

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΑΝΑΜΙΞΗΣ ΒΑΘΜΩΤΟΥ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΚΑΤΑΝΤΙ ΑΞΟΝΟΣΥΜΜΕΤΡΙΚΩΝ ΣΤΕΡΕΩΝ ΣΩΜΑΤΩΝ ΥΠΟ ΠΛΗΡΩΣ ΠΡΟΑΝΑΜΙΓΜΕΝΗ Ή ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΩΜΕΝΗ ΠΡΟΣΑΓΩΓΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

Πατεράκης Γ<sup>1</sup>, Πολίτη Ε.<sup>2</sup>, Κούτμος Π.<sup>3</sup>

Εργαστήριο Τεχνικής Θερμοδυναμικής,  
Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πάτρας,  
Πανεπιστημιούπολη Ρίο 26504, Τηλ: 2610- 997244, Fax: 2610- 997271  
e-mails: 1: [paterakis.gio@gmail.com](mailto:paterakis.gio@gmail.com) , 2: [mead6427@upnet.gr](mailto:mead6427@upnet.gr) ,  
3: [koutmos@mech.upatras.gr](mailto:koutmos@mech.upatras.gr)

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει και συγκρίνει τα χαρακτηριστικά του ισόθερμου τυρβώδους πεδίου ροής και ανάμιξης βαθμωτού μεγέθους, κατάντι διαφορετικών αξονοσυμμετρικών σωμάτων, υπό πλήρως προαναμιγμένη ή διαστρωματωμένη προσαγωγή καυσίμου. Ο σκοπός της διερεύνησης αυτής είναι η ανάδειξη πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων της γεωμετρίας του εκάστοτε φλογοσταθεροποιητή για εφαρμογές καύσης, διαστρωμάτωσης ή πλήρους προανάμιξης, με χρήση στερεού σώματος, με απώτερο στόχο τον κατάλληλο έλεγχο και την βελτιστοποίηση της σταθεροποίησης υπέρπτωχων φλογών. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την συγκεκριμένη εργασία μπορούν να περιγράψουν την επιρροή του σχήματος, του λόγου απόφραξης, καθώς και του πάχους του στερεού σώματος στην τοπολογία του σχετικού λόγου καυσίμου-αέρα στο απόρρευμα κατάντι του φλογοσταθεροποιητή. Για τους σκοπούς της εργασίας αποτυπώθηκαν το ισόθερμο ροϊκό πεδίο και το πεδίο της ανάμιξης και της διασποράς του σχετικού λόγου καυσίμου-αέρα, με τις μεθόδους διδιάστατης Απεικόνισης Ταχυμετρίας Σωματιδίων (2D Particle Image Velocimetry) και Φασματοσκοπίας Υπερύθρου με Μετασχηματισμό Fourier (Fourier transform infrared spectroscopy), αντίστοιχα.

**Λέξεις κλειδιά:** διαστρωμάτωση μίγματος, PIV, τυρβώδες πεδίο ροής, ανάμιξη βαθμωτού, ισόθερμο πεδίο, φασματοσκοπία υπέρυθρου με μετασχηματισμό Fourier (FTIR)

### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εξέλιξη των συστημάτων καύσης για την παραγωγή θερμικής ενέργειας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη βελτίωση της απόδοσης και την μείωση των εκπεμπόμενων ρυπογόνων ουσιών [Liu et al., (2017); Richards, Mcmillian, Gemmen, Rogers, & Cully, (2001)] Οι στόχοι αυτοί, μπορούν να επιτευχθούν μόνο μέσω αυστηρών δοκιμών και σωστής αξιολόγησης των καινοτόμων ιδεών διαμόρφωσης καυστήρων, πάντα βέβαια υπό κατάλληλα ελεγχόμενες εργαστηριακές συνθήκες [Bradley, (2009)]. Δεδομένου ότι αναμένεται μελλοντικά, με βάση τους υπό μελέτη κύκλους κινητήρων, να οδηγηθούμε στη λειτουργία καυστήρων πλησιέστερα στα όρια ευστάθειας της φλόγας, οι μερικώς προανεμιγμένες ή διαστρωματωμένες φλόγες ερευνώνται με σκοπό την αντικατάσταση των πτωχών φλογών πλήρους προανάμιξης. Αυτές οι τεχνικές αναμένεται να αντιμετωπίσουν το φαινόμενο της οπισθοχώρησης της φλόγας, να αυξήσουν την ευστάθεια των φλογών και το ποσοστό του εκμεταλλεύομενου καυσίμου, ενώ τέλος αναμένεται να βελτιώσουν την αποδοτικότητα και

παράλληλα να μειώσουν τα εκπεμπόμενα επίπεδα ρύπων, συγκριτικά με τις αντίστοιχες παραδοσιακές τεχνικές πλήρους προανάμιξης [Boxx, Carter, & Meier, (2011); Lipatnikov, (2017); Mark S. Sweeney, Hochgreb, Dunn, & Barlow, (2012)]. Στον αντίποδα, ανεπιθύμητες συνθήκες λειτουργίας είναι πιθανό να οδηγήσουν σε χρονικές ή χωρικές μεταβολές του εισαγόμενου μίγματος καυσίμου-αέρα, οι οποίες μπορεί να έχουν είτε θετικές είτε αρνητικές επιπτώσεις στις παραπάνω διεργασίες καύσης. [Sayad, Schönborn, & Klingmann, (2016); Tachibana, Kanai, Yoshida, Suzuki, & Sato, (2015)]. Ο σχεδιασμός όπως και ο προκαθορισμός της αναμειξιμότητας του εισαγόμενου μίγματος καυσίμου-αέρα στην περιοχή της φλόγας, αποτελούν από τις πιο βασικές παραμέτρους του τρόπου λειτουργίας της πρωτεύουσας ζώνης σταθεροποίησης της φλόγας και η βελτιστοποίηση τους επηρεάζει άμεσα την αγκίστρωση της φλόγας, τη μεταφορά θερμότητας, την ευστάθεια της φλόγας όπως και την ποσότητα των εκπεμπόμενων ρύπων. Τέλος ένας αποτελεσματικός έλεγχος της διασποράς του μίγματος προσφέρει επιπρόσθετη ευελιξία στον σχεδιασμό και στην λειτουργία της ζώνης της καύσης [Masri, (2015)]. Ως εκ τούτου, η επιτυχής προσαρμογή και εκμετάλλευση των τεχνικών της καύσης μερικής προανάμιξης σε σύγχρονες βιομηχανικές εφαρμογές απαιτεί την πλήρη κατανόηση της τυρβώδους μίξης του σχετικού λόγου καυσίμου-αέρα στην πρωτεύουσα ζώνη ανακυκλοφορίας.

Σε εργαστηριακή κλίμακα, μία από τις δημοφιλέστερες παραμέτρους σχετικά με τη μελέτη και την αξιολόγηση αυτών των τεχνικών της καύσης αποτελεί παραδοσιακά η γεωμετρία του φλογοσταθεροποιητικού σώματος. Αυτή η διάταξη είναι κατάλληλη για την αξιοποίηση παρεμβατικών ή μη μετρητικών μεθόδων, προσφέροντας τη δυνατότητα της λεπτομερούς κατανόησης της αλληλεπίδρασης της τυρβώδους ροής με την διεργασία της καύσης. Ακόμα, περιλαμβάνει χαρακτηριστικά όπου εμφανίζονται σε πρακτικές εφαρμογές της καύσης, όπως καλά καθορισμένες ανακυκλοφορίες, αγκίστρωση της φλόγας, υψηλή ένταση ανάμιξης καυσίμου-αέρα, αλληλεπιδράσεις τύρβης-χημείας και, τέλος, δυναμικές αστάθειες [Chaudhuri, Kostka, Renfro, & Cetegen, (2010); Kariuki, Dowlut, Yuan, & Balachandran, (2015); M. S. Sweeney, Hochgreb, & Barlow, (2011)].

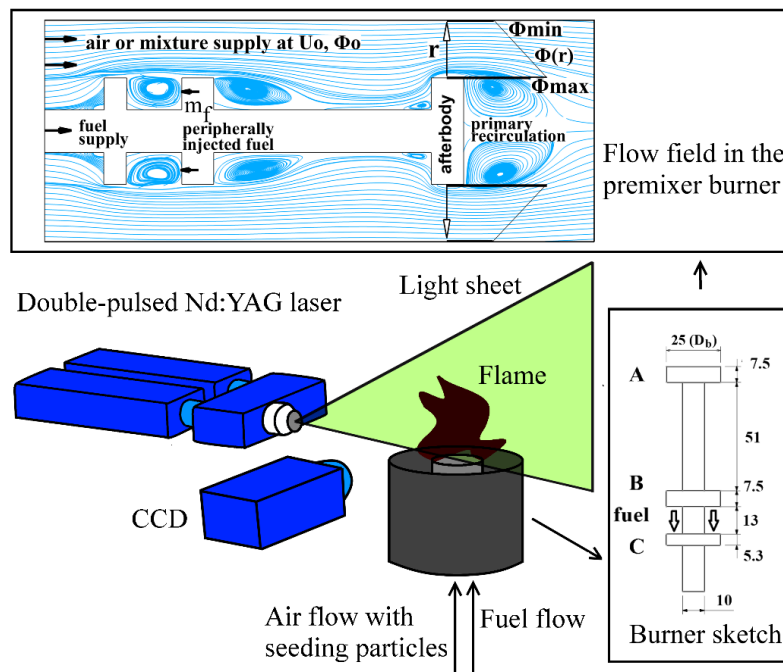
Στις μέρες μας, η προσέγγιση της μερικής προαναμειγμένης ή διαστρωματωμένης καύσης έχει αποτελέσει αντικείμενο ενασχόλησης αρκετών ερευνητών [Böhm, Frank, & Dreizler, (2011); Karagiannaki et al. (2014); Lipatnikov, (2017); Masri, (2015); Stahler et al. (2017); M. S. Sweeney et al. (2011); Mark S. Sweeney et al. (2012); Xiouris & Koutmos, (2011); Zhou, Balusamy, Sweeney, Barlow, & Hochgreb, (2013)]. Επίσης, αυτές οι έρευνες επισημαίνουν ότι ανάλογα με την διαστρωμάτωση προκύπτουν διαφορετικά αποτελέσματα, όπως ευρύτερα όρια ανάφλεξης στις περισσότερες περιπτώσεις και μεγαλύτερη ευαισθησία της φλόγας ανάλογα με τη κατανομή καυσίμου-αέρα [Balusamy, Cessou, & Lecordier, (2014); Marzouk, Ghoniem, & Najm, (2000); Pires Da Cruz, Dean, & Grenda, (2000); M. S. Sweeney et al. (2011)]. Επιπλέον, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η ασταθής συμπεριφορά των διαστρωματωμένων φλογών είναι διαφορετική από των προαναμειγμένων φλογών [Kamal, Barlow, & Hochgreb, (2015); M S Sweeney, Hochgreb, & Barlow, (2011)]. Περιορισμένος αριθμός μελετών έχει αναφερθεί στις διαφορετικές συμπεριφορές μεταξύ των διαστρωματωμένων και των προαναμειγμένων φλογών κοντά στην απόσβεση.

Η παρούσα μελέτη έχει ως στόχο τη συγκριτική διερεύνηση των λειτουργικών χαρακτηριστικών κατά την τυρβώδη ανάμιξη καυσίμου-αέρα στις ανωτέρω δύο ρευστομηχανικές διαμορφώσεις υπό συνθήκες σταθεροποίησης σε ένα ευρύ φάσμα φλογοσταθεροποιητικών σωμάτων και συνθηκών προσαγόμενου μίγματος. Ως πεδίο δοκιμών χρησιμοποιήθηκε ένας πολύδισκος αναμεικτής/καυστήρας, που έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Τεχνικής Θερμοδυναμικής για την μελέτη φλογών με πολλαπλή διαμόρφωση μίγματος εισόδου [(Paterakis et al (2013), Karagiannaki et al (2014)]. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται σε σχέση με διαφορετικές παραμέτρους, όπως ο λόγος απόφραξης, το πάχος και το αεροδυναμικό σχήμα του αξονοσυμμετρικού φλογοσταθεροποιητή.

## 2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε πειραματική διάταξη αποτελούμενη από ένα κεντρικό σωλήνα ( $D_c = 0.052 \text{ m}$ ) και από ένα σύστημα προανάμεικτη-καυστήρα (Εικόνα 1), που λειτουργεί μέσω της σύζευξης δύο επάλληλων αξονοσυμμετρικών κοιλοτήτων προανάμιξης με σώμα σταθεροποίησης [Xiouris & Koutmos 2005, Karagiannaki et al, (2014)]. Πιο αναλυτικά, η διάταξη του προανάμεικτη-καυστήρα εδράζεται εσωτερικά του κεντρικού

σωλήνα και αποτελείται από τρία αξονοσυμμετρικά σώματα, που διαμορφώνουν τις δύο επάλληλες κοιλότητες, δηλ. έναν δίσκο (C), τον δεύτερο δίσκο έγχυσης καυσίμου (B) και τον φλογοσταθεροποιητή (A). Στην περίπτωση της μερικής διαστρωμάτωσης του μίγματος καυσίμου-αέρα ο κεντρικός σωλήνας παροχετεύει τον κύριο αέρα καύσης στην περιοχή σταθεροποίησης, δηλαδή στην ανακυκλοφορία που δημιουργείται κατάντι μίας σειράς σταθερών σωμάτων ποικίλης γεωμετρίας. Ταυτόχρονα, αέριο προπάνιο εγχέεται από τον δίσκο «B» εντός της πρωτεύουσας κοιλότητας από δακτυλιοειδή σχισμή (1mm) και συνεχίζει την προανάμιξη του με το κεντρικό ρεύμα αέρα και στην δευτερεύουσα κοιλότητα πριν προσαχθεί στην φλόγα εντός της ζώνης ανακυκλοφορίας. Στην περίπτωση της πλήρους προανάμιξης ο κεντρικός σωλήνας παροχετεύει με προκαθορισμένο μίγμα την περιοχή σταθεροποίησης της καύσης, κατάντι του φλογοσταθεροποιητικού σώματος. Τέλος, το «D» είναι η ποσοστιαία διαφορά από το όριο απόσβεσης (LBO),  $D = (m_{fuel} - m_{fuel, LBO})/m_{fuel, LBO}$  (%), όπου το  $m_{fuel, LBO}$  είναι η παροχή καυσίμου που οδηγεί στην πτωχή απόσβεση. Στον παρακάτω πίνακα, Πίνακα 1, παρουσιάζονται οι συνθήκες λειτουργίας για τις περιπτώσεις όπου εξετάστηκαν και η αντίστοιχη ονοματολογία τους.



Εικόνα 1: Σχηματική απεικόνιση πειραματικής διάταξης και της μετρητικής μεθοδολογίας 2D-PIV.

Είδος πεδίου και αναμειξιμότητας		Σχήμα φλογοσταθεροποιητή		Λόγος απόφραξης		Πάχος φλογοσταθεροποιητή		Ποσό καυσίμου	
Διαστρωματωμένο	(STR)	Δίσκος	(D)	25mm	(0.23)	3.5mm	(RIM1)		D%
Πλήρως προανεμιγμένο	(FPR)	Κώνος	(C)	36mm	(0.48)	7.5mm	(RIM2)		
						15mm	(RIM3)		

Πίνακας 1: Ονοματολογία διερευνηθείσων περιπτώσεων

### 3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

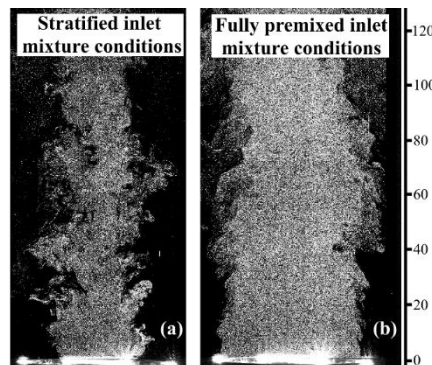
Οι ροές του κεντρικού αέρα ρυθμίζονται μέσω μετρητή διαφράγματος (orifice plate) κατασκευασμένο κατά το πρότυπο ISO5167, ενώ οι ροές του καυσίμου μέσω ηλεκτρονικών ροομέτρων Bronkhorst MV-304 High-Tech με μέγιστο σφάλμα το 2%. Για την μέτρηση της περιεκτικότητας του καυσίμου στα ισόθερμα πεδία, χρησιμοποιήθηκε διάταξη υπέρυθρης φασματοσκοπίας μετασχηματισμού Fourier (FTIR, Spectrum Two™ αναλυτή φασματοσκοπίας, PerkinElmer®). Τα αέρια δείγματα του μίγματος συλλέχθηκαν, μέσω ενός κωνικού συλλέκτη, με οπή αναρρόφησης 0,75mm. Το αέριο δείγμα

μεταφερόταν από τον συλλέκτη σε ένα κελί σταθερού όγκου. Η εξαγωγή και η ανάλυση των πληροφοριών σχετικά με τη σύνθεση του μίγματος έγινε χρησιμοποιώντας το λογισμικό Spectrum 10<sup>®</sup> (PerkinElmer<sup>®</sup>). Οι μετρήσεις έγιναν στο φασματικό διάστημα μεταξύ 450 και 4000 cm<sup>-1</sup>, με ανάλυση 0.5 cm<sup>-1</sup>. Από την εν λόγω ανάλυση των αποτελεσμάτων προέκυπτε τελικά η κατανομή του μίγματος καυσίμου-αέρα, στις προαναφερθείσες περιοχές.

Ακόμη, διεξάχθηκε οπτικοποίηση του ροϊκού πεδίου με χρήση της διδιάστατης ταχυμετρίας απεικόνισης σωματιδίων (2DPIV). Τα τροχοδεικτικά σωματίδια-σταγονίδια (seeding particles), που χρησιμοποιήθηκαν ήταν σωματίδια TiO<sub>2</sub>, μέσης διαμέτρου 2μm, τα οποία διασπάρθηκαν στην ροή με τη βοήθεια ενός διανομέα τύπου κυκλώνα. Επίσης, ένα παλμικό laser (QUANTEL ENERGREEN double-pulsed Nd:YAG laser), εξέπεμπε φύλλο φωτός πάχους 0.5mm, με μήκος κύματος στα 532 nm. Το σκεδαζόμενο από τα τροχοδεικτικά σταγονίδια φως αποτυπωνόταν σε εικόνα ανάλυσης 1600x1200 pixel, από μια φωτογραφική μηχανή LaVision<sup>®</sup> Imager Pro X 2M CCD camera, τοποθετημένη σε γωνία 90° από το φύλλο φωτός. Η φωτογραφική μηχανή ήταν εξοπλισμένη με έναν (AF Micro Nikkor 60 mm lens (f/4)) φακό. Το εικονιζόμενο πεδίο είχε πλάτος 66.80mm και ύψος 51.72mm, με χωρική ανάλυση 30.4μm/pixel (τετραγωνικό pixel διαστάσεων 7.4μm x 7.4μm). Η αρχική επεξεργασία των εικόνων έγινε σε λειτουργία πολλαπλών σαρώσεων (multi-pass) με επικάλυψη (overlap). Οι εξεταζόμενες περιοχές (interrogation windows) ήταν μειούμενου μεγέθους από 64 × 64 σε 32 × 32 pixels. Τρεις σαρώσεις έγιναν στο πρώτο στάδιο και μία στο δεύτερο. Η επικάλυψη ήταν 50% και 75% στο πρώτο και το δεύτερο στάδιο, αντίστοιχα. Στην συνέχεια, υπολογίστηκαν τα διανύσματα των ταχυτήτων και σχηματίστηκαν τα διανυσματικά πεδία στην αξονική και ακτινική διεύθυνση για την κάθε μέτρηση. Με την χρήση του λογισμικού DaVis8.0<sup>®</sup> της LaVision<sup>®</sup>, έγινε η επεξεργασία των πεδίων αυτών για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων.

#### 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στην **Εικόνα 2**, παρουσιάζονται φωτογραφικά στιγμιότυπα οπτικοποίησης τύπου «Mie-scattering της τοπολογίας καυσίμου-αέρα για συνθήκες εισαγωγής καυσίμου-αέρα μερικής ή πλήρους διαστρωμάτωσης για την περίπτωση **D-BR023-RIM2-D0%**. Πιο συγκεκριμένα, σταγονίδια λαδιού εγχύθηκαν από τα σημεία έγχυσης καυσίμου, για συνθήκες εισαγωγής καυσίμου-αέρα είτε μερικής είτε πλήρους διαστρωμάτωσης και αποτυπώθηκαν με την βοήθεια μίας CCD κάμερας και της χρήσης ενός λέιζερ. Από τις εικόνες αυτές, είναι εμφανής οι διαφορές της τοπολογίας και της διασποράς του ιχνηθέτη στο απόρρευμα του φλογοσταθεροποιητή για τις δύο διαφορετικές προσαγωγές καυσίμου. Στην συνέχεια, στην **Εικόνα 3**, παρουσιάζονται τα μέσα ισόθερμα ροϊκά πεδία για διαφορετικού σχήματος φλογοσταθεροποιητές, καθώς και οι αντίστοιχες ροϊκές γραμμές, δίνοντας χρήσιμες πληροφορίες για τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της πρωτεύουσας ανακυκλοφορίας κατάντι διαφορετικών φλογοσταθεροποιητικών σωμάτων.



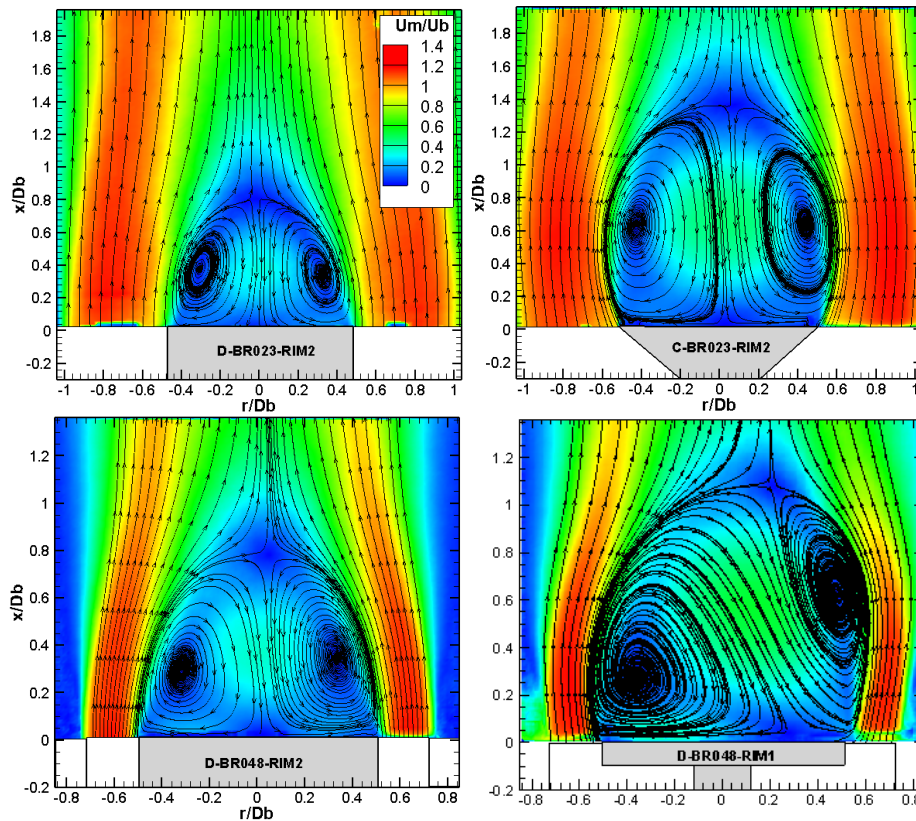
**Εικόνα 2:** Οπτικοποίηση τύπου «Mie-scattering» της τοπολογίας καυσίμου-αέρα για συνθήκες εισαγωγής καυσίμου-αέρα μερικής ή πλήρους διαστρωμάτωσης για την περίπτωση **D-BR023-RIM2-D0%**.

Ο σχηματισμός μεγάλων δομών στην πρωτεύουσα ανακυκλοφορία επηρεάζει την ποσότητα της μεταφερόμενης ορμής και μάζας κατάντι του φλογοσταθεροποιητή, και κατά συνέπεια και τα επίπεδα τύρβης. Στην **Εικόνα 4**, απεικονίζονται οι περιοχές έντονης αναμεικτικότητας για τέσσερις περιπτώσεις. Πιο συγκεκριμένα, με χρήση του παρακάτω τύπου υπολογίστηκε η μέση τιμή της

συνολικής έντασης της τύρβης, υποθέτοντας ότι η διακύμανση της αζιμουθιακής συνιστώσας της ταχύτητας,  $w'$  είναι ίση με  $v'$ , της αξονοσυμμετρικής ροής.

$$I_0 \% = (U'/U_b) \times 100 = \left( \sqrt{\frac{1}{3} \times (u'^2 + 2v'^2)} / U_b \right) \times 100$$

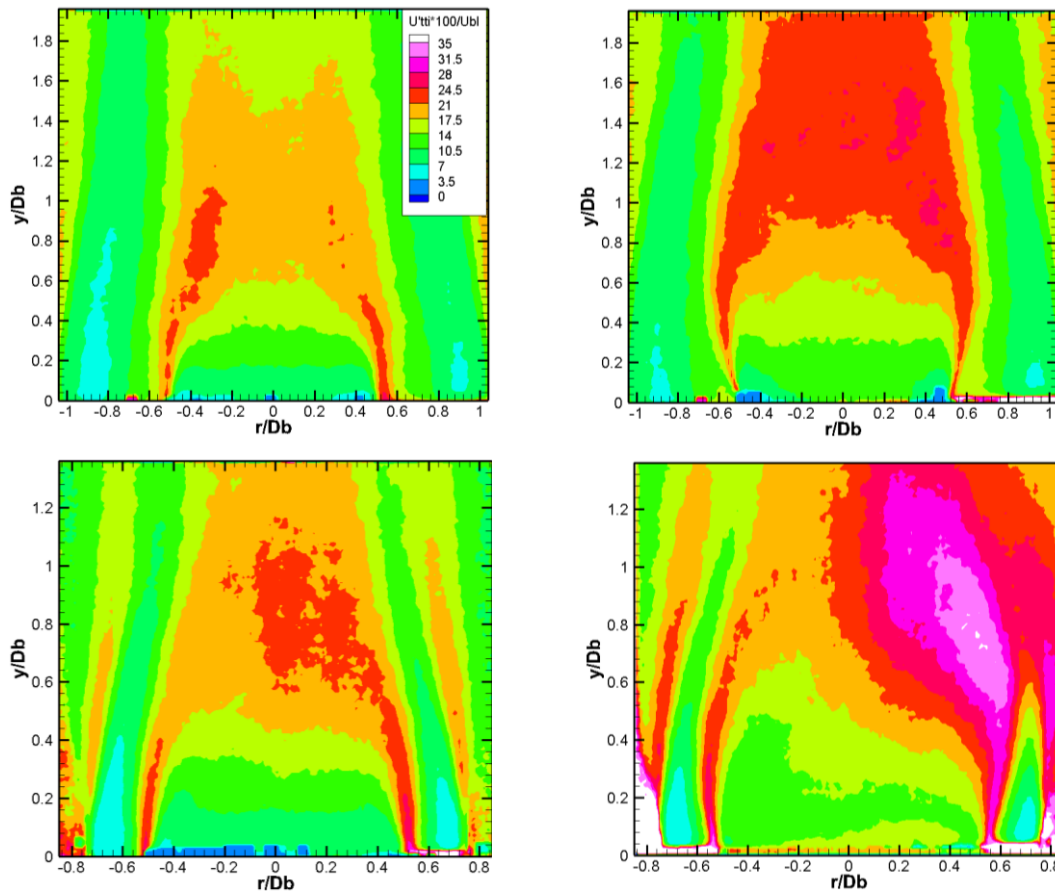
Από την **Εικόνα 4**, αποδεικνύεται ότι υπάρχει σαφής συσχέτιση μεταξύ της συνολικής έντασης της τύρβης και του λόγου απόφραξης. Είτε με την αύξηση του λόγου απόφραξης (BR) είτε με την αύξηση της γωνίας της ταχύτητας εξόδου, είτε με την μείωση του πάχους του φλογοσταθεροποιητή οδηγούμαστε σε υψηλότερα επίπεδα τύρβης.



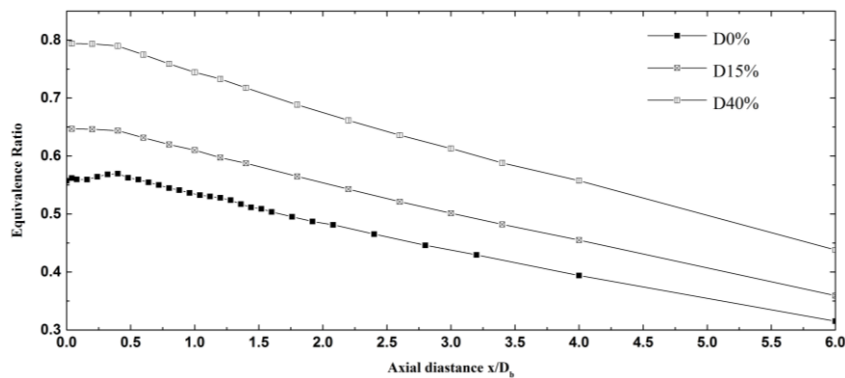
**Εικόνα 3:** Πεδία αδιάστατων μέσων ταχυτήτων υπό συνθήκες ισόθερμης ροής για τους (a) D-BR0.23-RIM2, (b) C-BR0.23-RIM2, (c) D-BR0.48-RIM2 και (d) D-BR0.48-RIM1 φλογοσταθεροποιητές.

Στην **Εικόνα 5** παρουσιάζονται οι κατανομές του σχετικού λόγου καυσίμου-αέρα για διαφορετικές ποσότητες εισερχόμενου μίγματος ( $D=0\%$ ,  $15\%$ ,  $40\%$ ), υπό συνθήκες διαστρωμάτωσης για το φλογοσταθεροποιητικό σώμα D-BR023-RIM2. Κοντά στην επιφάνεια του φλογοσταθεροποιητή ( $x/D_b=0$ ) και για απόσταση πάνω από  $x/D_b=0.5$ , η περιεκτικότητα του μίγματος καυσίμου-αέρα παραμένει σταθερή. Μετά από αυτό το ύψος, εμφανίζεται μια ομαλή μείωση μέχρι το σημείο ολοκλήρωσης της δειγματοληψίας, δηλ.  $x/D_b=6$ , όπου καταγράφονται περίπου οι μισές τιμές από τις αντίστοιχες των αρχικών σημείων δειγματοληψίας. Η συμπεριφορά αυτή καταδεικνύει την γραμμική σχέση της εισερχόμενης ποσότητας καυσίμου με την μεταβολή του  $\Phi$ .

Στην **Εικόνα 6**, δείχνονται για διαφορετικά αξονοσυμμετρικά σώματα οι κατανομές μίγματος καυσίμου-αέρα κατά μήκος του άξονα συμμετρίας. Εντός της πρωτεύουσας ανακυκλοφορίας, κατάντι του φλογοσταθεροποιητή, συναντάται ομογενοποιημένη κατανομή μίγματος, μέχρι και το σημείο περίπου ίσο με  $0.5D_b$ , στην συνέχεια η κατανομή του σχετικού λόγου καυσίμου-αέρα παρουσιάζει ραγδαία μείωση μέχρι και τα  $6D_b$ .



**Εικόνα 4:** Πεδία αδιάστατων μέσω των τιμών της συνολικής έντασης της τύρβης υπό ισόθερμες συνθήκες ανάμειξης για (a) D-BR0.23-RIM2, (b) C-BR0.23-RIM2, (c) D-BR0.48-RIM2 και (d) D-BR0.48-RIM1 φλογοσταθεροποιητές.

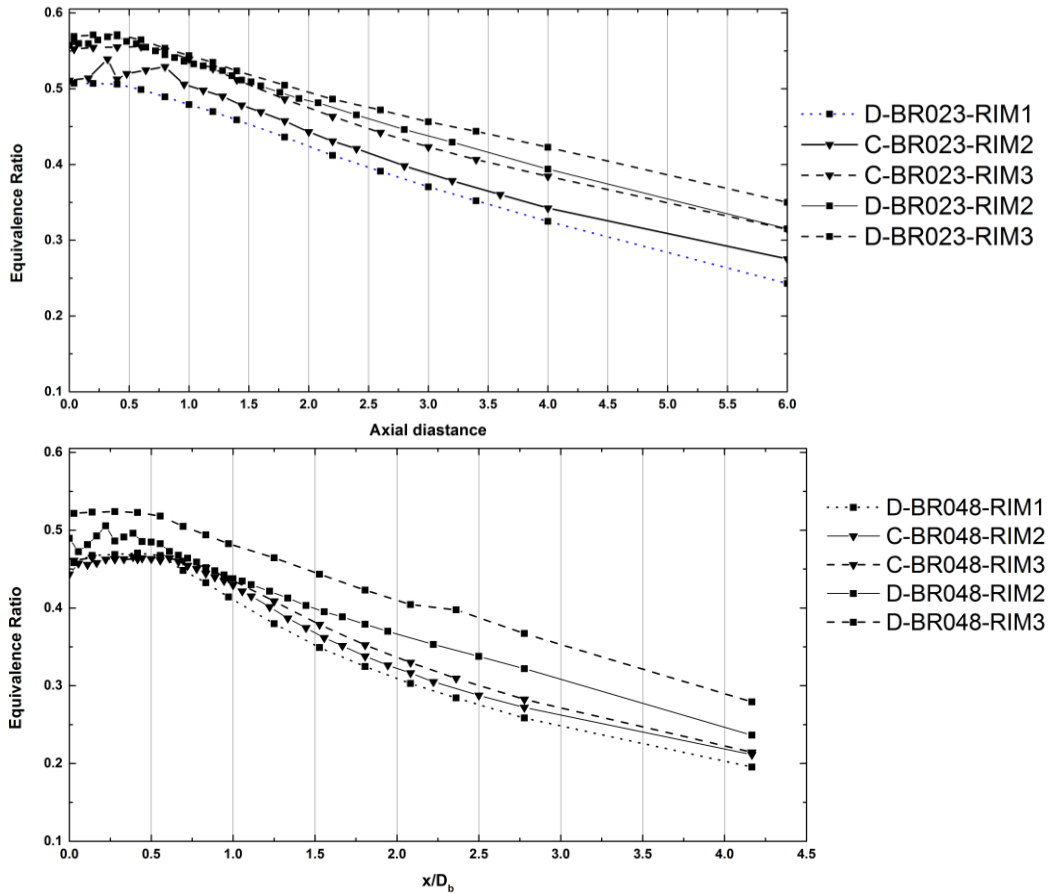


**Εικόνα 5:** Κατανομή του  $\Phi$  κατά μήκος του άξονα συμμετρίας για διαφορετικές παροχές καυσίμου για το φλογοσταθεροποιητή D-BR0.23-RIM2.

Τα ακτινικά προφίλ του σχετικού λόγου καυσίμου-αέρα για όλα τα φλογοσταθεροποιητικά σώματα παρουσιάζονται στην **Εικόνα 7**, για  $\delta = 0\%$ . Οι ακτινικές κατανομές της ποσότητας  $\Phi$  (**Εικ.7 a-d**) στο επίπεδο εξόδου, από την κόγχη του φλογοσταθεροποιητή έως και το κεντρικό σωλήνα, εμφανίζουν μέγιστες τιμές,  $\Phi_{peak}$ , πλησίον του τείχους του στερεού σώματος. Το εισερχόμενο εντός της ανακυκλοφορίας μείγμα συμβολίζεται με  $\Phi_{r,E}$  και εκφράζει το ολοκληρωμένο κατά μάζα προφίλ καυσίμου-αέρα που προσροφάται στην περιοχή σταθεροποίησης. Περίπου στη μέση της ανακυκλοφορίας ( $x/D_b=0.4$ ) τα επίπεδα του  $\Phi$  διατηρούνται σταθερά έως το όριο της ανακυκλοφορίας ( $r/D_b=0.5$ ), όπου στην συνέχεια μειώνεται η συγκέντρωση του καυσίμου, με τα κωνικά στερεά σώματα να παρουσιάζουν την ομαλότερη κλίση. Μετά το σημείο επανακόλλησης της ροής, οι

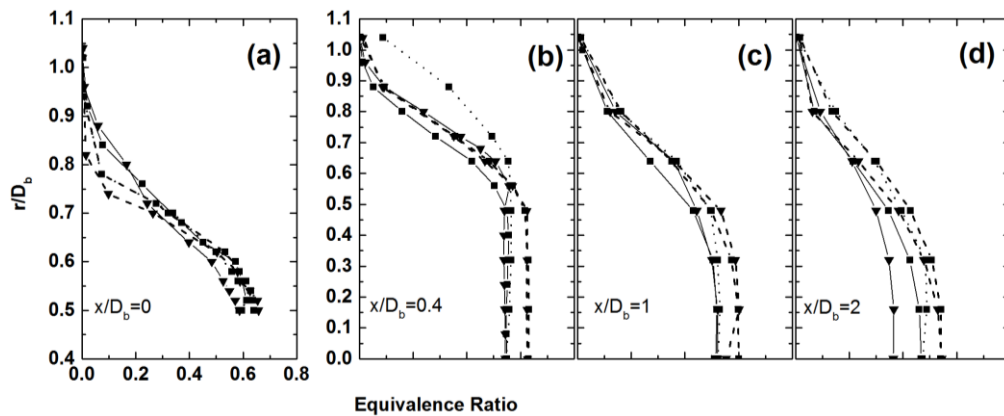


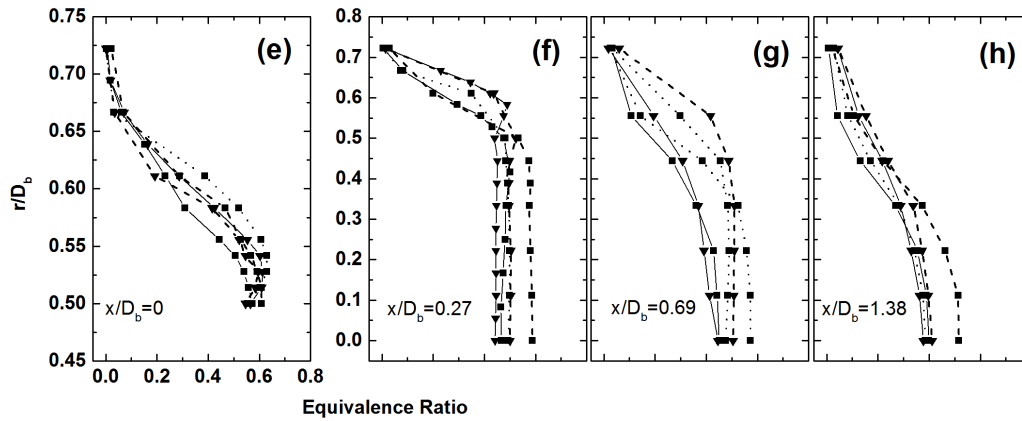
ακτινικές κατανομές του  $\Phi$  παρουσιάζουν ομοιότητες ανάλογες με ροές ακροφυσίων και γίνονται περισσότερο ομοιόμορφες περί το  $x/D_b=6$ .



**Εικόνα 6:** Κατανομή του λόγου καυσίμου-αέρα κατά μήκος του άξονα συμμετρίας για μία σειρά φλογοσταθεροποιητών με διαφορετικό λόγο απόφραξης a) 0.23 και b) 0.48.

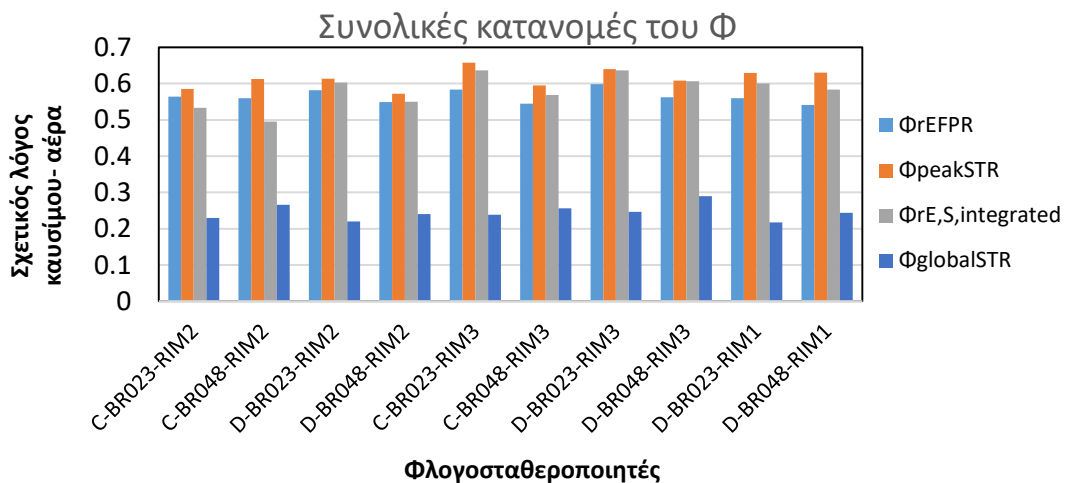
Στο επίπεδο εξόδου για τα φλογοσταθεροποιητικά σώματα με μεγάλο λόγο απόφραξης (BR0.48), παρατηρείται μια καμπανοειδής κατανομή  $\Phi$  σε όλες τις περιπτώσεις, με τις μέγιστες τιμές να κυμαίνονται από 0.57 έως 0.65 μετρημένες κοντά στην κόγχη του φλογοσταθεροποιητή, ενώ αμελητέες τιμές  $\Phi$  έχουν καταγραφεί κοντά στο τοίχωμα του κεντρικού σωλήνα. Στο σημείο δειγματοληψίας  $x/D_b=0.27$ , έχουν παρατηρηθεί ομοιόμορφα επίπεδα του  $\Phi$  μέχρι τα όρια της ανακυκλοφορίας, στα οποία, ανάλογα με το σχήμα του στερεού σώματος, έχουν διαφορετικό ρυθμό μείωσης.





**Εικόνα 7:** Αξονικές κατανομές του σχετικού λόγου καυσίμου-αέρα για όλους τους φλογοσταθεροποιητές (Να σημειωθεί η διαφορά της ακτινικής κατανομής μεταξύ των δύο διαφορετικών λόγων απόφραξης και των διάφορων σημείων δειγματοληψίας, ακόμα να σημειωθεί ότι το τέλος του RZ είναι στο  $x/D_b = 1$  και στο  $x/D_b = 0.75$  για BR0.23 και BR0.48 αντίστοιχα)

Στο  $x/D_b = 0.4$  παρατηρείται σταθερή η ποσότητα  $\Phi$  για ακτίνα έως  $r/D_b = 0.5$ . Μετά από αυτό, ακολουθεί μια μείωση του επιπέδου  $\Phi$  σε όλες τις περιπτώσεις, εκτός από τα σώματα κωνικού σχήματος και του D-BR023-RIM1. Αυτό μας αποδεικνύει ότι το σχήμα του φλογοσταθεροποιητικού σώματος και η γωνία εκφυγής της ταχύτητας στο επίπεδο εξόδου επηρεάζουν την κατανομή  $\Phi$  και στα διατμητικά στρώματα.



**Εικόνα 8:** Συγκεντρωτικός πίνακας κατανομών  $\Phi$ , ανάλογα με την διερευνηθείσα διαχείριση προσαγωγής μείγματος, πλήρους προανάμειξης ή διαστρωμάτωσης

Στην **Εικόνα 8** παρουσιάζεται ένα ραβδόγραμμα με τις ποσότητες του  $\Phi$  που συναντώνται ανά φλογοσταθεροποιητή και ανά μέθοδο διαχείρισης προσαγωγής μείγματος. Είναι εμφανή τα διαφοροποιημένα επίπεδα της συνολικά εισερχόμενης μάζας του καυσίμου στον καυστήρα, μεταξύ των περιπτώσεων πλήρους προανάμειξης,  $\Phi_{r,E,FPR}$ , και διαστρωμάτωσης,  $\Phi_{globalSTR}$ , με εύρος μεταβολής περίπου 3:1. Ακόμη, καταγράφηκαν και συγκρίθηκαν οι μέγιστες τιμές του σχετικού λόγου καυσίμου-αέρα,  $\Phi_{peak}$ , και του εισερχόμενου στην ανακυκλοφορία  $\Phi_{r,E}$ . Σε όλες τις περιπτώσεις το  $\Phi_{peak}$ , είναι πλησίον του  $\Phi_{r,E}$ , εκτός από τις περιπτώσεις των κωνικών σταθεροποιητών όπου σημειώνονται ελαφρά αυξημένες αποκλίσεις, με εξαίρεση την περίπτωση «C-BR023-RIM3». Σημαντική, επίσης, είναι η διαφορά της ποσότητας  $\Phi_{r,E}$ , με το πτωχό όριο ευφλεκτότητας για στρωτές προανεμειγμένες φλόγες προπανίου (περίπου στο 0.47). Σε όλες τις ροϊκές διαμορφώσεις υπάρχει διαφορά άνω του 14%, εκτός από την περίπτωση «C-BR048-RIM2», όπου αποκλίνει κατά 5%. Τέλος, δεν μπορεί να εξαχθεί άμεσο συμπέρασμα σχετικά με τις επιπτώσεις που προκαλεί η διαμόρφωση πλήρους προανάμειξης σε σύγκριση με την διαστρωμάτωση για την τοπολογία ανάμειξης υπό πτωχές συνθήκες λειτουργίας, αφού πρέπει να ληφθεί υπόψιν και η επίδραση μίας σειράς επιπλέον παραμέτρων.



Τέτοιες είναι ο αριθμός Lewis, μεταφορά θερμότητας στο στερεό σώμα, τύπος καυσίμου, ταχύτητα μετάδοσης της φλόγας σε αντιδρώσες ροές. Παρόλα αυτά, ο συνδυασμός των υψηλών τιμών του  $\Phi_{peak}$  και του  $\Phi_{r,E}$  φαίνεται να βελτιώνει τα όρια απόσβεσης των διαστρωματωμένων φλογών για όλες τις περιπτώσεις εκτός από τις «C-BR023-RIM2» και «C-BR048-RIM2».

## 5. ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ- ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η λεπτομερής καταγραφή του ισόθερμου ροϊκού πεδίου, όπως και του βαθμωτού πεδίου ανάμιξης συνέβαλλε στην κατανόηση της επίδρασης του λόγου απόφραξης, του πάχους και του προφίλ του φλογοσταθεροποιητή επί του πεδίου ορμής και ανάμιξης του βαθμωτού για το εκάστοτε απόρρευμα. Ο λόγος απόφραξης και το σχήμα του φλογοσταθεροποιητή επηρεάζουν σημαντικά το μέγεθος και το σχήμα της ανακυκλοφορίας, όπως και το ρυθμό της ανακυκλοφορούσας μάζας. [Paterakis G., Naxakis A., Partheniou A., and Koutmos P., (2016)] Αυτό έχει ως συνέπεια την διαμόρφωση διαφορετικών προφίλ εισόδου του σχετικού λόγου καυσίμου- αέρα στην ανακυκλοφορία. Λαμβάνοντας υπόψιν τα εισερχόμενα στον καυστήρα ποσά καυσίμου η πιο υψηλή κατανομή του σχετικού λόγου καυσίμου-αέρα παρατηρήθηκε για τους φλογοσταθεροποιητές κυλινδρικού σχήματος. Τέλος, παρατηρήθηκε ότι το εισερχόμενο μείγμα την ανακυκλοφορία παραμένει αμετάβλητο έως και περίπου το μέσο της ανακυκλοφορίας και στην συνέχεια φθίνει με ρυθμό ο οποίος επηρεάζεται άμεσα από τον ρυθμό της ανακυκλοφορούσας μάζας. Αυτό αποδεικνύει την σημασία της διαμόρφωσης του προφίλ ανάμιξης στην κόγχη του φλογοσταθεροποιητή, αλλά και τον ρυθμό μεταφερόμενης ορμής και μάζας πλησίον του σημείου επανένωσης της ανακυκλοφορίας. Μελλοντική προέκταση της εργασίας θα αποτελούσε η αντίστοιχη διερεύνηση με υπολογιστικά μοντέλα και εν συνεχεία η διεξαγωγή ρευστοθερμικών υπολογισμών με LES, όπου με την επιλογή κατάλληλων μοντέλων καύσης και χημείας, θα περιγράφονταν τα λειτουργικά χαρακτηριστικά των αντίστοιχων αντιδρωσών ροών.

### Ευχαριστίες

Η εργασία υποστηρίχθηκε από την Επιτροπή Ερευνών του Πανεπιστημίου Πατρών. Η συμβολή του μηχανουργείου του Πανεπιστημίου Πατρών συνετέλεσε στην κατασκευή της πειραματικής διάταξης και αναγνωρίζεται με ευγνωμοσύνη.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Andrews G.E., Ahmed N.T., Phylaktou R., et al. (2009), Weak extinction in low NOx gas turbine combustion, *Combust. Fuels Emis.* 2, p. 623–638. GT2009-59830.
- Chaudhuri S. and Cetegen B. (2008), Blow-off characteristics of bluff-body stabilized conical premixed flames with upstream spatial mixture gradients and velocity oscillations, *Combust. Flame*, vol. 153, p. 616-633.
- Cheng R.K., Levinsky H. (2007), Lean premixed burners, in: Derek Dunn-Rankin (Ed.), *Lean Combustion: Technology and Control*, Academic Press, p. 161–177.
- Del Taglia C., Blum L., Gass J., Ventikos Y. and Poulidakos D., (2004), Numerical and Experimental Investigation of an Annular Jet Flow With Large Blockage, *J. Fluids Eng* 126(3), p. 375-384, doi:10.1115/1.1760533.
- Durão D. F. G. and Whitelaw J. H., (1978), Velocity characteristics of the flow in the near wake of a disk, vol. 85, Issue 2, p. 369-385, DOI: <https://doi.org/10.1017/S0022112078000683>.
- Duwig C., Nogenmyr K.J., Chan C.K. et al (2011), Large Eddy Simulations of a piloted lean premix jet flame using finite-rate chemistry, *Combust. Theor. Model.*, vol.15, p.537-568.
- Heitor V., Taylor A. M. K. P., and Whitelaw J. H., (1988), Velocity and Scalar Characteristics of Turbulent Premixed Flames Stabilized on Confined Axisymmetric Baffles, *Combustion Science And Technology*, vol. 62, Iss. 1-3, p. 97-126.
- Karagiannaki Ch., Dogkas E., Paterakis G., Souflas K., Psarakis E.Z., Vasiliou P., Koutmos P. 2014, A comparison of the characteristics of disk stabilized lean propane flames operated under premixed or stratified inlet mixture conditions, *Exp. Therm. and Fluid Sci.*, vol. 59, p. 264–274.
- Kariuki J., Dawson J.R. and Mastorakos E. (2012), Measurements in turbulent premixed bluff body flames close to blow-off, *Combust. Flame*, vol. 159, p. 2589–2607.

Muruganandam T.M., Nair S., Scarborough D. et al(2005), Active Control of Lean Blowout for Turbine Engine Combustors, *J. Prop. Power*, vol. 21, p. 807-814.

Mustafa Kamal M., Barlow Robert S., Hochgreb Simone, (2015), Conditional analysis of turbulent premixed and stratified flames on local equivalence ratio and progress of reaction, *Combustion and Flame*, vol. 162, Issue 10, p. 3896–3913, doi.org/10.1016/j.combustflame.2015.07.026.

Paterakis G., Naxakis A., Partheniou A., and Koutmos P. (2016), Πειραματική Διερεύνηση του Ισόθερμου Τυρβώδους Πεδίου και της Ανάμιξης Βαθμωτού Μεγέθους κατάντι Αξονοσυμμετρικών Φλογοσταθεροποιητών, poster στο 10ο Πανελλήνιο Συνέδριο Φαινόμενα Ροής Ρευστών.

Paterakis G., Souflas K., Dogkas E., and Koutmos P. (2013), A Comparison of the Characteristics of Planar and Axisymmetric Bluff-Body Combustors Operated under Stratified Inlet Mixture Conditions, *Journal of Combustion*, vol. 13, Article ID 860508, doi: 10.1155/2013/860508.

Roshko A., (1993), Perspectives on bluff body aerodynamics, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 49, Iss. 1–3, p.79-100 doi:10.1016/0167-6105(93)90007-B.

Shanbhogue S. J., Husain S. and Lieuwen T. (2009), Lean blow-off of bluff body stabilized flames: scaling and dynamics, *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 35, p. 96-117.

Stohr M., Boxx I., Carter C. et al. (2011), Dynamics of lean blowout of a swirl-stabilized flame in a gas turbine model combustor, *Proc. Combust. Inst.*, vol. 33, p. 2953-2960.

Sweeney M.S., Hochgreb S. and Barlow R.S. (2011), The structure of premixed and stratified low turbulence flames, *Combust. Flame*, 158, p. 935–948.

Sweeney M.S., Hochgreb S., Dunn M.J., Barlow R.S. (2012), The structure of turbulent stratified and premixed methane/air flames II: Swirling flows, *Combust. Flame* 159, p.2912-2929.

Taylor A. M. K. P. and Whitelaw J. H., (1984), Velocity characteristics in the turbulent near wakes of confined axisymmetric bluff bodies, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 139, p. 391-416, DOI: <https://doi.org/10.1017/S0022112084000410>.

Xiouris C. and Koutmos P. (2005), An experimental investigation of the interaction of swirl flow with partially premixed disk stabilized propane flames, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 35, p. 1055-1066.

**TITLE: EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF ISOTHERMAL SCALAR MIXING FIELDS DOWNSTREAM OF AXISYMMETRIC BAFFLES UNDER FULLY PREMIXED OR STRATIFIED INLET MIXTURE CONDITIONS**

**ABSTRACT:** In the present work the characteristics of the isothermal turbulent flow and scalar mixing fields, developing downstream of a double-cavity premixer/disk burner configuration, are presented and discussed, for a range of inlet mixture compositions and stabilization baffle shapes. This comparison helps to delineate important operational characteristics of the stabilization and mixing performance for each burner configuration under fully premixed or stratified operation for ultra-lean conditions. Mean and turbulent flow along with scalar mixing field measurements have been conducted by employing 2D Particle Image Velocimetry and Fourier Transform Infrared Spectroscopy techniques to carry out the aforementioned comparative study.