικά αυτών των καυστήρων στη συνέχεια παρουσιάζουμε συγκεντρωμένα τις παρατηρήσεις σχετικά με την εκάστοτε μορφή του ροϊκού πεδίου που συναντήσαμε στην σχετική βιβλιογραφία συνοδευμένες από πιθανές ερμηνείες.



Εικόνα 14. Τυπικές διαμορφώσεις Sydney καυστήρων που απαντώνται στη βιβλιογραφία για την μελέτη ελεύθερης ισοθερμοκρασιακής και αντιδρώσας ροής.

Συνοριακές συνθήκες και πεδίο ροής

Σε αυτόν τον τύπο καυστήρα οι συνοριακές συνθήκες μπορεί να αφορούν είτε την κύρια είτε την δευτερεύουσα παροχή αέρα. Ειδικότερα, για τις πειραματικές δοκιμές που περιελάμβαναν ισοθερμοκρασιακή ροή οι συνοριακές συνθήκες της κύριας παροχής μετρήθηκαν στα $x = 5.2\text{mm}$ πάνω από αυτήν. Επίσης, αλλάζοντας μέρος του ακροφυσίου του καυστήρα ώστε να είναι εφικτή η οπτική πρόσβαση και άρα οι LDV μετρήσεις στα $x = -2.7\text{mm}$ επιβεβαιώθηκε η απουσία φαινομένων αστάθειας ή χαρακτηριστικών συχνοτήτων αναφορικά με την κύρια παροχή αέρα [6].

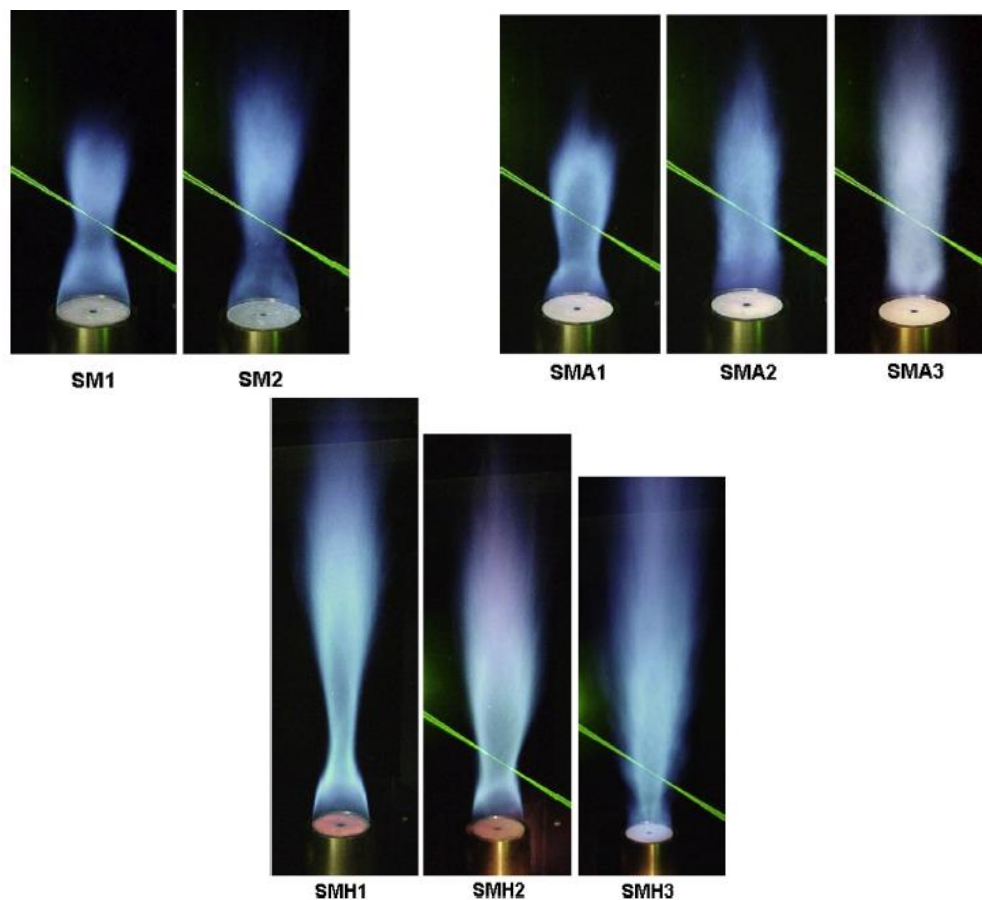
Σε αντιδρώσες ροές δεδομένα κατάλληλα για συνοριακές συνθήκες (κατανομή ταχυτήτων) αναφέρονται στα $x = 6.8\text{ mm}$ [2]. Τα γενικά χαρακτηριστικά του θερμικού πεδίου αποδεικνύεται πως εξαρτώνται από μία σειρά παραμέτρων με κυριότερες τη μέση ταχύτητα ροής του καυσίμου (U_j), τη μέση εφαιπτομενική (W_s) και αξονική (U_s) ταχύτητα της πρωτεύουσας παροχής αέρα και τη μέση χρονικά ταχύτητα της δευτερεύουσας παροχής (U_e) [4]. Σχετικά με το πεδίο ροής ένα κοινό χαρακτηριστικό σε όλες τις συναφείς πειραματικές δοκιμές είναι η ανάπτυξη ζώνης ανακυκλοφορίας. Ο σχηματισμός της, αποδίδεται στις σχετικά ισχυρές αξονικές ροές αέρα (U_s , U_e) και το μήκος της κυμαίνεται γενικά σε τάξη μεγέθους παραπλήσια με αυτή του κεντρικού κοίλου αγωγού (bluff body) των 50mm , ο οποίος αεροδυναμικά συμβάλλει στην αναχαίτιση της ροής. Πιο ειδικά, η πρώτη ζώνη ανακυκλοφορίας εμφανίζεται να περιστρέφεται γύρω από την επιφάνεια του καυστήρα με ρυθμό παραπλήσιο με αυτόν της κύριας παροχής [2]. Οι πειραματικές μελέτες επίσης υποδηλώνουν την ύπαρξη μιας πολύ μικρότερης ζώνης αυτή τη φορά ανακυκλοφορίας του καυσίμου η οποία ευνοεί την καλύτερη ανάμιξη του με το εκάστοτε οξειδωτικό. Ένα άλλο γνώρισμα της ροής το οποίο αναφέρεται σπανιότερα στη βιβλιογραφία είναι η παρατήρηση ταχύτατα περιστρεφόμενων θυλάκων καυσίμου (rocket of gas) οι οποίοι περιστρέφονται στο επίπεδο εξόδου του καυστήρα με ρυθμό έως και δέκα φορές μεγαλύτερο από τον αντίστοιχο της παροχής του αέρα [4]. Μολονότι τα ακριβή αίτια του εν λόγω φαινομένου δεν έχουν ακόμα αποσαφηνιστεί, αυτό εμφανίζεται να συνδέεται με ροές στις οποίες η πρώτη ζώνη ανακυκλοφορίας επεκτείνεται ανάντη της ροής προς την παροχή του καυσίμου [38].

Κατάντη της ροής, ένα άλλο ευρέως αναφερόμενο χαρακτηριστικό είναι η παρουσία δεύτερης ζώνης ανακυκλοφορίας η οποία αποδίδεται στον επαγόμενο στροβιλισμό από την κατάρρευση στροβίλων της ροής (vortex breakdown). Η ακριβής επίδραση ροϊκών παραμέτρων (U_e , U_j , U_s και W_s) και χημείας της καύσης (στοιχειομετρία μίγματος) όσον αφορά την κατάντη αναστροφή της ροής δεν έχει κατανοηθεί πλήρως θεωρείται όμως δεδομένο πως μόνος του ο αριθμός συστροφής δεν μπορεί να δικαιολογήσει την ύπαρξη αυτής της ζώνης τόσο σε περιπτώσεις αντιδρώσας [5] όσο και ισοθερμοκρασιακής ροής [3]. Ένα ακόμα χαρακτηριστικό της ροής το οποίο παρουσιάζεται κατάντη συνίσταται στη ταχύτατη περιστροφή μέρους από τα εκπεμπόμενα αέρια (parcel of gases). Οπτικά η κίνηση αυτή αποτυπώνεται με τη δημιουργία μιας στένωσης κατά μήκος του άξονα της φλόγας (collar-like flow feature) [4,38,2]. Η προηγούμενη όμως εξήγηση δεν είναι η μόνη. Αντίθετα η δεύτερη ζώνη ανακυκλοφορίας μαζί με την παρουσία περιοχών αυξημένων διαμηκτικών τάσεων προτείνονται ως δύο ακόμη πιθανοί μηχανισμοί οι οποίοι μπορούν να ερμηνεύσουν το υπό συζήτηση φαινόμενο [2].

Θερμικό πεδίο / flame structure

Παράλληλα με την μορφολογία του ροϊκού πεδίου η πειραματική διερεύνηση της αντιδρώσας ροής ολοκληρώνεται με την περιγραφή της μορφής της φλόγας. Γι' αυτό τον τύπο καυστήρα υπάρχουν διαθέσιμες στη βιβλιογραφία πρότυπες δοκιμές αντιδρωσών και μη ροών για ένα ευρύ φάσμα αριθμών

συστροφής και Reynolds. Για διευκόλυνση μάλιστα της σχετικής συζήτησης που θα ακολουθήσει παραθέτουμε στην Εικόνα 15 τις οκτώ περιπτώσεις τις οποίες έχουμε καταγράψει και στον Πίνακα 1 ως αποτέλεσμα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης.



Εικόνα 15. Μορφή της φλόγας για πρότυπες περιπτώσεις αντιδρώσας ελεύθερης ροής σε καυστήρα τύπου Sydney. Πηγή: <http://sydney.edu.au/engineering/aeromech/thermofluids/swirl.htm>

Μεταξύ των δοκιμών και των παραμετρικών μελετών οι οποίες έγιναν με σκοπό τη διερεύνηση της ευστάθειας της φλόγας (blow off limits) [4] αλλά και της ίδιας της ροής [5,3] τρεις είναι οι κύριες παρατηρήσεις που χρήζουν κατά την κρίση μας ιδιαίτερης αναφοράς: (i) Ο αριθμός συστροφής δεν είναι ο μοναδικός παράγοντας ο οποίος ευνοεί και εντέλει καθορίζει την ύπαρξη δευτερεύουσας ζώνης ανακυκλοφορίας και δημιουργίας στένωσης στη φλόγα. Χαρακτηριστική περίπτωση είναι η μορφή της SMH2 στην οποία και τα δύο αυτά χαρακτηριστικά απουσιάζουν σε σύγκριση με την χαμηλότερης συστροφής SMH1 [38], (ii) η εμφάνιση φαινομένων αστάθειας δεν είναι απαραίτητο γνώρισμα φλόγας στην οποία παρατηρείται στένωση (collar-like flow) ή τοπική σβέση της φλόγας (localized extinction) [38], (iii) το επίπεδο του αριθμού συστροφής δεν μπορεί από μόνο του να δικαιολογήσει τα χρονικά μεταβαλλόμενα χαρακτηριστικά της ροής με τα οποία συσχετίζεται η τοπική σβέση της φλόγας. Όπως και στην προηγούμενη παρατήρηση αν συγκρίνουμε τις SM1, SM2 οι οποίες λειτουργούν σε υψηλότερο αριθμό συστροφής απ' ότι η SMH1 θα διαπιστώσουμε πως η εμφάνιση της χαρακτηριστικής στένωσης είναι αισθητά πιο ασθενής.

3.2 Υπολογιστικές Προσομοιώσεις Καυστήρων Συστροφής

Παράλληλα με τις πειραματικές διερευνήσεις της συστροφής και των επιπτώσεων της στο ροϊκό και θερμικό πεδίο τα τελευταία χρόνια έχουν αυξηθεί οι προσπάθειες αξιοποίησης υπολογιστικών εργαλείων CFD. Η χρήση τέτοιου είδους εμπορικών πακέτων για τις ανάγκες σχεδιασμού προφανώς δεν μπορεί να υποκαταστήσει τις πειραματικές παρατηρήσεις, αποδεικνύονται όμως συχνά χρήσιμα μέσα, εφόσον έχει πιστοποιηθεί η ακρίβεια τους ώστε να αξιολογηθεί μια σειρά παραμέτρων που διαφορετικά θα απαιτούσαν μεγάλο αριθμό πειραμάτων. Έτσι, στη βιβλιογραφία ο ενδιαφερόμενος ερευνητής μπορεί να βρει από μελέτες που επιχειρούν να ελέγξουν την επίδραση **κατασκευαστικών** παραμέτρων όπως: η διάμετρος του αγωγού καυσίμου, η θέση του, το σχήμα του, η διαμόρφωση του ακροφυσίου του καυστήρα την επίδραση παραμέτρων **λειτουργίας** όπως: ο λόγος ισοδυναμίας, ο αριθμός συστροφής, την χρήση άλλων τεχνικών **μείωσης των εκπομπών και σταθεροποίησης της φλόγας** βλ. άλλα μίγματα καυσίμου ή air staging τεχνικές μέχρι διερευνήσεων των ίδιων των **μοντέλων των εξισώσεων μεταφοράς**. Από τον παραπάνω όγκο εργασιών στη βιβλιογραφική ανασκόπηση που θα ακολουθήσει θα εστιάσουμε στις υπολογιστικές προσομοιώσεις των φλογών μεθανίου οι οποίες άλλωστε θα αποτελέσουν κύριο τμήμα των παραμετρικών διερευνήσεων της παρούσας εργασίας.

Αρκετοί ερευνητές έχουν επικεντρωθεί στα χαρακτηριστικά της καύσης μεθανίου και των παραγόμενων εκπομπών σε καυστήρες συστροφής. Οι Khelil et al. [29] παρουσίασαν την αριθμητική πρόβλεψη φλογών διάχυσης φυσικού αερίου σε περιορισμένη ροή χρησιμοποιώντας μοντέλο PDF για την πρόβλεψη των εκπομπών NOx. Υπολογιστικές προσομοιώσεις υλοποιήθηκαν και από τους Keramida et al. [26] ώστε να αξιολογηθεί η επίδραση της μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολία χρησιμοποιώντας τα μοντέλα discrete transfer και το six-flux σε έναν αξονοσυμμετρικά μοντελοποιημένο φούρνο. Το αποτέλεσμα ήταν πως τα δύο μοντέλα είχαν παρόμοια συμπεριφορά και ήταν σε συμφωνία με τις αντίστοιχες πειραματικές προβλέψεις. Οι Wilkes et al. [55] μέτρησαν την αξονική και ακτινική κατανομή της θερμοκρασίας σε έναν αξονοσυμμετρικό φούρνο φυσικού αερίου γνωστό και ως «Harwell furnace». Οι Khanafer και Aithal [28] μελέτησαν αριθμητικά τις επιπτώσεις της συστροφής και της θερμοκρασίας του τοιχώματος του καυστήρα στον σχηματισμό NOx. Ειδικότερα, ανέφεραν πως η συστροφή ενισχύει την ανάμιξη των ρευμάτων καυσίμου-αέρα και συμβάλλει στη μείωση των παραγόμενων εκπομπών. Οι Jiang et al. [24] ασχολήθηκαν με τον σχηματισμό NO σε φλόγες συστροφής μεθανίου εξετάζοντας την συσχέτιση του με το μοντέλο τύρβης και την παραγωγή NOx.

Υπολογιστική προσομοίωση της επίδρασης της τύρβης στην παραγωγή NOx και αιθάλης (soot) πραγματοποιήθηκε από τους Saqr et al. [47] σε τυρβώδεις φλόγες μεθανίου-αέρα. Τα αποτελέσματα τους έδειξαν πως η αύξηση της τύρβης στην παροχή του οξειδωτικού μειώνει τον ρυθμό σχηματισμού των προϊόντων της καύσης. Οι Al-Omari et al. [7] προσέγγισαν αριθμητικά φλόγες διάχυσης μεθανίου και εκτίμησαν πως επιδρούν οι διαδικασίες σχηματισμού αιθάλης στη μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία στα τοιχώματα του θαλάμου καύσης. Οι Pbas et al. [22,23] ενδιαφέρθηκαν να προσεγγίσουν αριθμητικά την επίδραση της μεταβολής της σύστασης του προς καύση μίγματος από καθαρό υδρογόνο σε φυσικό αέριο ως προς το πεδίο της θερμοκρασίας και τις εκπομπές NOx. Η μελέτη αυτή κατέληξε πως τόσο η θερμοκρασία όσο και οι συγκεντρώσεις των βασικών ρυπαντών (CO, NOx) βρίσκονται σε ικανοποιητική συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα. Τέλος, οι Khalil et al. [27] μελέτησαν πειραματικά και αριθμητικά πως διαφορετικοί τρόποι έγχυσης του καυσίμου επηρεάζουν την εκπομπή ρύπων σε έναν κυλινδρικό καυστήρα. Τα ευρήματα κατέδειξαν πως οι εκπομπές NOx ήταν χαμηλές τόσο για τον προαναμεμειγμένο τύπο καύσης όσο και σε αυτόν της διάχυσης.

Διαπιστώνοντας την ευρύτητα των δυνατοτήτων των πακέτων CFD σε παρόμοιο πλαίσιο με τις μελέτες που προαναφέρθηκαν, στην παρούσα θα επιχειρήσουμε να προσεγγίσουμε υπολογιστικά την ψυχρή και θερμή λειτουργία εργαστηριακού καυστήρα συστροφής μεθανίου. Για τον σκοπό αυτό όπως έχει ήδη αναφερθεί θα δομήσουμε μέσω του εμπορικού πακέτου ANSYS CFX Version 17 ένα υπολογιστικό μοντέλο το οποίο να περιγράφει τα φαινόμενα μεταφοράς της υπό μελέτη ροής. Εξαιτίας της πολύπλοκης φύσης τους ιδιαίτερα στην περίπτωση της αντιδρώσας ροής, η ακρίβεια των υπολογισμών σε τέτοιου είδους ροές εναπόκειται στην προσεκτική επιλογή των μοντέλων των εξισώσεων μεταφοράς. Έτσι, συμπληρωματικά με την σύντομη παρουσίαση αναφορικά με τη χρήση των υπολογιστικών εργαλείων στην μελέτη των φλογών μεθανίου στη συνέχεια θα εστιάσουμε στα χαρακτηριστικά των υπολογιστικών μοντέλων που θα δοκιμάσουμε στην εργασία (Κεφάλαιο 5) όπως αυτά αναλύθηκαν σε σχετικές με το αντικείμενο μελέτες στη βιβλιογραφία.

Το πρώτο βήμα στην μοντελοποίηση τέτοιων ροών είναι η επιλογή μοντέλου τύρβης. Βιβλιογραφικά είναι γενικά αποδεκτό πως το μοντέλο των δύο εξισώσεων k-ε [32] λειτουργεί σχετικά ικανοποιητικά στην προσομοίωση απλών τυρβωδών ροών. Ωστόσο, για τη προσομοίωση αντιδρωσών ροών με συστροφή φαίνεται πως είναι ανεπαρκές. Οι Sharif et al. [50] συγκριμένα, κατέληξαν πως το μοντέλο k-ε υπερεκτιμά το επίπεδο της τυρβώδους διάχυσης εξαιτίας της παραδοχής του ισοτροπικού ιξώδους των δινών, πράγμα που δεν υφίσταται στις περισσότερες τυρβώδεις δομές της ροής όταν αυτή υπόκειται σε συστροφή. Για την αντιμετώπιση αυτής της αδυναμίας σε αρκετές περιπτώσεις ροών χρησιμοποιούνται τροποποιήσεις του όπως το RNG k-ε και το σχετικά νέο realizable k-ε με εξίσου ικανοποιητικά αποτελέσματα για προβλέψεις σε ροές με υψηλό βαθμό παραμόρφωσης (high strain rate). Αριθμητική μελέτη στην οποία χρησιμοποιήθηκε το realizable k-ε συναντάμε στην εργασία των AbdelGayed et al. [1] με σκοπό την προσομοίωση ροής υψηλής συστροφής σε καυστήρα αεριοστροβίλου. Τα αποτελέσματα έδειξαν αρκετά καλή συμφωνία με τις πειραματικές μετρήσεις της αξονικής και εφαπτομενικής συνιστώσας της ταχύτητας σε βαθμό που να αποτυπώνει ικανοποιητικά την ζώνη ανακυκλοφορίας. Σχετικά με το RNG k-ε συγκριτικές μελέτες εμφανίζονται ήδη από την δεκαετία του 1990 με τον Benim (1990) και τους Widmann et al. (1999b) ο οποίοι εφάρμοσαν απλό k-ε και RNG k-ε καταδεικνύοντας την ανωτερότητα του δεύτερου στην πρόβλεψη του πεδίου ροής. Παρόμοια σε πιο σύγχρονες μελέτες οι Hatzia Apostolou et al. (2006) [20] μελετώντας τις δυνατότητες των μοντέλων k-ε, RNG k-ε και realizable k-ε σε φλόγες διάχυσης καυστήρα συστροφής για αριθμούς συστροφής $S = 0.65$ και 0.90 κατέληξαν πως και τα τρία μοντέλα ακολουθούν ποιοτικά τις πειραματικές μεταβολές, η εφαρμογή όμως των RNG και realizable μας δίνει πιο ρεαλιστικά ποσοτικά αποτελέσματα με το RNG k-ε να υπερέχει ελαφρά.

Σε περιπτώσεις καύσης εξίσου σημαντικό ρόλο με το μοντέλο τύρβης παίζει και το μοντέλο που προσομοιώνει την αλληλεπίδραση τυρβωδών φαινομένων και χημικής κινητικής. Συγκεκριμένα αναφέρεται ότι το Eddy-Dissipation Concept model (EDM) [35] οδηγεί σε καλές προβλέψεις ειδικά όταν συνδυάζεται με λεπτομερή χημικό μηχανισμό (20 χημικά είδη) όπως υλοποιήθηκε από τους De et al. [16] για την προσέγγιση των πειραματικών δεδομένων του Delft Jet-in-Hot-Coflow. Η προσομοίωση με βάση το EDM κρίθηκε επαρκής προβλέποντας σωστά την πτωτική τάση του ύψους ανύψωσης της φλόγας (liftoff height) σε συνάρτηση με τον αριθμό Reynolds. Πολλές φορές όταν απαιτείται από τα χαρακτηριστικά της ροής να δοθεί μεγαλύτερη βαρύτητα στην επίδραση της χημικής κινητικής της καύσης χρησιμοποιείται και το Finite-Rate/Eddy-Dissipation model (FR/EDM). Αρκετά απλό και υπολογιστικά οικονομικό όπως και το EDM έχει αναφερθεί [44, 34] πως προσεγγίζει αρκετά καλά την αλληλεπίδραση τύρβης-καύσης σε ροές με συστροφή. Ειδικότερα, στην εργασία των Nogenmyr et al. [44], όπου το FR/EDM συνδυάστηκε με ένα διβηματικό μηχανισμό για την καύση του μεθανίου οι προβλέψεις του πεδίου των ταχυτήτων, των θερμοκρασιών και της κατανομής καυσίμου κρίθηκαν ικανοποιητικές.

Τέλος, μια άλλη παράμετρος που θα πρέπει να λάβουμε υπόψη μας στην προσομοίωση της τυρβώδους καύσης με συστροφή είναι τα μοντέλα ακτινοβολίας. Η αναγκαιότητα ενσωμάτωσής τους στο τελικό υπολογιστικό μοντέλο μαρτυρείται από σχετικές μελέτες [21, 40] στις οποίες αποδείχθηκε ότι ένα σημαντικό ποσοστό της παραγωγής θερμότητας ειδικά σε ροές σε θάλαμο καύσης πραγματοποιείται κατ' αυτό τον τρόπο. Σε περίπτωση μάλιστα που δεν ληφθεί υπόψη καταλήγουν πως η προσέγγιση του θερμικού πεδίου και των παραγόμενων εκπομπών μπορεί να καταστεί ποσοτικά αρκετά ανακριβής. Αναλυτικότερα, σε επίπεδο επιλογής μοντέλου η πιο συνήθης επιλογή είναι αυτή του P1 λόγω της ακρίβειας και της υπολογιστικής οικονομίας που μας προσφέρει. Οι Yilmaz et al. [57] εξέτασαν την επίδραση του μοντέλου τύρβης και του μοντέλου ακτινοβολίας σε φλόγες διάχυσης προπανίου και υδρογόνου με συστροφή. Δύο διαφορετικά μοντέλα ακτινοβολίας χρησιμοποιήθηκαν το P1 και το Discrete Transfer Radiation Model (DTRM). Τα αποτελέσματα της παραμετρικής διερεύνησης έδειξαν πως οι βαθμίδες της θερμοκρασίας προσεγγίστηκαν διαφορετικά με το P1 να είναι εκείνο που συνολικά απέδωσε καλύτερα τις πειραματικές μεταβολές σε διάφορες αξονικές αποστάσεις εντός του θαλάμου καύσης.

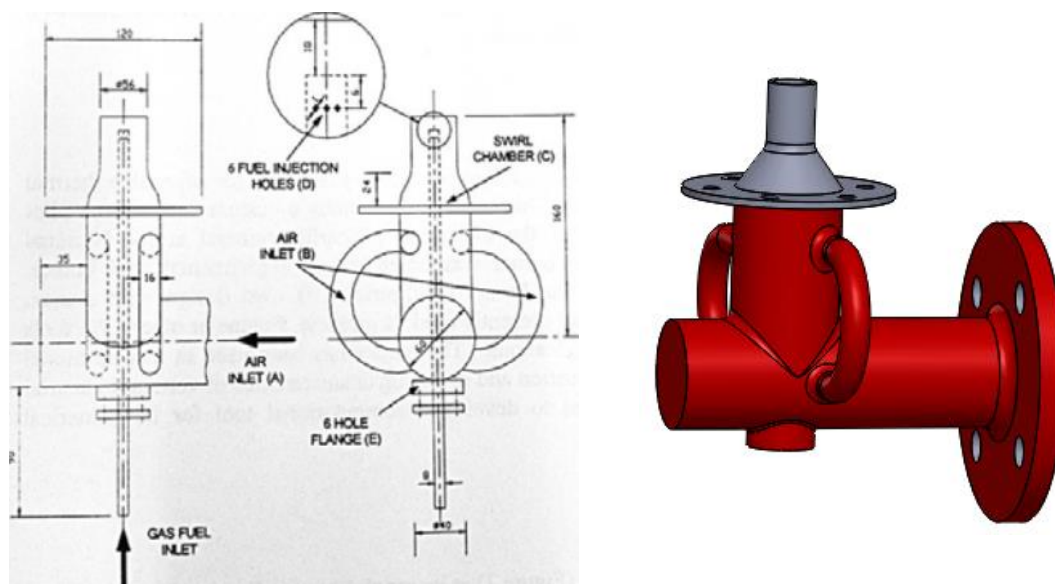
4. Πειραματικές Μετρήσεις στον Καυστήρα Συστροφής του Εργαστηρίου ΕΜΣΚ

4.1 Γενικά Χαρακτηριστικά

Οι παραμετρικές μελέτες οι οποίες έλαβαν χώρα (Κεφάλαιο 6) με σκοπό την δημιουργία ενός ικανού προς πρόβλεψη υπολογιστικού μοντέλου κρίθηκαν με βάση την απόκλιση τους από μία σειρά πειραματικών δεδομένων. Στο παρόν κεφάλαιο θα περιγράψουμε τον εργαστηριακό καυστήρα, την μετρητική διαδικασία μαζί με τις μετρητικές διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν και τέλος θα παρουσιάσουμε τα πειραματικά δεδομένα τα οποία λάβαμε υπόψη για τις ανάγκες πιστοποίησης του μοντέλου μας.

4.1.1 Γεωμετρικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά

Ο εργαστηριακού τύπου καυστήρας στον οποίο πραγματοποιήθηκε η πειραματική μελέτη είναι της μορφής που απεικονίζεται παρακάτω (Εικόνα 16).



Εικόνα 16. (α) Μηχανολογικό σχέδιο του εργαστηριακού καυστήρα συστροφής, (β) CAD αναπαράσταση του εργαστηριακού καυστήρα.

Ειδικότερα, ο αέρας εισέρχεται από τον κάθετο στον άξονα του καυστήρα αγωγό Air inlet (A) και μέσω των επαφτομενικών αγωγών Air inlet (B) οδηγείται στον κύριο δακτυλιωτό αγωγό Swirl chamber (C) αποκτώντας την απαιτούμενη συστροφή. Ο θάλαμος αυτός, διαμέτρου 55mm, περιέχει τον αγωγό μεταφοράς καυσίμου Gas fuel inlet εσωτερικής διαμέτρου 7mm και ουσιαστικά είναι ο χώρος στον οποίο πραγματοποιείται η ανάμιξη καυσίμου-οξειδωτικού πριν από την εκροή και την ανάφλεξη του στο περιβάλλον. Η ανάμιξη επιτυγχάνεται σε μία περιοχή περίπου 13.5mm πριν το στόμιο του καυστήρα με δεδομένο πως εκεί ο αγωγός καυσίμου φέρει 6 κυκλικά διατεταγμένες οπές διαμέτρου 1mm (fuel injection holes (D)).

4.1.2 Μετρητική διαδικασία

Για τον χαρακτηρισμό του ροϊκού και θερμικού πεδίου απαιτήθηκε η χρησιμοποίηση μιας σειράς μετρητικών όπως: α) θερμό νήμα (hot wire anemometer) για τη μέτρηση της ταχύτητας του μίγματος στην μη αντιδρώσα ροή, β) S τύπου θερμοζεύγος για τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας και (γ) χρωματογράφος αερίων (gas chromatograph) για την εκτίμηση της συγκέντρωσης των διαφορετικών συστατικών που συνιστούν τις αέριες εκπομπές.

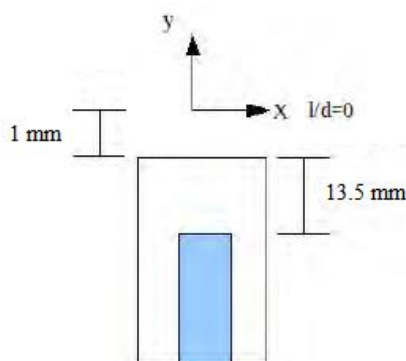
Στη επόμενη ενότητα θα παρουσιάσουμε πιο αναλυτικά το πώς υλοποιήθηκε η παραμετρική μελέτη χάρη στην οποία προέκυψε ο πειραματικός χαρακτηρισμός των ροών τις οποίες θα επιχειρήσουμε να προσεγγίσουμε και υπολογιστικά. Από αυτές η σειρά δεδομένων που αναφέρεται ως μονοστατική μη-αντιδρώσα ροή ή αλλιώς ροή αέρα-αέρα υλοποιήθηκε στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας ενώ

τα δεδομένα της πολυσυστατικής αντιδρώσας και μη ροής λήφθηκαν από την βιβλιογραφία. Συγκεκριμένα, πρόκειται για πειραματικά δεδομένα τα οποία προέκυψαν από την εργασία της υποψήφιας διδάκτορος Larisa Leon de Syniawa στα πλαίσια του έργου CM0901 COST στο Εργαστήριο Ετερογενών Μιγμάτων και Καύσης του Ε.Μ.Π.

4.1.2.1 Μονοσυστατική μη-αντιδρώσα ροή

Στις περιπτώσεις μη-αντιδρώσας ροής ανεξαρτήτως σύστασης μίγματος η πειραματική διερεύνηση της λειτουργίας του καυστήρα συνίσταται στον υπολογισμό της ολικής ταχύτητας της ροής σε διαφορετικές θέσεις τόσο κατά τον x όσο και κατά τον y άξονα. Σε αυτή τη σειρά μετρήσεων ο καυστήρας λειτουργεί με αέρα στους αγωγούς του οξειδωτικού (80 slpm) και του καυσίμου (10 slpm).

Για τον υπολογισμό της κατανομής της ταχύτητας της ροής χρησιμοποιήθηκε θερμό νήμα το οποίο προσαρμόστηκε σε βηματικό μηχανισμό ώστε να είναι εφικτή η ακριβής μέτρηση της ταχύτητας και στους δύο άξονες (x, y). Πιο συγκεκριμένα ως αφετηρία, σημείο (0,0), θεωρήσαμε την τοποθέτηση του μετρητικού στη θέση 1mm πάνω από το μέσο του ακροφυσίου του καυστήρα (Εικόνα 17) και ακολούθως μετρήσαμε την τιμή της ταχύτητας στις αξονικές θέσεις: y (l/d) = 5mm (0.22), 15mm (0.59), 25mm (0.96), 50mm (1.89), 80mm (3.00), 110mm (4.11) και 140mm (5.22). Σε καθεμία από αυτές μετακινούσαμε το μετρητικό κατά την ακτινική διεύθυνση x με ένα σταθερό βήμα συνήθως 2mm ή 4mm προς μία συγκεκριμένη και σταθερή σε όλες τις μετρήσεις κατεύθυνση έχοντας υποθέσει ότι η κατανομή των ταχυτήτων είναι συμμετρική. Τέλος, διαπιστώνοντας τη παρουσία διακυμάνσεων στις μετρήσεις ρυθμίσαμε τη συσκευή ώστε να μας δίνει το χρονικό μέσο όρο των μετρήσεων για $\Delta t = 30s$.



Εικόνα 17. Λεπτομέρεια στην οποία αποτυπώνεται η θεώρηση του σημείου μηδέν για τις ανάγκες των μετρήσεων.

4.1.2.2 Πολυσυστατική ροή

Οι μετρήσεις αυτές έγιναν στα πλαίσια της επιστημονικής δράσης CM0901 COST “Development of detailed kinetic models for cleaner combustion” και συγκεκριμένα αφορούν το σκέλος του πειραματικού χαρακτηρισμού του μίγματος CH₄-αέρα.

Ως προς το κομμάτι της πολυσυστατικής μη αντιδρώσας-ροής χρησιμοποιήθηκε όπως και στην προηγούμενη ενότητα το θερμό νήμα ώστε να υπολογίσουμε την κατανομή της ταχύτητας της ροής σε συγκεκριμένες αξονικές θέσεις: y (l/d) = 0.96mm (0.04), 12.0mm (0.50), 24.0mm (1.0), 48.0mm (2.0). Η θέση αναφοράς l/d = 0 θεωρήθηκε αυτή τη φορά η έξοδος του ακροφυσίου. Με τη βοήθεια λοιπόν του εργαστηριακού βηματικού μηχανισμού υπολογίστηκε κατά την ακτινική διεύθυνση x με βήμα 2mm σε κάθε ένα από τα προαναφερθέντα ύψη η τιμή της ολικής ταχύτητας της ροής.

Αναφορικά με την πολυσυστατική αντιδρώσα ροή οι μετρήσεις επικεντρώθηκαν στην εκτίμηση της θερμοκρασίας και της συγκέντρωσης των αερίων συστατικών χρησιμοποιώντας ένα S τύπου θερμοζεύγος και ένα Agilent 7890A χρωματογράφο αντιστοίχως. Το μετρητικό τοποθετήθηκε στον βηματικό μηχανισμό και έτσι λήφθηκαν οι μετρήσεις θερμοκρασίας και συγκέντρωσης συστατικών και προς τις δύο κατευθύνσεις (θετικά και αρνητικά x) πάνω από το ακροφύσιο του καυστήρα. Συγκεκριμένα, η δειγματοληψία έλαβε χώρα 1mm πάνω από το ακροφύσιο μέσω ενός μη ψυχομένου αισθητήρα Al₂O₃ εσωτερικής διαμέτρου 2mm, ο οποίος οδηγούσε το αέριο δείγμα στο σύστημα ανάλυσης. Μαζί με τον αισθητήρα για την ανάλυση των καυσαερίων είχε τοποθετηθεί στην ίδια θέση

μέτρησης ένα εξωτερικά μονωμένο με κεραμικό θερμοζεύγος έτσι ώστε να είναι δυνατή σε πραγματικό χρόνο η παρακολούθηση της θερμοκρασίας τους.

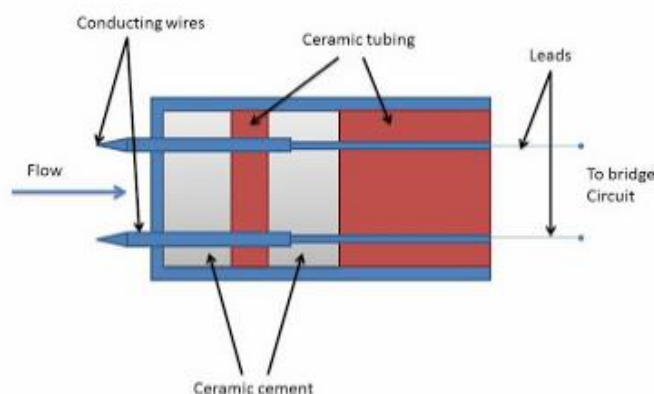
4.2 Μετρητικές Διατάξεις

4.2.1 Θερμό νήμα

Η βασική αρχή λειτουργίας του θερμού νήματος συνίσταται στη μεταφορά θερμότητας από το ηλεκτρικά θερμαινόμενο νήμα στη ροή του διερχόμενου ρευστού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της θερμοκρασίας του νήματος και άρα την μεταβολή της αντίστασης του, γεγονός το οποίο μεταφράζεται σε μεταβολή ηλεκτρικής έντασης, η οποία είναι ισοδύναμη με την ζητούμενη παροχή του εξεταζόμενου ρευστού.

Γενικά τα κύρια μέρη ενός τέτοιου οργάνου όπως απεικονίζεται και παρακάτω είναι:

- Αγωγίμα σύρματα τα οποία προστατεύονται από το κεραμικό-μονωτικό κέλυφος.
- Συρματίδια μολύβδου είναι συνδεδεμένα με μία γέφυρα whitestone έτσι ώστε να μπορούμε να μεταβάλλουμε την αντίσταση της.



Εικόνα 18. Σχηματική απεικόνιση των βασικών χαρακτηριστικών ενός τυπικού θερμού νήματος.

4.2.2 Θερμοζεύγος

Η αρχή λειτουργίας αυτού του οργάνου βασίζεται στην απλή παρατήρηση πως όταν δύο διαφορετικά μέταλλα είναι ενωμένα και εφαρμοστεί διαφορά θερμοκρασίας στα άκρα τους αναπτύσσεται διαφορά δυναμικού. Παρ' όλο που πρόκειται για τάση της τάξης των μV το μέγεθος αυτό είναι ικανό ώστε να υπολογίσουμε την ζητούμενη άγνωστη θερμοκρασία με δεδομένη την θερμοκρασία αναφοράς του οργάνου.

Ανάλογα με το εύρος των θερμοκρασιών στις οποίες μπορούν να λειτουργήσουν καθώς και της ευαισθησίας που εμφανίζουν τα όργανα αυτά διακρίνονται σε διάφορους τύπους. Στην περίπτωση μας όπως έχει αναφερθεί σχετικά χρησιμοποιήθηκε τύπου S θερμοζεύγος, τα οποία γενικά διακρίνονται για την χρήση τους σε μετρήσεις υψηλής θερμοκρασίας (μέχρι 1600°C) αλλά με σχετικά χαμηλότερη ευαισθησία ($10 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$) απ' ό,τι άλλοι διαθέσιμοι τύποι.

4.2.3 Χρωματογράφος αερίων

Στα πλαίσια των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε ο Agilent 7890 A GC χρωματογράφος αερίων ο οποίος είναι εξοπλισμένος με δύο κανάλια για την ανάλυση των κύριων προϊόντων καύσης καθώς και των άκαυστων υδρογονανθράκων. Στο πρώτο κανάλι, τα προς ανάλυση είδη διέρχονται διαμέσου μιας τριχοειδούς στήλης η οποία με την σειρά της συνδέεται με έναν FID ανιχνευτή για την ανάλυση $\text{C}_1\text{-C}_4$ αλκανίων και αλκενίων. Το δεύτερο κανάλι καταλήγει σε έναν TCD ανιχνευτή, ο οποίος είναι υπεύθυνος για την μέτρηση CO_2 , CO , H_2 και σε μία μοριακή στήλη για τον διαχωρισμό O_2 και N_2 [3].

Ο χρωματογράφος αερίων πρόκειται για μία συσκευή η οποία χρησιμοποιείται ευρέως λόγω της εξαιρετικής ευαισθησίας και ανάλυσης της. Συγκεκριμένα, με βάση ένα δείγμα 1μL ή και λιγότερο είναι σε θέση να ανιχνεύσει ποσότητες της τάξης του ppm. Επιπλέον, βρίσκει εφαρμογή σε συστήματα τα οποία περιέχουν συστατικά ακόμη και με παρόμοια σημεία βρασμού. Επιλέγοντας τον κατάλληλο προσροφητή είναι δυνατόν να διαχωρίσει μόρια τα οποία είναι συγγενή τόσο στις φυσικές όσο και στις χημικές τους ιδιότητες.

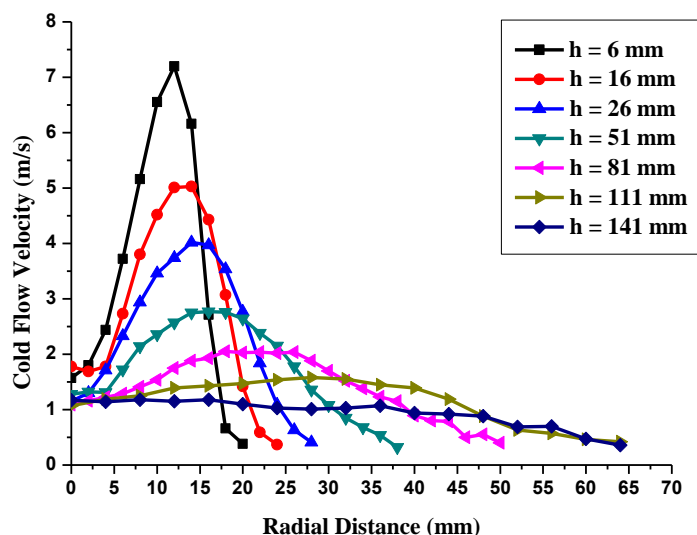
Έκτος από αυτούς τους λόγους η τεχνική αυτή διακρίνεται για την απλότητα της, την σχετικά άμεση απόκριση της και την ευκολία να συνδυαστεί με άλλα ολοκληρωμένα ηλεκτρονικά συστήματα ώστε να παρακολουθούνται οι ποικίλες χημικές διαδικασίες οποίες συμβαίνουν κατά την ανίχνευση και τον διαχωρισμό στις κατάλληλες στήλες του οργάνου. Δοθέντων όλων αυτών των πλεονεκτημάτων καθίστανται σαφείς ορισμένοι από τους λόγους που μας οδήγησαν στη χρήση του στην παρούσα πειραματική μελέτη.

4.3 Αποτελέσματα Μετρήσεων

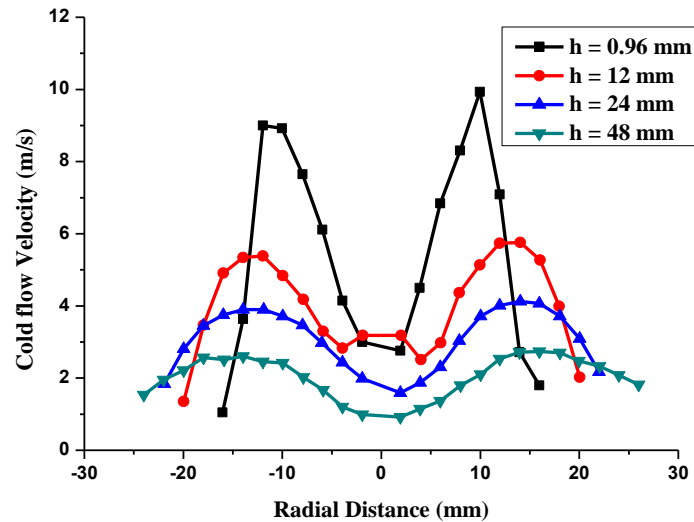
Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα των παραμετρικών μελετών όπως αυτές περιγράφηκαν στις ενότητες 4.1.2.1 και 4.1.2.2.

4.3.1 Κατανομή ταχυτήτων

Το ροϊκό πεδίο για τη μονοσυστατική μη-αντιδρώσα ροή αέρα-αέρα (Εικόνα 19) και για την πολυσυστατική CH₄-αέρα (Εικόνα 20) αποτυπώνεται παρακάτω διαμέσου της ακτινικής κατανομής της ολικής ταχύτητας της ροής.



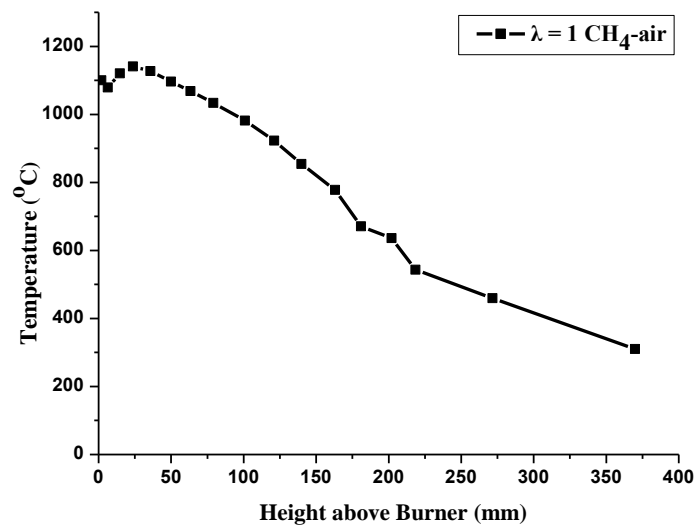
Εικόνα 19. Μεταβολή της ολικής ταχύτητας του λειτουργούντος ρευστού ως προς την ακτινική διεύθυνση για διαφορετικά ύψη (h) πάνω από την έξοδο του καυστήρα. Λόγω συμμετρίας παρουσιάζονται οι μισές κατανομές. Οι μετρήσεις αφορούν μονοσυστατική μη αντιδρώσα ροή αέρα-αέρα με ογκομετρικές παροχές: 80 l/min στην είσοδο του οξειδωτικού και 10 l/min σε αυτή του καυσίμου.



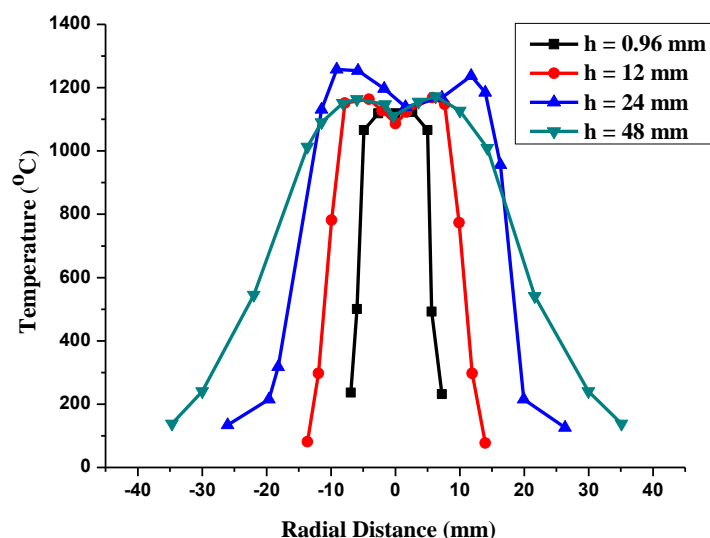
Εικόνα 20. Μεταβολή της ολικής ταχύτητας του λειτουργούντος ρευστού ως προς την ακτινική διεύθυνση για διαφορετικά ύψη (h) πάνω από την έξοδο του καυστήρα. Οι μετρήσεις αφορούν πολυσυστατική μη αντιδρώσα ροή αέρα-μεθανίου με ογκομετρικές παροχές: 80.5 l/min στην είσοδο του οξειδωτικού και 8.36 l/min σε αυτή του καυσίμου.

4.3.2 Κατανομή θερμοκρασιών

Για την περίπτωση της αντιδρώσας ροής CH_4 -αέρα ($\lambda = 1$) με τη βοήθεια του θερμοζεύγους μετρήθηκε η μεταβολή της θερμοκρασίας τόσο κατά την αξονική όσο και κατά την ακτινική διεύθυνση.



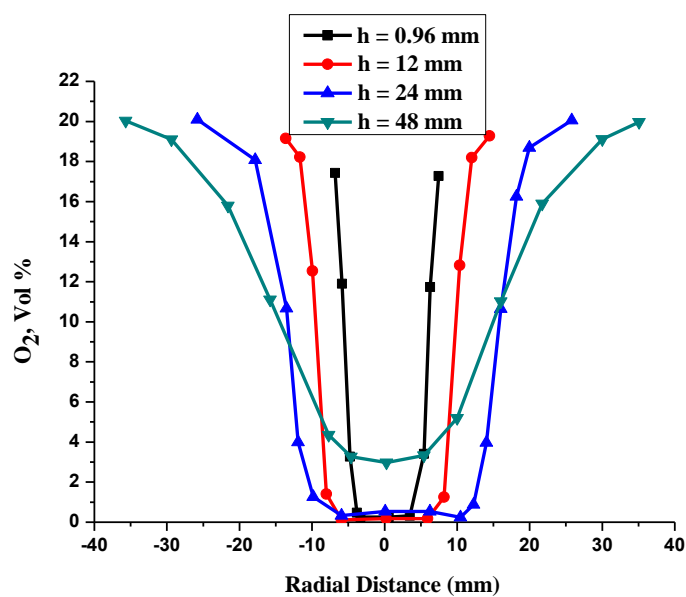
Εικόνα 21. Μεταβολή της θερμοκρασίας ως προς την απόσταση από την έξοδο του καυστήρα για πολυσυστατική αντιδρώσα ροή μίγματος CH_4/Air σε στοιχειομετρική αναλογία $\lambda = 1$.



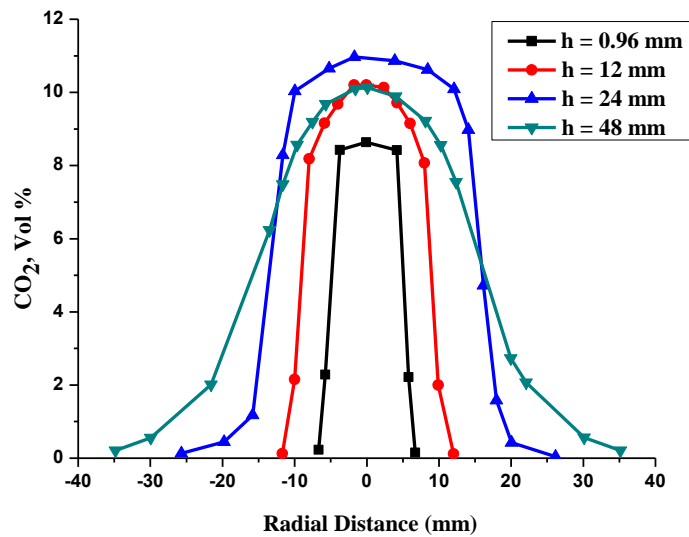
Εικόνα 22. Μεταβολή της θερμοκρασίας ως προς την ακτινική διεύθυνση για διαφορετικά ύψη (h) πάνω από την έξοδο του καυστήρα. Οι μετρήσεις αφορούν πολυσυστατική αντιδρώσα ροή μίγματος CH₄/Air σε στοιχειομετρική αναλογία $\lambda = 1$.

4.3.3 Κατανομή συγκεντρώσεων συστατικών

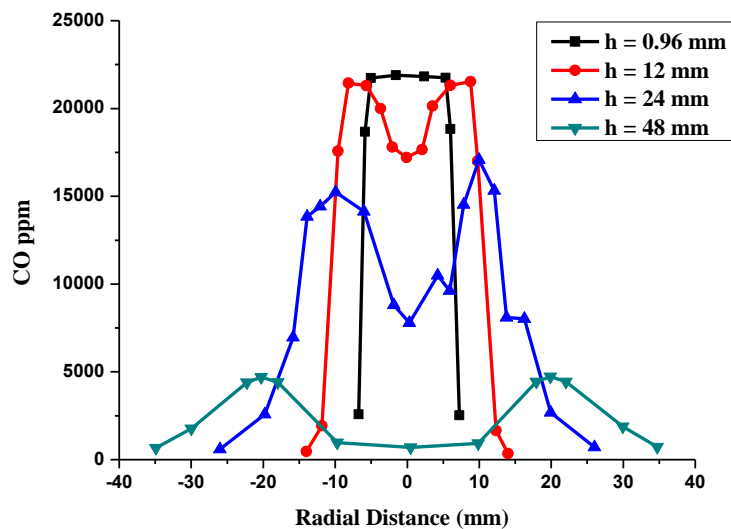
Επιπλέον, ο πειραματικός χαρακτηρισμός των φλογών ολοκληρώθηκε με την μέτρηση μέσω του χρωματογράφου αερίων της σύστασης των αερίων εκπομπών.



Εικόνα 23. Ποσοστιαία μεταβολή της κατ' όγκο συγκέντρωσης του οξυγόνου ως προς την ακτινική διεύθυνση για διαφορετικά ύψη (h) πάνω από την έξοδο του καυστήρα. Οι μετρήσεις αφορούν πολυσυστατική αντιδρώσα ροή μίγματος CH₄/Air σε στοιχειομετρική αναλογία $\lambda = 1$.



Εικόνα 24. Ποσοστιαία μεταβολή της κατ' όγκο συγκέντρωσης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα ως προς την ακτινική διεύθυνση για διαφορετικά ύψη (h) πάνω από την έξοδο του καυστήρα. Οι μετρήσεις αφορούν πολυσυστατική αντιδρώσα ροή μίγματος CH₄/Air σε στοιχειομετρική αναλογία λ = 1.

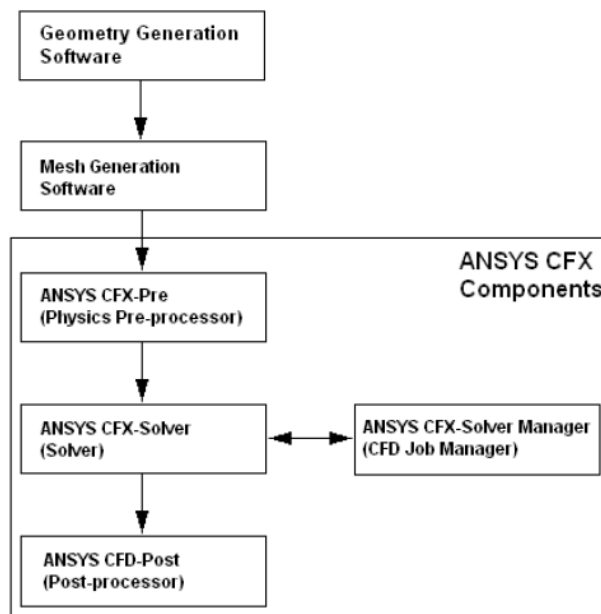


Εικόνα 25. Μεταβολή της κατά ppm συγκέντρωσης των εκπομπών μονοξειδίου του άνθρακα ως προς την ακτινική διεύθυνση για διαφορετικά ύψη (h) πάνω από την έξοδο του καυστήρα. Οι μετρήσεις αφορούν πολυσυστατική αντιδρώσα ροή μίγματος CH₄/Air σε στοιχειομετρική αναλογία λ = 1.

5. Κώδικας Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής ANSYS CFX

Η πορεία δόμησης του τελικού υπολογιστικού μας μοντέλου περιλαμβάνει την επιλογή επιμέρους μοντέλων για τις εξισώσεις μεταφοράς από τις βιβλιοθήκες του CFD εμπορικού πακέτου ANSYS CFX 17. Προτού λοιπόν προχωρήσουμε στην αναλυτική περιγραφή τους θα περιοριστούμε σε μια συνοπτική καταγραφή των δυνατοτήτων του εν λόγω προγράμματος. Το ANSYS CFX πρόκειται στην ουσία για ένα γενικού σκοπού CFD πρόγραμμα το οποίο έχει εφαρμοστεί στην επίλυση ενός ευρέως φάσματος προβλημάτων ροής για πάνω από 20 χρόνια. Κεντρικό στοιχείο του είναι ο παράλληλος επιλύτης χάριν στον οποίο μπορούμε να λύσουμε σε συνδυασμό με την πληθώρα των φυσικών μοντέλων που διαθέτει γρήγορα και αποδοτικά ροές όπως: από στρωτή σε τυρβώδη (περιλαμβάνοντας την μετάβαση), ασυμπίεστη, πλήρως συμπίεστη, ισοθερμοκρασιακή, με μεταφορά θερμότητας με συναγωγή ή/και ακτινοβολία, αντιδρώσα, πολυφασική και πολλές άλλες ακόμη.

Εκτός όμως από ένας πανίσχυρος CFD κώδικας με την ενσωμάτωση του στην πλατφόρμα ANSYS Workbench παρέχει την ευελιξία στον χρήστη στο ίδιο περιβάλλον να δημιουργήσει την γεωμετρία του προβλήματος (ANSYS Design Modeler), να δομήσει το πλέγμα (ANSYS Meshing) και τέλος να ορίσει τις αρχικές, οριακές συνθήκες μαζί με τις παραμέτρους του επιλύτη (CFX Pre). Τα βήματα κατά την δόμηση ενός υπολογιστικού μοντέλου μαζί με τις αντίστοιχες μονάδες του CFX εικονίζονται στο παρακάτω διάγραμμα ροής.



Εικόνα 26. Οι εμπλεκόμενες ενότητες (modules) του ANSYS CFX κατά τη δόμηση ενός υπολογιστικού μοντέλου.

5.1 Μοντελοποίηση Τύρβης

Στα πλαίσια της υπολογιστικής προσομοίωσης της τύρβης επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν τα ακόλουθα μοντέλα:

- RNG k-ε.
- SST k-ω.

Μοντέλο RNG k-ε

Το μοντέλο RNG k-ε περιλαμβάνει τις ίδιες εξισώσεις μεταφοράς (διαφορικές εξισώσεις ισοζυγίων) για την παραγωγή της τυρβώδους κινητικής ενέργειας και της καταστροφής της όπως και στο κλασικό k-ε, με τις σταθερές όμως του μοντέλου να είναι διαφορετικές και τη $C_{\varepsilon 1}$ να έχει αντικατασταθεί από τη συνάρτηση $C_{\varepsilon 1RNG}$.

Η διαφορική εξίσωση λοιπόν για την απορρόφηση της τύρβης σε αυτό το μοντέλο γίνεται:

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\varepsilon RNG}} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1RNG} P_k - C_{\varepsilon 2RNG} \rho \varepsilon + C_{\varepsilon 1RNG} P_{\varepsilon b}) \quad (10)$$

όπου:

$$C_{\varepsilon 1RNG} = 1.42 - f_\eta \quad (11)$$

και:

$$f_\eta = \frac{\eta \left(1 - \frac{\eta}{4.38} \right)}{\left(1 + \beta_{RNG} \eta^3 \right)} \quad (12)$$

$$\eta = \sqrt{\frac{P_k}{\rho C_{\mu RNG} \varepsilon}}$$

με $\beta_{RNG} = 0.012$, $C_{\mu RNG} = 0.085$, $C_{\varepsilon 1RNG} = 1.42 - f_\eta$, $C_{\varepsilon 2RNG} = 1.68$ και $\sigma_{\varepsilon RNG} = 0.7179$.

Μοντέλο SST k-ω

Μια καλή περιοχή εφαρμογής της οικογένειας των προτύπων k-ω του ANSYS CFX είναι κοντά στον τοίχο και συγκεκριμένα για ροές με χαμηλό αριθμό Reynolds. Ειδικότερα τα μοντέλα k-ε για ροές χαμηλού Reynolds μας δίνουν ικανοποιητικές προλέξεις έως και την περιοχή του λογαριθμικού νόμου με δεδομένο ότι $y^+ < 0.2$ ενώ για τα μοντέλα k-ω απαιτείται κατ' ελάχιστο $y^+ < 2.0$.

Στο SST k-ω όπως και στα υπόλοιπα αυτής της κατηγορίας ο συντελεστής τυρβώδους συνεκτικότητας συνδέεται με την τυρβώδη κινητική ενέργεια και την τυρβώδη συχνότητα με βάση τη σχέση:

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega} \quad (13)$$

Στο SST μοντέλο χρησιμοποιούμε τις γνωστές εξισώσεις μεταφοράς για την τυρβώδη κινητική ενέργεια και για την συχνότητα τύρβης ω . Οι σχέσεις αυτές οι οποίες αναπτύχθηκαν πρώτα από τον Wilcox φαίνονται παρακάτω:

k-εξίσωση

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{k1}} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \beta' \rho k \omega \quad (14)$$

ω-εξίσωση

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j \omega) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega 1}} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \alpha_1 \frac{\omega}{k} P_k - \beta_1 \rho \omega^2 \quad (15)$$

με τους παραπάνω συντελεστές να έχουν τις τιμές: $\beta' = 0.09$, $\alpha_1 = 5/9$, $\beta_1 = 0.075$, $\sigma_{\omega 1} = 2$.

Η διαφορά από το κλασικό μοντέλο είναι πως η σταθερά σ_{k1} τίθεται ίση με 1.176.

5.2 Μοντελοποίηση Θερμικής Ακτινοβολίας

Το μοντέλο ακτινοβολίας είναι απαραίτητο σε τέτοιου είδους προσομοιώσεις αφού έχει εκτιμηθεί πως το ποσό της απαγόμενης θερμότητας με ακτινοβολία μπορεί να φτάσει έως και το 33% της ολικής προσφερόμενης θερμικής ισχύος [40]. Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά τρία μοντέλα ακτινοβολίας τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις των φλογών CH₄-αέρα.

5.2.1 Μοντέλο P1

Το μοντέλο διαφορικής προσέγγισης P1 αποτελεί μια απλούστευση της εξίσωσης μεταφοράς μέσω ακτινοβολίας και υποθέτει ότι η ένταση της ακτινοβολίας είναι ισοτροπική ή ανεξάρτητη της κατεύθυνσης σε οποιαδήποτε θέση του χωρίου. Σε αυτό το μοντέλο, όλες οι συνοριακές συνθήκες τύπου ανοίγματος (openings) θεωρούνται σαν σώματα που απορροφούν το σύνολο της ενέργειας που ακτινοβολείται σε αυτά ενώ ταυτόχρονα δρουν και ως μέλανα σώματα ακτινοβολίας συγκεκριμένης θερμοκρασίας αναφοράς.

Η φασματική ακτινοβολία της θερμικής ροής στο όριο διάχυσης για ένα μέσο το οποίο έχει τη δυνατότητα να εκπέμπει, να απορροφά και να σκεδάζει γραμμικά ακτινοβολία μπορεί να υπολογιστεί με βάση τη σχέση:

$$q_{rv} = - \frac{1}{3(K_{av} - K_{sv}) - AK_{sv}} \nabla G_v \quad (16)$$

Η εξίσωση για τη φασματική προσπίπτουσα ακτινοβολία προκύπτει αντικαθιστώντας τους παραπάνω όρους στην εξίσωση μεταφοράς της ακτινοβολίας:

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{3(K_{av} - K_{sv}) - AK_{sv}} \nabla G_v \right) = K_{av} (G_v - 4E_{bv}) \quad (17)$$

όπου A είναι ο γραμμικός συντελεστής ανισοτροπίας.

5.2.2 Μοντέλο Discrete Transfer

Αυτό το μοντέλο βασίζεται στην παρακολούθηση ακτίνων που έχουν αφητηρία τις επιφάνειες συνόρων και διακριτοποιούν τη εξίσωση κατά μήκος των ακτίνων ανάλογα με τα όρια των πεπερασμένων στοιχείων (ΠΣ) που χρησιμοποιούνται. Οι φυσικές ιδιότητες σε κάθε πεπερασμένο στοιχείο θεωρούνται ομοιόμορφες. Αυτές οι ακτίνες μπορούν να παραλληλιστούν με τη μέθοδο παρακολούθησης των φωτονίων που χρησιμοποιείται στο μοντέλο του 'Monte Carlo' και για το λόγο αυτό η περιγραφή των δύο μοντέλων είναι πανομοιότυπη. Η παρακολούθηση γίνεται μόνο μία φορά ανά επανάληψη και στη συνέχεια παράγεται ο όρος πηγής της εξίσωσης διατήρησης της ενέργειας. Για να είναι τα αποτελέσματα ακριβή θα πρέπει τα ΠΣ να επιλεγθούν κατάλληλα έτσι ώστε το πεδίο ακτινοβολίας μέσα σε αυτά να είναι ομογενές.

Το discrete transfer μοντέλο του CFX υποθέτει ότι η σκέδαση είναι ισοτροπική, οπότε η εξίσωση μεταφοράς της φασματικής ακτινοβολίας γράφεται ως εξής:

$$\frac{dI_v(\mathbf{r}, \mathbf{s})}{ds} = -(K_{av} + K_{sv})I_v(\mathbf{r}, \mathbf{s}) + K_a I_b(\nu, T) + \frac{K_{sv}}{4\pi} \int_{4\pi} I_v(\mathbf{r}, \mathbf{s}') d\Omega' + S \quad (18)$$

Υποθέτοντας ότι το σύστημα είναι σχετικά ομογενές έτσι ώστε:

$$I_v(\mathbf{r}) \sim I_v(\mathbf{r} + d\mathbf{r}) \quad q_v^R(\mathbf{r}) \sim q_v^R(\mathbf{r} + d\mathbf{r}) \quad (19)$$

το μοντέλο μας δύναται να επιλυθεί για την ένταση, I_v , αλλά και για τις ακτίνες οποίες σκεδάζονται στα όρια χρησιμοποιώντας την εξίσωση μεταφοράς:

$$I_v(\mathbf{r}, \mathbf{s}) = I_{v_0} \exp(-(K_{av} + K_{sv})s) + I_{bv} (1 - \exp(-K_a s)) + K_{sv} \bar{I}_v \quad (20)$$

όπου:

I_{v_0} : η ένταση της ακτινοβολίας που σκεδάζεται στο σύνορο και

I_v : η μέση ένταση της ακτινοβολίας.

5.2.3 Μοντέλο Monte Carlo

Το μοντέλο Monte Carlo υποθέτει ότι η ένταση της ακτινοβολίας είναι ανάλογη της διαφορικής ροής φωτονίων και θεωρεί το πεδίο ακτινοβολίας ως ένα αέριο που απαρτίζεται από φωτόνια. Για αυτό το θεωρητικό αέριο υπολογίζεται μια πιθανότητα απορρόφησης του φωτονίου ανά μονάδα μήκους σε συγκεκριμένη συχνότητα. Συνεπώς, η μέση ένταση της ακτινοβολίας είναι ανάλογη της απόστασης την οποία έχει διανύσει ένα φωτόνιο σε μοναδιαίο όγκο ανά μονάδα χρόνου. Καθώς το φωτόνιο αποδεσμεύεται από μία επιφάνεια ακολουθεί μία πορεία μέχρι η ενέργεια του να πέσει κάτω από ένα όριο. Καθ' όλη αυτή τη διάρκεια και όποτε υφίσταται μία μεταβολή στην ενέργεια που φέρει, ανανεώνονται τα εμπλεκόμενα μεγέθη. Το σύνολο μεταβολών του φωτονίου δημιουργεί ένα ιστορικό. Για να επιτευχθεί μια αποδεκτή ακρίβεια θα πρέπει να παρακολουθείται το ιστορικό αρκετών φωτονίων (number of histories).

5.3 Μοντελοποίηση Καύσης

Τα μοντέλα καύσης είναι αυτά τα οποία προσομοιώνουν την αντίδραση (κατανάλωση και παραγωγή των αντιδρώντων και προϊόντων αντίστοιχα). Αν και συνήθως τέτοιου είδους προβλήματα αντιμετωπίζονται ως μη-μόνιμα (transient state), στη δική μας περίπτωση θα προσομοιωθεί μόνιμη κατάσταση ροής (steady state). Όπως και στα μη μόνιμα πεδία φλόγας, έτσι και στη μόνιμη ροή θα πρέπει να επιλυθεί η εξίσωση διατήρησης της ενέργειας και θα πρέπει να ληφθούν υπόψη τα ανωστικά φαινόμενα (buoyancy model).

Δύο είδη μοντέλων θερμικής άνωσης υπάρχουν διαθέσιμα στο υπολογιστικό πακέτο: το πλήρες (full) και το μοντέλο Boussinesq. Το πλήρες μοντέλο χρησιμοποιείται κυρίως όταν η πυκνότητα του ρευστού είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας ή της πίεσης, ενώ αυτό του Boussinesq σε αντίθετη περίπτωση. Στην δικιά μας περίπτωση επιλέχθηκε το πλήρες μοντέλο. Γενικά, θα πρέπει να χρησιμοποιείται συμπίεστο ρευστό για τη μελέτη της φλόγας καθώς οι μεταβολές πυκνότητας δε μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες. Μόνο στην περίπτωση που η πυκνότητα υφίσταται πολύ μικρές μεταβολές δύναται το ρευστό να θεωρηθεί και να μοντελοποιηθεί ως ασυμπύεστο. Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε το ρευστό να μοντελοποιηθεί ως ασυμπύεστο με την παραδοχή την αλλαγή της πυκνότητας μέσω της μεταβολής της θερμοκρασίας.

5.2.1 Μοντέλο EDM

Το μοντέλο διασκορπισμού των δινών «Eddy Dissipation» όπως αλλιώς λέγεται βασίζεται στην υπόθεση ότι οι χημικές αντιδράσεις που περιγράφουν το φαινόμενο είναι πολύ πιο γρήγορες από τη ροή. Γεγονός το οποίο υποδεικνύει ότι όταν τα αντιδρώντα σε κάποιο σημείο βρεθούν στην κατάλληλη στοιχειομετρική αναλογία αντιδρούν ακαριαία και παράγουν τα αντίστοιχα προϊόντα (mixed is burnt). Το μοντέλο υποθέτει ότι ο ρυθμός της αντίδρασης σχετίζεται άμεσα με το χρόνο ανάμιξης στην κατάλληλη αναλογία. Όμως στην τυρβώδη ροή, όπως είναι η φλόγα, ο χρόνος ανάμιξης καθορίζεται από τις ιδιότητες της τύρβης. Γίνεται λοιπόν κατανοητό ότι ο ρυθμός αντίδρασης είναι ανάλογος με το χρόνο ανάμιξης ο οποίος καθορίζεται από την κινητική ενέργεια της τύρβης και από τον διασκεδασμό της (dissipation).

$$rate \propto \frac{\varepsilon}{k} \quad (21)$$

Σε αυτό το μοντέλο επιπρόσθετα λαμβάνονται υπόψη δύο συντελεστές περιορισμού: των προϊόντων (coefficient A) και των αντιδρώντων (coefficient B).

Συντελεστής περιορισμού αντιδρώντων A

$$R_k = A \frac{\varepsilon}{k} \min \left(\frac{[I]}{v'_{kl}} \right) \quad (22)$$

όπου το [I] είναι η μοριακή συγκέντρωση του συστατικού I το οποίο αντιστοιχεί στα αντιδρώντα συστατικά της δοσμένης αντίδρασης.

Συντελεστής περιορισμού προϊόντων B

$$R_k = AB \frac{\varepsilon}{k} \left(\frac{\sum_P [I] W_l}{\sum_P v''_{kl} W_l} \right) \quad (23)$$

όπου το P είναι ένας δείκτης που κάθε φορά αντιστοιχεί στα προϊόντα της δοσμένης στοιχειώδους αντίδρασης k.

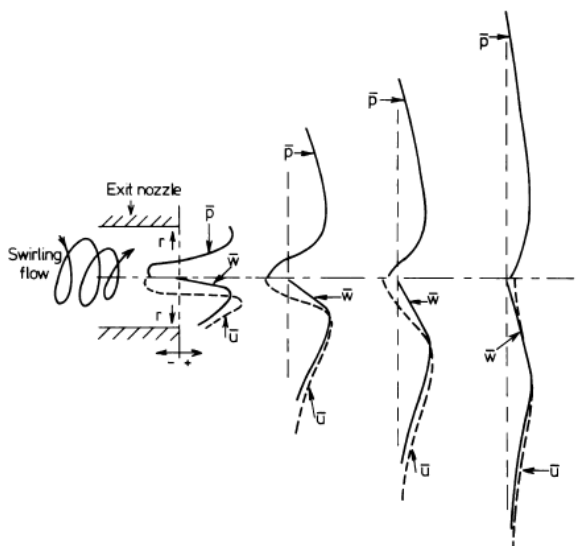
6. Πιστοποίηση Υπολογιστικών Αποτελεσμάτων

6.1 Μονοσυστατική μη-αντιδρώσα ροή

Η ροή την οποία θα προσπαθήσουμε να προσεγγίσουμε υπολογιστικά αντιστοιχεί στη λειτουργία του εργαστηριακού καυστήρα με παροχή αέρα: 80 slpm στον δακτυλιωτό αγωγό και 10 slpm στον αγωγό από τον οποίο κανονικά διέρχεται το καύσιμο. Προσομοιώσαμε αυτή την ροή δοκιμάζοντας διαφορετικά πλέγματα και μοντέλα τύρβης επιδιώκοντας να καταλήξουμε στο πλέγμα εκείνο το οποίο θα χρησιμοποιήσουμε στο υπόλοιπο της εργασίας για την ψυχρή λειτουργία του καυστήρα.

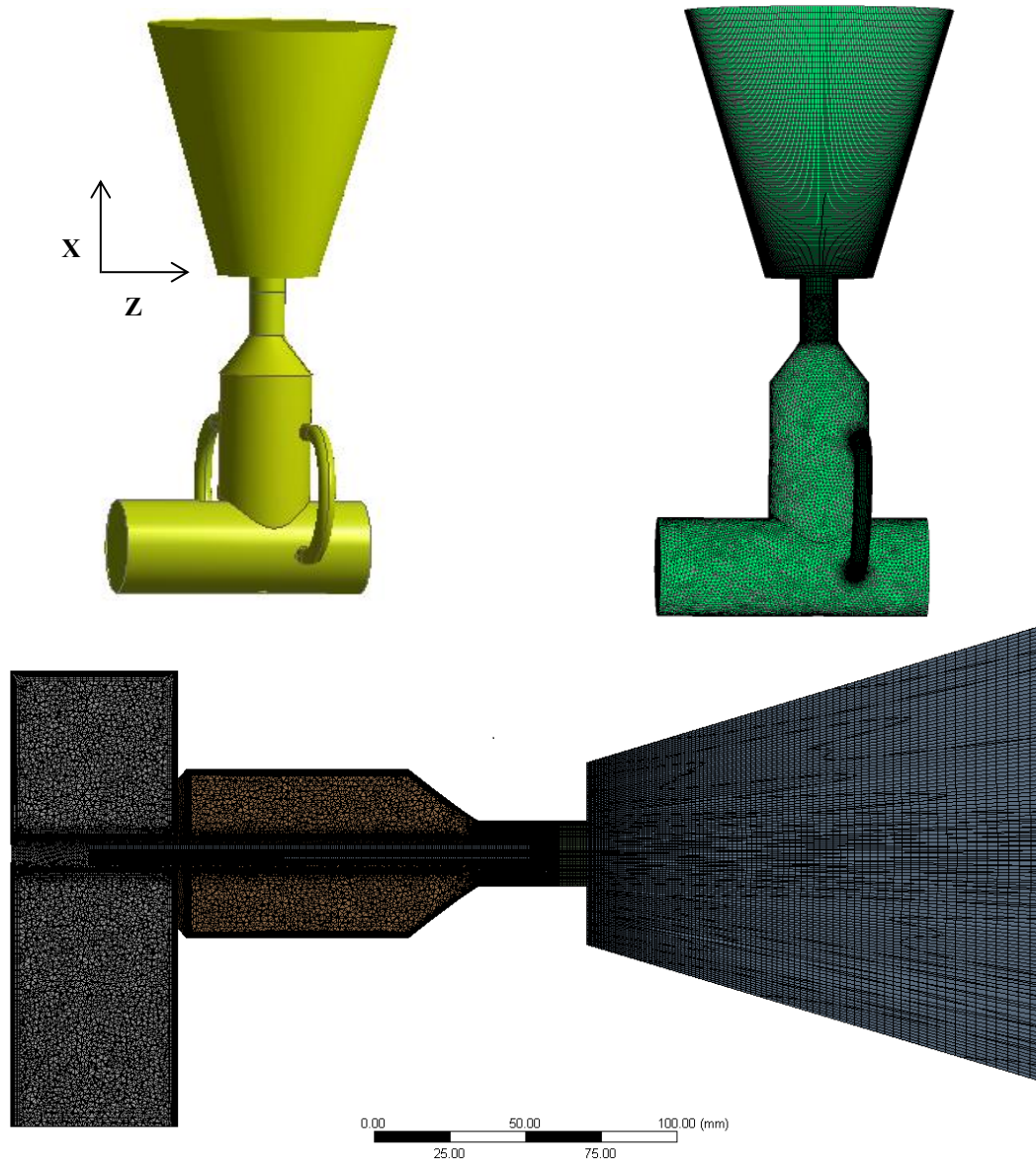
6.1.1 Υπολογιστικό χωρίο

Η δόμηση του υπολογιστικού μας χωρίου συνίσταται στον καθορισμό των περιοχών εντός του καυστήρα από τις οποίες διέρχεται ρευστό (καύσιμο ή οξειδωτικό) μαζί με τον χώρο στον οποίο επιθυμούμε να λυθούν οι εξισώσεις μεταφοράς. Γι' αυτό τον λόγο εκτός από τον όγκο που καταλαμβάνει το ρευστό κατά την λειτουργία του καυστήρα δημιουργήσαμε και ένα τεχνητό σύνορο το οποίο περικλείει μία περιοχή σχήματος κώνου εντός της οποίας αναμένεται να μελετηθεί το φαινόμενο της τυρβώδους καύσης. Η επιλογή του συγκεκριμένου σχήματος έγινε με το σκεπτικό πως η δημιουργία ζώνης ανακυκλοφορίας κατάντη του ακροφυσίου (το πόσο μακριά εξαρτάται από τον βαθμό συστροφής) και η επακόλουθη δημιουργία στροβίλου όπως είναι επόμενο καθιστά πιο έντονο το φαινόμενο της ακτινικής επέκτασης του προφίλ της ταχύτητας.



Εικόνα 27. Σχηματική αναπαράσταση της δημιουργίας της κεντρικής ζώνης ανακυκλοφορίας [19]: (1) Η κατανομή της εφαπτομενικής ταχύτητας προκαλεί μία βαθμίδα πίεσης στην ακτινική διεύθυνση και υπό-ατμοσφαιρική πίεση κοντά στον κεντρικό άξονα, (2) αξονική μείωση της εφαπτομενικής ταχύτητας οδηγεί στη μείωση της ακτινικής κατανομής της βαθμίδας πίεσης στην αξονική διεύθυνση, (3) αξονική βαθμίδα πίεσης δημιουργείται στην κεντρική περιοχή προς το ακροφύσιο προκαλώντας έτσι ροή ανακυκλοφορίας.

Με το πέρας του ορισμού της γεωμετρίας σειρά είχε η γένεση πλέγματος με σκοπό την χωρική διακριτοποίηση του όγκου ελέγχου που ορίστηκε στη γεωμετρία και η επίλυση των εξισώσεων μεταφοράς με βάση τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων. Κατά την κατασκευή του πλέγματος ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε ώστε στις περιοχές γειννίαςσης του ρευστού με τα στερεά τοιχώματα του καυστήρα να τοποθετηθούν ζώνες πιο πυκνού πλέγματος (inflation layers). Επίσης, καταβλήθηκε προσπάθεια να απλοποιησουμε μέσω τομών την γεωμετρία σε απλούστερα σώματα ώστε να είναι εφικτή η μεγαλύτερη δυνατή κάλυψη της με δομημένο πλέγμα.



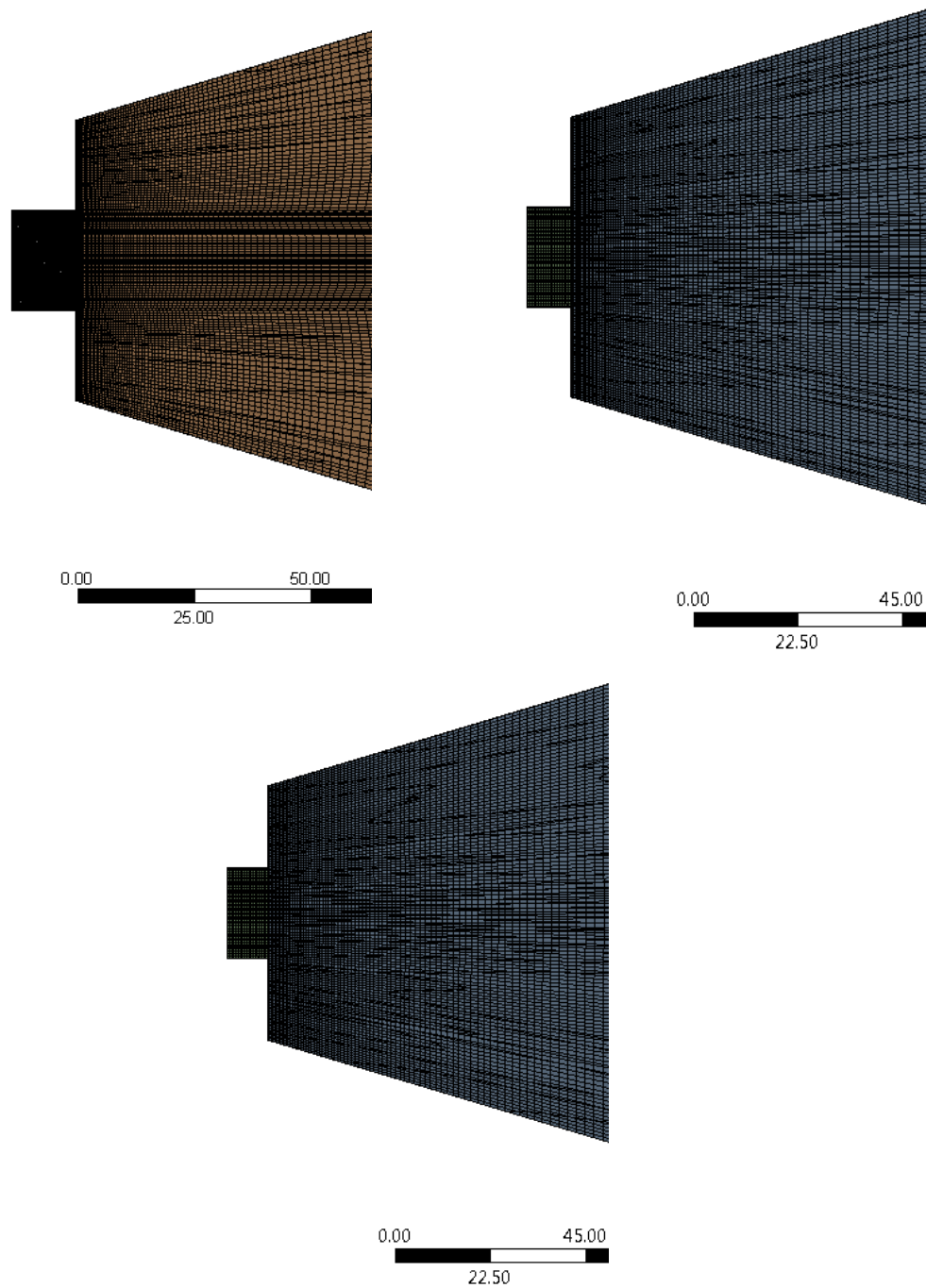
Εικόνα 28.(α) Ο όγκος ελέγχου των ρευστών (καυσίμου και οξειδωτικού), (β) Γενική άποψη της χωρικής διακριτοποίησης (Denser Mesh), (γ) Τομή του πλέγματος Denser Mesh.

Όπως στις περισσότερες αριθμητικές μεθόδους έτσι και εδώ για να είναι εφικτή η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της υπολογιστικής επίλυσης θα πρέπει να έχει προηγηθεί μελέτη ανεξαρτησίας της λύσης από την πυκνότητα του πλέγματος. Εξ' αυτού του λόγου δημιουργήσαμε τρία διαφορετικά πλέγματα τα οποία έχουν μεν παραπλήσιους δείκτες ποιότητας (βλ. Πίνακα 2) επιχειρείται όμως κατά την σταδιακή μετάβαση προς το πιο πυκνό η αντικατάσταση όσο το δυνατόν περισσότερων περιοχών μη δομημένου πλέγματος με δομημένο και η πύκνωση στην περιοχή κατάντη του ακροφυσίου.

Mesh	# Elements	Element Quality	Aspect Ratio	Skewness	Orthogonal Quality
Fully Unstructured (FU)	2464153	0.70971	2.832	0.19836	0.9064
Partially Unstructured (PU)	2572445	0.69094	3.0154	0.19772	0.9247
Denser	3385601	0.69875	2.8955	0.2094	0.90887

Πίνακας 2. Πλήθος στοιχείων και δείκτες ποιότητας για τα πλέγματα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τις ανάγκες της διερεύνησης της ανεξαρτησίας της λύσης.

Εστιάζοντας στην περιοχή πλησίον του ακροφυσίου παρουσιάζουμε ακολούθως τη μορφή των τριών πλεγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν στην παραμετρική μελέτη.



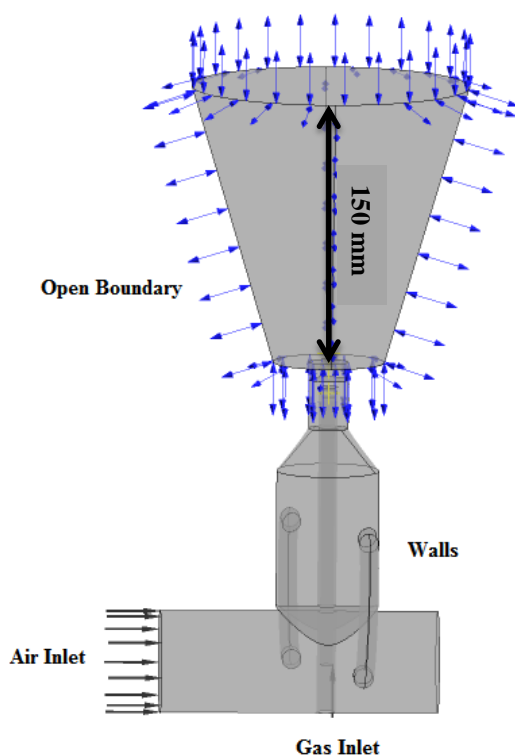
Εικόνα 29. Λεπτομέρεια του πλέγματος από την περιοχή του ακροφυσίου και κατάντη αυτού. (α) FU πλέγμα, (β) PU πλέγμα, (γ) Denser πλέγμα.

Οριακές συνθήκες-Παράμετροι επίλυσης

Επόμενο βήμα μετά την γένεση του πλέγματος είναι ο ορισμός των υλικών που συμμετέχουν στην ροή, των ιδιοτήτων τους και μετέπειτα ο ορισμός της φυσικής του προβλήματος μαζί με τις οριακές συνθήκες του υπολογιστικού χωρίου. Σε αυτή την ενότητα όπου η ροή αφορά την τροφοδοσία αέρα τόσο σε θέση οξειδωτικού όσο και καυσίμου επιλέξαμε ως υλικό αέρα με ιδιότητες ιδανικού αερίου σε θερμοκρασία 25°C και πίεσης 1atm. Στη συνέχεια ορίσαμε ότι η ροή είναι ισοθερμοκαρσιακή, λάβαμε υπόψη μας τυχόν ανωστικά φαινόμενα δηλώνοντας την κατεύθυνση του διανύσματος της επιτάχυνσης της βαρύτητας και επιλέξαμε τις εξισώσεις που αφορούν τη μοντελοποίηση της τύρβης (RNG k-ε, SST k-ω).

Μετά τον χαρακτηρισμό της φυσικής του προβλήματος της τυρβώδους ισοθερμοκρασιακής ροής πρέπει να δηλώσουμε τις οριακές και αρχικές συνθήκες του χωρίου. Ως συνθήκες εισόδου ορίσαμε στην κατάλληλη επιφάνεια ομοιόμορφο κατανομή κάθετης ταχύτητας σε αυτήν ίση με **0.56 m/s** και παρόμοια για τον αγωγό καυσίμου ταχύτητα διέλευσης από τον κεντρικό αγωγό διαμέτρου 7mm τα **4.33 m/s**. Σε αυτές τις περιοχές θεωρήσαμε επιπλέον ως αρχική συνθήκη μέτρια επίπεδα τύρβης (5%). Όλες οι υπόλοιπες εξωτερικές επιφάνειες του καυστήρα θεωρηθήκαν αδιαπέραστα τοιχώματα με μηδενική σχετική πίεση. Ο κώνος όπως προαναφέρθηκε είναι ο χώρος εκροής του μίγματος (εν προκειμένω του αέρα) στο περιβάλλον οπότε οι συνοριακές επιφάνειες ορίστηκαν ως ανοικτές επιφάνειες (openings/ μηδενικό gradient πίεσης) οι οποίες επιτρέπουν τόσο την είσοδο όσο και την έξοδο του αέρα περιβάλλοντος.

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζουμε τις οριακές συνθήκες και τις επιφάνειες στις οποίες αυτές εφαρμόστηκαν.



Εικόνα 30. Παρουσίαση των οριακών συνθηκών.

Το τελευταίο στάδιο πριν την πλήρη κατάστροψη του μοντέλου αφορά τη ρύθμιση των παραμέτρων επίλυσης. Το πρόβλημα προσομοιώθηκε ως σταθερής κατάστασης (steady state) με σχήμα διακριτοποίησης υψηλής ανάλυσης (high resolution) για την τύρβη καθώς και τη συναγωγή (advection). Τα κριτήρια σύγκλισης των εξισώσεων μεταφοράς (μάζας, ορμής και τύρβης) ορίστηκαν στις 1000 επαναλήψεις (μέγιστος επιτρεπόμενος αριθμός επαναλήψεων) και τα μέγιστα υπόλοιπα (residuals) να είναι μικρότερα της τάξης του 10^{-4} . Στην περίπτωση που το κριτήριο τερματισμού είναι διπλό όπως εδώ η επίλυση σταματά όταν ένα εκ των δύο εκπληρωθεί.

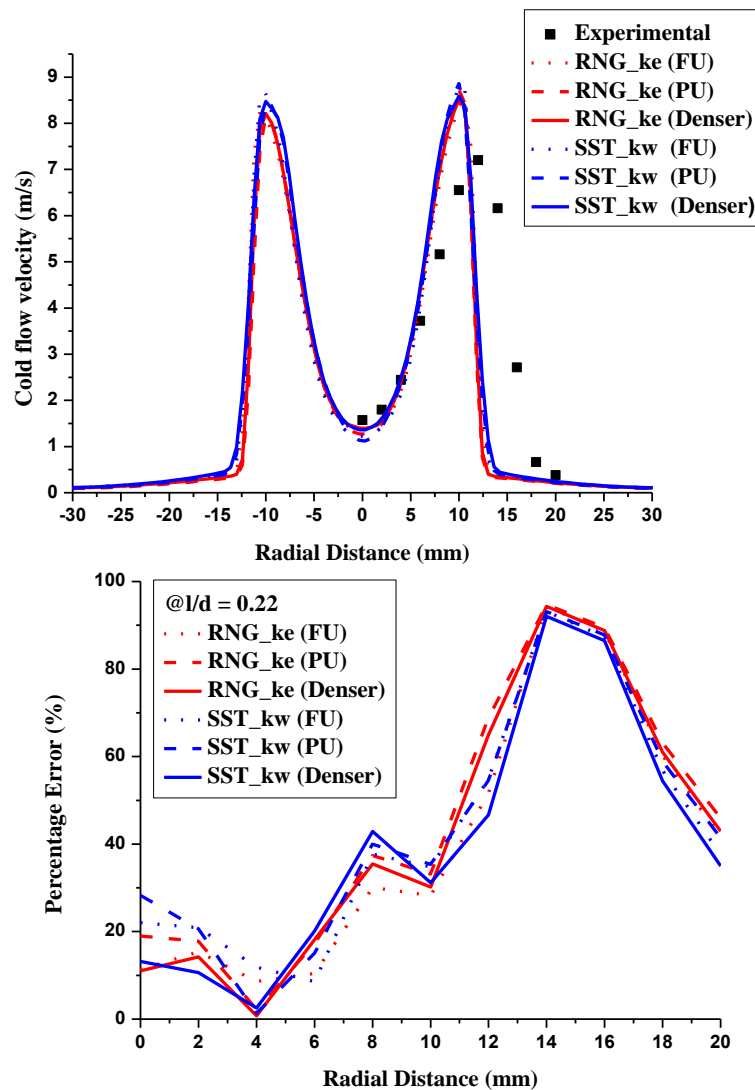
6.1.2 Σύγκριση με πειραματικά δεδομένα

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα της παραμετρικής μελέτης των τριών πλεγμάτων (PU, FU, Denser) και των δύο μοντέλων τύρβης RNG k-ε και SST k-ω σε αντιπαραβολή με τα πειραματικά δεδομένα των προφίλ των κατανομών της ολικής ταχύτητας (βλ. Εικόνα 19).

Δεδομένα Λειτουργίας/ Συνολική Ογκομετρική Παροχή (slpm)	Μοντέλο Τύρβης	Πλέγμα
90	RNG k-ε	FU, PU, Denser
	SST k-ω	FU, PU, Denser

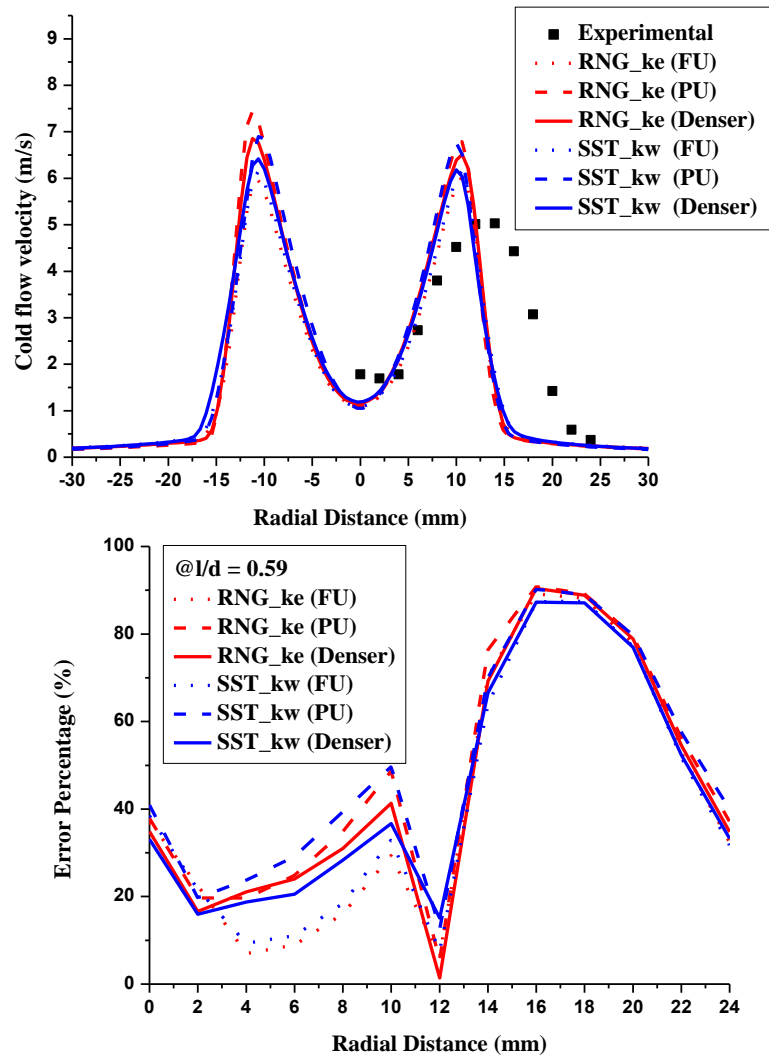
Πίνακας 3. Οι εξεταζόμενες παράμετροι των υπολογιστικών δοκιμών.

Σύγκριση με πειραματικές τιμές για ύψος $l = 6\text{mm}$ ($l/d = 0.22$) πάνω από την έξοδο του καυστήρα



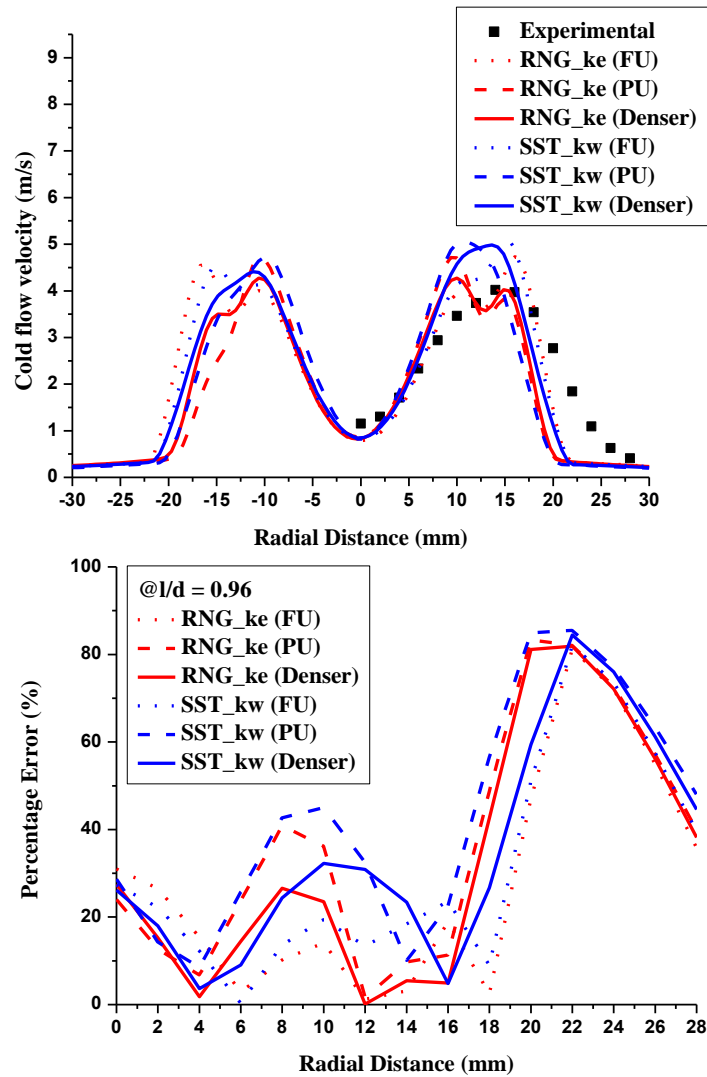
Εικόνα 31. (α) Αριθμητική επίλυση της μονοστατικής μη αντιδράσας ροής αέρα-αέρα χρησιμοποιώντας τα μοντέλα τύρβης: RNG_ke (κόκκινες καμπύλες), SST_kw (μπλε καμπύλες) για τρία διαφορετικά πλέγματα: FU - Fully Unstructured, καμπύλες με τελείες- (2.46E6 elements), PU -Partially Unstructured; καμπύλες με παύλες- (2.57E6 elements), Denser: -πυκνωμένο το PU, συνεχείς καμπύλες- (3.39E6 elements), (β) Ποσοστιαία μεταβολή του σφάλματος των παραπάνω αριθμητικών υπολογισμών ως προς την ακτινική απόσταση από το κέντρο του καυστήρα για ύψος $l = 6\text{mm}$ ($l/d = 0.22$).

Σύγκριση με πειραματικές τιμές για ύψος $l=16\text{mm}$ ($l/d = 0.59$) πάνω από την έξοδο του καυστήρα



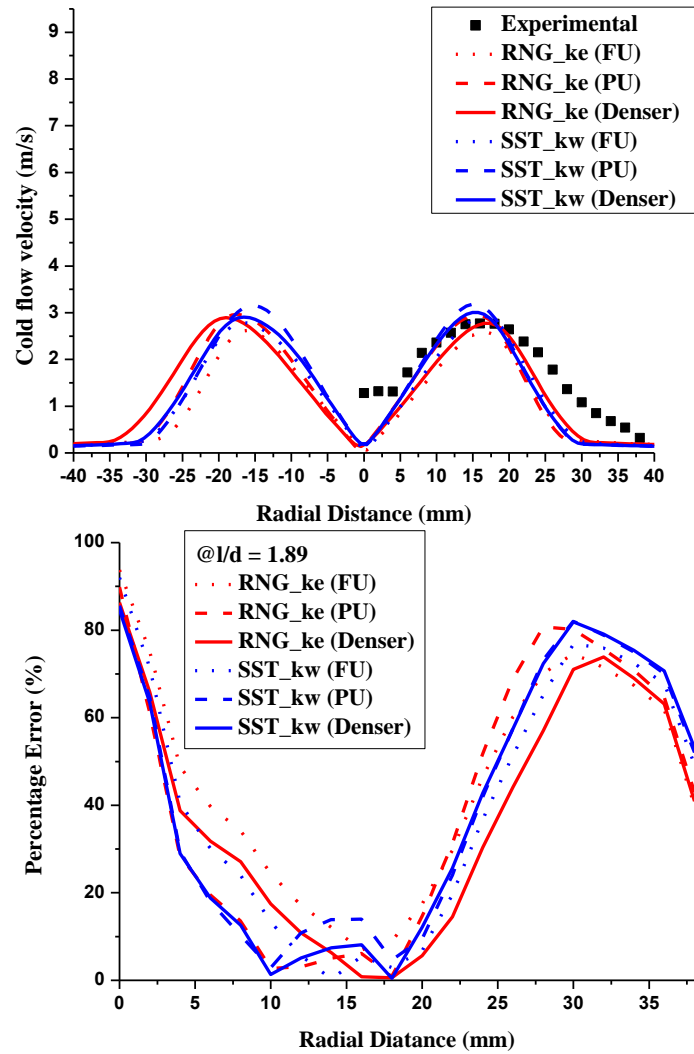
Εικόνα 32. (α) Αριθμητική επίλυση της μονοσυστατικής μη αντιδρώσας ροής αέρα-αέρα χρησιμοποιώντας τα μοντέλα τύρβης: RNG_ke (κόκκινες καμπύλες), SST_kw (μπλε καμπύλες) για τρία διαφορετικά πλέγματα: FU - Fully Unstructured, καμπύλες με τελείες- (2.46E6 elements), PU -Partially Unstructured; καμπύλες με παύλες- (2.57E6 elements),Denser: -πικνωμένο το PU, συνεχείς καμπύλες- (3.39E6 elements), (b) Ποσοστιαία μεταβολή του σφάλματος των παραπάνω αριθμητικών υπολογισμών ως προς την ακτινική απόσταση από το κέντρο του καυστήρα για ύψος $l = 16\text{mm}$ ($l/d = 0.59$).

Σύγκριση με πειραματικές τιμές για ύψος $l=26\text{mm}$ ($l/d = 0.96$) πάνω από την έξοδο του καυστήρα



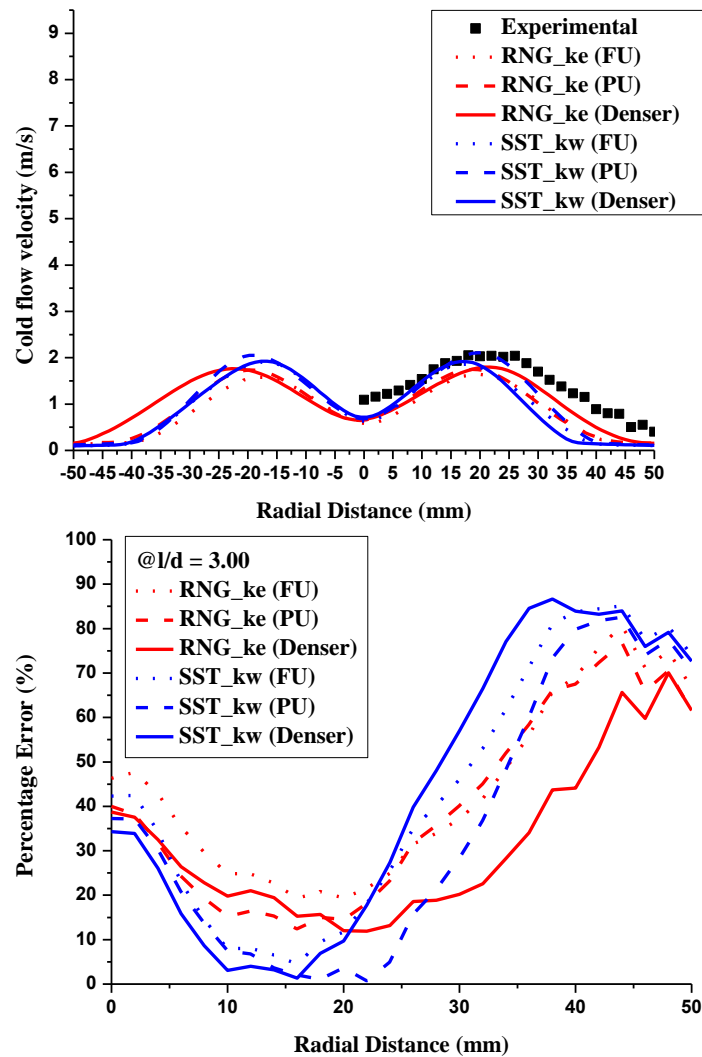
Εικόνα 33. (α) Αριθμητική επίλυση της μονοσυστατικής μη αντιδρώσας ροής αέρα-αέρα χρησιμοποιώντας τα μοντέλα τύρβης: RNG_ke (κόκκινες καμπύλες), SST_kw (μπλε καμπύλες) για τρία διαφορετικά πλέγματα: FU - Fully Unstructured, καμπύλες με τελείες- (2.46E6 elements), PU -Partially Unstructured; καμπύλες με παύλες- (2.57E6 elements),Denser: -πικνωμένο το PU, συνεχείς καμπύλες- (3.39E6 elements), (β) Ποσοστιαία μεταβολή του σφάλματος των παραπάνω αριθμητικών υπολογισμών ως προς την ακτινική απόσταση από το κέντρο του καυστήρα για ύψος $l = 26\text{mm}$ ($l/d = 0.96$).

Σύγκριση με πειραματικές τιμές για ύψος $l=51\text{mm}$ ($l/d = 1.89$) πάνω από την έξοδο του καυστήρα



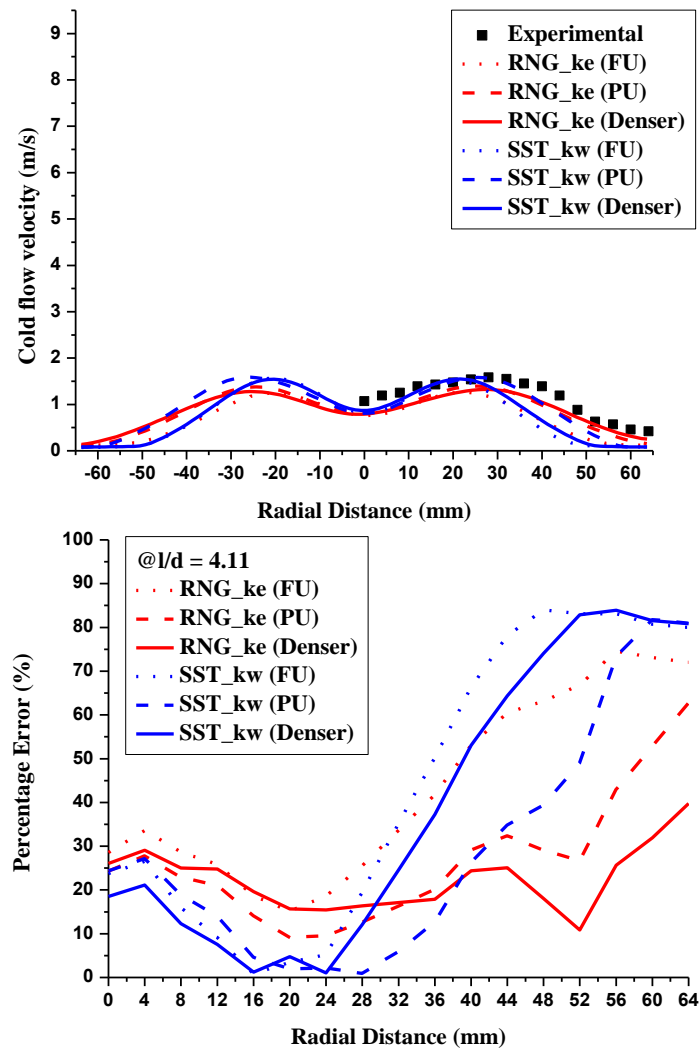
Εικόνα 34. (α) Αριθμητική επίλυση της μονοστατικής μη αντιδράσας ροής αέρα-αέρα χρησιμοποιώντας τα μοντέλα τύρβης: RNG_ke (κόκκινες καμπύλες), SST_kw (μπλε καμπύλες) για τρία διαφορετικά πλέγματα: FU - Fully Unstructured, καμπύλες με τελείες- (2.46E6 elements), PU -Partially Unstructured; καμπύλες με παύλες- (2.57E6 elements),Denser: -πυκνωμένο το PU, συνεχείς καμπύλες- (3.39E6 elements), (b) Ποσοστιαία μεταβολή του σφάλματος των παραπάνω αριθμητικών υπολογισμών ως προς την ακτινική απόσταση από το κέντρο του καυστήρα για ύψος $l = 51\text{mm}$ ($l/d = 1.89$).

Σύγκριση με πειραματικές τιμές για ύψος $l=81\text{mm}$ ($l/d = 3.00$) πάνω από την έξοδο του καυστήρα



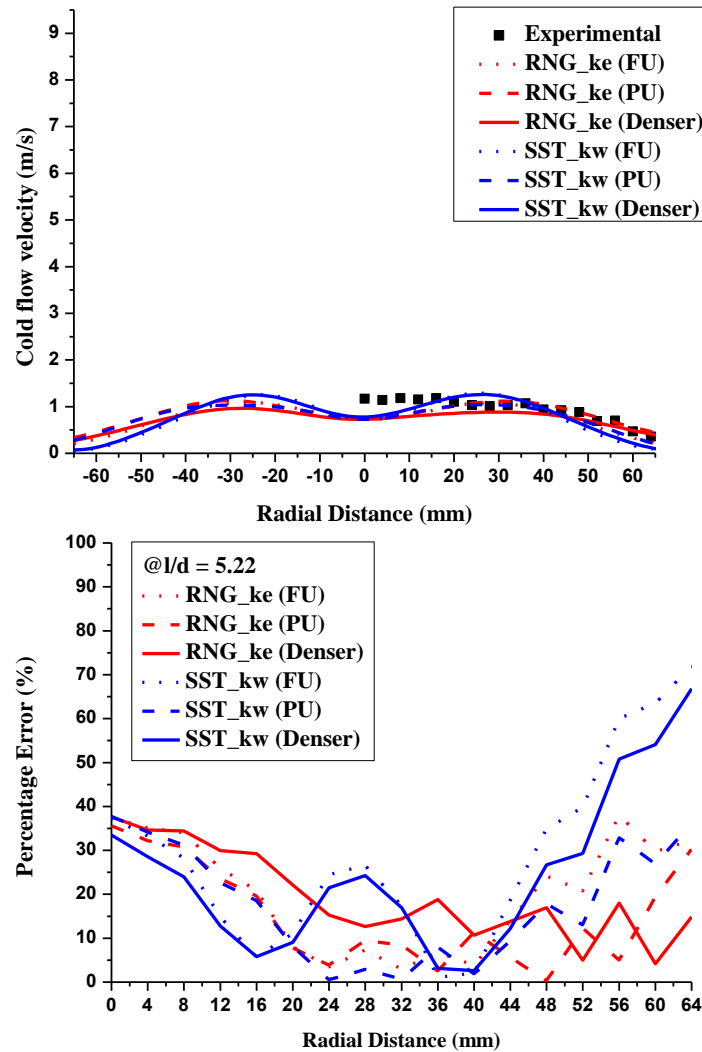
Εικόνα 35. (α) Αριθμητική επίλυση της μονοσυστατικής μη αντιδρώσας ροής αέρα-αέρα χρησιμοποιώντας τα μοντέλα τύρβης: RNG_ke (κόκκινες καμπύλες), SST_kw (μπλε καμπύλες) για τρία διαφορετικά πλέγματα: FU - Fully Unstructured, καμπύλες με τελείες- (2.46E6 elements), PU -Partially Unstructured; καμπύλες με παύλες- (2.57E6 elements),Denser: -πυκνωμένο το PU, συνεχείς καμπύλες- (3.39E6 elements), (b) Ποσοστιαία μεταβολή του σφάλματος των παραπάνω αριθμητικών υπολογισμών ως προς την ακτινική απόσταση από το κέντρο του καυστήρα για ύψος $l = 81\text{mm}$ ($l/d = 3.00$).

Σύγκριση με πειραματικές τιμές για ύψος $l=111\text{mm}$ ($l/d = 4.11$) πάνω από την έξοδο του καυστήρα



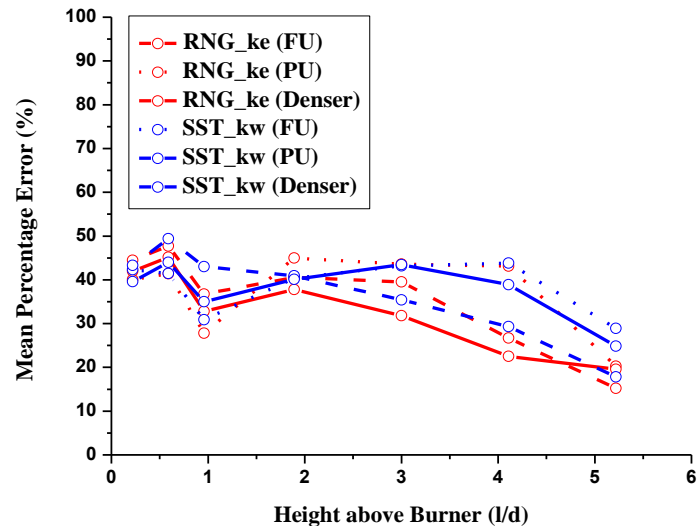
Εικόνα 36. (α) Αριθμητική επίλυση της μονοστατικής μη αντιδρώσας ροής αέρα-αέρα χρησιμοποιώντας τα μοντέλα τύρβης: RNG_ke (κόκκινες καμπύλες), SST_kw (μπλε καμπύλες) για τρία διαφορετικά πλέγματα: FU - Fully Unstructured, καμπύλες με τελείες- (2.46E6 elements), PU -Partially Unstructured; καμπύλες με παύλες- (2.57E6 elements),Denser: -πυκνωμένο το PU, συνεχείς καμπύλες- (3.39E6 elements), (β) Ποσοστιαία μεταβολή του σφάλματος των παραπάνω αριθμητικών υπολογισμών ως προς την ακτινική απόσταση από το κέντρο του καυστήρα για ύψος $l = 111\text{mm}$ ($l/d = 4.11$).

Σύγκριση με πειραματικές τιμές για ύψος $l = 141\text{mm}$ ($l/d = 5.22$) πάνω από την έξοδο του καυστήρα



Εικόνα 37. (α) Αριθμητική επίλυση της μονοστατικής μη αντιδράσας ροής αέρα-αέρα χρησιμοποιώντας τα μοντέλα τύρβης: RNG_ke (κόκκινες καμπύλες), SST_kw (μπλε καμπύλες) για τρία διαφορετικά πλέγματα: FU - Fully Unstructured, καμπύλες με τελείες- ($2.46E6$ elements), PU -Partially Unstructured; καμπύλες με παύλες- ($2.57E6$ elements),Denser: -πυκνωμένο το PU, συνεχείς καμπύλες- ($3.39E6$ elements), (b) Ποσοστιαία μεταβολή του σφάλματος των παραπάνω αριθμητικών υπολογισμών ως προς την ακτινική απόσταση από το κέντρο του καυστήρα για ύψος $l = 141\text{mm}$ ($l/d = 5.22$).

Για να έχουμε μία συνολική εικόνα των προβλέψεων καθεμιάς προσομοίωσης υπολογίσαμε τους μέσους όρους του σφάλματος πρόβλεψης της ταχύτητας κάθε ύψους πάνω από την έξοδο του καυστήρα και ακολούθως επισυνάπτουμε τα αποτελέσματα στο γράφημα της Εικόνας 38 και στον συνοδευτικό Πίνακα 4.



Εικόνα 38. Μεταβολή του μέσου ποσοστιαίου σφάλματος κατά τον υπολογισμό της ολικής ταχύτητας για μονοσυστατική μη αντιδρώσα ροή αέρα-αέρα ως προς το ύψος πάνω από την έξοδο του καυστήρα για τις θέσεις: $l/d = 0.22, 0.59, 0.96, 1.89, 3.00, 4.11, 5.22$. Οι τιμές υπολογίστηκαν με βάση τα σφάλματα για τις επιμέρους ακτινικές θέσεις σε κάθε ύψος (Εικόνες. 31-37).

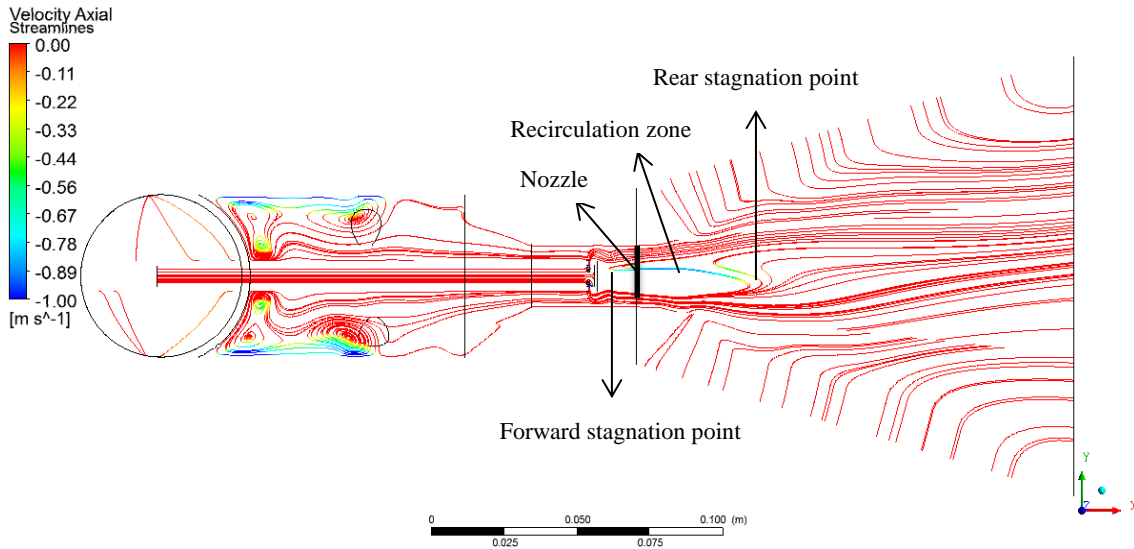
Ύψος πάνω από τον καυστήρα (l/d)	RNG (FU)	RNG (PU)	RNG (Denser)	SST (FU)	SST (PU)	SST (Denser)
0.22	40.04%	44.46%	41.98%	42.33%	43.32%	39.57%
0.59	41.40%	47.73%	45.15%	41.46%	49.37%	44.00%
0.96	27.81%	36.72%	32.77%	30.90%	43.03%	34.99%
1.89	45.00%	40.59%	37.78%	40.38%	40.92%	40.08%
3.00	43.58%	39.53%	31.80%	43.18%	35.39%	43.49%
4.11	43.14%	26.70%	22.51%	43.84%	29.33%	38.89%
5.22	20.28%	15.18%	19.56%	28.88%	17.81%	24.82%
Συνολικό Μέσο Σφάλμα (%)	37.32%	35.84%	33.08%	38.71%	37.02%	37.98%

Πίνακας 4. Οι επί τοις εκατό τιμές των σφαλμάτων που απεικονίζονται διαγραμματικά στην Εικόνα 38.

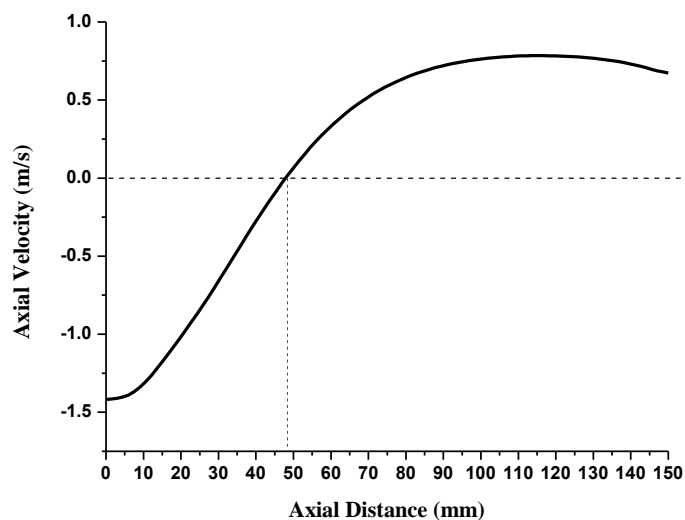
Με βάση τη διττή παραμετρική μελέτη πλέγματος και μοντέλου τύρβης καταλήξαμε στην υιοθέτηση του Denser πλέγματος (3.39 E6 στοιχεία) ως μία αξιόπιστη επιλογή για τις επόμενες προσομοιώσεις της ψυχρής λειτουργίας του καυστήρα. Αναφορικά με την καταλληλότητα του μοντέλου τύρβης φαίνεται πως στις συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας το RNG k-ε υπερτερεί ελαφρά του SST k-ω. Παρ' όλα αυτά, το εν λόγω ζήτημα μένει να ερευνηθεί περαιτέρω στην παραμετρική μελέτη της Ενότητας 6.2.

6.1.3 Γενικά χαρακτηριστικά αναπτυσσόμενου πεδίου ροής

Έχοντας ολοκληρώσει την παραμετρική μελέτη παρουσιάζουμε κάποια από τα βασικά χαρακτηριστικά του αναπτυσσόμενου πεδίου ροής και κυρίτερα της περιοχής κατάντη του ακροφυσίου. Τα αποτελέσματα έχουν προκύψει από την προσομοίωση με βάση το μοντέλο RNG (Denser) (βλ. Πίνακα 4) μιας και σε αυτό διαπιστώθηκαν οι μικρότερες αποκλίσεις από τις πειραματικές τιμές.



Εικόνα 39. Οι ροϊκές γραμμές της μονοσυστατικής μη αντιδρώσας ροής αέρα-αέρα στο επίπεδο x-y του καυστήρα χρωματισμένες ανάλογα με την τιμή της αξονικής ταχύτητας στο εύρος: -1 έως 0 m/s.



Εικόνα 40. Μεταβολή της αξονικής ταχύτητας ως προς την αξονική διεύθυνση x για μονοσυστατική μη αντιδρώσα ροή αέρα-αέρα.

Τα τυπικά χαρακτηριστικά ενός πεδίου ροής με συστρόφη παρουσιάζονται στην Εικόνα 39. Η ροή κατάντη του ακροφυσίου χαρακτηρίζεται από μία ζώνη ανακυκλοφορίας η οποία εκτείνεται αξονικά έως και 50mm. Η ζώνη η οποία δεσπόζει στον κεντρικό άξονα της ροής σύμφωνα με τους αριθμητικούς υπολογισμούς φαίνεται πως εκτείνεται και προς το εσωτερικό του καυστήρα δημιουργώντας έτσι εντός του ακροφυσίου σημείο ανακοπής (forward stagnation point). Επιπλέον, περιβάλλεται από περιοχές διάτμησης οι οποίες όπως θα δούμε και παρακάτω είναι ιδιαίτερως σημαντικές για την σταθεροποίηση της καύσης και της ίδιας της φλόγας.

Εκτός από την ποιοτική περιγραφή του πεδίου ροής η προσομοίωση μας επέτρεψε να υπολογίσουμε αριθμητικά τον αριθμό συστρόφης στη διατομή του ακροφυσίου σύμφωνα με την σχέση (1). Το αποτέλεσμα ήταν πως η ροή μας χαρακτηρίζεται ως χαμηλής συστρόφης με $S = 0.204$.

6.2 Πολυσυστατική μη-αντιδρώσα ροή

Έχοντας καταλήξει με βάση την παραμετρική μελέτη της Ενότητας 6.1 στο πλέγμα που θα υιοθετήσουμε για τις cold-flow προσομοιώσεις θα συνεχίσουμε την πορεία διερεύνησης με σκοπό την εξεύρεση ενός αξιόπιστου υπολογιστικού μοντέλου συγκρίνοντας αυτή την φορά την καταλληλότητα των χρησιμοποιούμενων μοντέλων τύρβης. Με γνωστό τον πειραματικό χαρακτηρισμό της πολυσυστατικής μη-αντιδρώσας ροής CH₄-αέρα (βλ. Εικόνα 20) θα δοκιμάσουμε να χρησιμοποιήσουμε τα μοντέλα RNG k-ε και SST k-ω.

Η υιοθέτηση των συγκεκριμένων έναντι της πληθώρας των διαθέσιμων επιλογών από το περιβάλλον του ANSYS CFX 17 δεν ήταν τυχαία αλλά είχε να κάνει με τα χαρακτηριστικά της μελετώμενης ροής όπως η καμπύλωση των ροϊκών γραμμών, η παρουσία στροβιλισμού αλλά και του ίδιου του βαθμού συστροφής όπως αυτός υπολογίστηκε στην Ενότητα 6.1. Ειδικότερα, τα μοντέλα τύρβης SST k-ω και RNG k-ε συνιστώνται για ροές στις οποίες εμφανίζεται αρνητική βαθμίδα πίεσης ή συμβαίνει συστροφή της ροής αντίστοιχα. Το RNG ιδιαίτερος μάλιστα μαζί με το realizable k-ε προτείνεται και από το εμπορικό πακέτο για ροές με χαμηλό αριθμό συστροφής, δηλαδή για $S < 0.6$, αλλά και από τη σχετική βιβλιογραφία (Ενότητα 3.2).

6.2.1 Υπολογιστικό χωρίο

Η γεωμετρία και το πλέγμα του υπολογιστικού χωρίου έχουν περιγραφεί στην προηγούμενη ενότητα και παραμένουν τα ίδια στην παρούσα περίπτωση. Με δεδομένο όμως πώς πια ασχολούμαστε με μια πολυσυστατική ροή αυτό το οποίο θα διαφοροποιηθεί στη δόμηση του υπολογιστικού μοντέλου είναι ο ορισμός των ιδιοτήτων των υλικών μαζί με την επιπλέον εξίσωση μεταφοράς που προστίθεται κατά την επίλυση.

Οριακές συνθήκες-Παράμετροι επίλυσης

Η ροή σε αυτή την ενότητα αντιστοιχεί σε μίγμα CH₄-αέρα με το οξειδωτικό να θεωρείται ως ιδανικό αέριο και το καύσιμο να χαρακτηρίζεται φυσικά και χημικά με βάση τις καταχωρημένες τιμές στη σχετική βιβλιοθήκη του εμπορικού πακέτου για θερμοκρασία 20°C και πίεση 1atm. Ως συνθήκες εισόδου ορίσαμε στην κατάλληλη επιφάνεια ομοιόμορφη κατανομή κάθετης ταχύτητας σε αυτήν ίση με **0.56 m/s** και παρόμοια για το καύσιμο ταχύτητα διέλευσης από τον κεντρικό αγωγό διαμέτρου 7mm τα **3.62 m/s**. Σε αυτές τις περιοχές θεωρήσαμε επιπλέον ως αρχική συνθήκη μέτρια επίπεδα τύρβης (5%). Όλες οι υπόλοιπες επιφάνειες χαρακτηρίστηκαν από τις ίδιες συνοριακές συνθήκες όπως στην Ενότητα 6.1 και το ίδιο συνέβη και με τις παραμέτρους επίλυσης όπως είναι το είδος του εξεταζόμενου προβλήματος (steady state) αλλά και τα κριτήρια σύγκλισης για τις εξισώσεις μεταφοράς (μάζας, ορμής, συστατικών και τύρβης). Εξαιρέση στις συνοριακές συνθήκες ήταν η σύσταση του μίγματος στις ανοικτές επιφάνειες του χωρίου. Σε αυτές επειδή επιτρέπεται η ελεύθερη είσοδος και έξοδος του αέρα περιβάλλοντος επιλέξαμε το κλάσμα μάζας μεθανίου να είναι μηδέν και αυτό του οξυγόνου ίσο με 0.2321.

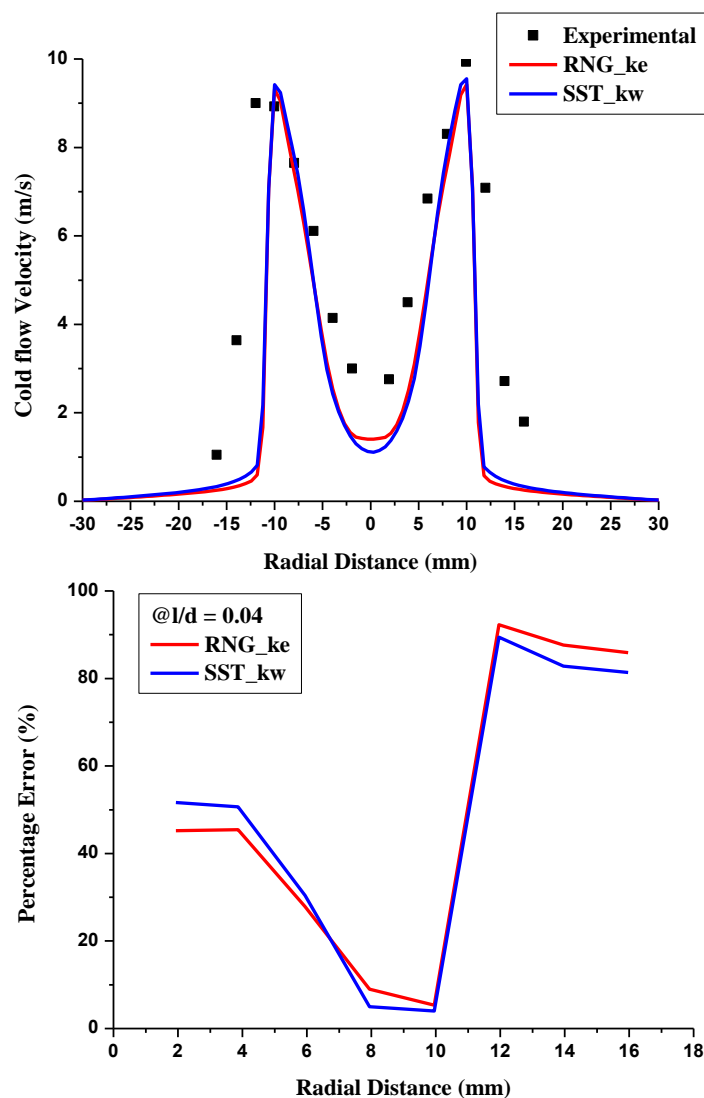
6.2.2 Σύγκριση με πειραματικά δεδομένα

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα της παραμετρικής μελέτης των δύο μοντέλων τύρβης: RNG k-ε, SST k-ω σε αντιπαραβολή με τα πειραματικά δεδομένα της κατανομής της ολικής ταχύτητας (βλ. Εικόνα 20).

Δεδομένα Λειτουργίας/ Συνολική Ογκομετρική Παροχή (slpm)	Μοντέλο Τύρβης	Πλέγμα
88.86	RNG k-ε	Denser
	SST k-ω	Denser

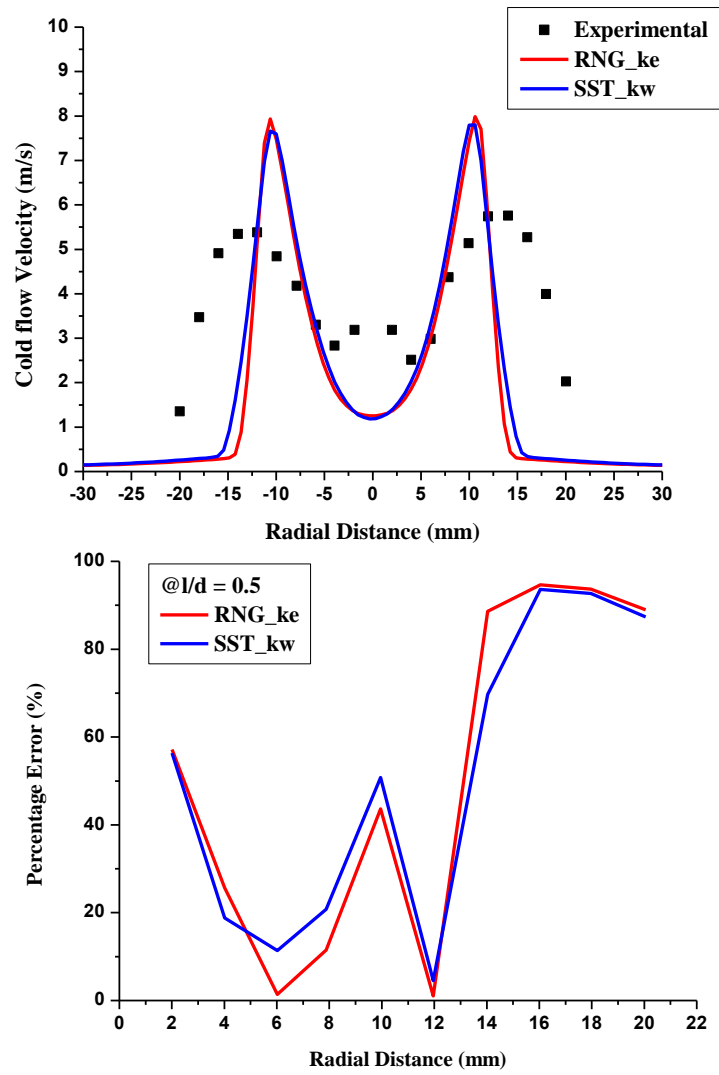
Πίνακας 5. Οι εξεταζόμενες παράμετροι των υπολογιστικών δοκιμών.

Σύγκριση με πειραματικές τιμές για ύψος $l=0.96\text{mm}$ ($l/d = 0.04$) πάνω από την έξοδο του καυστήρα



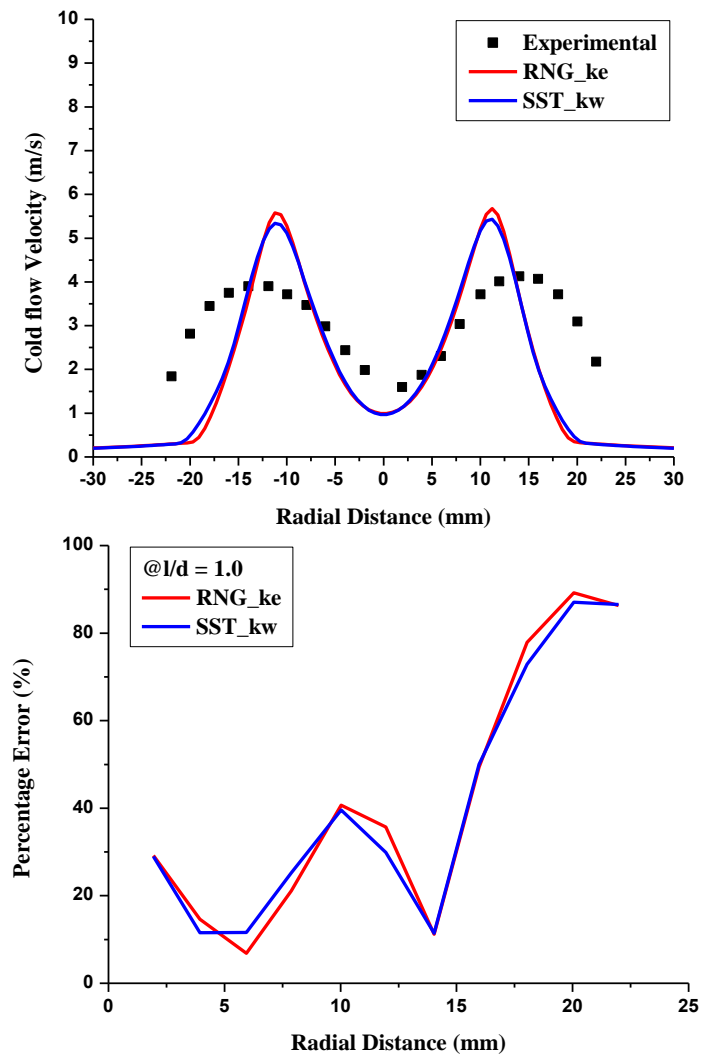
Εικόνα 41. (α) Αριθμητική επίλυση της πολυσυστατικής μη αντιδρώσας ροής μεθανίου-αέρα χρησιμοποιώντας τα μοντέλα τύρβης: RNG_ke (κόκκινη καμπύλη), SST_kw (μπλε καμπύλη), (β) Ποσοστιαία μεταβολή του σφάλματος των παραπάνω αριθμητικών υπολογισμών ως προς την ακτινική απόσταση από το κέντρο του καυστήρα για ύψος $l=0.96\text{mm}$ ($l/d = 0.04$).

Σύγκριση με πειραματικές τιμές για ύψος $l=12\text{mm}$ ($l/d = 0.5$) πάνω από την έξοδο του καυστήρα



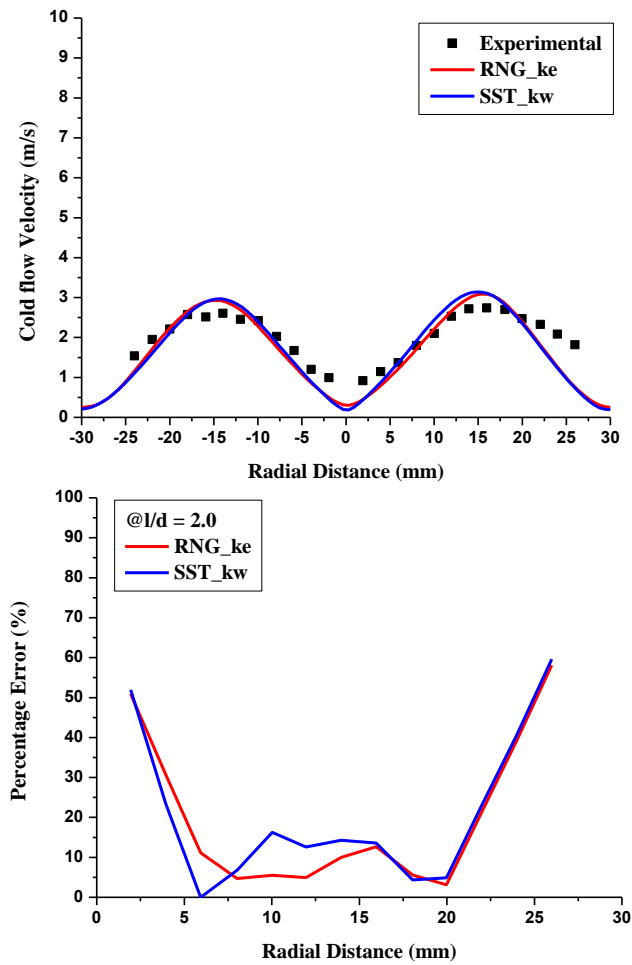
Εικόνα 42. (α) Αριθμητική επίλυση της πολυσυστατικής μη αντιδρώσας ροής μεθανίου-αέρα χρησιμοποιώντας τα μοντέλα τύρβης: RNG_ke (κόκκινη καμπύλη), SST_kw (μπλε καμπύλη), (β) Ποσοστιαία μεταβολή του σφάλματος των παραπάνω αριθμητικών υπολογισμών ως προς την ακτινική απόσταση από το κέντρο του καυστήρα για ύψος $l=12\text{mm}$ ($l/d = 0.5$).

Σύγκριση με πειραματικές τιμές για ύψος $l=24$ mm ($l/d = 1.00$) πάνω από την έξοδο του καυστήρα



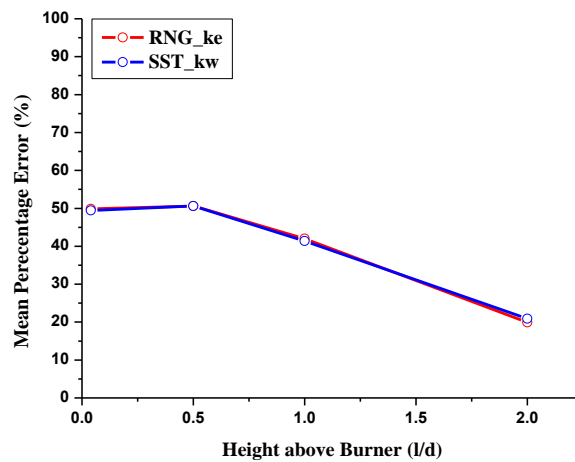
Εικόνα 43. (α) Αριθμητική επίλυση της πολυσυστατικής μη αντιδρώσας ροής μεθανίου-αέρα χρησιμοποιώντας τα μοντέλα τύρβης: RNG_ke (κόκκινη καμπύλη), SST_kw (μπλε καμπύλη), (β) Ποσοστιαία μεταβολή του σφάλματος των παραπάνω αριθμητικών υπολογισμών ως προς την ακτινική απόσταση από το κέντρο του καυστήρα για ύψος $l=24$ mm ($l/d = 1.00$).

Σύγκριση με πειραματικές τιμές για ύψος $l=48\text{mm}$ ($l/d = 2.00$) πάνω από την έξοδο του καυστήρα



Εικόνα 44. (α) Αριθμητική επίλυση της πολυσυστατικής μη αντιδρώσας ροής μεθανίου-αέρα χρησιμοποιώντας τα μοντέλα τύρβης: RNG_ke (κόκκινη καμπύλη), SST_kw (μπλε καμπύλη), (β) Ποσοστιαία μεταβολή του σφάλματος των παραπάνω αριθμητικών υπολογισμών ως προς την ακτινική απόσταση από το κέντρο του καυστήρα για ύψος $l=48\text{mm}$ ($l/d = 2.00$).

Συνολικά, οι μέσοι όροι του σφάλματος πρόβλεψης της ταχύτητας κάθε ύψους πάνω από την έξοδο του καυστήρα επισυνάπτονται στο γράφημα της Εικόνας 45 και στον συνοδευτικό Πίνακα 6.

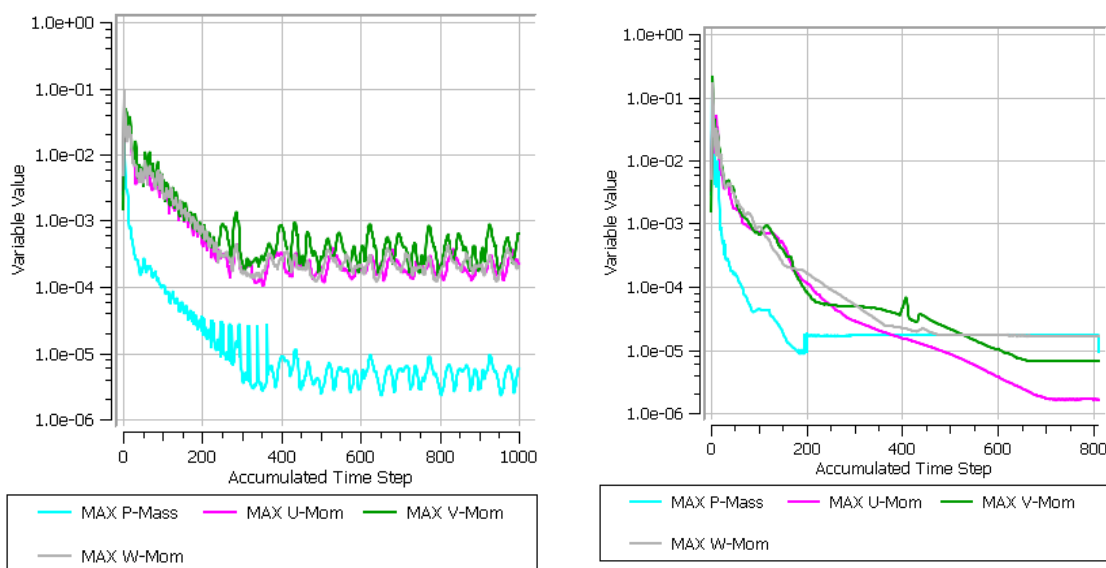


Εικόνα 45. Μεταβολή του μέσου ποσοστιαίου σφάλματος κατά τον υπολογισμό της ολικής ταχύτητας για πολυσυστατική μη αντιδρώσα ροή μεθανίου-αέρα ως προς το ύψος πάνω από την έξοδο του καυστήρα για τις θέσεις: $l/d = 0.04, 0.50, 1.00, 2.00$. Οι τιμές υπολογίστηκαν με βάση τα σφάλματα για τις επιμέρους ακτινικές θέσεις σε κάθε ύψος (Εικόνες 41-44).

Ύψος πάνω από τον καυστήρα (l/d)	RNG k-ε	SST k-ω
0.04	49.84%	49.43%
0.50	50.63%	50.59%
1.00	42.02%	41.35%
2.00	19.88%	20.92%
Συνολικό Μέσο Σφάλμα (%)	40.59%	40.57%

Πίνακας 6. Οι επί τοις εκατό τιμές των σφαλμάτων που απεικονίζονται διαγραμματικά στην Εικόνα 45.

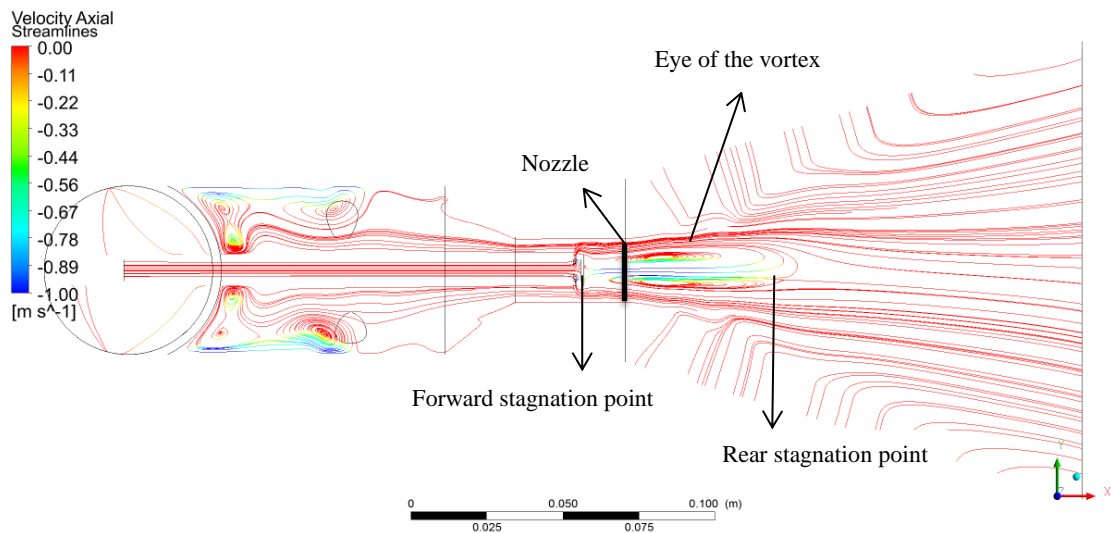
Με βάση την παραμετρική μελέτη για το μοντέλο τύρβης αν και τα δύο αποδείχθηκαν ουσιαστικά ισοδύναμα στην ικανότητα πρόβλεψης της ακτινικής κατανομής της ολικής ταχύτητας επιλέχθηκε το RNG k-ε για τις επόμενες προσομοιώσεις. Αυτό συνέβη λόγω του ότι τόσο βιβλιογραφικά όσο και στο θεωρητικό εγχειρίδιο του ANSYS CFX 17 προτείνεται το RNG μαζί με το realizable k-ε για περιπτώσεις ροής με χαμηλή συστροφή. Επιπλέον, το συγκεκριμένο μοντέλο ανταποκρίθηκε καλύτερα σε επίπεδο σύγκλισης καθώς και υπολογιστικού κόστους. Παραστατικότερα η διαπίστωση αυτή απεικονίζεται στα διαγράμματα της Εικόνας 46.



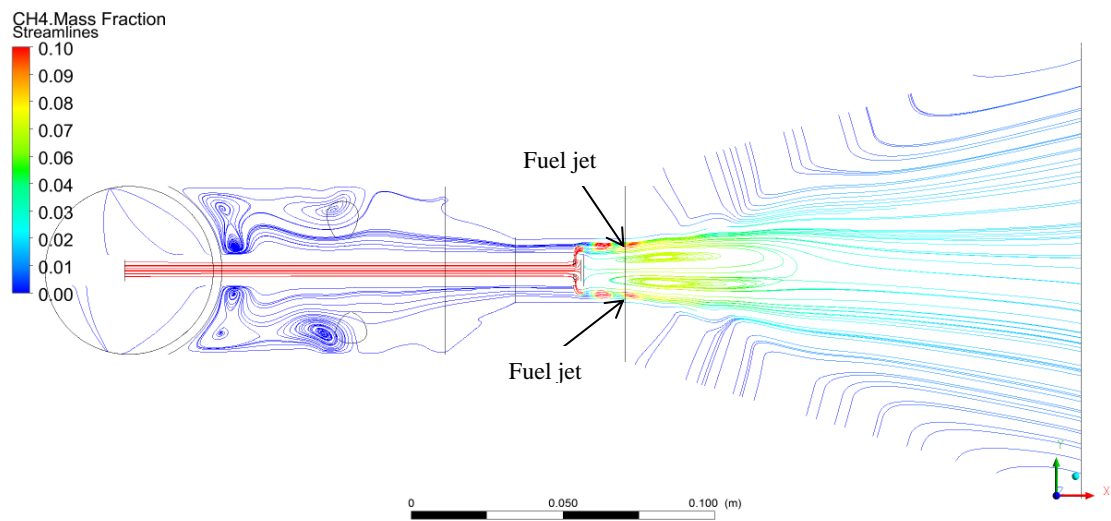
Εικόνα 46. Πορεία σύγκλισης των προσομοιώσεων με διαφορετικά μοντέλα τύρβης. Στην αριστερή εικόνα φαίνεται το SST k-ω το οποίο χρειάστηκε 16h σε wall clock time για να ολοκληρωθεί, ενώ στη δεξιά εικόνα φαίνεται το RNG k-ε για το οποίο απαιτήθηκαν 12h και 43min.

6.2.3 Γενικά χαρακτηριστικά αναπτυσσόμενου πεδίου ροής

Η μορφή του πεδίου ροής για το διφασικό μίγμα μεθανίου-αέρα θα επιχειρηθεί να αποτυπωθεί στις επόμενες εικόνες εστιάζοντας περισσότερο όπως είναι φυσικό στην περιοχή όπου σε επόμενο στάδιο θα συμβεί η καύση, δηλαδή μετά το ακροφύσιο.



Εικόνα 47. Οι ροϊκές γραμμές της πολυσυστατικής μη αντιδρώσας ροής CH₄-αέρα στο επίπεδο x-y του καυστήρα χρωματισμένες ανάλογα με την τιμή της αξονικής ταχύτητας στο εύρος: -1 έως 0 m/s.

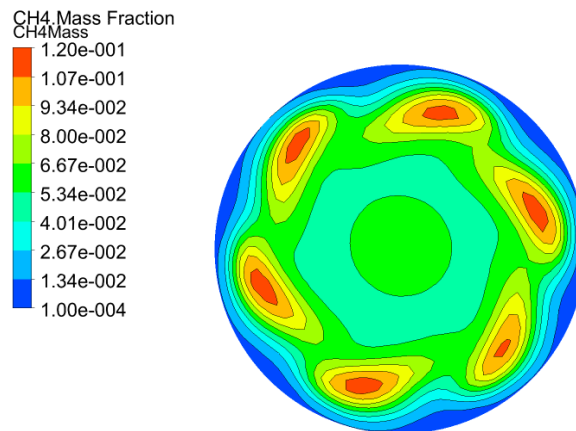


Εικόνα 48. Οι ροϊκές γραμμές της πολυσυστατικής μη αντιδρώσας ροής CH₄-αέρα στο επίπεδο x-y του καυστήρα χρωματισμένες ανάλογα με την τιμή του κλάσματος μάζας μεθανίου στο εύρος: 0 έως 0.10.

Με βάση τις Εικόνες 47-48 παρατηρούμε πως στον κεντρικό άξονα του καυστήρα κυριαρχεί η ζώνη ανακυκλοφορίας όπως και στην Ενότητα 6.1. Μάλιστα η τοροειδούς σχήματος ζώνη (toroidal recirculation zone) η οποία τυπικά συνοδεύει μια ροή με συστροφή (βλ. Εικόνα 8) εδώ κάνει την εμφάνιση της πιο έντονα με την παρουσία δύο στροβίλων των οποίων το κέντρο υποδεικνύεται στην Εικόνα 47 (eye of the vortex). Η διαφορά είναι πως εδώ η μείωση της ταχύτητας του καυσίμου οδήγησε στην εξάπλωση της περιοχής ανακυκλοφορίας με το εμπρόσθιο σημείο ανακοπής να είναι πιο κοντά στον αγωγό καυσίμου και την περιοχή των αρνητικών ταχυτήτων να εκτείνεται έως τα 60 mm όπως φαίνεται και στο διάγραμμα της Εικόνας 50. Επιπρόσθετα, κοντά στο ακροφύσιο και γύρω από την περιοχή της ανακυκλοφορίας αναπτύσσεται η μέγιστη ολική ταχύτητα η οποία σαφώς συνδέεται με την περιστροφική κίνηση στην οποία υποβάλλεται το δισυστατικό μίγμα (βλ. Εικόνα 41).

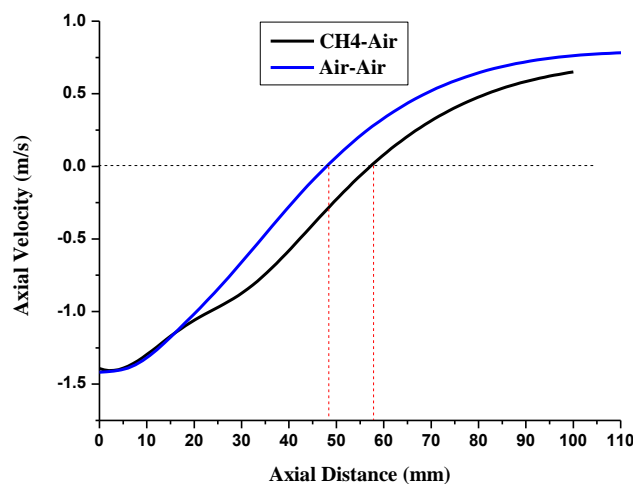
Παρατηρώντας πιο προσεκτικά (Εικόνα 48) θα διαπιστώσουμε πως η προαναφερθείσα περιοχή μέγιστης ταχύτητας είναι και η βασική έξοδος του ρεύματος καυσίμου από το ακροφύσιο. Η παρατήρηση αυτή υποστηρίζεται επιπλέον από την επιφανειακή κατανομή του μεθανίου στη διατομή του ακροφυσίου (Εικόνα 49). Εκεί όπως είναι σαφές υπάρχει μια μη συμμετρική κατανομή του καυσίμου η οποία όμως συμβαδίζει με την ύπαρξη των έξι οπών που έχει ο αγωγός καυσίμου (βλ. Εικόνα 49 και τις έξι περιοχές μέγιστης συγκέντρωσης). Η κατανομή είναι επίσης ανομοιόμορφη, γεγονός που εξηγείται αφενός από την άσκηση φυγόκεντρων δυνάμεων και αφετέρου από τον σχετικά

μικρό χώρο μήκους μόλις 13.5mm (Εικόνα 17) στον οποίο έρχονται σε επαφή οξειδωτικό και καύσιμο πριν εξέλθει το μίγμα από το ακροφύσιο, στοιχείο σαφώς δηλωτικό της μερικής προανάμιξης όπως αυτή αποτυπώνεται στην Εικόνα 49.



Εικόνα 49. Οι ισογραμμές του κλάσματος μάζας μεθανίου στη διατομή του ακροφυσίου για την πολυσυστατική μη αντιδρώσα ροή CH₄-αέρα.

Ο υπολογισμός της συστροφής στη διατομή του ακροφυσίου σύμφωνα με την σχέση (1) έδωσε μία τιμή ελαφρώς μεγαλύτερη από αυτήν του μονοφασικού μίγματος $S = 0.24$. Η μεταβολή δικαιολογείται από την μικρή σχετικά αύξηση της ταχύτητας του οξειδωτικού ως προς το καύσιμο. Μολονότι βιβλιογραφικά η αύξηση της συστροφής συσχετίζεται με την ταυτόχρονη ακτινική εξάπλωση της ζώνης ανακυκλοφορίας και την αξονική μετατόπιση της προς το ακροφύσιο στην περίπτωση μας κάτι τέτοιο δεν παρατηρείται. Αντίθετα, όπως αποδεικνύεται και από το διάγραμμα της Εικόνας 50, η περιοχή των αρνητικών τιμών της αξονικής ταχύτητας είναι πιο εκτεταμένη στην πολυσυστατική ροή (μεγαλύτερη συστροφή) και μάλιστα ύστερα από τα 60mm εμφανίζονται ταχύτητες μικρότερου μέτρου απ' ό τι στη μονοσυστατική ροή (μικρότερη συστροφή).



Εικόνα 50. Σύγκριση της μεταβολή της αξονικής ταχύτητας ως προς την αξονική διεύθυνση x για πολυσυστατική και μονοσυστατική μη αντιδρώσα ροή μεθανίου-αέρα και αέρα-αέρα αντίστοιχα.

Οι διαφορές στη συστροφή και στην υπολογισμένη αξονική ταχύτητα δεν είναι μεγάλες ειδικά αν λάβουμε υπόψη πως συνήθως σε παραμετρικές μελέτες με βάση αυτή επιδιώκουμε μεταβολές της τάξης του 0.5 ή και παραπάνω και σίγουρα όχι στο δεύτερο δεκαδικό ψηφίο. Αν όμως μπορεί να υπάρξει ένα συμπέρασμα αυτό είναι πως εντός της ζώνης ανακυκλοφορίας στη μονοσυστατική ροή η μεγαλύτερη ταχύτητα του καυσίμου (του αέρα που εξέρχεται από τον αγωγό καυσίμου) οδηγεί στην άμβλυνση της έντασης της ανακυκλοφορίας και του στροβιλισμού. Το «καύσιμο» σε αυτή την περιοχή είναι σε σημαντική συγκέντρωση και η μεγάλη θετική τιμή της αξονικής συνιστώσας της ταχύτητας

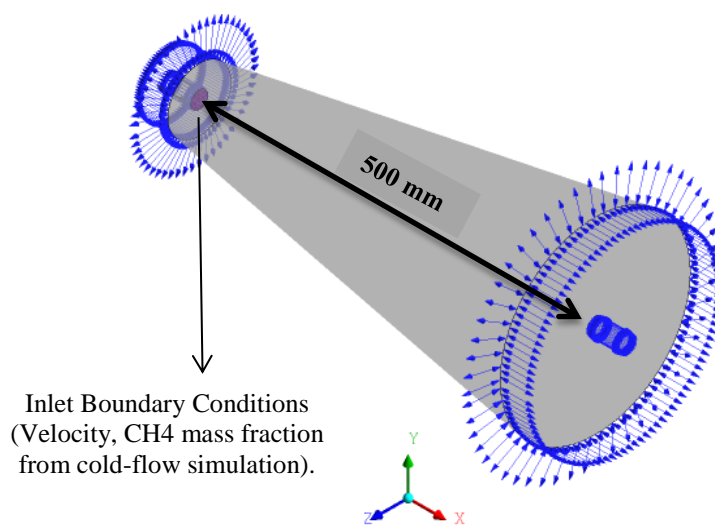
του αποσβένει τα φαινόμενα που συνεπάγονται του στροβιλισμού, φορέας του οποίου είναι κατά βάση ο αέρας, όπως αυτός εξέρχεται από τους αγωγούς κατεύθυνσης.

6.3 Πολυσυστατική αντιδρώσα ροή

6.3.1 Υπολογιστικό χωρίο

Στην περίπτωση της πολυσυστατικής και αντιδρώσας ροής χρειάζεται να επεκτείνουμε το χωρίο (κόνος) στο οποίο μελετάται η τυρβώδης καύση. Έτσι, λαμβάνοντας υπόψη τις πειραματικές τιμές μεταβολής της θερμοκρασίας ως προς την αξονική διεύθυνση (Εικόνα 21) αυξήσαμε το ύψος του κώνου στα 500 mm. Η δοκιμή να λύσουμε τις εξισώσεις ενέργειας, συστατικών και ακτινοβολίας στο προκύπτον χωρίο κατέληξε σε αδυναμία σύγκλισης, οπότε οδηγηθήκαμε στην απλοποίηση του μοντέλου διατηρώντας μόνο την περιοχή κατάντη του ακροφυσίου (περιοχή καύσης).

Με βάση αυτή την επιλογή η επίλυση πραγματοποιήθηκε σε δύο βήματα. Στο πρώτο επιλύεται η πολυσυστατική μη αντιδρώσα ροή περιλαμβάνοντας την γεωμετρία του καυστήρα, στην ουσία δηλαδή χρησιμοποιούμε τα αποτελέσματα της καλύτερης προσομοίωσης της ενότητας 6.2, άρα αυτής με πλέγμα Denser και μοντέλο τύρβης το RNG k-ε. Το δεύτερο βήμα ήταν η χρησιμοποίηση της κατανομής της ολικής ταχύτητας και της κατανομής του κλάσματος μάζας του μεθανίου και του οξυγόνου ως συνοριακές συνθήκες εισόδου στην επιφάνεια που αντιστοιχεί το ακροφύσιο και στη συνέχεια η επίλυση του προβλήματος της αντιδρώσας ροής. Παρακάτω παρουσιάζουμε το νέο χωρίο στο οποίο θα μελετηθεί το ροϊκό και θερμικό πεδίο της φλόγας μεθανίου για λόγο ισοδυναμίας αέρα καυσίμου $\lambda = 1$ και θερμική ισχύ ίση με 5kW.



Εικόνα 51. Παρουσίαση του υπολογιστικού χωρίου μαζί με τις συνοριακές συνθήκες.

Σε επίπεδο δόμησης υπολογιστικού μοντέλου πέραν από τις παραπάνω συνοριακές συνθήκες η επιλογή των αρχικών συνθηκών ήταν ένα κρίσιμο βήμα ώστε να υποβοηθηθεί η έναρξη της καύσης. Σε αντίθεση με τις προηγούμενες ενότητες όπου μελετούσαμε την ψυχρή λειτουργία του καυστήρα εδώ ύστερα από δοκιμές καταλήξαμε στην επιλογή αρχικής θερμοκρασίας T ίσης με 1500K και της παρουσίας μικρής ποσότητας προϊόντων της καύσης. Το τελευταίο επετεύχθη ορίζοντας ως αρχικό κλάσμα μάζας για τα συστατικά CO , CO_2 και H_2O ίσο με 0.01. Οι παράμετροι επίλυσης καθώς και τα κριτήρια σύγκλισης παρέμειναν τα ίδια με τις προηγούμενες προσομοιώσεις με την προσθήκη όπως είναι εύλογο του μοντέλου καύσης και ακτινοβολίας.

6.3.2 Σύγκριση με πειραματικά δεδομένα

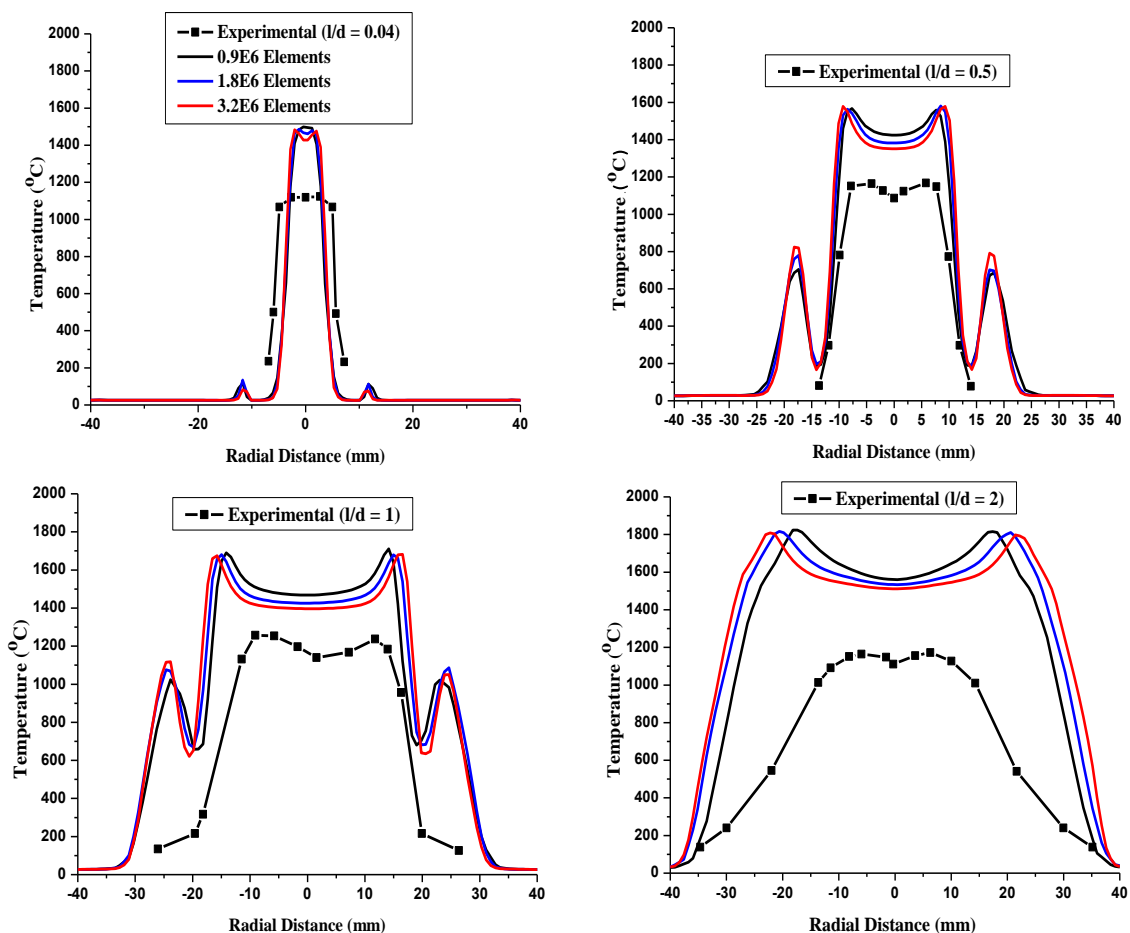
Όπως και στις προηγούμενες ενότητες έτσι και εδώ πριν επιχειρήσουμε να ελέγξουμε τις δυνατότητες πρόβλεψης των μοντέλων των εξισώσεων μεταφοράς θα ελέγξουμε την ανεξαρτησία της λύσης από

την πυκνότητα του πλέγματος. Γι' αυτό τον σκοπό κατασκευάστηκαν τρία πλέγματα διαφορετικής πυκνότητας: 0.9, 1.8 και 3.2 εκατομμυρίων στοιχείων στα οποία ελέγξαμε την αξονική μεταβολή της θερμοκρασίας καθώς και την ακτινική κατανομή της στις αξονικές θέσεις x (l/d): 0.96mm (0.04), 12mm (0.5), 24mm (1.0) και 48mm (2.0).

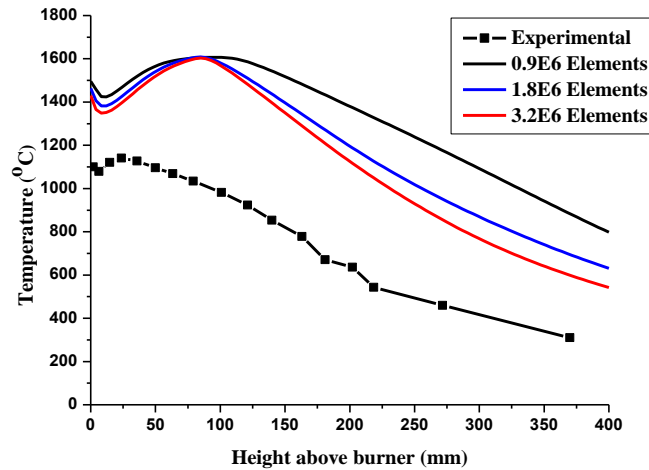
Mesh	# Elements	Element Quality	Aspect Ratio	Skewness	Orthogonal Quality
1	0.9E6	0.82861	1.7999	0.1627	0.97297
2	1.8E6	0.82436	1.8319	0.15764	0.97296
3	3.2E6	0.82215	1.8447	0.15446	0.97241

Πίνακας 7. Πλήθος στοιχείων και δείκτες ποιότητας για τα πλέγματα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τις ανάγκες της διερεύνησης της ανεξαρτησίας της λύσης.

Ενδεικτικά, παρουσιάζουμε παρακάτω την ανεξαρτησία της λύσης κατά την πρόβλεψη της θερμοκρασίας (ακτινική κατανομή και αξονική μεταβολή) χρησιμοποιώντας ως μοντέλο καύσης το EDM, ως χημικό μηχανισμό τον διβηματικό με ενδιάμεση παραγωγή μονοξειδίου του άνθρακα και ως μοντέλο ακτινοβολίας το P1. Αναφορικά με το μοντέλο καύσης EDM θα πρέπει να γίνει η επισήμανση πως οι σταθερές A και B ορίστηκαν με τιμές 4 και 0.5 αντίστοιχα. Η επιλογή για την τιμή της σταθεράς B είναι συνήθης όταν θέλουμε να «ρυθμίσουμε» την ποσότητα των παραγόμενων προϊόντων καθορίζοντας έτσι έμμεσα και την εκλυόμενη θερμότητα. Επιπρόσθετα υποστηρίζεται τόσο από το θεωρητικό εγχειρίδιο του ANSYS CFX 17 όσο και από τη σχετική με τους καυστήρες συστροφής βιβλιογραφία [56] καθιστώντας την τροποποίηση τουλάχιστον δόκιμη.



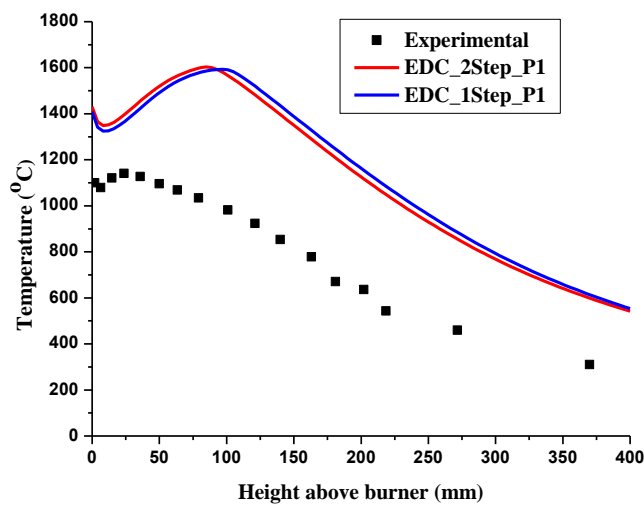
Εικόνα 52. Υπολογισμός της κατανομής της θερμοκρασίας ως προς την ακτινική διεύθυνση του καυστήρα (άξονας z , βλ. Εικόνα 51) για τις αξονικές θέσεις: $l/d = 0.04, 0.50, 1.00, 2.00$. Η αριθμητική επίλυση της πολυσυστατικής αντιδρώσας ροής μεθανίου-αέρα έγινε χρησιμοποιώντας τρία πλέγματα διαφορετικής πυκνότητας: 3.2 Ε6 στοιχείων (κόκκινη καμπύλη), 1.8 Ε6 στοιχείων (μπλε καμπύλη) και 0.9 Ε6 στοιχείων (μαύρη καμπύλη).

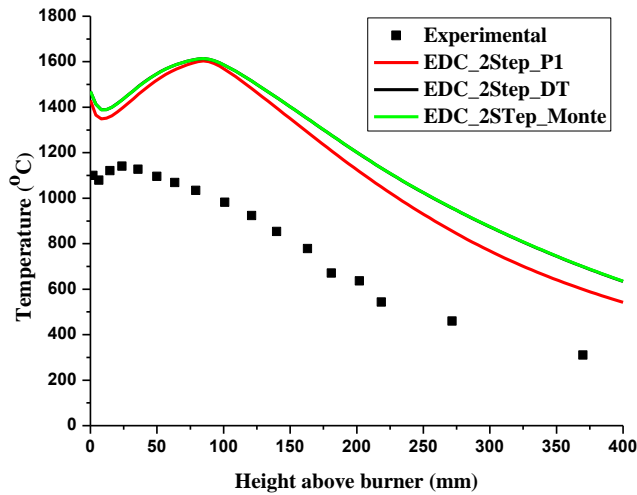


Εικόνα 53. Υπολογισμός της κατανομής της θερμοκρασίας ως προς την αξονική διεύθυνση του καυστήρα (άξονας x, βλ. Εικόνα 51). Η αριθμητική επίλυση της πολυσυστατικής αντιδρώσας ροής μεθανίου-αέρα έγινε χρησιμοποιώντας τρία πλέγματα διαφορετικής πυκνότητας: 3.2 E6 στοιχείων (κόκκινη καμπύλη), 1.8 E6 στοιχείων (μπλε καμπύλη) και 0.9 E6 στοιχείων (μαύρη καμπύλη).

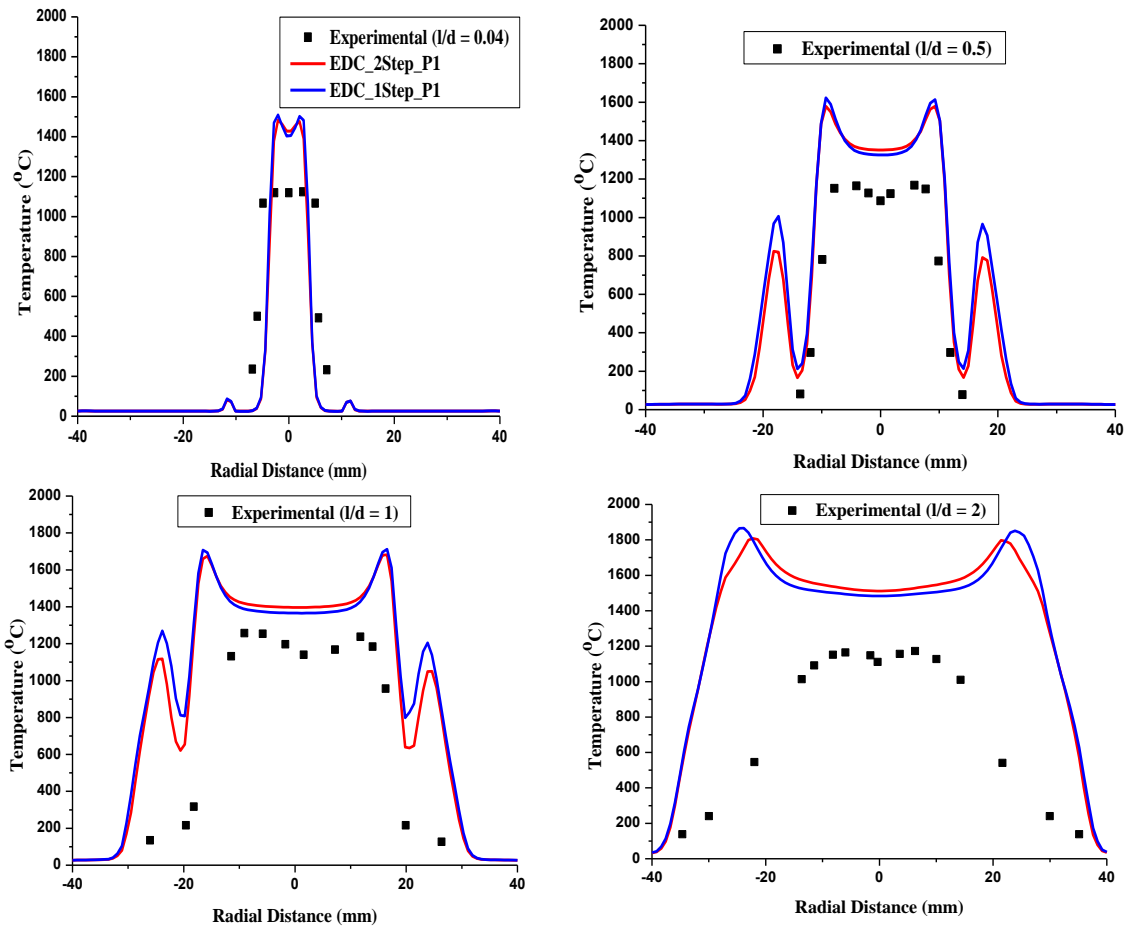
Η μελέτη ανεξαρτησίας της λύσης έδειξε πως το πλέγμα με τα 3.2E6 στοιχεία μπορεί να μας δώσει προβλέψεις της θερμοκρασίας οι οποίες είναι ανεξάρτητες από τον βαθμό πυκνωσης. Έχοντας καταλήξει στο πλέγμα λοιπόν που θα χρησιμοποιηθεί στις προσομοιώσεις της παρούσας ενότητας θα συνεχίσουμε με την διερεύνηση για την εξεύρεση του υπολογιστικού εκείνου μοντέλου (καύσης και ακτινοβολίας) που περιγράφει καλύτερα το φαινόμενο της τυρβώδους καύσης.

Παραμετρική διερεύνηση της επίδρασης του μηχανισμού καύσης και του μοντέλου ακτινοβολίας στην μεταβολή της θερμοκρασίας

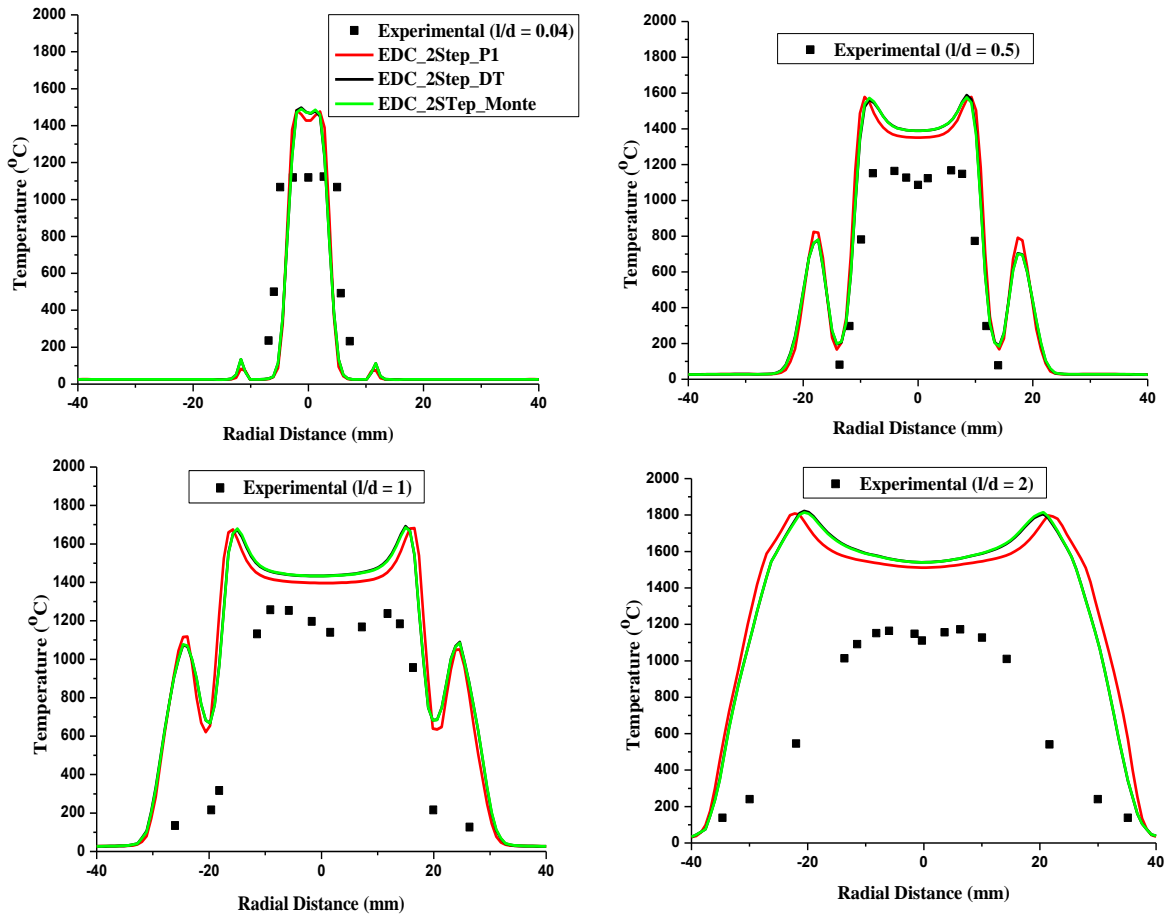




Εικόνα 54. Παραμετρική διερεύνηση της εξάρτησης της πρόβλεψης της θερμοκρασίας κατά την αξονική διεύθυνση του καυστήρα από: (α) τον μηχανισμό καύσης (ενός και δύο βημάτων) και (β) το μοντέλο ακτινοβολίας (P1, Discrete Transfer, Monte Carlo).

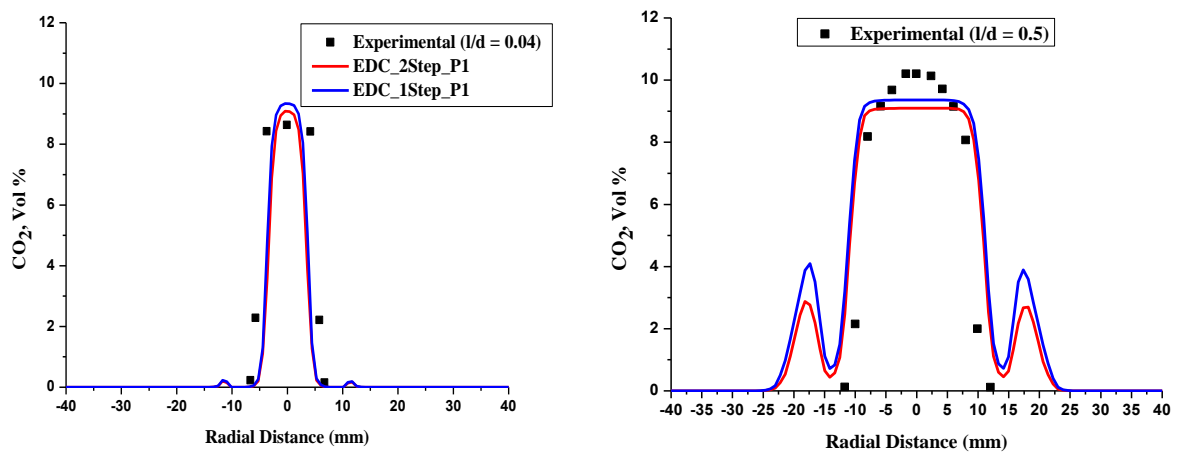


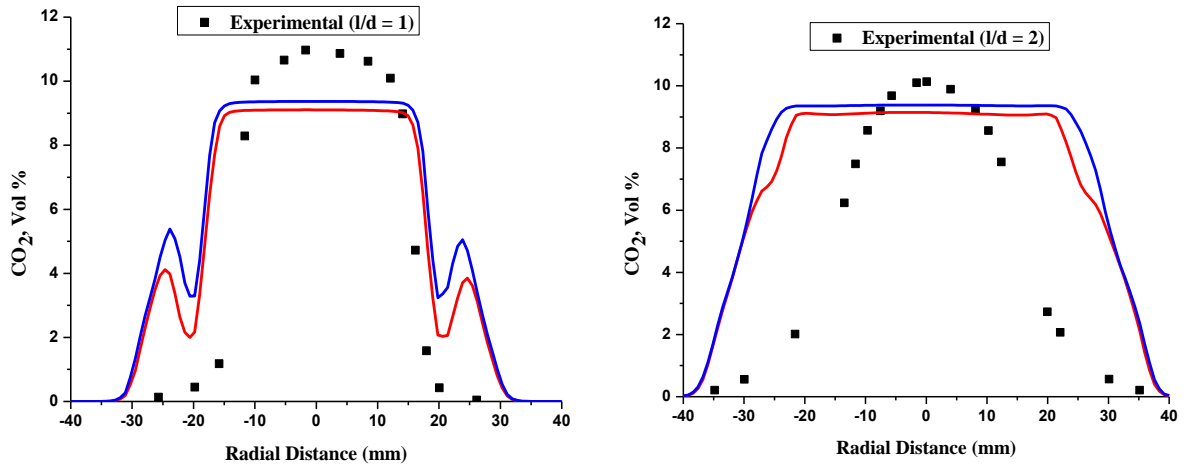
Εικόνα 55. Παραμετρική διερεύνηση της εξάρτησης της πρόβλεψης της θερμοκρασίας κατά την ακτινική διεύθυνση του καυστήρα από τον μηχανισμό καύσης (ενός και δύο βημάτων).



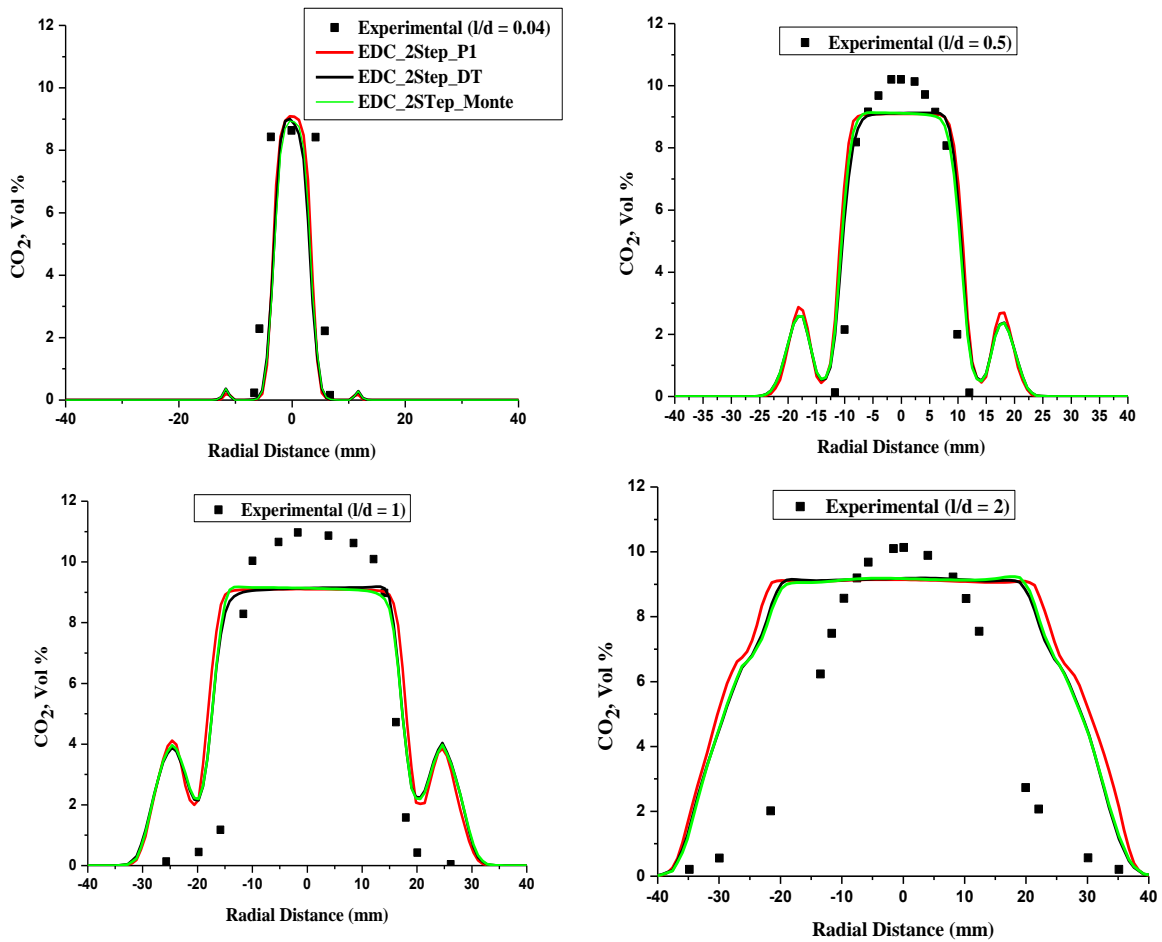
Εικόνα 56. Παραμετρική διερεύνηση της εξάρτησης της πρόβλεψης της θερμοκρασίας κατά την ακτινική διεύθυνση του καυστήρα από το μοντέλο ακτινοβολίας (P1, Discrete Transfer, Monte Carlo).

Παραμετρική διερεύνηση της επίδρασης του μηχανισμού καύσης και του μοντέλου ακτινοβολίας στην μεταβολή της συγκέντρωσης CO₂



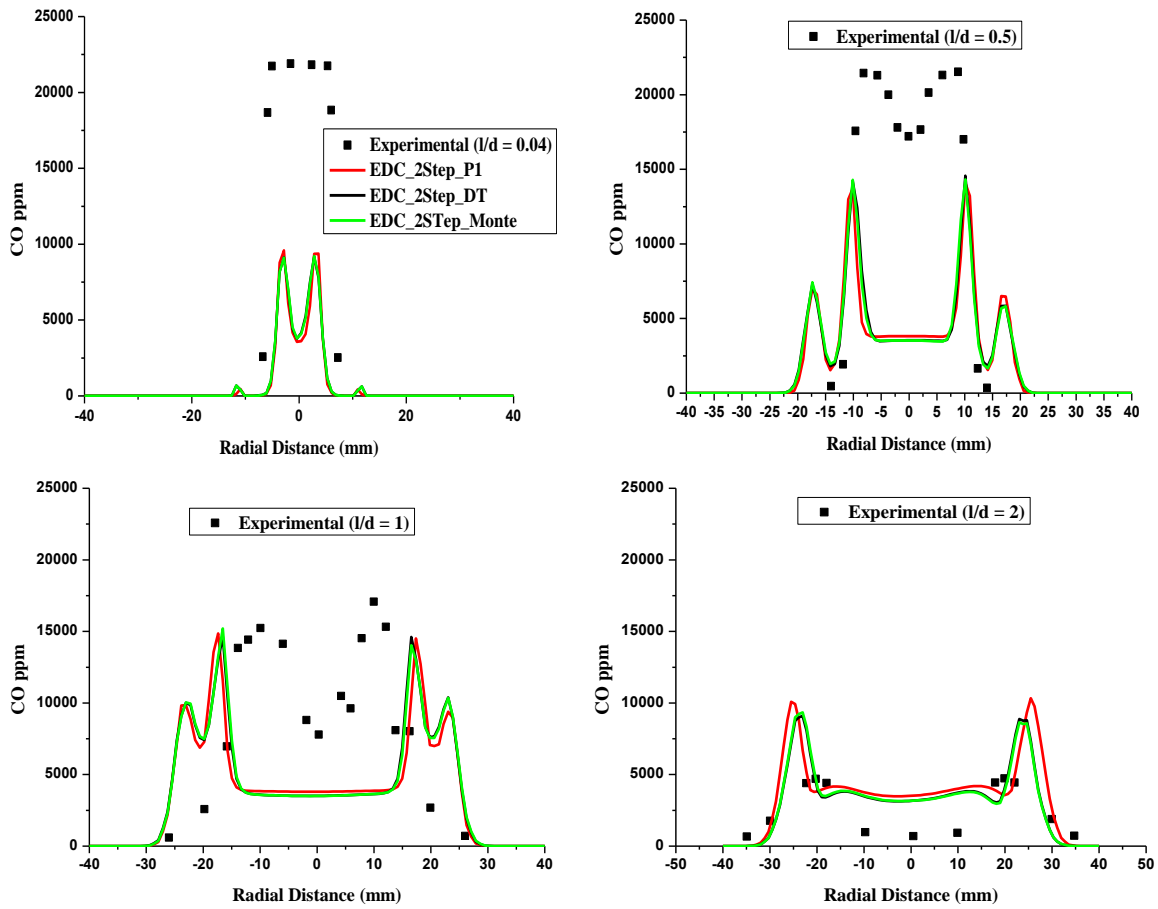


Εικόνα 57. Παραμετρική διερεύνηση της εξάρτησης της πρόβλεψης της κατ' όγκο συγκέντρωσης CO₂ κατά την ακτινική διεύθυνση του καυστήρα από τον μηχανισμό καύσης (ενός και δύο βημάτων).



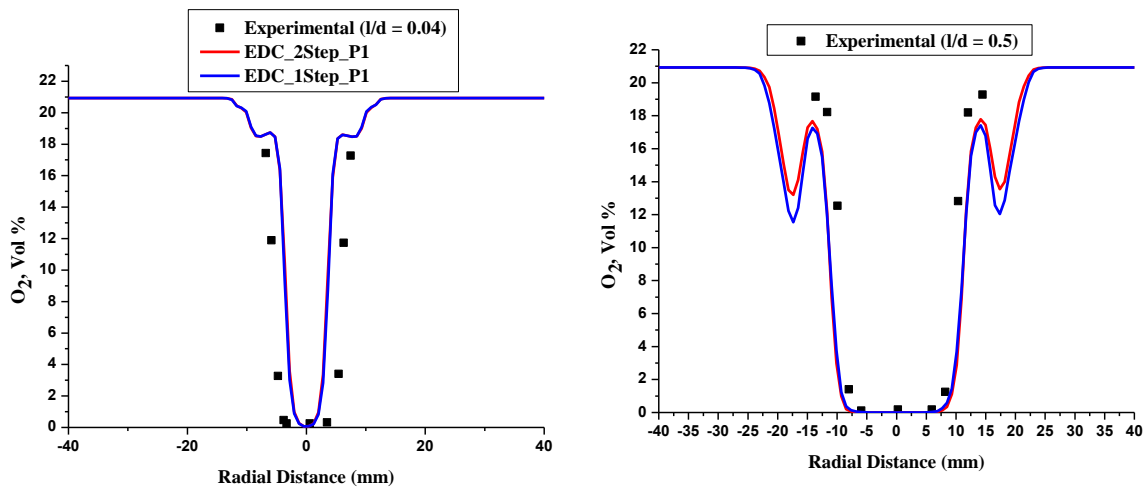
Εικόνα 58. Παραμετρική διερεύνηση της εξάρτησης της πρόβλεψης της κατ' όγκο συγκέντρωσης CO₂ κατά την ακτινική διεύθυνση του καυστήρα από το μοντέλο ακτινοβολίας (P1, Discrete Transfer, Monte Carlo).

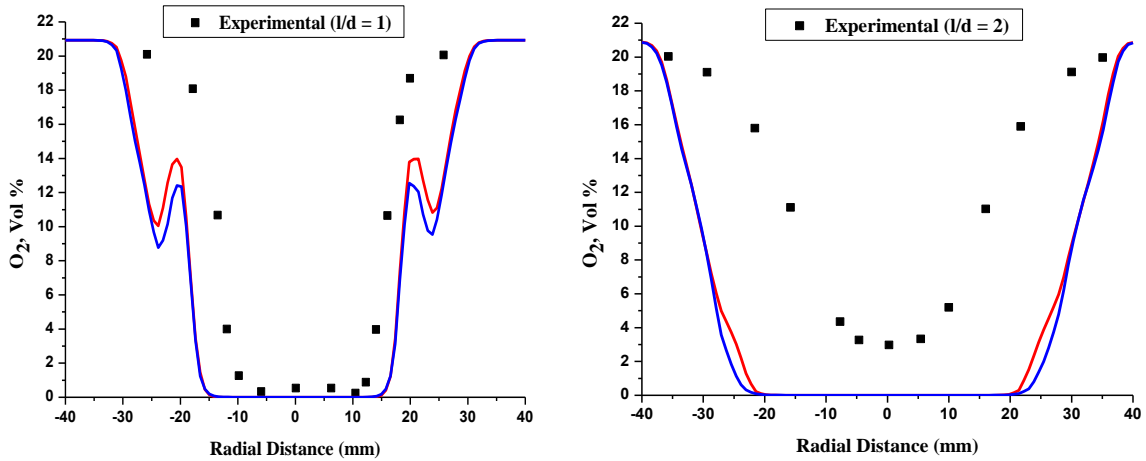
Παραμετρική διερεύνηση της επίδρασης του μοντέλου ακτινοβολίας στην μεταβολή της συγκέντρωσης CO



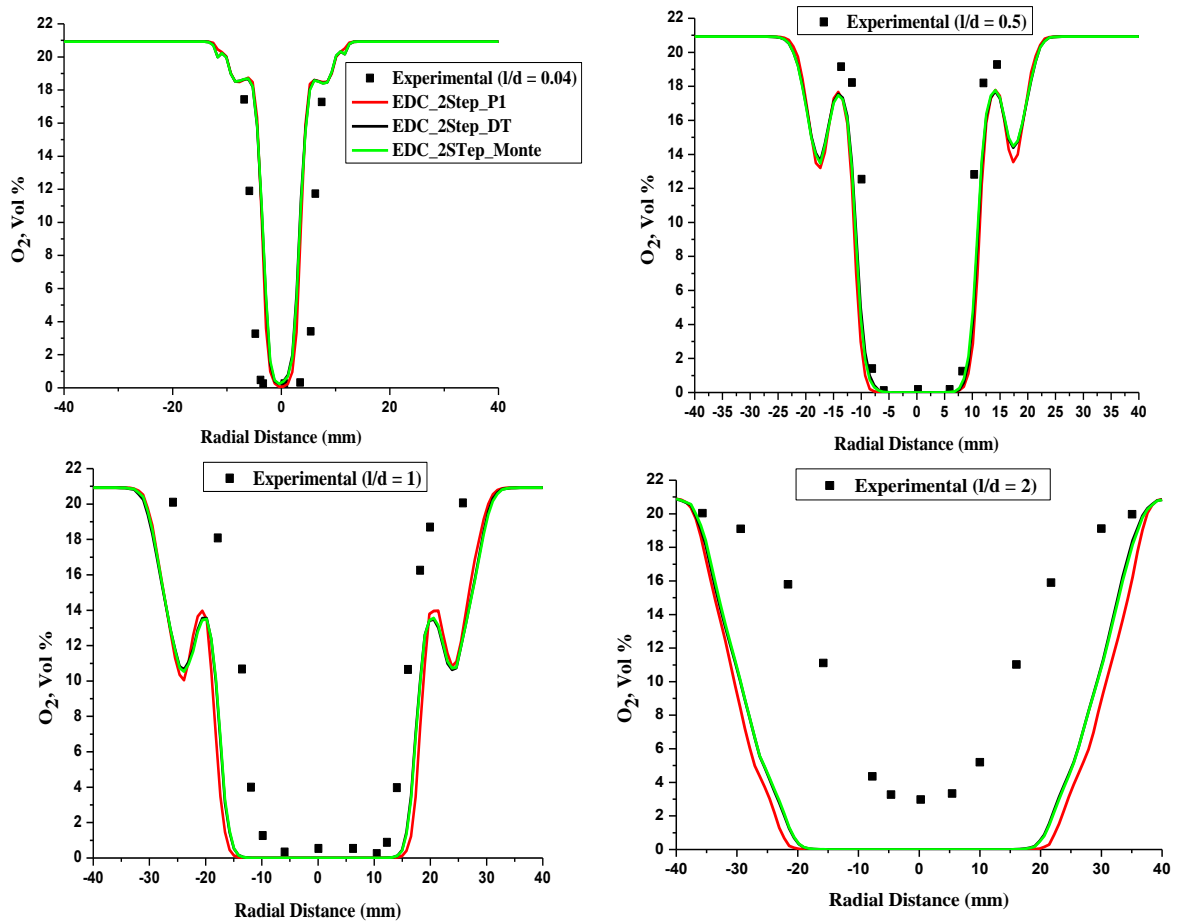
Εικόνα 59. Παραμετρική διερεύνηση της εξάρτησης της πρόβλεψης της συγκέντρωσης CO κατά την ακτινική διεύθυνση του καυστήρα από το μοντέλο ακτινοβολίας (P1, Discrete Transfer, Monte Carlo).

Παραμετρική διερεύνηση της επίδρασης του μηχανισμού καύσης και του μοντέλου ακτινοβολίας στην μεταβολή της συγκέντρωσης O₂





Εικόνα 60. Παραμετρική διερεύνηση της εξάρτησης της πρόβλεψης της κατ' όγκο συγκέντρωσης O_2 κατά την ακτινική διεύθυνση του καυστήρα από τον μηχανισμό καύσης (ενός και δύο βημάτων).



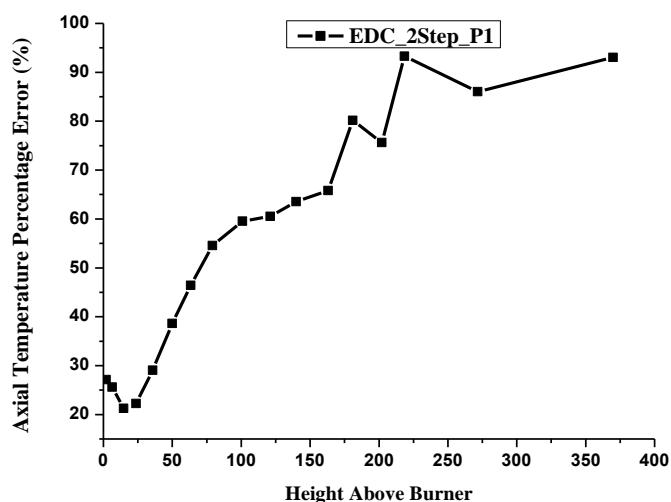
Εικόνα 61. Παραμετρική διερεύνηση της εξάρτησης της πρόβλεψης της κατ' όγκο συγκέντρωσης O_2 κατά την ακτινική διεύθυνση του καυστήρα από το μοντέλο ακτινοβολίας (P1, Discrete Transfer, Monte Carlo).

Με βάση την διαπραματική μελέτη που προηγήθηκε καταλήγουμε όπως αναμενόταν ότι ο μηχανισμός καύσης των δύο βημάτων είναι πιο ρεαλιστικός στην πρόβλεψη τόσο της θερμοκρασίας όσο και της συγκέντρωσης των αερίων συστατικών Όσον αφορά το σκέλος του μοντέλου ακτινοβολίας η συμπεριφορά των P1, Discrete Transfer και Monte Carlo είναι σχεδόν παρόμοια με εξαίρεση τις συγκεντρώσεις των αερίων εκπομπών για $l/d = 2$ όπου φαίνεται τα Discrete Transfer και Monte Carlo να υπερτερούν ελαφρά ειδικά στις περιπτώσεις πρόβλεψης της θερμοκρασίας, CO_2 και O_2 .

Λαμβάνοντας όμως υπόψη το αυξημένο υπολογιστικό τους κόστος καταλήξαμε στο P1 ως μία εξίσου αξιόπιστη επιλογή για την προσομοίωση της μεταφοράς θερμότητας μέσω ακτινοβολίας. Συνεπώς, ως καταλληλότερο υπολογιστικό μοντέλο για την αριθμητική επίλυση του προβλήματος της τυρβώδους καύσης από άποψη ακρίβειας και υπολογιστικής οικονομίας κρίθηκε το EDC_2Step_P1. Το πόσο καλά μπορεί να περιγράψει το θερμικό πεδίο απεικονίζεται ποσοτικά με το μέσο σφάλμα πρόβλεψης της θερμοκρασίας και των συγκεντρώσεων των CO₂, CO και O₂ για τα ύψη l/d: 0.04, 0.5, 1 και 2 πάνω από την έξοδο του καυστήρα στον Πίνακα 8. Οι πειραματικές μετρήσεις της ακτινικής κατανομής αντιστοιχούν σε θετικές ακτίνες (μισό προφίλ) αξιοποιώντας την συμμετρία των πειραματικών καμπυλών (Εικόνες 22-25).

Ύψος πάνω από τον καυστήρα (l/d)	T (°C)	CO ₂ , Vol(%)	CO (ppm)	O ₂ , Vol(%)
0.04	62.20 % (5 μετρήσεις)	85.86 % (3 μετρήσεις)	90.19 % (4 μετρήσεις)	632.84 % (5 μετρήσεις)
0.50	61.34 % (7 μετρήσεις)	316.13 % (6 μετρήσεις)	128.91 % (7 μετρήσεις)	62.10 % (6 μετρήσεις)
1.0	128.56 % (7 μετρήσεις)	1047.87 % (8 μετρήσεις)	82.74 % (10 μετρήσεις)	78.72 % (9 μετρήσεις)
2.0	48.18 % (7 μετρήσεις)	258.54 % (9 μετρήσεις)	132.02 % (7 μετρήσεις)	81.35 % (7 μετρήσεις)
Συνολικό Μέσο Σφάλμα (%)	75.07%	427.1%	108.47%	213.75%

Πίνακας 8. Οι επί τοις εκατό τιμές των σφαλμάτων της θερμοκρασίας και των συγκεντρώσεων των αερίων συστατικών: CO₂, CO και O₂. Οι αριθμητικοί υπολογισμοί έγιναν με βάση τον συνδυασμό των μοντέλων: EDC (καύσης), 2βημάτων και P1 (ακτινοβολίας). Επιπλέον, επισυνάπτεται και το πλήθος των πειραματικών τιμών που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε έναν από τους υπολογισμούς για την εκτίμηση του σφάλματος.



Εικόνα 62. Ποσοστιαία μεταβολή του σφάλματος της αξονικής θερμοκρασίας. Για τον υπολογισμό των τιμών λήφθηκαν υπόψη 17 πειραματικές τιμές.

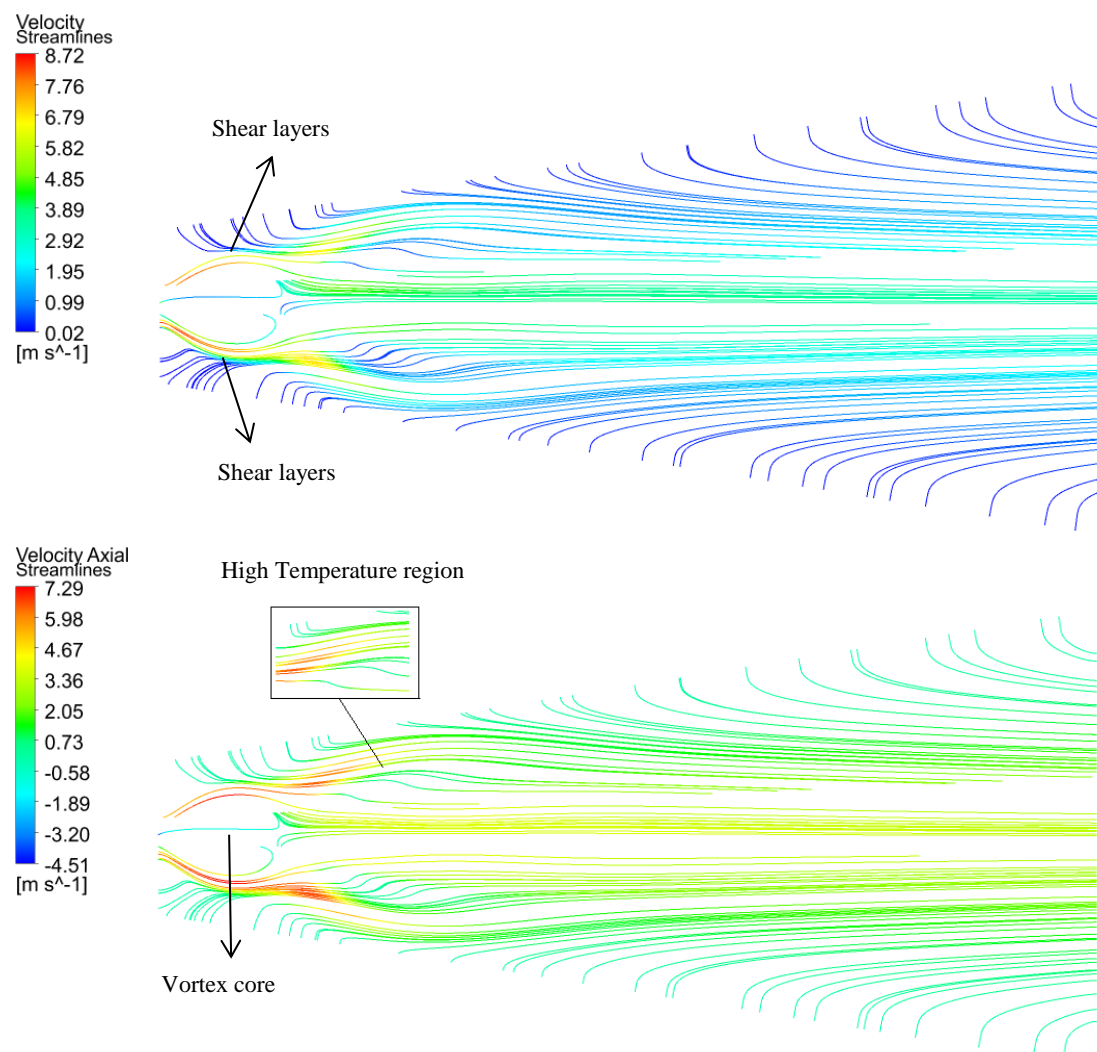
Τα αριθμητικά αποτελέσματα αποκαλύπτουν πως η προσπάθεια να κατασκευάσουμε ένα μοντέλο πρόβλεψης δεν είναι παρά μία προσέγγιση στην οποία επιβάλλεται να γίνουν τροποποιήσεις αν θέλουμε να καταλήξουμε σε ένα αξιόπιστο και ποσοτικά υπολογιστικό μοντέλο περιγραφής του φαινομένου της τυρβώδους καύσης με συστροφή. Ωστόσο, με δεδομένο πως ακολουθεί την ποιοτική μεταβολή των εξεταζόμενων μεγεθών θα το αξιοποιήσουμε στο βαθμό που μας το επιτρέπει για να κατανοήσουμε καλύτερα το προκύπτον ροϊκό και θερμικό πεδίο.

6.4 Γενικά Χαρακτηριστικά Αναπτυσσόμενου Πεδίου Ροής

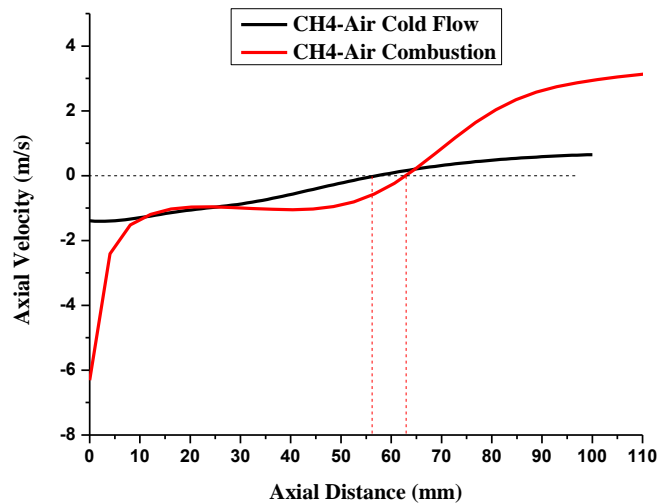
Ολοκληρώνοντας τη σειρά των παραμετρικών διερευνήσεων με απώτερο στόχο την εύρεση ενός ικανοποιητικού υπολογιστικού μοντέλου έχουμε καταλήξει σε: πλέγμα (Denser), μοντέλο τύρβης (RNG k-ε), μηχανισμό καύσης (διβηματικός), μοντέλο αλληλεπίδρασης χημείας της καύσης και της τύρβης (EDM) και μοντέλο ακτινοβολίας. Με βάση αυτό τον συνδυασμό θα επιχειρήσουμε στην παρούσα ενότητα να παρουσιάσουμε και να σχολιάσουμε κάποια από τα βασικά χαρακτηριστικά της μορφής του αναπτυσσόμενου ροϊκού και θερμικού πεδίου.

Ροϊκό πεδίο

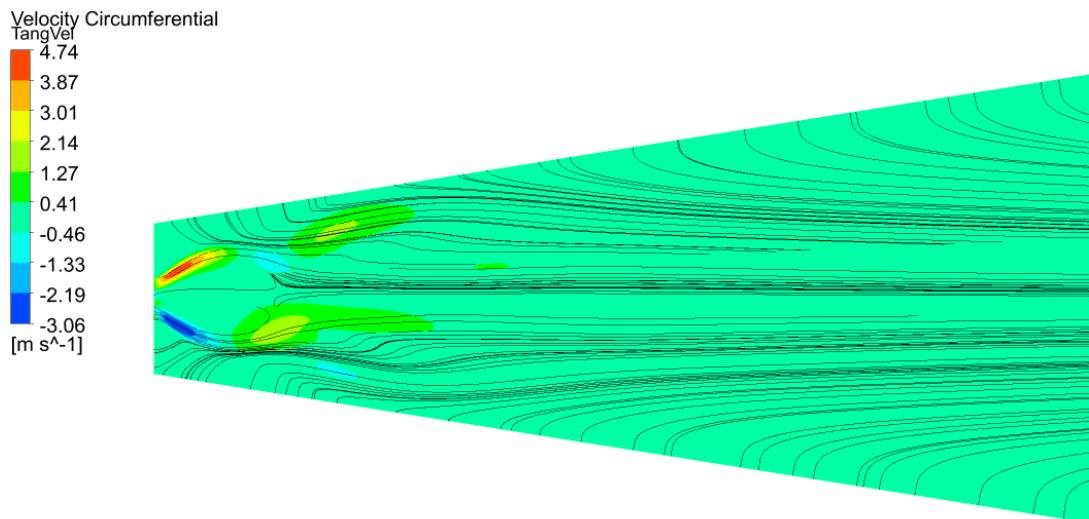
Στην περίπτωση των φλογών μεθανίου ο αριθμός συστροφής υπολογίστηκε σε **0.13** οπότε παρατηρείται μείωση σε σύγκριση με την αντίστοιχη ισοθερμοκρασιακή ροή. Αυτό όπως είναι φυσικό έχει επιδράσει στην μορφή του πεδίου ροής (Εικόνα 63) με την περιοχή ανακυκλοφορίας να απεικονίζεται δίχως τις έντονες στροβιλώδεις δομές (weak vortex) της Εικόνας 47. Ο στρόβιλος στην αντιδρώσα ροή όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις τις οποίες περιγράψαμε περιβάλλεται από στρώματα διάτμησης (shear layers) στα οποία τα θερμά προϊόντα της καύσης αναμιγνύονται με φρέσκο μίγμα μεθανίου – αέρα με αποτέλεσμα να σταθεροποιείται η καύση μαζί και η φλόγα σε αυτές τις περιοχές.



Εικόνα 63. Οι ροϊκές γραμμές της πολυσυστατικής αντιδρώσας ροής CH₄-αέρα στο επίπεδο x-y του καυστήρα χρωματισμένες ανάλογα με την τιμή της ολικής ταχύτητας (πάνω απεικόνιση) και της αξονικής συνιστώσας της (κάτω απεικόνιση).



Εικόνα 64. Σύγκριση της μεταβολή της αξονικής ταχύτητας ως προς την αξονική διεύθυνση x για πολυσυστατική μη αντιδρώσα (μαύρη καμπύλη) και αντιδρώσα (κόκκινη καμπύλη) ροή μεθανίου-αέρα.

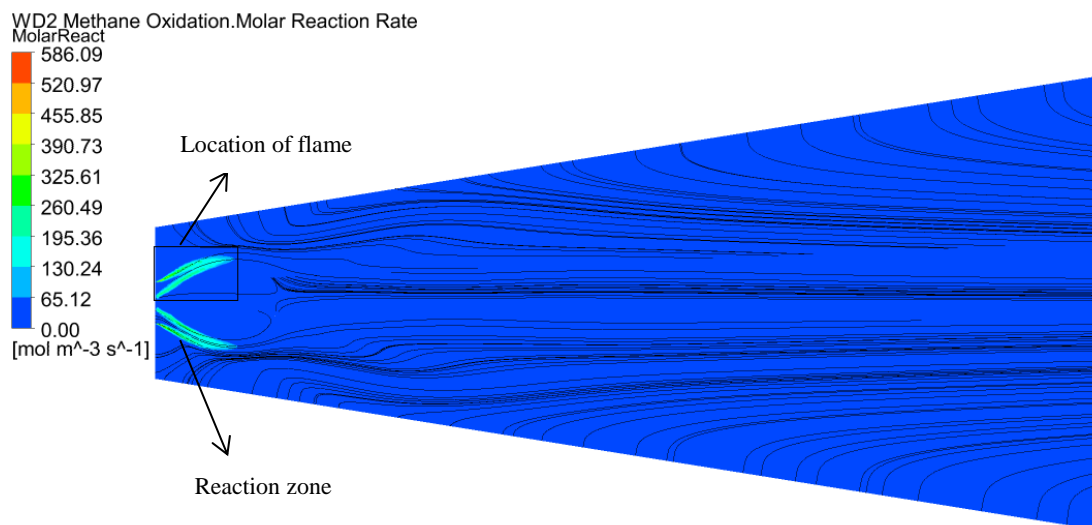


Εικόνα 65. Οι ροϊκές γραμμές της πολυσυστατικής αντιδρώσας ροής CH_4 -αέρα στο επίπεδο x - y του καυστήρα με υπέρθεση των ισοεπιφανειών της εραπτομενικής συνιστώσας της ταχύτητας.

Η μείωση της συστροφής αποτυπώνεται και ποσοτικά στο διάγραμμα της Εικόνας 64. Εκεί παρατηρείται πως από τη στιγμή που η ταχύτητα τροφοδοσίας του αέρα (κύριος φορέας συστροφής) έχει παραμείνει αναλλοίωτη σε σχέση με την ισοθερμοκρασιακή ροή η αξονική ταχύτητα του μίγματος είναι εκείνη η οποία καθορίζει τον βαθμό συστροφής. Ως εκ τούτου η αύξηση του μέτρου της οδηγεί στην πτώση της συστροφής. Κατά τ' άλλα η έκταση της περιοχής ανακυκλοφορίας κατά την αξονική διεύθυνση x φαίνεται να αυξάνεται λίγο (περίπου 10mm) χωρίς όμως να διαπιστώνονται άλλες αξιοσημείωτες μορφολογικές αλλαγές στο πεδίο ροής σε σύγκριση με την αντίστοιχη ισοθερμοκρασιακή.

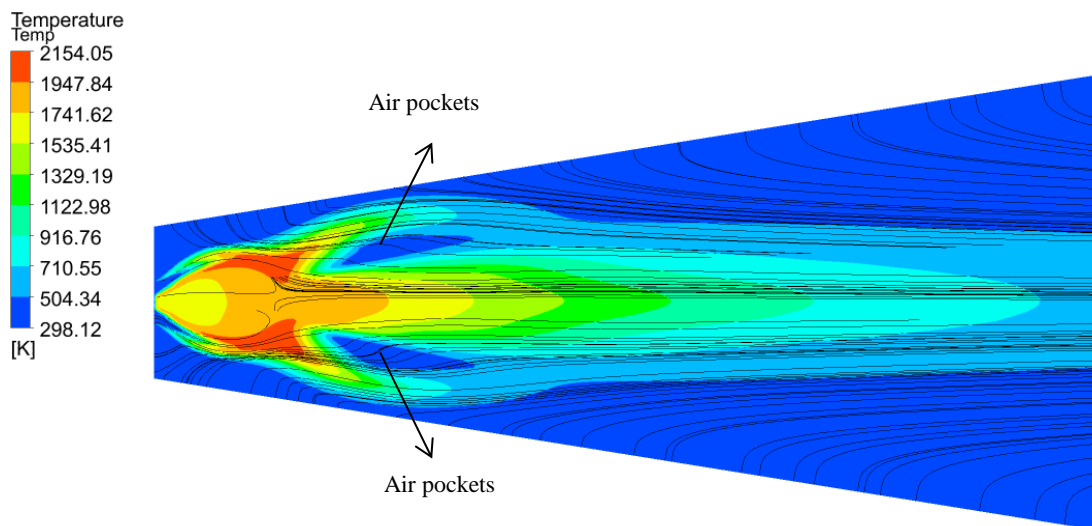
Θερμικό πεδίο

Όπως έχει γίνει αντιληπτό από την έως τώρα ανάλυση ροϊκό και θερμικό πεδίο βρίσκονται σε διαρκή και στενή αλληλεπίδραση με το δεύτερο να διαμορφώνεται με βάση τα χαρακτηριστικά του πρώτου. Μία άμεση παρατήρηση η οποία επιβεβαιώνει αυτή την γενική αρχή είναι η απεικόνιση του μοριακού ρυθμού αντίδρασης του μεθανίου και κατ' επέκταση της θέσης της φλόγας. Η φλόγα (Εικόνα 66) έχει σταθεροποιηθεί γύρω από τον στρόβιλο και συγκεκριμένα στα στρώματα διάτμησης όπως επισημάνθηκε και στη περιγραφή του ροϊκού πεδίου.



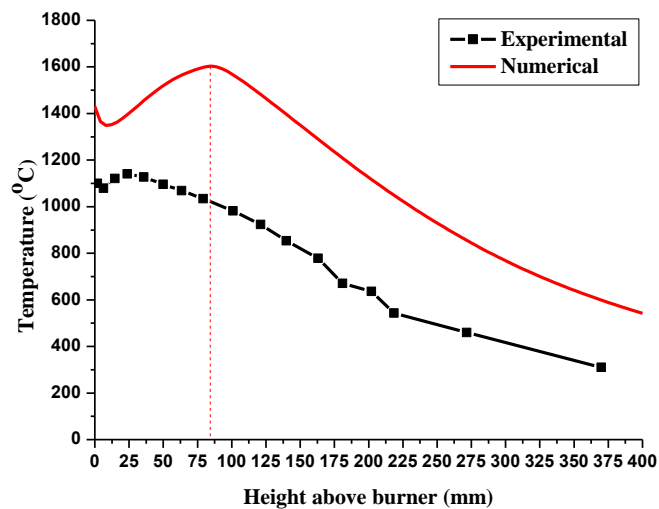
Εικόνα 66. Οι ροϊκές γραμμές της πολυσυστατικής αντιδρώσας ροής CH₄-αέρα στο επίπεδο x-y του καυστήρα με υπέρθεση των ισοεπιφανειών του μοριακού ρυθμού αντίδρασης του μεθανίου.

Επιπρόσθετα παρατηρείται πως γύρω από τον κεντρικό άξονα και εντός της ζώνης ανακυκλοφορίας (έως και 65mm κατάντη του ακροφυσίου) η θερμοκρασία έχει σχετικά χαμηλή τιμή, γεγονός που εξηγείται αν λάβουμε υπόψη πως σε αυτή την περιοχή το μίγμα ανανεώνεται συνεχώς με φρέσκο, κρύο σχετικά μίγμα λόγω των υψηλών αξονικών ταχυτήτων που επικρατούν. Από την άλλη πλευρά οι υψηλότερες θερμοκρασίες παρατηρούνται να αποκλίνουν από τον κεντρικό άξονα, τοποθετημένες στις περιοχές της μέγιστης ταχύτητας μεταξύ στροβίλου και στρωμάτων διάτμησης (περιοχές ανάμιξης και σταθεροποίησης της φλόγας).



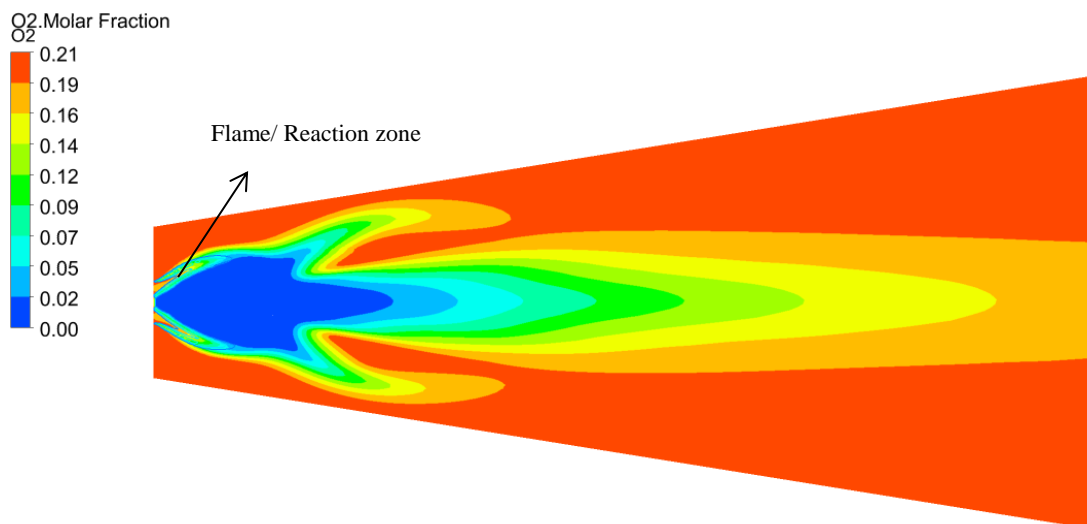
Εικόνα 67. Οι ροϊκές γραμμές της πολυσυστατικής αντιδρώσας ροής CH₄-αέρα στο επίπεδο x-y του καυστήρα με υπέρθεση των ισοεπιφανειών της θερμοκρασίας.

Ένα ακόμη ενδιαφέρον σημείο είναι πως λόγω της έντονης καμπύλωσης των ροϊκών γραμμών τα προϊόντα της καύσης φαίνεται να ακολουθούν ανάλογη πορεία με αποτέλεσμα να αφήνουν χώρο ο οποίος σύμφωνα με την αριθμητική επίλυση καταλαμβάνεται από θύλακες αέρα (Εικόνα 67). Για το φαινόμενο αυτό δεν έχουμε στη διάθεση μας κάποιοι είδους πειραματική αιτιολόγηση. Σύμφωνα όμως με το αριθμητικό μοντέλο σε αυτές τις περιοχές (γύρω στα 12cm κατάντη του ακροφυσίου) παρατηρείται αύξηση της εφαπτομενικής ταχύτητας (Εικόνα 65) η οποία συμβάλλει όπως φαίνεται και από την κατανομή του O₂ στην εισροή ατμοσφαιρικού αέρα.



Εικόνα 68. Υπολογισμός της κατανομής της θερμοκρασίας ως προς την αξονική διεύθυνση του καυστήρα.

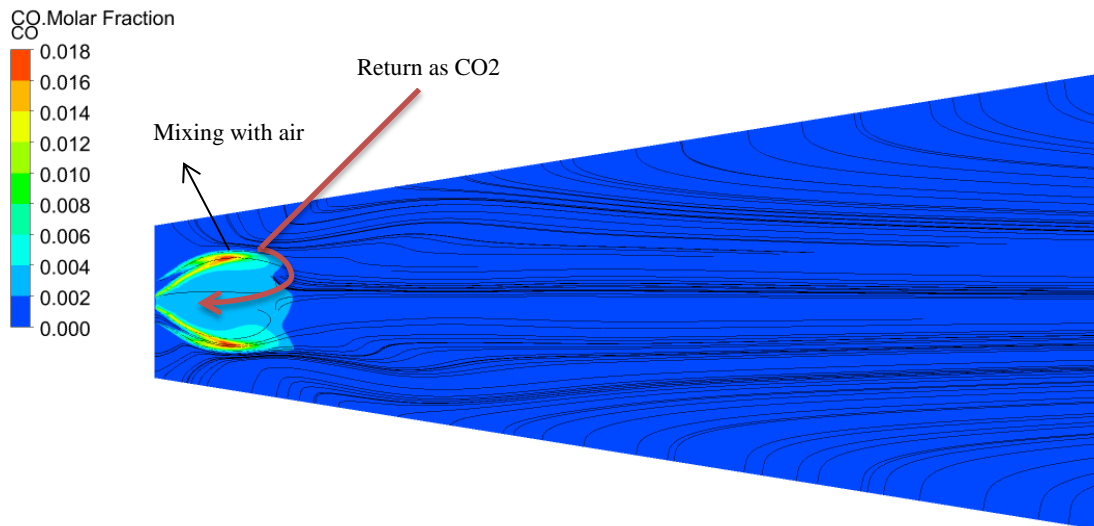
Η εικόνα του θερμικού πεδίου ολοκληρώνεται με την αναφορά στην χωρική κατανομή του O_2 και των αερίων εκπομπών (CO , CO_2).



Εικόνα 69. Οι ισοεισφανείς του μοριακού κλάσματος του O_2 στο επίπεδο x-y του καυστήρα με υπέρθεση των ισογραμμών του μοριακού ρυθμού αντίδρασης του μεθανίου.

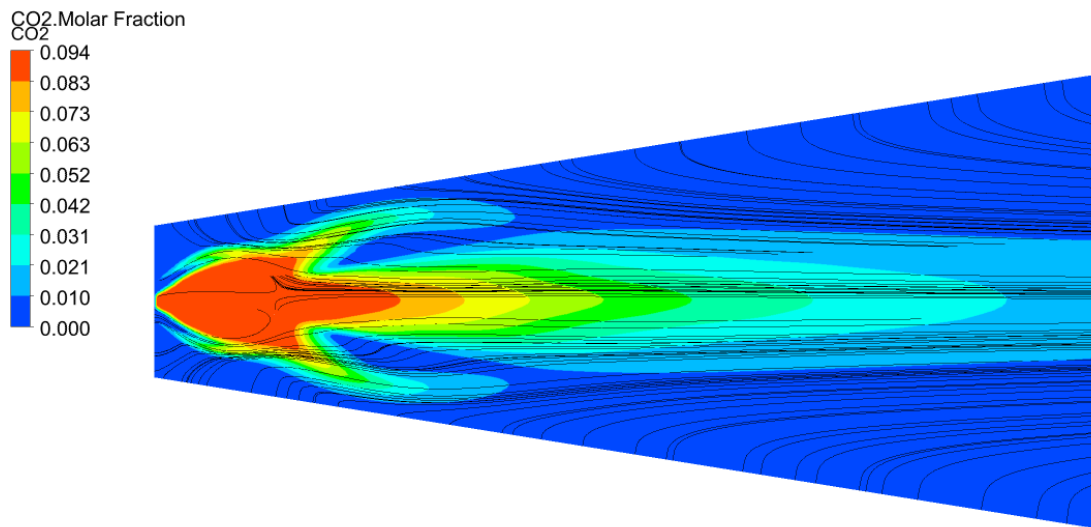
Η κατανομή του O_2 είναι χαρακτηριστική της ανάλυσης του ροϊκού πεδίου που προηγήθηκε. Ειδικότερα, φαίνεται πως η ανάμιξη των προϊόντων καύσης με φρέσκο μίγμα και αέρα συμβαίνει στις ζώνες διάτμησης (περιοχή υψηλών θερμοκρασιών). Αντίθετα, σύμφωνα με τα αριθμητικά αποτελέσματα στον πυρήνα του στροβίλου δεν έχουμε ανάμιξη με φρέσκο αέρα αλλά όπως επισημάνθηκε νωρίτερα ανατροφοδοσία με φρέσκο μίγμα από τις περιοχές διάτμησης - ανάμιξης.

Όπως είναι γνωστό η παραγωγή CO είναι πολύ υψηλή στην περιοχή της αντίδρασης (reaction zone). Αυτό επιβεβαιώνεται από την επίλυση αφού εκεί τοποθετούνται πράγματι οι υψηλότερες συγκεντρώσεις CO ενώ και η χωρική κατανομή του είναι ιδιαίτερα περιορισμένη γύρω από αυτές τις ζώνες. Το γεγονός αυτό σχετίζεται επίσης και με την επιλογή των μοντέλων που έχουμε κάνει. Δεν θα πρέπει να ξεχνάμε πως το CO είναι ένα ενδιάμεσο προϊόν (διβηματικός μηχανισμός) στην αλυσίδα των αντιδράσεων οπότε από την στιγμή που γίνεται η ανάμιξη με φρέσκο αέρα στα shear layers, μέσω της ανακυκλοφορίας επανέρχεται οξειδωμένο ως CO_2 στον πυρήνα του στροβίλου.



Εικόνα 70. . Οι ισοεπιφάνειες του μοριακού κλάσματος του CO στο επίπεδο x-y του καυστήρα με υπέρθεση των ροϊκών γραμμών.

Η κατανομή του CO₂ και η έντονη παρουσία του στην περιοχή της ανακυκλοφορίας φαίνονται στην Εικόνα 71. Τέλος, είναι ξεκάθαρο πως η χωρική κατανομή του ως προϊόν της αντίδρασης είναι αντίστροφη αυτής του O₂ (Εικόνα 69) το οποίο ανήκει στα αντιδρώντα και καταναλώνεται μαζί με το μεθάνιο για την παραγωγή του.



Εικόνα 71. Οι ισοεπιφάνειες του μοριακού κλάσματος του CO₂ στο επίπεδο x-y του καυστήρα με υπέρθεση των ροϊκών γραμμών.

7. Προσομοίωση Καυστήρα Συστροφής

Στο τελευταίο Κεφάλαιο θα προσπαθήσουμε να χρησιμοποιήσουμε το παρόν υπολογιστικό μοντέλο για την αξιολόγηση παραμέτρων όπως η ισχύς λειτουργίας του συστήματος και ο λόγος αέρα καυσίμου λ . Ειδικότερα, επιχειρήθηκαν δύο δοκιμές. Πρώτον διπλασιάσαμε τις παροχές καυσίμου και οξειδωτικού διπλασιάζοντας έτσι την παρεχόμενη ισχύ από τα 5 στα 10kW και δεύτερον διπλασιάσαμε την παροχή του αέρα ($\lambda = 2$, φτωχό μίγμα).

Υπολογιστικές δοκιμές	Μεθάνιο	Αέρας	Λόγος αέρα καυσίμου	Θερμική ισχύς
Πιστοποίηση μοντέλου (βλ. Ενότητα 6.3)	8.36 slpm	80.5 slpm	1	5 kW
1	16.72 slpm	161 slpm	1	10 kW
2	8.36 slpm	161 slpm	2	5 kW

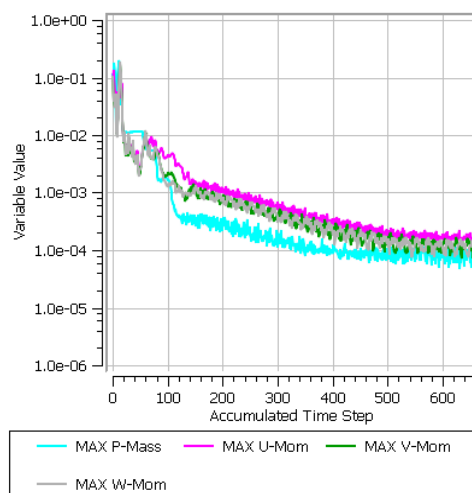
Πίνακας 9. Βασικά χαρακτηριστικά λειτουργίας του καυστήρα για τα υπολογιστικά πειράματα (δοκιμές 1, 2).

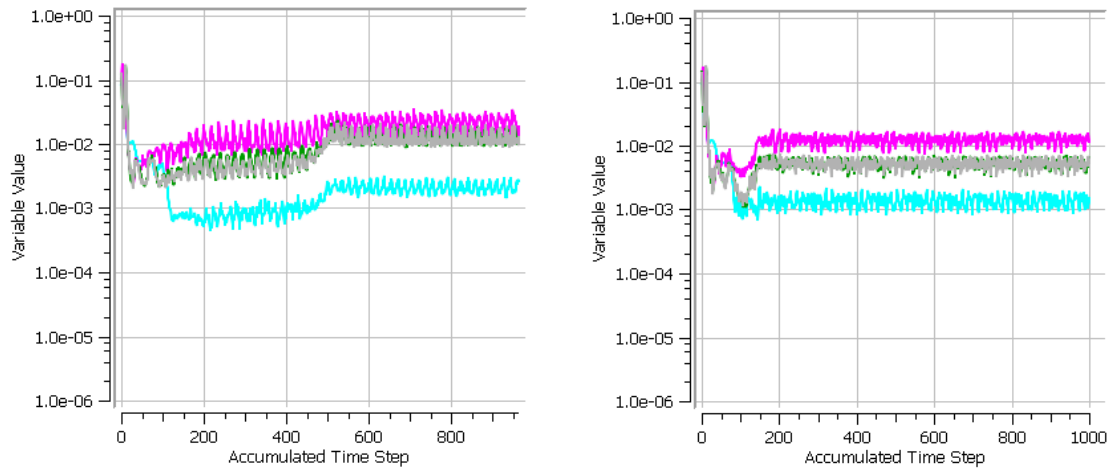
7.1 Υπολογιστικό Χωρίο

Το υπολογιστικό χωρίο είναι ίδιο με αυτό της ενότητας 6.3 αφού πρόκειται για πολυφασική και αντιδρώσα ροή. Όπως και εκεί η επίλυση έγινε σε δύο στάδια. Πρώτα λύθηκε το πρόβλημα της ψυχρής λειτουργίας χρησιμοποιώντας τις κατάλληλες συνοριακές συνθήκες για αέρα και καύσιμο (βλ. Πίνακα 9) και ύστερα στο χωρίο της Εικόνας 51 με συνοριακές συνθήκες τις τιμές που υπολογίσαμε από την ισοθερμοκρασιακή επιλύσαμε την αντιδρώσα ροή. Οι παράμετροι επίλυσης συμπεριλαμβανομένης της μοντελοποίησης των εξισώσεων μεταφοράς έχει ήδη γίνει και αναλυθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο (υπολογιστική δοκιμή πιστοποίησης, βλ Πίνακα 9) οπότε στη συνέχεια η αναφορά μας θα επικεντρωθεί στην παράθεση και ερμηνεία των υπολογιστικών αποτελεσμάτων.

7.2 Υπολογιστικά Αποτελέσματα

Η προσομοίωση της καύσης στις δύο υπολογιστικές δοκιμές παρουσίασε προβλήματα σύγκλισης όπως φαίνεται και στη σχετική εικόνα με αποτέλεσμα να καθίσταται παρακινδυνευμένη η χρησιμοποίηση των αποτελεσμάτων της αριθμητικής επίλυσης για την αξιολόγηση της λειτουργίας του καυστήρα. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να έχουμε κατά νου πως χειριζόμαστε ένα υπολογιστικό μοντέλο το οποίο στην περίπτωση της αντιδρώσας ροής έχει αποδειχθεί πως αποκλίνει σημαντικά από τις πειραματικές εκτιμήσεις (Πίνακας 8). Αρα, ξεκινάμε ήδη από μια δυσμενή θέση για προβλέψεις σχετικά με το θερμικό πεδίο η οποία επιδεινώνεται ακόμα περισσότερο από την παρατηρούμενη αδυναμία σύγκλισης.





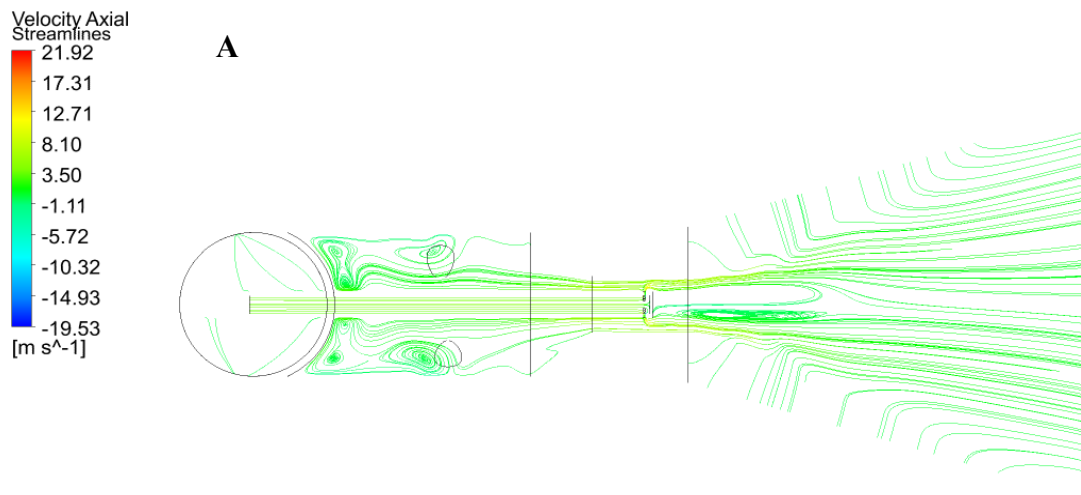
Εικόνα 72. Πορεία σύγκλισης των υπολογιστικών δοκιμών. Η πάνω εικόνα δείχνει την πορεία σύγκλισης της εξίσωσης συνέχειας και ορμής για την προσομοίωση της ενότητας 6.3 (πιστοποίηση με πειραματικά δεδομένα). Η κάτω αριστερά εικόνα απεικονίζει την υπολογιστική δοκιμή 1 ύστερα από 1 μέρα και 5 ώρες wall clock time και η κάτω δεξιά την δοκιμή 2 ύστερα από 1 μέρα και 7 ώρες οπότε και τερματίστηκε.

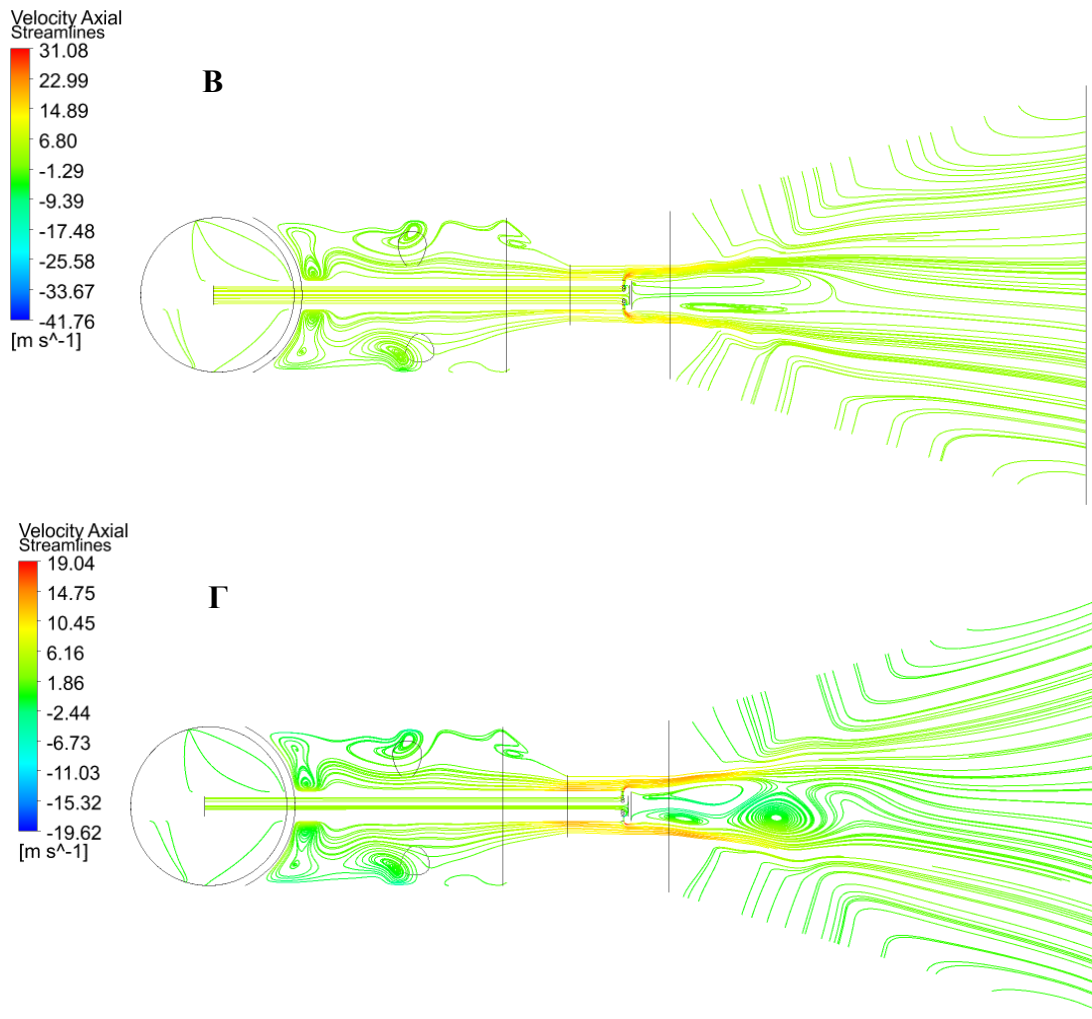
Το πρόβλημα το οποίο παραστατικότερα αποδίδεται στην Εικόνα 72 δεν μπορεί να εξηγηθεί μόνον από την αύξηση της συστροφής της δοκιμής 2 αλλά όπως φαίνεται και από την αποτυχία στην περίπτωση της 1 χρήζει περαιτέρω διερεύνησης από την οποία δεν μπορεί να παραληφθεί το πλέγμα ή ακόμα και οι διαστάσεις του τεχνητού χωρίου (πιθανή αύξηση της βάσης του κώνου).

Έτσι, τα αποτελέσματα της επίλυσης θα περιοριστούν στην περιγραφή του ροϊκού πεδίου και αυτά για πολυφασική μη αντιδρώσα ροή.

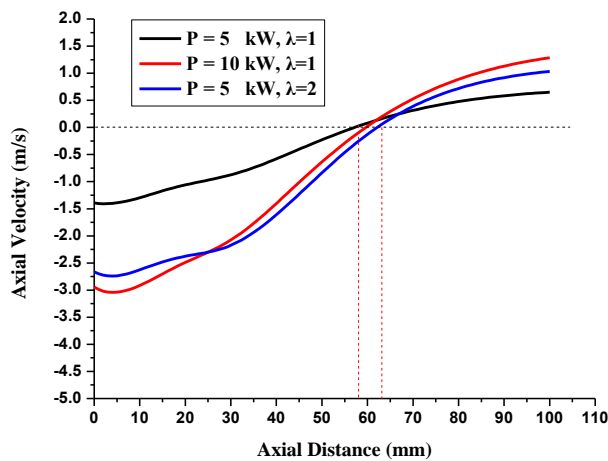
Ροϊκό πεδίο

Από την επίλυση των δοκιμών 1 και 2 προέκυψε ότι ο βαθμός συστροφής για την 1 παρέμεινε σχεδόν ο ίδιος (**0.23**) μιας και ο λόγος της παροχής του αέρα προς του καυσίμου ήταν αναλλοίωτος. Αντίθετα, στη δοκιμή 2 η αύξηση της ταχύτητας του αέρα συνετέλεσε σε αύξηση της συστροφής σε **S = 0.28**.





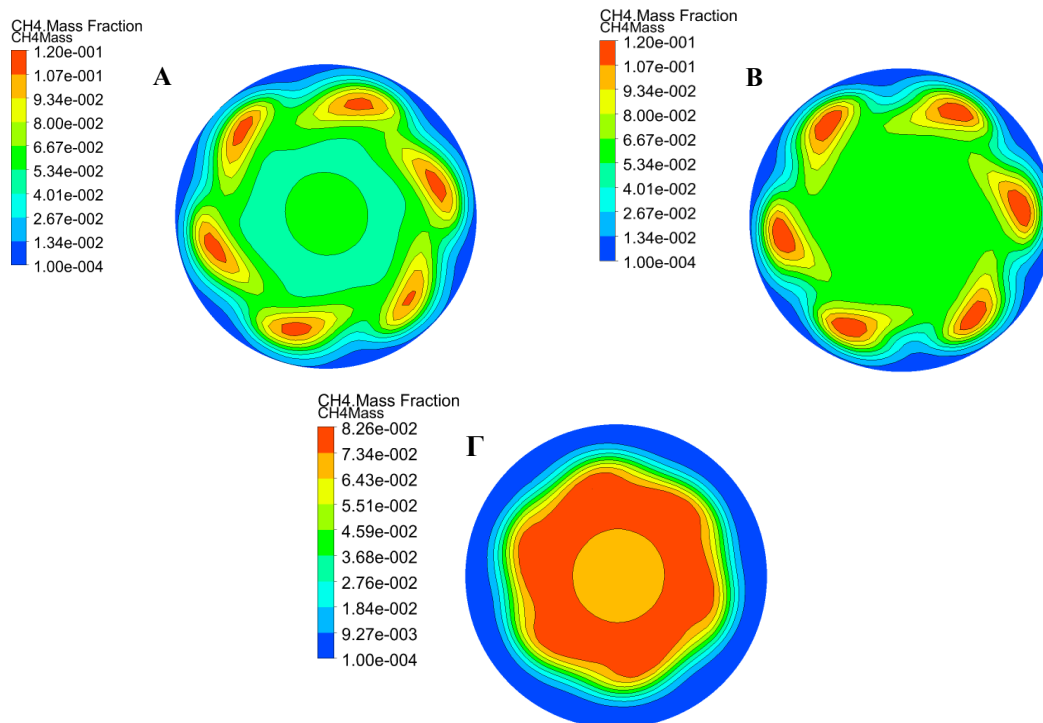
Εικόνα 73. Οι ροϊκές γραμμές της πολυσυστατικής αντιδράσας ροής CH₄-αέρα στο επίπεδο x-y του καυστήρα χρωματισμένες ανάλογα με την τιμή της αξονικής ταχύτητας. Α) δοκιμή με $\lambda = 1$, $P = 5$ kW, Β) δοκιμή με $\lambda = 1$, $P = 10$ kW και Γ) δοκιμή με $\lambda = 2$, $P = 5$ kW.



Εικόνα 74. Σύγκριση της μεταβολής της αξονικής ταχύτητας ως προς την αξονική διεύθυνση x για πολυσυστατική αντιδράσας ροή CH₄-αέρα. Οι τρεις καμπύλες αντιστοιχούν σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας.

Η αύξηση της έντασης του στρωβιλισμού αποτυπώνεται στη μορφή της ζώνης ανακυκλοφορίας. Έτσι, μεταξύ των πεδίων 73.A και 73.B δεν διαπιστώνονται ποιοτικές διαφορές αλλά μόνο ποσοτικές ως προς τις τιμές της αξονικής ταχύτητας. Η τελευταία φαίνεται πως για την περίπτωση που εξετάζουμε επηρεάζεται κυρίως από την ταχύτητα εκροής του jet καυσίμου.

Σε αντιδιαστολή με τις πρώτες δύο περιπτώσεις στην 73.Γ η αύξηση της ταχύτητας του αέρα και άρα της έντασης της περιστροφής είναι υπεύθυνη για τη δημιουργία ενός ακόμη στροβίλου κατάντη της ροής. Η κεντρική ζώνη ανακυκλοφορίας κοντά στο ακροφύσιο φαίνεται πως επεκτείνεται ακτινικά, προκαλώντας τον σχηματισμό στρωμάτων διάτμησης μεγαλύτερου πάχους διαφοροποιώντας έντονα τη μορφολογία της ροής που έως τώρα έχουμε περιγράψει.



Εικόνα 75. Οι ισογραμμές του κλάσματος μάζας μεθανίου στη διατομή του ακροφυσίου για Α) δοκιμή με $\lambda = 1$, $P = 5$ kW, Β) δοκιμή με $\lambda = 1$, $P = 10$ kW και Γ) δοκιμή με $\lambda = 2$, $P = 5$ kW.

Τέλος, η επίδραση της συστροφής εκτός από τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά της ροής επηρεάζει και την χωρική κατανομή του μεθανίου (Εικόνα 75). Χαρακτηριστική είναι περίπτωση της απεικόνισης 75.Γ στην οποία η ένταση του στροβιλισμού είναι τέτοια που αν και ο χώρος για την προανάμιξη οξειδωτικού-καυσίμου έχουμε διαπιστώσει πως είναι μικρός αρκεί για να σχηματίσει μια αρκετά πιο ομοιόμορφη κατανομή σε σχέση με τις αντίστοιχες των 75.Α, Β.

8. Γενικά Συμπεράσματα-Προτάσεις Μελλοντικής Διερεύνησης

Στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας, ασχοληθήκαμε με την υπολογιστική προσομοίωση ροής σε καυστήρα συστροφής σε μη αντιδρώσα και αντιδρώσα ροή. Αυτό το πολύ γενικό πλαίσιο εργασίας πρακτικά εξειδικεύτηκε σε δύο βασικές ενότητες. Πρώτον στη δόμηση ενός αξιόπιστου υπολογιστικού μοντέλου για την αντιδρώσα ροή μεθανίου-αέρα σε δοσμένες συνθήκες λειτουργίας και δεύτερον στην υπολογιστική επίλυση περιπτώσεων στις οποίες μεταβάλλονται παράμετροι όπως ο βαθμός συστροφής και η ισχύς λειτουργίας του καυστήρα.

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων και στα δύο αυτά επίπεδα καταλήξαμε στα εξής συμπεράσματα:

- Στις περιπτώσεις των μη αντιδρωσών ροών (αέρα-αέρα και μεθανίου-αέρα) το παρόν υπολογιστικό μοντέλο ακολουθεί ποιοτικά και ποσοτικά την ακτινική μεταβολή της ολικής ταχύτητας. Η παραμετρική μελέτη κατέληξε στην επιλογή του RNG k-ε ως μοντέλου τύρβης βάσει του οποίου το μέσο σφάλμα στην πρόβλεψη της ολικής ταχύτητας για την ροή αέρα ήταν 33.08% και σε αυτήν του μεθανίου-αέρα γύρω στο 40%. Πιο εξειδικευμένα για τους δύο αυτούς τύπους ροών συνοψίζουμε πως στη μονοσυστατική μη αντιδρώσα ροή αέρα-αέρα οι αριθμητικές προβλέψεις φαίνεται να υπερτιμούν τις μέγιστες ταχύτητες που αναπτύσσονται στο πεδίο ροής και αποτυγχάνουν να ακολουθήσουν την κατανομή κατά την ακτινική διεύθυνση. Το ίδιο συμβαίνει και στην περίπτωση της πολυσυστατικής ροής για την οποία χρήσιμες παρατηρήσεις μπορούν να γίνουν σχετικά με την κατανομή του μεθανίου. Η κατανομή του στο ακροφύσιο του καυστήρα διαπιστώθηκε ανομοιομορφη και ακτινική εξαιτίας της περιστροφικής κίνησης του αέρα. Το τελευταίο δικαιολογείται και από τον λιγοστό χώρο μήκους μόλις 13.5mm ο οποίος είναι διαθέσιμος για την ανάμιξη τους.
- Για την αντιδρώσα ροή μεθανίου-αέρα ο μηχανισμός καύσης δύο βημάτων με την ενδιάμεση παραγωγή CO αποδεικνύεται πιο κοντά στην πραγματικότητα. Επιπλέον, ως μοντέλο ακτινοβολίας προτιμήθηκε το P1 αν και υστερεί ελαφρά έναντι των Discrete Transfer και Monte Carlo ειδικά σε πιο μεγάλα αξονικά ύψη όπως στη θέση $l/d = 2.0$. Παρ' όλα αυτά, οι αποκλίσεις δεν είναι σημαντικές και με δεδομένη την υπολογιστική οικονομία που προσφέρει θεωρήθηκε ως μία αξιόπιστη επιλογή. Ποσοτικά οι προβλέψεις απέχουν σημαντικά (μέσο σφάλμα τουλάχιστον 70%) από τις πειραματικές και το υπολογιστικό μοντέλο φαίνεται πως προβλέπει πιο αποδοτική καύση (μεγαλύτερη θερμοκρασία και σημαντικά μικρότερη παραγωγή CO) από την πειραματικά παρατηρούμενη. Ως προς την μορφολογία του ροϊκού της πεδίου παρατηρείται δημιουργία στροβίλου εντός του οποίου τα θερμά προϊόντα της καύσης αναμιγνύονται με το φρέσκο μίγμα μεθανίου-αέρα με αποτέλεσμα να σταθεροποιείται η καύση και η φλόγα. Εξαιτίας αυτού του μηχανισμού και των υψηλών αξονικών ταχυτήτων στον πυρήνα του στροβίλου η θερμοκρασία διατηρείται σχετικά χαμηλά. Αντίθετα οι μέγιστες τιμές της παρατηρούνται ακτινικά ως προς τον κεντρικό άξονα και πιο συγκεκριμένα μεταξύ των στρωμάτων διάτμησης και του στροβίλου. Ως προς τις αέριες εκπομπές η παραγωγή του CO περιορίζεται κατά κύριο λόγο στην περιοχή της αντίδρασης (reaction zone) και η κατανομή του CO₂ είναι σχεδόν αντίστροφη αυτής του O₂. Το τελευταίο είναι φυσιολογικό αφού το CO₂ πρόκειται για προϊόν της αντίδρασης που παράγεται από την κατανάλωση μεθανίου και οξυγόνου.

Το υπολογιστικό μοντέλο στο οποίο καταλήξαμε από τις παραμετρικές διερευνήσεις των δύο ειδών μη αντιδρωσας ροής και της αντιδρωσας αποδείχθηκε ιδιαίτερα ευαίσθητο στις αλλαγές των παραμέτρων λειτουργίας του καυστήρα. Επομένως, επιβάλλεται επέκταση της διερεύνησης για την δόμηση του (χωρίο, πλέγμα, μοντέλα εξισώσεων μεταφοράς). Ωστόσο η χρήση του για την αξιολόγηση της επίδρασης παραμέτρων όπως η ισχύς λειτουργίας και ο αριθμός συστροφής στο πεδίο ροής και δη σε επίπεδο ψυχρής λειτουργίας κατέληξε σε ορισμένα εξαγόμενα που παρουσιάζουν επίσης ενδιαφέρον:

- Με τον διπλασιασμό της ισχύος δεν παρατηρούνται σημαντικές ποιοτικές διαφορές στη μορφή του ροϊκού πεδίου. Ποσοτικά όμως αυξάνονται οι αξονικές ταχύτητες οπότε είναι πιθανή στην καύση η βελτίωση της σταθεροποίησης της φλόγας και η μείωση του μήκους της. Επιπρόσθετα η κατανομή του μεθανίου συνεχίζει να είναι χωρικά ανομοιόμορφη στη διατομή του ακροφυσίου του καυστήρα όπως περίπου είχε παρατηρηθεί και στη λειτουργία με την μισή ισχύ.
- Στην περίπτωση αύξησης του λόγου αέρα-καυσίμου ($\lambda = 2$) η συνακόλουθη αύξηση της συστροφής οδηγεί στον σχηματισμό δύο περιοχών ανακυκλοφορίας με τη δεύτερη να είναι μακριά από το ακροφύσιο κατάντη της ροής. Ακόμη παρατηρείται ακτινική επέκταση του στρόβιλου και σχηματισμός μεγαλύτερου πάχους στρωμάτων διάτμησης-ανάμιξης. Τέλος, σχετικά με την κατανομή του κλάσματος μάζας του μεθανίου παρατηρείται σαφώς μεγαλύτερη ομοιογένεια στη διατομή του ακροφυσίου του καυστήρα.

Η παρούσα μοντελοποίηση του εργαστηριακού καυστήρα συστροφής δεν θα πρέπει να θεωρηθεί ως τελική απάντηση στο εξεταζόμενο πρόβλημα αλλά ως μία αρχική προσέγγιση των φλογών μεθανίου ειδικά σε επίπεδο ποσοτικής εκτίμησης. Σε αυτό το πλαίσιο είναι ευνόητο πως χωρούν αρκετές τροποποιήσεις-προτάσεις για μελλοντική διερεύνηση οι οποίες κάλλιστα θα μπορούσαν να αποτελέσουν μέρος σχετικών εργασιών.

Ως πρώτο βήμα λοιπόν, προτείνεται η απλοποίηση της γεωμετρίας του καυστήρα και η δημιουργία κατά το δυνατόν δομημένου πλέγματος ώστε να εξασφαλίσουμε υπολογιστική οικονομία και να αποκτήσουμε μιας καλύτερης ποιότητας χωρική διακριτοποίηση. Επιπλέον, η απότομη πτώση της θερμοκρασίας με την εμφάνιση θυλάκων αέρα (air rockets) όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στην Εικόνα 67 υποδεικνύουν πως το χωρίο δεν είναι αρκετά μεγάλο κατά την ακτινική διεύθυνση, οπότε συστήνεται η αύξηση της διαμέτρου της βάσης του κώνου εξασφαλίζοντας λογικότερα από φυσικής άποψης αποτελέσματα και καλύτερη συμπεριφορά σύγκλισης. Εκτός από την γεωμετρία και το πλέγμα σε επίπεδο μοντελοποίησης οι διεξαχθείσες παραμετρικές διερευνήσεις κατέδειξαν ως βασικούς συντελεστές για την ικανότητα πρόβλεψης την μοντελοποίηση της τύρβης και της καύσης. Έχοντας αυτό υπόψη σε συνδυασμό με τον χαρακτηρισμό της ροής ως χαμηλής συστροφής ($S = 0.13$ για την αντιδρώσα) θα μπορούσε να δοκιμαστεί κάποιο άλλο μοντέλο τύρβης όπως το realizable k-ε του ANSYS Fluent το οποίο όπως και το RNG k-ε προτείνονται αμφότερα από το θεωρητικό εγχειρίδιο του πακέτου. Όσον αφορά την καύση η χρήση ενός μοντέλου μερικής προανάμιξης θα ήταν μία δόκιμη επιλογή που πιθανώς να χαρακτηριζόταν πιστότερα το θερμικό πεδίο με δεδομένο πως η χωρική κατανομή του μεθανίου στη διατομή του καυστήρα διαπιστώθηκε ανομοιόμορφη.

Πέραν από αλλαγές πάνω στις επιλογές που κάναμε κατά την πορεία δόμησης του μοντέλου μπορούν να προταθούν και ιδέες επέκτασης της παρούσας εργασίας. Για παράδειγμα θα ήταν ιδιαίτερος χρήσιμος να ληφθούν πειραματικές μετρήσεις που να αφορούν την αξονική ταχύτητα των υπό μελέτη ροών ώστε να εμπλουτιστεί ο ροϊκός χαρακτηρισμός τους με τον προσδιορισμό της ζώνης ανακυκλοφορίας που αποδείχθηκε τόσο σημαντική για το μελετώμενο φαινόμενο. Βεβαίως δεν θα πρέπει να ξεχνάμε πως η συστροφή και ειδικά ο στρόβιλος έχουν εγγενή χρονικά εξαρτώμενα χαρακτηριστικά (κίνηση του στρόβιλου, κατάρρευση του) τα οποία έχει αποδειχθεί από συναφείς πειραματικές και αριθμητικές εργασίες πως παίζουν πιο κρίσιμο ρόλο από τις αντίστοιχες μέσες τιμές ως προς την μελέτη της ευστάθειας της καύσης και της διαδικασίας ανάμιξης. Συνεπώς, θα είχε νόημα η προσομοίωση του παρόντος προβλήματος ως transient και ιδιαίτερο ενδιαφέρον η μελέτη πιθανών φαινομένων αστάθειας.

Βιβλιογραφία

- [1] AbdelGayed, H.M., Abdelghaffar, W.A., El Shorbagy, K., Main flow characteristics in a lean premixed swirl stabilized gas turbine combustor - numerical computations. *Am J Sci Ind Res*, 2013.
- [2] Al-Abdeli, Y.M.A., Experiments in turbulent swirling non-premixed flames and isothermal flows, in: PhD Thesis, School of Aerospace, Mechanical & Mechatronic Engineering 2004, The University of Sydney, Sydney (Australia).
- [3] Al-Abdeli, Y.M., Masri, A.R., Precession and recirculation in turbulent swirling isothermal jets, *Combust. Sci. Technol.* 176 (5–6) 645–665, 2004.
- [4] Al-Abdeli, Y.M., Masri, A.R., Stability characteristics and flowfields of turbulent non-premixed swirling flames, *Combust. Theor. Model.* 7 (4) 731–766, 2003.
- [5] Al-Abdeli, Y.M., Masri, A.R., Turbulent swirling natural gas flames: stability characteristics, unsteady behavior and vortex breakdown, *Combust. Sci. Technol.* 179 (1–2) 207–225, 2007.
- [6] Al-Abdeli, Y.M., Masri, A.R., Marquez, G.R., Starner, S.H., Time-varying behavior of turbulent swirling nonpremixed flames, *Combust. Flame* 146 (1–2) 200–214, 2006.
- [7] Al-Omari, S. A. B., Kawajiri, K., and Yonesawa, T., Soot Processes in a Methane-Fueled Furnace and Their Impact on Radiation Heat Transfer to Furnace Walls, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 44, pp. 2567–2581, 2001.
- [8] Anacleto, P.M., Fernandes, E.C., Heitor, M.V., Shtork, S.I., Swirl flow structure and flame characteristics in a model lean premixed combustor, *Combust. Sci. Technol.* 175 (8) 1369–1388, 2003.
- [9] ANSYS CFX Solver Theory Manual.
- [10] Ax, H., Stopper, U., Meier, W., Aigner, M., Guthe, F., Experimental analysis of the combustion behavior of a gas turbine burner by laser measurement techniques, in: *Proceedings of the ASME Turbo Expo 2009: Power for Land, Sea and Air GT2009*, ASME, Orlando/Florida, 2009.
- [11] Basu, P., Kefa, C., Jestin, L., *Boilers and Burners Design and Theory*, Springer, 2000.
- [12] Beer, J. M., and Chigier, N. A., *Combustion Aerodynamics*, Wiley, Inc., New York, 1972.
- [13] Bockle, S., Kazenwadel, J., Kunzelmann, T., Schulz, C., Laser-diagnostic multispecies imaging in strongly swirling natural gas flames, *Appl. Phys. B Lasers Opt.* 71 (5) 741–746, 2000.
- [14] Cavaliere, D.E., Kariuki, J., Mastorakos, E., A comparison of the blow-off behavior of swirl-stabilized premixed, non-premixed and spray flames, *Flow, Turbul. Combust.* 91 (2) 347–372, 2013.
- [15] Chigier, N.A., Beer, J.M., Velocity and static pressure distributions in swirling air jets issuing from annular and divergent nozzles. *Trans ASME J Basic Eng*;86D(4):788–96, 1964.
- [16] De, A., Oldenhof, E., Sathiah, P., Roekaerts, D., Numerical simulation of delft-jet-in-hot-coflow (DJHC) flames using the eddy dissipation concept model for turbulence-chemistry interaction. *Flow Turb Combust*, 2011.
- [17] Dhanuka, S.K., Temme, J.E., Driscoll, J.F., Mongia, H.C., Vortex-shedding and mixing layer effects on periodic flashback in a lean premixed prevaporized gas turbine combustor, *Proc. Combust. Inst.* 32 (2) 2901–2908, 2009.

- [18] el_Hossaini, M.Khosravy., Review of the New Combustion Technologies in Modern Gas Turbines, INTECH, Chapter 6.
- [19] Gupta, A.K., Lilley, D.J., Syred, N. Swirl flows. Tunbridge Wells, UK: Abacus Press; 1984.
- [20] Hatzia Apostolou, A., Orfanoudakis, N.G., Koukou, M.K., Raptis, G., CFD modeling of the swirl-stabilised flame produced by a laboratory-scale combustor: selection of the turbulence model, Proceedings of the 4th WSEAS Int. Conf. on HEAT TRANSFER, THERMAL ENGINEERING and ENVIRONMENT, Elounda, Greece, August 21-23, 2006 (pp83-88).
- [21] Ilbas, M., The effect of thermal radiation and radiation models on hydrogen-hydrocarbon combustion modelling. Int J Hydrogen Energy, 2005.
- [22] Ilbas, M., Yilmaz, _I., and Kaplan, Y., Investigations of Hydrogen and Hydrogen-Hydrocarbon Composite Fuel Combustion and NO_x Emission Characteristics in a Model Combustor, Int. J. Hydrogen Energy, 30, pp. 1139–1147, 2005.
- [23] Ilbas, M., Yilmaz, _I., Veziroglu, T. N., and Kaplan, Y., Hydrogen as Burner Fuel: Modelling of Hydrogen-Hydrocarbon Composite Fuel Combustion and NO_x Formation in a Small Burner, Int. J. Energy Res., 29, pp. 973–990, 2005.
- [24] Jiang, B., Liang, H., Huang, G., and Li, X., Study on NO_x Formation in CH₄/Air Jet Combustion, Chin. J. Chem. Eng., 14, pp. 723–728, 2006.
- [25] Kalt, P.A.M., Al-Abdeli, Y.M., Masri, A.R., Barlow, R.S., Swirling turbulent nonpremixed flames of methane: flow field and compositional structure, Proc. Combust. Inst. 29 (2) 1913–1919, 2002.
- [26] Keramida, E., Liakos, H. H., Founti, M. A., Boudouvis, A. G., and Markatos, N. C., Radiative Heat Transfer in Natural Gas-Fired Furnaces, Int. J. Heat Mass Trans., 43, pp. 1801–1809, 2000.
- [27] Khalil, A. E. E., Gupta, A. K., Bryden, K. M., and Lee, S. C., Mixture Preparation Effects on Distributed Combustion for Gas Turbine Applications, ASME J. Energy Resour. Technol., 134(3), p. 0322011, 2012.
- [28] Khanafer, K., and Aithal, S. M., Fluid-Dynamic and NO_x Computation in Swirl Burners, Int. J. Heat Mass Transfer, 54, pp. 5030–5038, 2011.
- [29] Khelil, A., Naji, H., Loukarfi, L., and Mompean, G., Prediction of a High Swirled Natural Gas Diffusion Flame Using a PDF Model, Fuel, 88, pp. 374–381, 2009.
- [30] Kremer, A., Hassel, E.P., Janicka, J., Velocity measurements in a strongly swirling natural gas flame Geschwindigkeitsmessungen in einer stark verdrallten Erdgasflamme, Forsch. Ingenieurwes. 63 (9) 263–269, 1997.
- [31] Landenfeld, T., Kremer, A., Hassel, E.P., Janicka, J., Schafer, T., Kazenwadel, J., Schulz, C., Wolfrum, J., Laser-diagnostic and numerical study of strongly swirling natural gas flames, Symp. (Int.) Combust. 27 (1) 1023–1029, 1998.
- [32] Launder, BE., Spalding, DB., Lectures in mathematical models of turbulence. London, UK: Academic Press; 1972.
- [33] Lefebvre, A.H., Gas Turbine Combustion, Hemisphere Publishing Corporation, 1983.
- [34] Li, S., Zheng, Y., Martinez, DM., Zhua, M., Jiang, X., Large-eddy simulation of flow and combustion dynamics in a lean partially-premixed swirling combustor. Energy Proc, 2015.

- [35] Magnussen, B.F., Hjertager, B.H., On mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion. *Proc Combust Inst*, 1977.
- [36] Marinov, S., Kern, M., Zarzalis, N., Habisreuther, P., Peschiulli, A., Turrini, F., Sara, O.N., Similarity issues of kerosene and methane confined flames stabilized by swirl in regard to the weak extinction limit, *Flow, Turbul. Combust.* 89 (1) 73, 2012.
- [37] Martin, C. A., Aspects of the Design of Swirlers as Used in Fuel Injectors for Gas Turbine Combustors, ASME Paper No. 87-GT-139, 1987.
- [38] Masri, A.R., Kalt, P.A.M., Al-Abdeli, Y.M., Barlow, R.S., Turbulence-chemistry interactions in non-premixed swirling flames, *Combust. Theor. Model.* 11 (5) 653–673, 2007.
- [39] Masri, A.R., Kalt, P.A.M., Barlow, R.S., The compositional structure of swirl-stabilised turbulent nonpremixed flames, *Combust. Flame* 137 (1–2) 1–37, 2004.
- [40] Meier, W., Keck, O., Noll, B., Kunz, O., Stricker, W., Investigations in the TECFLAM swirling diffusion flame: laser Raman measurements and CFD calculations, *Appl. Phys. B Lasers Opt.* 71 (5) 725–731, 2000.
- [41] Mellor, A.M., Gas Turbine Engine Pollution, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 1, pp. 111-133, 1976.
- [42] Nauert, A., Petersson, P., Linne, M., Dreizler, A., Experimental analysis of flashback in lean premixed swirling flames: conditions close to flashback, *Exp. Fluids* 43 (1) 89–100, 2007.
- [43] Ng, W.B., Syed, K.J., Zhang, Y., The study of flame dynamics and structures in an industrial-scale gas turbine combustor using digital data processing and computer vision techniques, *Exp. Thermal Fluid Sci.* 29 (6) 715–723, 2005.
- [44] Nogenmyr, K.J., Fureby, C., Bai, X.S., Petersson, P., Collin, R., Linne, M., Large eddy simulation and laser diagnostic studies on a low swirl stratified premixed flame. *Combust Flame*, 2009.
- [45] Ribeiro, M. M., and Whitelaw, J. H., Coaxial Jets With and Without Swirl, *J. Fluid Mech.* 96, 769-795, 1980.
- [46] Roder, M., Dreier, T., Schulz, C., Simultaneous measurement of localized heat release with OH/CH₂O-LIF imaging and spatially integrated OH/ chemiluminescence in turbulent swirl flames, *Appl. Phys. B* 107 (3) 611–617, 2012.
- [47] Saqr, K. M., Aly, H. S., Sies, M. M., and Wahid, M. A., Effect of Free Stream Turbulence on NO_x and Soot Formation in Turbulent Diffusion CH₄- Air Flames, *Int. Commun. Heat Mass.*, 37, pp. 611–617, 2010.
- [48] Schmitt, P., Poinot, T., Schuermans, B., Geigle, K.P., Large-eddy simulation and experimental study of heat transfer, nitric oxide emissions and combustion instability in a swirled turbulent high-pressure burner, *J. Fluid Mech.* 570 17–46, 2007.
- [49] Schneider, C., Dreizler, A., Janicka, J., Fluid dynamical analysis of atmospheric reacting and isothermal swirling flows, *Flow, Turbul. Combust.* 74 (1) 103–127, 2005.
- [50] Sharif, M.A., Wong, Y.K., Evaluation of the performance of three turbulence closure models in the prediction of confined swirling flows. *Comput Fluids*, 1995.
- [51] Sheen, H.J., Chen, W.J., Jeng, S.Y., Huang, T.L., Correlation of swirl number for a radial-type swirl generator, *Exp. Thermal Fluid Sci.* 12 (4) 444–451. 1996.

- [52] Shyy, W., Braaten, M.E., Burrus, D.L., Study of three-dimensional gas-turbine combustor flows, *Int. J. Heat Mass Transf.* 32 (6) 1155–1164, 1989.
- [53] Wang S, Hsieh SY, Yang V., Unsteady flow evolution in swirl injector with radial entry. I. Stationary conditions. *Physics of Fluids*;17:045106, 2005.
- [54] Weber, R., and Dugue, J., Combustion Accelerated Swirling Flows in High Confinements, *Prog. Energy Combust. Sci.* 18, 349-367, 1992.
- [55] Wilkes, N. S., Guilbert, P. W., Shepherd, C. M., and Simcox, S., The Application of Harwell-Flow 3D to Combustion Models, Atomic Energy Authority Report, Harwell, UK, Paper No. AERE-R13508, 1989.
- [56] Yilmaz İ., Effect of Swirl Number on Combustion Characteristics in a Natural Gas Diffusion Flame. *ASME. J. Energy Resour. Technol.*, 2013.
- [57] Yilmaz, I., Tastan, M., Ilbas, M., Tarhan, C., Effect of turbulence and radiation models on combustion characteristics in propane-hydrogen diffusion flames. *Energ Convers Manage*, 2013.