

## ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΦΛΟΓΩΝ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΣΕ ΑΞΟΝΟΣΥΜΜΕΤΡΙΚΟ ΣΩΜΑ ΥΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΥΡΡΕΟΝΤΟΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΣΤΡΟΒΙΛΙΣΜΟΥ

Δόγκας Ε., Μητσόπουλος Ε. Π., Κούτμος Π.

Εργαστήριο Τεχνικής Θερμοδυναμικής, Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών,  
Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, 26504,

e-mail: [lefterisdogas@gmail.com](mailto:lefterisdogas@gmail.com), [vagelis.m199538@gmail.com](mailto:vagelis.m199538@gmail.com), [koutmos@mech.upatras.gr](mailto:koutmos@mech.upatras.gr)

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η συγκεκριμένη εργασία μελετά την αλληλεπίδραση μιας αξονοσυμμετρικής πρωτεύουσας ζώνης καύσης, σταθεροποιημένης επί στερεού σώματος, η οποία λειτουργεί σε συνθήκες διαστρωματωμένου μείγματος, μαζί με ένα δευτερεύον ομόκεντρο στροβιλιζόμενο ρεύμα και με ένα εξωτερικό συρρέον ρεύμα αέρα. Η δακτυλιοειδής αυτή διάταξη, οδηγεί στη δημιουργία δύο διαδοχικών ανακυκλοφοριών στην αξονική διεύθυνση της ροής. Την πρωτεύουσα ζώνη ανακυκλοφορίας, που βρίσκεται κατάντι του στερεού σώματος και τη δευτερεύουσα διαδοχική ζώνη, η οποία προωθεί την περεταίρω ανάμειξη των προϊόντων της καύσης με το στροβιλιζόμενο αέρα. Ο ρυθμός και η απόδοση της ανάμειξης του κύριου, του δευτερεύοντος και του εξωτερικού ρεύματος των αερίων καθώς και η επικάλυψη των δύο ζωνών ανακυκλοφορίας, μελετήθηκαν για διάφορες αρχικές συνθήκες και για ένα συνδυασμό έγχυσης καυσίμου είτε στο κύριο ρεύμα είτε στο ρεύμα του στροβιλισμού. Στη συνέχεια, μελετήθηκαν οι αντιδράσεις ροές σε συνθήκες πτωχής και πολύ πτωχής καύσης ώστε να διερευνηθεί η δυνατότητα της συγκεκριμένης διάταξης να ελέγχει αποτελεσματικά τη διαδικασία της Καύσης. Για την προκαταρκτική αξιολόγηση των μεταβολών στη δομή της φλόγας, του πεδίου ανάμειξης και της απόδοσης της Καύσης, χρησιμοποιήθηκαν μετρήσεις των συγκεντρώσεων του μείγματος καυσίμου αέρα και των θερμοκρασιών, η απεικόνιση των χημειοφωταυγάζων ριζικών  $\text{OH}^*$  και  $\text{CH}^*$  και η ανάλυση των παραγόμενων ρύπων. Συμπληρωματικές υπολογιστικές προσομοιώσεις του πεδίου ανάμειξης εκτελέστηκαν για την βαθύτερη κατανόηση των χαρακτηριστικών της ροής που υποστηρίζουν την σταθεροποίηση της φλόγας. Τέλος συζητούνται και τονίζονται οι διαφορές της παρούσας διάταξης με παρόμοιες αξονοσυμμετρικές διατάξεις της βιβλιογραφίας.

**Λέξεις Κλειδιά:** Τυρβώδες φλόγες προπάνιου, διαστρωμάτωση μίγματος, Καυστήρας με χρήση στροβιλισμού, Προσομοίωση των Μεγάλων Δινών

### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Προκειμένου να ανταποκριθούμε στη διαρκώς αυξανόμενη ζήτηση για ενέργεια από τα ορυκτά καύσιμα των επόμενων δύο δεκαετιών (IEA 2016) χωρίς να επιβαρύνουμε δυσανάλογα το περιβάλλον, η εξέλιξη και η χρήση καθαρών μορφών παραγωγής ενέργειας είναι επιβεβλημένη. Οι αεριοστροβίλοι αποτελούν μια από τις πιο ελπιδοφόρες διαθέσιμες τεχνολογίες, που είναι ευρέως

διαδεδομένες, για τη μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων και την αύξηση της απόδοσης των διεργασιών παραγωγής ενέργειας. Η βιώσιμη χρήση της καύσης για την παραγωγή ενέργειας μέσω των αεριοστρόβιλων προϋποθέτει ευελιξία στη χρήση εναλλακτικών καυσίμων, αύξηση της θερμικής απόδοσης καθώς και σημαντικά μειωμένες εκπομπές ρυπαντών όπως CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, σωματιδιακές εκπομπές και UHC. Πολλές τεχνολογίες καύσης μειωμένων ρύπων έχουν προταθεί και διερευνώνται σε εργαστηριακό ή βιομηχανικό επίπεδο.

Η καύση Πτωχού Προαναμεμιγμένου και Προεξατμισμένου (LPP) μείγματος χρησιμοποιεί μια περιοχή προανάμειξης του καυσίμου με το οξειδωτικό, παρέχοντας έτσι στην φλόγα ένα ομοιόμορφο πτωχό μείγμα, το οποίο καίγεται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες και παράγει μειωμένους ρύπους. Έχουν προταθεί από τους (Fu et al., 2011, Kalb & Sattelmayer, 2006) διάφορες παραλλαγές, οι οποίες βελτιώνουν την απόδοση την προανάμειξης, αυξάνουν την σταθερότητα της φλόγας και προσφέρουν καλύτερο έλεγχο των καυσαερίων. Η βαθμιαία προσαγωγή του αέρα ή του καυσίμου, έχει επίσης αποδειχθεί αποτελεσματική στη μείωση των οξειδίων του αζώτου (NO<sub>x</sub>) και των άλλων ρυπαντών σε πρακτικές εφαρμογές καυστήρων για πλειάδα καυσίμων. Στη μέθοδο της Πλούσιας καύσης με Γρήγορη Απόσβεση και μετάπτωσης σε Πτωχή Καύση (RQL), αρχικά ένα πλούσιο μείγμα καυσίμου σταθεροποιείται μέσω στροβιλισμού στην πρωτεύουσα ζώνη καύσης. Έπειτα τα καυσαέρια από την πρωτεύουσα ζώνη καύσης αναμειγνύονται πολύ γρήγορα με περίσσεια αέρα στο στάδιο της πτωχής καύσης, ώστε να ελαχιστοποιηθεί ο χρόνος παραμονής του μείγματος σε συνθήκες κοντά στις στοιχειομετρικές, με στόχο τη μείωση της παραγωγής των NO<sub>x</sub>. Εναλλακτικές μεθόδους που συνδυάζουν τόσο τη βαθμιαία παροχή του αέρα όσο και του καυσίμου έχουν προταθεί από τους (Mongia, 2003, Straub et al., 2005) και υπόσχονται περαιτέρω μείωση των NO<sub>x</sub>. Η υλοποίηση της ιδέας του Πτωχού Άμεσου Ψεκασμού (LDI) διαφέρει από αυτή του RQL και του LPP, εφόσον αυτή εγχύει και αναμειγνύει τάχιστα το καύσιμο εντός μιας πτωχής ζώνης καύσης μέσω πολλαπλών στροβιλιστών (Heath et al., 2010 Tacina et al., 2014). Η υλοποίηση του LDI προσφέρει έναν απλούστερο, μικρότερου μήκους καυστήρα ο οποίος λειτουργεί σε διάφορες συνθήκες και σε υψηλές πιέσεις.

Στις περισσότερους καυστήρες, η στροβιλώδης ροή εφαρμόζεται στην πρωτεύουσα ζώνη σταθεροποίησης προκειμένου να βελτιστοποιήσει την ανάμειξη του καυσίμου και του αέρα, την αγκίστρωση της φλόγας, τη μεταφορά θερμότητας καθώς και τη μείξη των διαφόρων συστατικών (π.χ. Candel et al., 2012, Driscoll & Temme, 2011, Field & O' Connor, 1996). Η μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων εξαρτώνται από την διάταξη (Doss et al. 2016; Fritz et al. 2004), ενώ η βέλτιστη απόδοση για συγκεκριμένο εύρος λειτουργίας εξαρτάται από το πόσο καλά είναι προσαρμοσμένος σε αυτή είναι το στροβιλισμός (Loretero & Huang, 2013, Syred, 2006). Η πολυπλοκότητα και η πολλαπλότητα τέτοιων διατάξεων εγγυάται τις συνεχιζόμενες έρευνες για πιθανές παραλλαγές και αλληλεπιδράσεις μεταξύ του στροβιλισμού και της ζώνης καύσης.

Περαιτέρω ευελιξία στη σχεδίαση και τη λειτουργία της ζώνης καύσης παρέχεται από τη χωρική διακύμανση του σχετικού λόγου καυσίμου/αέρα του μείγματος, είτε μέσω της μερικής προανάμειξης των αντιδρώντων στην είσοδο της ζώνης καύσης (π.χ. Doss et al., 2016, Sweeney et al. 2012, Xiouris & Koutmos, 2011), είτε μέσω της σταδιακής παροχής καυσίμου κατά τη διάρκεια της καύσης (π.χ. Heath et al., 2010).

Στη διαδικασία εξέλιξης καυστήρων, συχνά γίνεται χρήση πολύπλοκων υπολογιστικών προσομοιώσεων σαν παράλληλο στήριγμα των πειραματικών διαδικασιών, ώστε να αποσαφηνιστεί η βέλτιστη παραλλαγή μιας διάταξης μεταξύ της πληθώρας των εναλλακτικών επιλογών. Τόσο μελέτες με εργαστηριακά μοντέλα (π.χ. Candel et al., 2012, Xiouris & Koutmos, 2012) όσο και μελέτες πλήρους κλίμακας (π.χ. Toqan et al., 1992) έχουν αξιοποιηθεί για να διερευνηθεί η επίδραση των διαφοροποιήσεων στον αρχικό σχεδιασμό ή στις κανονικές συνθήκες λειτουργίας

Στη συγκεκριμένη εργασία μελετάται η αλληλεπίδραση μιας αξονοσυμμετρικής, σταθεροποιημένης επί στερεού σώματος πρωτεύουσας ζώνης καύσης, η οποία λειτουργεί υπό συνθήκες διαστρωματωμένου μείγματος, με ένα δευτερεύον ομόκεντρο δακτυλιοειδές ρεύμα παροχής στροβιλιζόμενου ρευστού, το οποίο μπορεί να είναι ατμοσφαιρικός αέρας ή αέρας με πρόσμιξη καυσαερίων. Αυτή η ακτινική δακτυλιοειδής μετατόπιση του στροβιλισμού οδηγεί στη δημιουργία δύο ομοαξονικών διαδοχικών ανακυκλοφοριών στην διεύθυνση της ροής. Η πρωτεύουσα ζώνη ανακυκλοφορίας βρίσκεται κατάντι του στερεού σώματος, ενώ η δευτερεύουσα ζώνη (Κεντρική Δακτυλιοειδής Ζώνη Ανακυκλοφορίας – CTRZ) που προκαλείται από το περιφερειακό στροβιλισμό, βρίσκεται κατάντι της πρώτης, και είναι υπεύθυνη για την περειαίρω ανάμιξη των κύριων παραγώγων

της καύσης. Μια παρόμοια διάταξη καυστήρα έχει μελετηθεί υπολογιστικά και πειραματικά από τους Χιouris & Koutmos (2011, 2012) κάτω από μη εγκλιβωτισμένες συνθήκες και για διαφορετικές παραμέτρους εισερχόμενου ρευστού. Σε αυτές τις μελέτες είχε δοθεί έμφαση στην επίδραση της περιοχής προανάμειξης και στη διαστρωμάτωση του εισερχόμενου μείγματος στο πεδίο ταχυτήτων εντός του απορρεύματος, υπό την επίδραση εισαγωγής στροβιλιζόμενου ρεύματος αέρα μικρής ισχύος. Ο σημαντικός ρόλος που παίζει η αλληλεπίδραση των δύο ζωνών ανακυκλοφορίας καθώς και η ανάγκη περαιτέρω διερεύνησης της απόδοσης ανάμειξης της διάταξης για διαφορετικά καύσιμα και για διαφορετικές συνθήκες εισαγωγής αέρα και στροβιλισμού τροφοδότησαν το συνεχιζόμενο ενδιαφέρον μας για τη μελέτη της συγκεκριμένης διάταξης.

Οι Toqan et al. (1992) έχουν διερευνήσει έναν καυστήρα εισαγωγής μη προαναμεμιγμένου καύσιμου, ο οποίος εκμεταλλεύεται πολλαπλά δακτυλιοειδή ρεύματα προσαγωγής στροβιλιζόμενου ρευστού στο πεδίο, τα οποία εισάγονται συζευγμένα από το επίπεδο έγχυσης καυσίμου σε αυτό. Δημιουργούνται δύο ζώνες καύσης, μία στροβιλιζόμενη, χαμηλής ανάμειξης και πλούσιας σε καύσιμο και μία δεύτερη κατάντι της αρχικής. Πρόκειται για μια ανακυκλοφορούσα περιοχή που προωθεί την περεταίρω μείωση των εκπομπών διαμέσου της ανάμειξης και της καύσης των προϊόντων της πρώτης ζώνης. Οι Terasaki & Hayashi (1996) παρατήρησαν βελτίωση στις εκπομπές του CO και NOx με τη χρήση ενός διπλού δακτυλιοειδούς καυστήρα στροβιλισμού, ο οποίος αποτελείται από ένα κεντρικό μη προαναμεμιγμένο ρεύμα έγχυσης καυσίμου και ένα περιβάλλον αζονικά προεξέχον περιστρεφόμενο εξωτερικό ρεύμα, τα οποία είναι προσαρτημένα και περιστρεφόμενα σε απόσταση από το επίπεδο εισόδου του καυστήρα σχηματίζοντας μια μοναδική και επιμήκη ζώνη σταθεροποίησης.

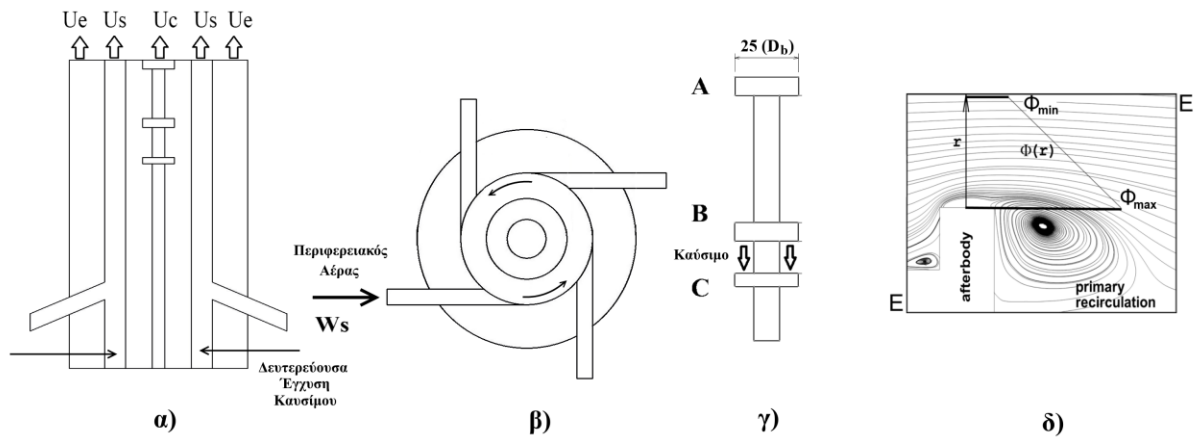
Ο συνδυασμός των δύο επάλληλων ζωνών ανακυκλοφορίας με εισαγωγή διαστρωματωμένου μείγματος στην κύρια ζώνη ανακυκλοφορίας και η χρήση ρεύματος στροβιλισμού που επιβάλλεται στην περιοχή των καυσαερίων, και όχι στην περιοχή αγκίστρωσης της φλόγας αποτελεί μια διάταξη διαφορετική από τις συνήθεις διατάξεις στερεών σωμάτων βηματικής διαστολής ή συζευγμένων στροβιλιζόμενων ρευμάτων και η οποία χρήζει διερεύνηση. Στη συγκεκριμένη εργασία ερευνάται η αλληλεπίδραση που έχει η κεντρική παροχή καυσίμου, η μεταβολή της ισχύος του στροβιλισμού και το εξωτερικό συρρέον ρεύμα του αέρα με την μεταβλητή περιοχή που δημιουργείται από τις δύο ζώνες των ανακυκλοφοριών. Για την προκαταρκτική αξιολόγηση των μεταβολών στη δομή της φλόγας, στο πεδίο ανάμειξης και στην απόδοση του καυστήρα, χρησιμοποιήθηκαν μετρήσεις των συγκεντρώσεων του καυσίμου και του αέρα εντός του πεδίου ανάμειξης, του θερμοκρασιακού πεδίου, και η οπτική ανάλυση δεδομένων χημειοφωταύγεια για τα ριζικά OH\* και CH\*. Τέλος, υποστηρικτικά έγιναν υπολογιστικές προσομοιώσεις του πεδίου ισόθερμης ανάμειξης για να κατανοηθούν βαθύτερα τα χαρακτηριστικά αυτής της πολύπλοκης ροής και να ευρεθεί η βέλτιστη παραλλαγή του καυστήρα.

## 2. ΜΕΛΕΤΗΘΕΙΣΕΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΚΑΥΣΤΗΡΑ ΚΑΙ ΤΗΣ ΦΛΟΓΑΣ

Η βασική διάταξη του πειραματικού καυστήρα που μελετήθηκε στην εν λόγω εργασία (Εικόνα 1α, β and γ) είναι όμοια με αυτή που αναφέρεται από τους Χιouris & Koutmos (2012) και τους Karagiannaki et al. (2015). Η διάταξη του προαναμεικτη/καυστήρα αποτελείται από δύο κοιλότητες σχηματιζόμενες μεταξύ τριών ομόκεντρων δίσκων ( $D=0.025$  m), οι οποίοι συνδέονται κατά τον άξονά τους με έναν οριζόντιο κοίλο σωλήνα παροχής καυσίμου. Το προπάνιο εγχέεται μέσω ενός δακτυλιοειδούς διακένου 1mm στην κύρια κοιλότητα ανάμειξης του καυσίμου-αέρα, Εικόνα 1γ. Η δεύτερη κοιλότητα ευνοεί τη μερική προ-ανάμειξη του καυσίμου με το κεντρικό ρεύμα αέρα, ενώ αποτρέπει το φαινόμενο της οπισθοχώρησης του μετώπου της φλόγας εξισορροπώντας τους χρόνους ανάμειξης και αυτανάφλεξης. Η ανάντι αυτή περιοχή τροφοδοτεί την περιοχή της κύριας ανακυκλοφορίας με μια ακτινική βαθμίδα σχετικού λόγου καυσίμου αέρα (Εικόνα 1δ), ελεγχόμενη από το κεντρικό ρεύμα αέρα, την ποσότητα του εγγεόμενου καυσίμου και τη δεύτερη κοιλότητα.

Η ζώνη της καύσης περιβάλλεται από ένα ομόκεντρο δακτυλιοειδές ρεύμα στροβιλιζόμενου αέρα ( $D_s=85$ mm, Εικόνες 1α, β), το οποίο δημιουργείται μέσω τεσσάρων επαπτομενικών σωληνίσκων ανάντι των κοιλοτήτων (Karagiannaki et al., 2015). Ένα δακτυλιοειδές συρρέον εξωτερικό ρεύμα αέρα ( $D_e=141$ mm, Εικόνα 1α) που προσκρούει υπό γωνία στη απόκλεισα στροβιλώδη κίνηση, χρησιμοποιήθηκε για να ρυθμίσει τη διεύθυνση του στροβιλιζόμενου ρεύματος στην κύρια ζώνη ανακυκλοφορίας καθώς και την αλληλεπίδραση μεταξύ της κύριας ζώνης και της δευτερεύοντα

(CTRZ). Η διάταξη των πολλαπλών ομόκεντρων σωλήνων εγκιβωτίστηκε εντός ενός αγωγού τετραγωνικής διατομής πλευράς 300mm. Τα τοιχώματα του τετραγωνικού κιβωτίου τοποθετήθηκαν σε τέτοια απόσταση ώστε να μην επηρεάζουν την ρευστομηχανική αλληλεπίδραση των δύο δινών του συστήματος. Αυτό επιβεβαιώθηκε από διάφορες μετρήσεις ταχυτήτων με LDV, σε συνθήκες ελεύθερης και περιορισμένης ροής



**Εικόνα 1:** Διάταξη του καυστήρα (Dogkas et al. 2018)

Η ένταση του στροβιλισμού που εφαρμόστηκε ήταν μεταξύ 0.0 και 0.8. Αυτή υπολογίστηκε ως ο λόγος της γωνιακής προς την αξονική ορμή. Οι ορμές βρέθηκαν κατόπιν ολοκλήρωσης των μετρημένων και των υπολογισμένων τιμών της αξονικής και της εφαπτομενικής ταχύτητας του αέρα στο επίπεδο εξόδου του σωλήνα του στροβιλισμού. Οι συγκρίσεις των διαφόρων επιπέδων του σχετικού λόγου καυσίμου/αέρα, βασίστηκαν στο δείκτη  $\delta$ . Το  $\delta$  είναι η ποσοστιαία διαφορά από το όριο απόσβεσης (LBO),  $\delta = (mfuel - mfuel, LBO)/mfuel, LBO$  (%), όπου το  $mfuel, LBO$  είναι η παροχή καυσίμου που οδηγεί στην πτωχή απόσβεση.

Η ονοματολογία που χρησιμοποιήθηκε για τη σύγκριση των αντιδρώντων και μη πεδίων, δίνεται υπό τη μορφή ακρωνύμων. Έτσι το πρώτο γράμμα αναφέρεται στο Ισόθερμο πεδίο (I), στο Πεδίο ανάμειξης (M) και στο Αντιδρών πεδίο (R). Το δεύτερο σύνολο γραμμάτων αναφέρεται στη θέση και την ποσότητα έγχυσης καυσίμου. Το (P) αναφέρεται στην έγχυση του καυσίμου στην πρώτη κοιλότητα και η επιλογή των P3 και P25 έγινε με κριτήριο την τιμή του  $\delta$ . Το τρίτο σύνολο γραμμάτων αναφέρεται στην έντασης του ρεύματος του στροβιλισμού, για (S0.0) ή (S0.8) και το τέταρτο αναφέρεται στο λόγο της αξονικής ορμής του εξωτερικού ρεύματος αέρα προς το άθροισμα των αξονικών ορμών του κεντρικού κύριου ρεύματος αέρα και του στροβιλιζόμενου ρεύματος αέρα (E0/2.7). Από τα παραπάνω προκύπτει ότι μια διαμόρφωση μη αντιδρώντας ροής, με εγχυόμενο καύσιμο  $\delta 3\%$  στη κύρια κοιλότητα, με στροβιλισμό έντασης 0.8 και με ένα εξωτερικό ρεύμα αέρα λόγου ορμής 2.7, θα εκφράζονταν ως MP3S0-S0.8E2.7. Επίσης εκτελέστηκαν προκαταρκτικές προσομοιώσεις του μη αντιδρώντος πεδίου ανάμειξης με σκοπό την καλύτερη κατανόηση των τοπολογιών του απορρέματος που συντηρούν τις δομές του αντιδρώντος πεδίου.

### 3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

Η παροχή καυσίμου ρυθμίστηκε μέσω του ροόμετρου Bronkhorst MV-304/306 (Bronkhorst High-Tech B.V., Ruurlo, Netherlands) με μέγιστη απόκλιση της τάξεως του 1.25% (FSD). Οι διάφορες συγκεντρώσεις των συστατικών μετρήθηκαν με χρήση του Μετασχηματισμού Fourier Υπέρυθρης Φασματογραφίας (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) (FTIR, Spectrum Two™ spectroscopy analyzer, PerkinElmer®). Για τη λήψη δειγμάτων εντός του απορρέματος χρησιμοποιήθηκε ένας μικροαισθητήρας. Οι αναλύσεις των δειγμάτων έγιναν σε μια κυψέλη αερίων εγνοσμένου όγκου (volume gas cell), χρησιμοποιώντας το λογισμικό Spectrum 10® (PerkinElmer®). Το φάσμα λήψης μετρήσεων εκτείνεται από 450 έως 4000  $cm^{-1}$  ενώ η ελάχιστη διακριτική ικανότητα των μετρήσεων ήταν τα 0.5  $cm^{-1}$ . Αυτό επέτρεψε την αξιολόγηση της τοπολογίας του λόγου ισοδυναμίας εντός του πεδίου για τις συνθήκες λειτουργίας του καυστήρα με την αβεβαιότητα να κυμαίνεται μεταξύ 5% και 8%.

Το μέσο πεδίο των θερμοκρασιών μετρήθηκε με χρήση μη επικαλυμμένων θερμοζεύγων τύπου S (Pt-Pt/10%Rh), με διάμετρο στελέχους 25–75- $\mu\text{m}$ . Η έξοδος των θερμοζευγών επεξεργαζόταν με τη βοήθεια μιας κάρτας DaqTemp 7A Omega. Αναλυτικά η διαδικασία της μέτρησης της θερμοκρασίας καθώς και της αντιστάθμισης των σφαλμάτων παρουσιάζονται στους (Χιουρίς & Κούτμος, 2012).

Ταυτόχρονες εικόνες χημειοφωταύγειας  $\text{OH}^*$  και  $\text{CH}^*$  του στιγμιαίου πεδίου αποτυπώθηκαν με τη βοήθεια του συστήματος απεικόνισης LaVision® (FlameMaster, αξιοποιώντας μια Elite 2M CCD κάμερα, μια μονάδα ενίσχυσης εικόνας IRO, ζωνοπερατά οπτικά φίλτρα LaVision® εστιασμένα στα 307nm and 433nm και ανάλογους φακούς για απεικόνιση των  $\text{OH}^*/\text{CH}^*$ ). Η χωρική κατανομή των  $\text{OH}^*$  και  $\text{CH}^*$  καταγραφόταν ταυτόχρονα με χρήση μιας CCD κάμερας, η οποία χρησιμοποιεί ένα σύστημα διπλής αποτύπωσης εικόνας για το διαχωρισμό του φάσματος του εισερχομένου φωτός, το οποίο αναπτύχθηκε και κατασκευάστηκε από το Εργαστήριο (Souflas & Koutmos, 2017). Η καταγραφή των εικόνων και η επεξεργασία των αποτελεσμάτων έγινε με το λογισμικό Davis 8.0 (LaVision®). Στη συγκεκριμένη εργασία οι εικόνες του μέσου πεδίου αποτυπώνουν ποιοτικές διακυμάνσεις του μετώπου της φλόγας και είναι χρήσιμες στην αναγνώριση της τοπολογίας και των χαρακτηριστικών αγκίστρωσης αυτού. Οι εικόνες του φόντου ελήφθησαν με ίδιο χρόνο ολοκλήρωσης και με την ίδια ενίσχυση σήματος με αυτές του μετώπου της φλόγας και αφαιρέθηκαν από αυτές. Οι εικόνες του μέσου πεδίου προέκυψαν μέσω στατιστικής επεξεργασίας 500 εικόνων του στιγμιαίου πεδίου και ελήφθησαν με συχνότητα δειγματοληψίας 14Hz. Ο λόγος σήματος-θορύβου των εικόνων του στιγμιαίου πεδίου διατηρήθηκε σε επίπεδα υψηλότερα του 8:1 και ο χρόνος έκθεσης ήταν 2.1ms. Η μέγιστη ανάλυση του αισθητήρα CCD ήταν 1628 x 1236 εικονοστοιχεία. Χρησιμοποιήθηκαν χρόνοι ενίσχυσης εικόνας της τάξεως των 100 $\mu\text{s}$ , ενώ η ενίσχυση του σήματος διατηρήθηκε στο 75%.

### 3. ΜΕΘΟΔΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Για τη μοντελοποίηση του ισόθερμου πεδίου ανάμειξης χρησιμοποιήθηκε το Μοντέλο των Μεγάλων Δινών (LES), όπως αυτό υλοποιείται στα πλαίσια του εμπορικού προγράμματος Fluent 18 της Ansys (Ansys 18, ANSYS Inc.). Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην περιοχή του απορρεύματος, ενώ αναλυτικότερα η μεθοδολογία υλοποίησης του LES έχει παρουσιαστεί από τους (Χιουρίς & Κούτμος, 2012). Όσον αφορά την πλεγματοποίηση, ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην επαρκή ανάλυση των κοιλοτήτων πρόμιξης και της περιοχής του σταθεροποιητικού δίσκου. Περισσότερες λεπτομέρειες δίνονται στους Dogkas et al. (2018)

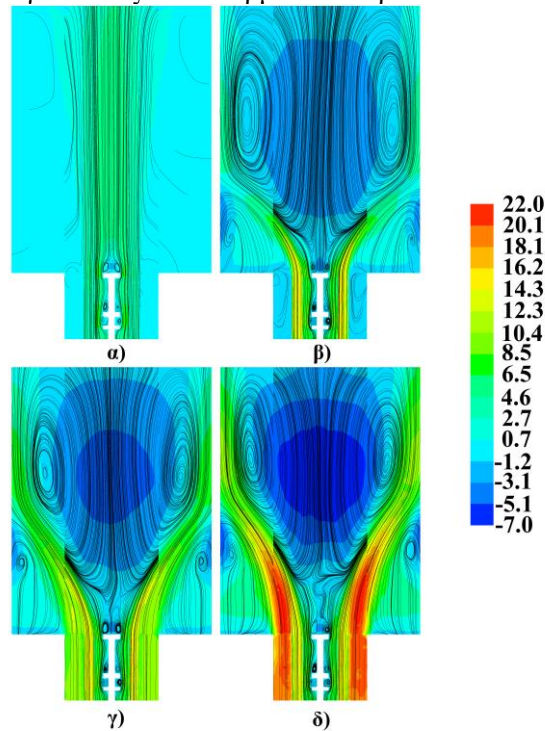
### 4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

#### 4.1. Ισόθερμη Ροή

Στην ισόθερμη και μη αντιδράσα ροή ανάμειξης, πρώτα θα παρουσιαστεί η τοπολογία του απορρεύματος για να καταδειχθεί η πληθώρα των δυνατών διαμορφώσεων έγχυσης καυσίμου που μπορούν να επιτευχθούν στη διάταξη πολλαπλών δακτυλιοειδών ρευμάτων.

Οι δυνατές προσομοιωμένες ισόθερμες τοπολογίες του πεδίου ταχυτήτων που μπορούν να διαμορφωθούν στη συγκεκριμένη διάταξη, με μεταβλητές την ισχύ του στροβιλισμού και την παροχή του εξωτερικού συρρέοντος ρεύματος αέρα δίνονται στην Εικόνα 2. Χωρίς τον στροβιλισμό (α), η κύρια ζώνη της ανακυκλοφορίας κατάντι του σταθεροποιητικού δίσκου ελέγχει τη δημιουργία του απορρεύματος. Η αποδόμηση της περιοχής της ανακυκλοφορίας πραγματοποιείται 0.7 διαμέτρους κατάντι στο επίπεδο εξόδου του καυστήρα στην υπολογιστική προσομοίωση και 0.74 στις πειραματικές μετρήσεις. Με την εισαγωγή στροβιλισμού ισχύος 0.8 δημιουργείται μια δεύτερη κεντρική ζώνη ανακυκλοφορίας κατάντι της πρώτης (CTRZ). Αυτή η συμπεριφορά παρατηρήθηκε αρχικά από τους Χιουρίς & Κούτμος (2011), οι οποίοι συζήτησαν τις διακυμάνσεις του μέσου πεδίου των ταχυτήτων κατά την αξονική διεύθυνση, σε συνθήκες χωρίς εγκιβωτισμό και χωρίς τη χρήση εξωτερικού ρυθμιστικού ρεύματος αέρα (external). Οι παρόντες υπολογισμοί δείχνουν πως με την προοδευτική αύξηση του παρεχόμενου εξωτερικού ρεύματος αέρα μπορούμε να επιτύχουμε σταδιακό έλεγχο της διαστολής και της διεϊσδυσης του στροβιλιζόμενου ρεύματος αέρα στη δευτερεύουσα ζώνη ανακυκλοφορίας. Επιπλέον μπορούμε να μεταβάλλουμε το μέγεθος, την ισχύ και τη θέση της δευτερεύουσας ζώνης ανακυκλοφορίας, όπως φαίνεται στις Εικόνες γ, δ. Τα παραπάνω έχουν ως συνέπεια και τη μεταβολή της σχετικής θέσης των δύο ζωνών ανακυκλοφορίας. Η

αποτελεσματικότητα του εξωτερικού ρυθμιστικού ρεύματος αέρα στον έλεγχο της αλληλεπίδρασης των δύο ζωνών ανακυκλοφορίας, για την πειραματική διάταξη που παρουσιάζεται στη συγκεκριμένη εργασία, εξαρτάται από το λόγο των αξονικών ορμών των τριών δακτυλιοειδών ρευμάτων.



**Εικόνα 2:** Τοπολογία του ισόθερμου πεδίου ταχυτήτων

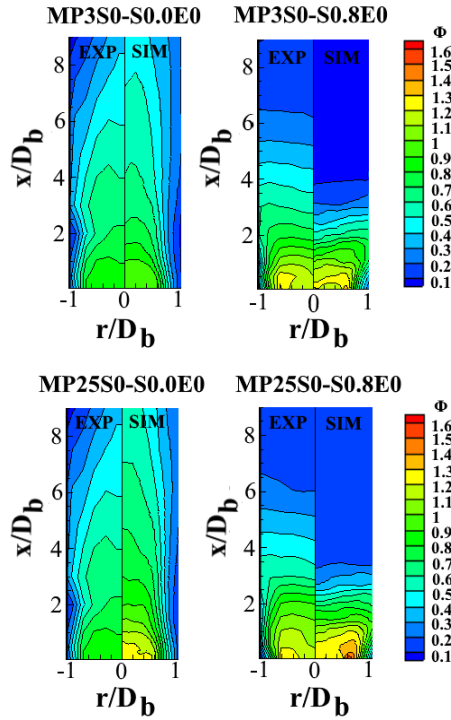
Οι μεταβολές στο ισόθερμο πεδίο ανάμειξης λόγω της προσαγωγής στροβιλιζόμενου ή μη ρεύματος αέρα, ή λόγω των αλλαγών των παραμέτρων εισόδου των υπόλοιπων ρευμάτων πρέπει να προσδιοριστούν μιας και θα βοηθήσουν στην καλύτερη κατανόηση της αντιδρώσας ροής που θα επακολουθήσει. Έγινε μία προσπάθεια να μετρηθεί η κατανομή του καυσίμου στο πεδίο για διαφορετικές παραμέτρους ταχύτητας εισόδου και στροβιλισμού καθώς και για διαφορετικές θέσεις έγχυσης καυσίμου, διατηρώντας όμως σε κάθε περίπτωση την κύρια ζώνη διαστρωμάτωσης του μείγματος. Στη συγκεκριμένη εργασία θα αξιολογηθεί για πρώτη φορά ο ρυθμός και η απόδοση της ανάμειξης δευτερευόντων εισαγόμενων αερίων διαμέσου του στροβιλισμού, καθώς και η δυνατότητα ελέγχου αυτής της ανάμειξης μέσω του ρυθμιστικού εξωτερικού ρεύματος αέρα. Η ανάμειξη του καυσίμου-αέρα καθορίζεται από τη βαθμίδα του σχετικού λόγου καυσίμου/αέρα στο επίπεδο εξόδου του καυστήρα, που εισέρχεται στην κύρια ζώνη ανακυκλοφορίας. Οι μετρούμενες τιμές για τη διαστρωμάτωση του μείγματος (Εικόνα 1δ) κυμαίνονται μεταξύ  $\Phi_{\min} = 0.1/0.2$  και  $\Phi_{\max} = 0.77/1.0$  για μηδενική ένταση στροβιλισμού και από  $\Phi_{\min} \approx 0.2/0.27$  μέχρι  $\Phi_{\max} \approx 1.06/1.4$  για ένταση στροβιλισμού 0.8. Η έγχυση του καυσίμου γινόταν μόνο στο κύριο ρεύμα και αφορούσε τις περιπτώσεις δ3% και δ25%.

Στην Εικόνα 3 παρουσιάζονται οι πειραματικές και οι υπολογιστικά ευρεθείσες τιμές του σχετικού λόγου καυσίμου/αέρα του ισόθερμου πεδίου ανάμειξης σε μορφή τοπολογιών. Όπως και στις περιπτώσεις του αντιδρώντος πεδίου, η έγχυση καυσίμου πραγματοποιήθηκε στην πρώτη κοιλότητα σε ποσοστά δ3% και δ25% και για ένταση στροβιλισμού 0 και 0.8. Στην περίπτωση του πολύ πτωχού, κοντά στην απόσβεσης μείγματος δ3%, η προσαγωγή του στροβιλισμού συμβάλει στη συγκέντρωση πλούσιου μείγματος κοντά στο σταθεροποιητικό δίσκο εντός του απορρεύματος αυτού. Έτσι, η διασπορά του πεδίου ανάμειξης περιορίζεται και ενισχύεται η περιοχή κοντά στο τοίχωμα του δίσκου. Και εξαιτίας της ζώνης χαμηλών ταχυτήτων που δημιουργείται σε αυτή την περιοχή, την καθιστά ιδανική για αγκίστρωση της φλόγας. Στην πλούσια περίπτωση παροχής καυσίμου δ25%, η επίδραση του στροβιλισμού είναι εντονότερη στην κατάντι περιοχή δημιουργίας ταπορρεύματος. Ο κατάλληλος συνδυασμός αυτών των παραμέτρων θα μπορούσε να αξιοποιηθεί κατάλληλα για μια πιθανή ελεγχόμενη πλήρη οξείδωση των προϊόντων της κύριας ζώνης καύσης, μέσω της διάλυσής τους στο



ρεύμα του στροβιλισμού. Μέσω της κατάλληλης ρύθμισης της θέσης των δύο επάλληλων ζωνών ανακυκλοφορίας, μπορούμε να ελέγξουμε την απόδοση της ανάμειξης.

Οι υπολογιστικές προσομοιώσεις αναπαρέστησαν ικανοποιητικά τις μετρηθείσες μεταβολές του πεδίου ανάμειξης, που οφείλονται τόσο στην επίδραση του στροβιλισμού όσο στην αύξηση της παροχής καυσίμου. Το μέτωπο ανάμειξης που αναπτύσσεται κατάντι της πρώτης ζώνης ανακυκλοφορίας για χωρίς στροβιλισμό μεταβάλλεται σε ένα μέτωπο μορφής απορρέματος στη δεύτερη ζώνη ανακυκλοφορίας, όταν η ένταση του στροβιλισμού έχει επίπεδο 0.8, εμποδίζοντας έτσι την περαιτέρω διασπορά του μείγματος καύσιμου στο πεδίο. Αυτή η συμπεριφορά επιβεβαιώνεται και από τις αντίστοιχες προσομοιώσεις.



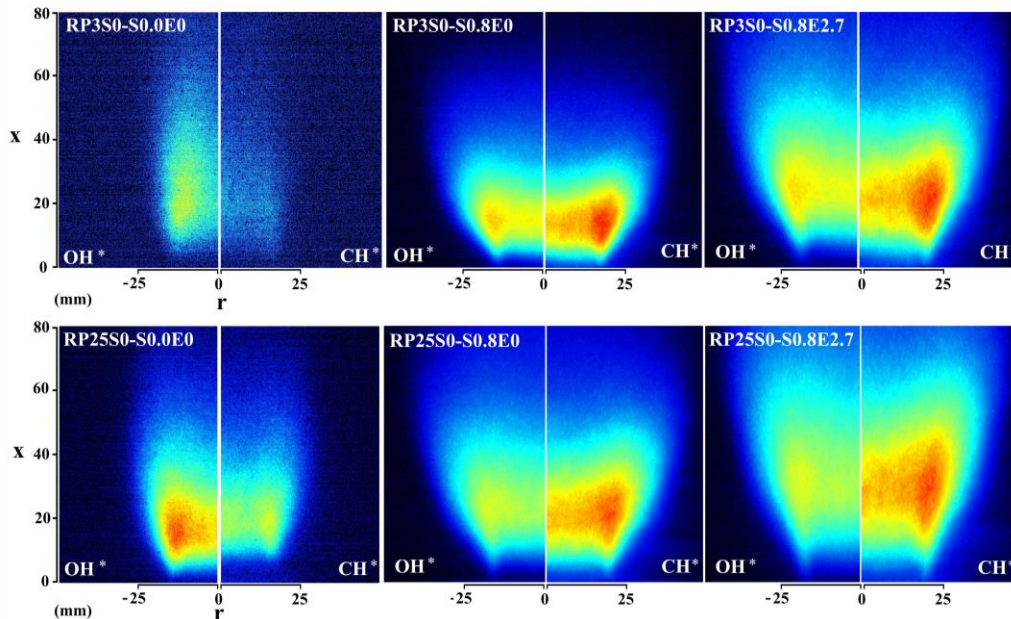
**Εικόνα 2:** Τοπολογία του πεδίου των μετρημένων και υπολογισμένων μέσων τιμών του σχετικού λόγου καυσίμου αέρα

Ενθαρρυντικό κρίνεται το γεγονός πως οι υπολογιστικές προσομοιώσεις προσέγγισαν ικανοποιητικά τις διαφορετικές τοπολογίες του πεδίου ανάμειξης αναδεικνύοντας τον καίριο ρόλο τους στην εκτέλεση παραμετρικών μελετών. Η σωστή μοντελοποίηση του αντιδρώντος πεδίου προϋποθέτει τη σωστή αναπαράσταση των τοπολογιών του πεδίου μείξης και του πεδίου ορμής, ιδιαίτερα στην περιοχή του απορρέματος του σταθεροποιητικού δίσκου. Με τη χρήση του προετοιμαστικού σταδίου των προσομοιώσεων για τον καθορισμό των επακριβών αρχικών συνθηκών εισόδου στον όγκο ελέγχου της κύριας προσομοίωσης, αναμένουμε βελτίωση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων στη μελέτη της εν λόγω διάταξης. Παρόλα αυτά το σύστημα των δύο επάλληλων ανακυκλοφοριών που συζητάμε, αποτελεί μια αρκετά πολύπλοκη ροή και προκειμένου να προβούμε σε μοντελοποίηση της αντιδρώσας ροής είναι απαραίτητη η περαιτέρω βελτίωση των μοντέλων του πεδίου ανάμειξης καθώς και του πεδίου ορμής.

#### 4.2. Αντιδρώσα Ροή

Στην Εικόνα 5 παρουσιάζονται οι μεταβολές στην τοπολογία της φλόγας για διαφορετικές συστάσεις μείγματος, και για όλα, τα υπό διερεύνηση, επίπεδα στροβιλισμού, μέσω της απεικόνισης της χημειοφωταύγειας των φυσικά διεγερμένων ριζικών  $\text{CH}^*$  και  $\text{OH}^*$ . Στην εικόνα αυτή, από την σύγκριση των περιπτώσεων RP3S0-S0.8E0 και RP25S0-S0.8E0, παρατηρούμε ότι η επίδραση του στροβιλισμού βοηθάει στην αγκίστρωση της φλόγας στα τοιχώματα του σταθεροποιητικού δίσκου. Αυτό επιτυγχάνεται καθώς ο στροβιλισμός, μειώνει το μήκος της φλόγας και διαστέλλει το ανακυκλοφορούν πεδίο. Αυξάνοντας την παροχή καυσίμου ( $\delta 25\%$ ) και την παροχή αέρα στο

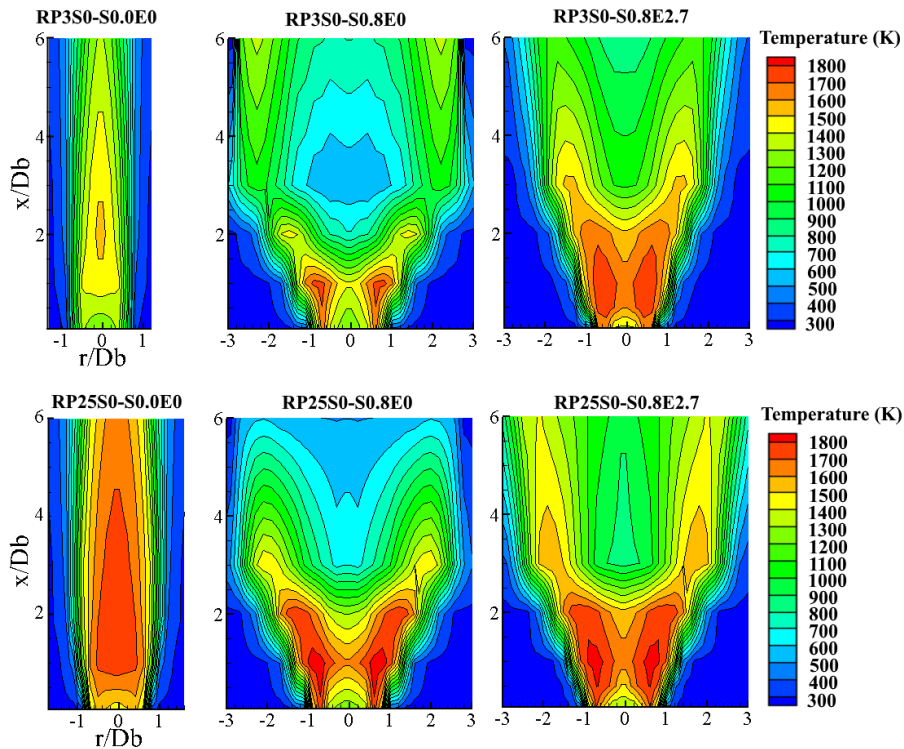
εξωτερικό συρρέον ρεύμα (λόγος ορμών 2,7), το μέτωπο της φλόγας επιμηκώνεται. Αυτό θα είναι περισσότερο ορατό από την τοπολογία του θερμοκρασιακού πεδίου.



**Εικόνα 5:** Απεικονίσεις των χημιοφωταυγάζοντων ριζικών  $\text{OH}^*$  και  $\text{CH}^*$ .

Στην Εικόνα 6 δίνεται το μετρημένο θερμοκρασιακό πεδίο σε μορφή τοπολογιών για έγχυση μείγματος καυσίμου  $\delta=3\%$  και  $\delta=25\%$ , στην πρώτη κοιλότητα, με ή χωρίς την επίδραση στροβιλισμού (S0.0 και S0.8). Προκειμένου να μελετήσουμε την επίδραση του εξωτερικού συρρέοντος ρεύματος αέρα στο σύστημα των δύο επάλληλων ανακυκλοφοριών, το σύνολο των περιπτώσεων μετρήθηκαν τόσο χωρίς το εξωτερικό ρεύμα όσο και με αυτό. Η αύξηση της ισχύος του στροβιλισμού μικραίνει το μήκος και διευρύνει το μέτωπο της φλόγας και για τις δύο συστάσεις μείγματος. Η συμπεριφορά αυτή φαίνεται εντονότερα στην περίπτωση του πλούσιου μείγματος (25%). Στις δύο διαμορφώσεις η επίδραση του στροβιλισμού ενισχύει τις πιο πτωχές φλόγες, συγκεντρώνοντας πλουσιότερο μείγμα καυσίμου-αέρα κοντά στα διατμητικά στρώματα που πηγάζουν από τον καυστήρα, κοντά στο σταθεροποιητικό δίσκο βοηθώντας έτσι το μέτωπο της φλόγας να αγκιστρωθεί ευκολότερα. Τα προϊόντα της κύριας πρωτεύουσας ζώνης καύσης προσροφούνται εντός της δευτερεύουσας ζώνης ανακυκλοφορίας, μια διαδικασία που είναι αποδοτικότερη για υψηλότερες παροχές καυσίμου. Η φλόγα εντός της πρωτεύουσας ζώνης καύσης περιορίζεται από την αντιτιθέμενη σε αυτήν δεύτερη ζώνη ανακυκλοφορίας. Τα μέγιστα επίπεδα και το εύρος θερμοκρασιών διευρύνονται υπό την επίδραση της δευτερεύουσας ζώνης ανακυκλοφορίας. Πρέπει να σημειωθεί ότι το στροβιλιζόμενο ρευστό επιδρά επί των καυσαερίων της κύριας ζώνης καύσης και όχι επί του μετώπου της φλόγας, βοηθώντας έτσι στη σταθεροποίηση της. Αντίθετα, όταν ο στροβιλισμός προσάγεται κατευθείαν στην περιοχή σταθεροποίησης της φλόγας, οδηγεί στην αποσταθεροποίησής της (Driscoll & Temme, 2011, Fritz et al, 2004). Η επιζήμια επίδραση της προσαγωγής του στροβιλισμού στη σταθεροποίηση μιας φλόγας είχε μελετηθεί επίσης από τους Χιουρίς & Κούτμος (2012) σε παρόμοια διάταξη καυστήρα, υπό συνθήκες μη εγκιβωτισμού και για διαφορετικές παραμέτρους εισόδου. Επιπλέον η χρήση του συρρέοντος εξωτερικού ρεύματος αέρα στη συγκεκριμένη μελέτη έχει σημαντική επίδραση στα χαρακτηριστικά του μετώπου της φλόγας. Με χρήση, λοιπόν, ενός συρρέοντος εξωτερικού ρεύματος αέρα με λόγο ορμών 2.7, η περιοχή της κύριας ανακυκλοφορίας, όπου επιτυγχάνεται η αγκίστρωση της φλόγας, είναι ορατά μεγαλύτερη, ενώ η ζώνη των υψηλών θερμοκρασιών είναι επιμηκυνόμενη. Μετατρέποντας έτσι μια μικρή, οριακή και στενά προσκολλημένη στα τοιχώματα του καυστήρα φλόγα σε μια κραταιά, διευρυμένη φλόγα όμοιας αυτής των πλουσιότερων μειγμάτων. Μέσω της περαιτέρω τροποποίησης της παροχής του ρυθμιστικού ρεύματος αέρα παρατηρείται πως τα χαρακτηριστικά των πτωχότερων φλογών συγκλίνουν σε αυτά των πλουσιότερων (RP3S0-S0.8E2.7 σε RP3S0-S0.8E2.7).





**Εικόνα 6:** Τοπολογία του μετρημένου πεδίου των θερμοκρασιών

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτή την εργασία μελετήθηκε η αλληλεπίδραση μιας αξονοσυμμετρικής πρωτεύουσας ζώνης καύσης, σταθεροποιημένης επί στερεού σώματος, σε συνθήκες λειτουργίας διαστρωματωμένου μείγματος, μαζί με ένα δευτερεύον ομόκεντρο στροβιλιζόμενο ρεύμα και με ένα εξωτερικό συρρέον ρεύμα αέρα.

Η προσαγωγή στο πεδίο, στροβιλιζόμενου ρεύματος αέρα, κατάντι της ζώνης σταθεροποίησης της φλόγας, βελτίωσε την ευστάθεια του μετώπου της φλόγας σε συνθήκες πολύ πτωχού, κοντά στην απόσβεση μείγματος. Η χρήση του εξωτερικού ρυθμιστικού ρεύματος αέρα στη συγκεκριμένη διάταξη μας έδωσε τη δυνατότητα ελέγχου της διεξόδου του στροβιλιζόμενου ρεύματος αέρα στην πρωτεύουσα ανακυκλοφορία καθώς και της αλληλεπίδρασης των δύο επάλληλων ανακυκλοφοριών. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν είναι χρήσιμα για την βελτίωση της ανάμειξης όταν αραιώνουμε τα προϊόντα της πρωτεύουσας ζώνης καύσης με αέρα από τον στροβιλισμό.

Προκαταρκτικές δοκιμές του μοντέλου LES για τις μη αντιδρώσες ροές ανάμειξης επέτρεψαν την αξιολόγηση των υπολογιστικών μοντέλων στην πρόβλεψη των πολύπλοκων χαρακτηριστικών του απορρέυματος της συγκεκριμένης ροής. Περαιτέρω προσπάθειες για τη βελτίωση της αξιοπιστίας των συγκεκριμένων μοντέλων θα επέτρεπαν τη μοντελοποίηση και της ροής με καύση.

## 6. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

ANSYS® Academic Research, Release 18, (2017)

Candel, S., Durox, D., Schuller, T., Palies, P., Bourgoïn, J. F., and Moeck, J. P. (2012) “Progress and challenges in swirling flame dynamics.”, *Comptes Rendus – Mecanique*.

Dogkas, E., Mitsopoulos E. P., and AU Koutmos, P. (2018) “Mixing and Combustion Performance of a Stratified Bluff Body Primary Zone Interacting with a Coannular Swirl–Induced Recirculation.”, *ASCE* 144.

- Doss, T. P., Keramiotis, C., Vourliotakis, G., Zannis, G., Skevis, G., and Founti, M. A. (2016) “Experimental Investigation on the Influence of Simulated EGR Addition on Swirl-Stabilized CH<sub>4</sub> Flames.” *Journal of Energy Engineering*, 142.
- Driscoll, J. F., and Temme, J. (2011) “Role of Swirl in Flame Stabilization.” 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting, (January), p.1–11.
- Field, R., and O’Connor, P. T. (1996). “Swirl Technology: Enhancement of Design, Evaluation, and Application.”, *Journal of Environmental Engineering*, ASCE 122, p.741–748, 2011.
- Fu, Z., Lin, Y., Li, J., and Sung, C.-J. (2011) “Experimental Investigation on Ignition Performance of LESS Combustor.”.
- Heath, C. M., Hicks, Y. R., Anderson, R. C., and Locke, R. J., “Optical Characterization of a Multipoint Lean Direct Injector for Gas Turbine Combustors: Velocity and Fuel Drop Size Measurements.” Vol. 2: Combustion, Fuels and Emissions, Parts A and B, p.791–802, 2010.
- Kalb, J. R., and Sattelmayer, T. (2006) “Lean Blowout Limit and NO<sub>x</sub>-Production of a Premixed Sub-ppm NO<sub>x</sub> Burner with Periodic Recirculation of Combustion Products.”, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* 128, p.247–254.
- Karagiannaki, C., Paterakis, G., Souflas, K., Dogkas, E., and Koutmos, P. (2015) “Performance evaluation of a model swirl burner under premixed or stratified inlet mixture conditions.”, *Journal of Energy Engineering*, 141.
- Loretero, M. E., and Huang, R. F. (2013) “Effects of acoustic excitation and annular swirl strength on a non-premixed and swirl-stabilized flame.”, *Journal of Energy Engineering*, 139, p.329–337.
- Mongia, H. C. (2003) “TAPS-A 4th Generation Propulsion Combustor Technology for Low Emissions.”, AIAA 1, p.1085–1095.
- Souflas, K., and Koutmos, P. (2017) “Flow, Mixing, and Combustion Characteristics of High Velocity Ratio Plane Coaxial and Convolute Trailing Edge Nozzles.”, *Journal of Energy Engineering*, American Society of Civil Engineers, 143.
- Straub, L., D., Casleton, H., K., Lewis, E., R., Maloney, J., D., and Richards, A., G. (2005) “Assessment of Rich-Burn, Quick-Mix, Lean-Burn Trapped Vortex Combustor for Stationary Gas Turbines.”, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, ASME, 127, p.36–41.
- Sweeney, M. S., Hochgreb, S., Dunn, M. J., and Barlow, R. S. (2012) “The structure of turbulent stratified and premixed methane/air flames II: Swirling flows.”, *Combust. Flame*, 159, 2912–2929.
- Syred, N., “A review of oscillation mechanisms and the role of the precessing vortex core (PVC) in swirl combustion systems.”, *Progress in Energy and Combustion Science*, 2006.
- Tacina, K. M., Chang, C. T., He, Z. J., Lee, P., Dam, B., and Mongia, H. (2014) “A Second Generation Swirl-Venturi Lean Direct Injection Combustion Concept.”, AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference; 50th; Cleveland, OH; United States.
- Terasaki, T., and Hayashi, S. (1996) “The effects of fuel-air mixing on NO<sub>x</sub> formation in non-premixed swirl burners.”, *Symposium (International) on Combustion*, 26, p.2733–2739.
- Toqan, M. A., Beér, J. M., Jansohn, P., Sun, N., Testa, A., Shihadeh, A., and Teare, J. D. (1992) “Low NO<sub>x</sub> emission from radially stratified natural gas-air turbulent diffusion flames.”, *Symposium (International) on Combustion*, 24, p.1391–1397.
- Xiouris, C., and Koutmos, P. (2011) “An experimental investigation of the interaction of swirl flow with partially premixed disk stabilized propane flames.” *Experimental Thermal and Fluid Science*, 35, p.1055–1066.
- Xiouris, C. Z., and Koutmos, P. (2012) “Fluid dynamics modeling of a stratified disk burner in swirl co-flow.”, *Applied Thermal Engineering* 35, p.60–70.