

ΠΕΔΙΟ ΡΟΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΜΕΙΞΗΣ ΚΑΤΑΝΤΗ ΑΞΟΝΟΣΥΜΜΕΤΡΙΚΟΥ ΦΛΟΓΟΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΤΗ ΣΕ ΜΗ ΑΝΤΙΔΡΩΣΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ.

Σούφλας Κωνσταντίνος, Περράκης Κυριάκος, Κούτμος Παναγιώτης
Εργαστήριο Τεχνικής Θερμοδυναμικής, Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών
Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, 26504
Email: souflaskonstantinos@gmail.com
kyper07@hotmail.com
koutmos@mech.upatras.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι χρονικά μέσες και διακυμαινόμενες τιμές του μη αντιδρώντος πεδίου ροής και τα χαρακτηριστικά ανάμειξης κατάντη ενός σταθεροποιητικού σώματος έχουν διερευνηθεί για μια σειρά μειγμάτων εισόδου και για διαφορετικά επίπεδα προθέρμανσης. Ο καυστήρας που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από τρεις ομόκεντρους δίσκους οι οποίοι σχηματίζουν δύο κοιλότητες προανάμειξης. Το καύσιμο εγχέεται στην πρώτη κοιλότητα και αναμειγνύεται μερικώς με τον αέρα εντός των κοιλοτήτων του συστήματος, διαμορφώνοντας ένα διαστρωματωμένο προφίλ του σχετικού λόγου καυσίμου-αέρα στην είσοδο της περιοχής σταθεροποίησης. Ο καυστήρας είναι ικανός να αγκιστρώνει φλόγες σε πολύ φτωχά μείγματα, φθάνοντας σε $\Phi = 0.13$ στους 743K. Οι μέθοδοι της ταχυμετρίας απεικόνισης σωματιδίων (PIV), και της φασματομετρίας υπέρυθρου με μετασχηματισμού Fourier (FTIR) έχουν χρησιμοποιηθεί για να αξιολογηθούν τα πεδία ροής και ανάμειξης που αναπτύσσονται στο κατάντη του σταθεροποιητή απόρρυμμα. Έχουν επιλεγεί τέσσερα επίπεδα προθέρμανσης των αντιδρώντων, που κυμαίνονται από 300 έως 743 K, για φτωχά και εξαιρετικά φτωχά, μείγματα. Έχει εξεταστεί η επίδραση της προθέρμανσης στην ανάπτυξη της τοπολογίας του απορέυμματος, στην ανάμειξη των συστατικών και έχουν αξιολογηθεί οι λειτουργικοί παράμετροι του φλογοσταθεροποιητή. Περαιτέρω, η μελέτη συνέβαλε στην αποσαφήνιση των επιδράσεων της διαστρωμάτωσης του μείγματος εισόδου, χωρίς ή σε συνδυασμό με την προθέρμανση του, στα χαρακτηριστικά απόδοσης του σταθεροποιητικού δίσκου και στην ταυτοποίηση των παραμέτρων που ελέγχουν την τοπολογία του μείγματος στη περιοχή ανακυκλοφορίας.

Λέξεις Κλειδιά: Κεντρική περιοχή ανακυκλοφορίας, φλογοσταθεροποιητικό σώμα, PIV, FTIR, τυρβώδες ροϊκό πεδίο, πεδίο ανάμειξης.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η σταθεροποίηση προ-αναμειγμένων ή μερικώς προ-αναμειγμένων τυρβωδών φλογών, σε διάφορες συνθήκες μείγματος εισόδου, συναντάται σε μια σειρά από πρακτικές εφαρμογές καύσης, από βιομηχανικούς καυστήρες έως κινητήρες πρόωσης. Η μερικώς προ-αναμειγμένη σταθεροποίηση της φλόγας μπορεί να επιτευχθεί με αεροδυναμική σταθεροποίηση π.χ. (K. Souflas and Koutmos 2017; Chtereve, Emerson, and Lieuwen 2018), με στροβιλισμό π.χ. (Chatterjee and Gülder 2018; Chen et al. 1990) και με χρήση φλογο-σταθεροποιητικού σώματος π.χ. (R. Chowdhury and Cetegen 2018; Karagiannaki et al. 2015) καθώς και με συνδυασμό αυτών.

Η σταθεροποίηση της φλόγας με χρήση σταθεροποιητικού σώματος επιτυγχάνεται μέσω του σχηματισμού μιας κεντρικής περιοχής ανακυκλοφορίας (ΠΑ) που δημιουργείται λόγω της παρεμπόδισης της κύριας ροής, δημιουργώντας μια περιοχή χαμηλής ταχύτητας με μεγαλύτερους χρόνους παραμονής. Το εισερχόμενο μείγμα αναφέγγεται συνεχώς στη ζώνη του δακτυλιοειδούς

διατμητικού στρώματος, όπου τα θερμά προϊόντα καύσης αλληλοεπιδρούν με το φρέσκο μείγμα, προωθώντας την αγκίστρωση της φλόγας π.χ. (Zukoski and Marble 1955; Chen et al. 1990). Αυτή η κεντρικά τοποθετημένη περιοχή ανακυκλοφορίας (ΠΑ) ελέγχει τις ταχύτητες ανάμειξης καυσίμου-αέρα και ρυθμίζει το πλάτος, το μήκος, την αγκύρωση, τη σβέση και την οπισθανάφλεξη της φλόγας (Chen et al. 1990). Η καλύτερη κατανόηση της τοπολογίας της ΠΑ και των χαρακτηριστικών της ανάμειξης είναι σημαντική για τη βελτιστοποίηση της λειτουργικής συμπεριφοράς, της απόδοσης και των εκπομπών ρύπων του καυστήρα.

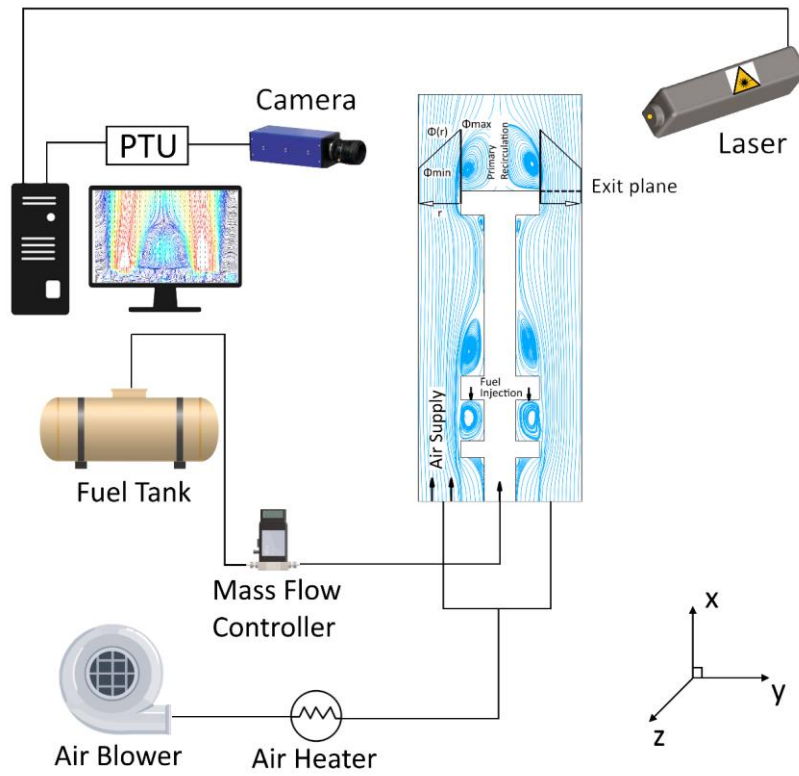
Αρχικά, αρκετές μελέτες επικεντρώθηκαν στην κατά βάθος κατανόηση της μη αντιδρώσας ροής και της ανάμειξης σε καυστήρες με φλογο-σταθεροποιητικά σώματα για διάφορες συνθήκες μείγματος εισόδου. Οι Hedley και Jackson (Hedley and Jackson 1965) υπογράμμισαν τον ρόλο της περιοχής ανακυκλοφορίας στην προώθηση της ανάμειξης των αντιδρώντων στην περιοχή του απορεύματος. Οι Davies και Beer (Davies and Beer 1971) χρησιμοποίησαν την τεχνική θερμού σύρματος για να αναλύσουν τις λεπτομέρειες των δομών μέσης και τυρβώδους ροής και την εξάρτησή τους από το λόγο απόφραξης για μια ροή δακτυλιοειδούς δέσμης που απορρέει από ένα σταθεροποιητικό σώμα. Οι Taylor και Whitelaw (Taylor and Whitelaw 1984) χρησιμοποίησαν την τεχνική LDV για να διερευνήσουν τα χαρακτηριστικά της ταχύτητας στο τυρβώδες απόρευμα των περιβεβλημένων αξονοσυμμετρικών σταθεροποιητικών σωμάτων, για ισόθερμες συνθήκες. Η επίδραση του σχήματος των σταθεροποιητικών δίσκων και του λόγου απόφραξης στα χαρακτηριστικά της τοπολογίας της ανακυκλοφορίας και των τυρβωδών χαρακτηριστικών συζητήθηκε εκτενώς, καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι με την αύξηση του λόγου απόφραξης, η φυσαλίδα ανακυκλοφορίας επεκτείνεται και στενεύει ενώ μειώνεται ο ρυθμός ροής της ανακυκλοφορούσας μάζας και η τυρβώδης κινητική ενέργεια. Ο Meraner (Meraner et al. 2018) πρόσφατα διερευνήσε τα χαρακτηριστικά μίας ΠΑ που δημιουργήθηκε κατάντη ενός καινοτόμου μερικώς προ-αναμεμειγμένου σταθεροποιητικού σώματος τόσο αριθμητικά όσο και πειραματικά.

Παρόλο που πολλές ερευνητικές εργασίες έχουν εστιάσει στη μελέτη των παραπάνω θεμάτων, τα χαρακτηριστικά ροής, ανάμειξης και σταθεροποίησης στην ανάπτυξη του απορεύματος ενός σταθεροποιητικού σώματος, κάτω από ποικιλία συνδυασμών, στα επίπεδα διαστρωμάτωσης και προθέρμανσης του μείγματος, δεν έχει διευκρινιστεί πλήρως. Έτσι στο πλαίσιο αυτό, η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στη μελέτη των επιδράσεων της διαστρωμάτωσης και προθέρμανσης του μείγματος εισόδου, στην ανάπτυξη του μη αντιδρώντος ροϊκού και μεικτικού πεδίου στην περιοχή απορεύματος κατάντη ενός σταθεροποιητικού δίσκου. Η λειτουργική συμπεριφορά του σταθεροποιητή εξομοιώνει μερικώς τη συμπεριφορά σε αντιδρώσες συνθήκες. Οι συγκεντρώσεις των συστατικών, οι ταχύτητες του αέρα, και οι θερμοκρασίες έχουν ληφθεί με PIV 2-D / 2C, θερμοζεύγη (T / C) και τοπική δειγματοληψία αερίων με ανάλυση FTIR σε όλη τη περιοχή ανακυκλοφορίας (ΠΑ) σε ποικίλες περιπτώσεις διαστρωμάτωσης και προθέρμανσης. Τα αποτελέσματα χρησιμοποιήθηκαν στην αναγνώριση των παραμέτρων ελέγχου και συνέβαλαν στην οριοθέτηση των βέλτιστων συνθηκών μεταξύ των πολλαπλών πιθανών ρυθμίσεων εισόδου που εξετάστηκαν.

2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Η πειραματική εγκατάσταση παρουσιάζεται στο Σχήμα 1. Η διάταξη του καυστήρα προ-ανάμειξης αποτελείται από τρεις ομοαξονικούς δίσκους, οι οποίοι συνδέονται κατά μήκος του άξονά τους με έναν κοίλο σωλήνα παροχής καυσίμου σχηματίζοντας έτσι δύο διαδοχικές κοιλότητες προ-ανάμειξης καυσίμου-αέρα. Το καύσιμο εγχύθηκε από μια σχισμή 1 mm στην κύρια κοιλότητα ανάμειξης καυσίμου-αέρα και περαιτέρω αναμείχθηκε στη δευτερεύουσα κοιλότητα διατηρώντας ένα προφίλ ακτινικά διαστρωματωμένου σχετικού λόγου καυσίμου αέρα στο επίπεδο εξόδου του σταθεροποιητή. Όταν αναφλεγεί, το μέτωπο αντίδρασης μπορεί να σταθεροποιηθεί στο διατμητικό στρώμα που αναπτύσσεται κοντά στην περιοχή του χείλους του σταθεροποιητικού δίσκου. Μια λεπτομερέστερη περιγραφή του καυστήρα μπορεί να βρεθεί στο (Karagiannaki et al. 2014). Ο πρωτογενής αέρας καύσης διοχετεύεται μέσω ενός αγωγού 50 mm στην περιοχή αντίδρασης με έναν φυσητήρα Leister® ROBUST. Η παρούσα μελέτη ασχολείται με τις ισόθερμες ροές ανάμειξης καυσίμου-αέρα που αναπτύσσονται στην περιοχή του απορεύματος. Η κύρια παροχή αέρα καύσης δύναται να προθερμαθεί σε θερμοκρασίες έως 743 K από έναν θερμαντήρα 6kW Leister® LHS 61S, ο οποίος ελέγχεται λεπτομερώς και παρακολουθείται συνεχώς από ένα Leister® CSS Easy Digital Temperature Regulator. Οι θερμοκρασίες εισόδου μετρήθηκαν με δύο θερμοζεύγη τύπου K σε απόσταση 140 mm

προς τα ανάντη του επιπέδου εξόδου. Ακόμα, η πειραματική συσκευή φέρει εξωτερική μόνωση πάχους 20mm, προκειμένου να αποφευχθούν τυχόν απώλειες θερμότητας στο περιβάλλον. Τα επίπεδα έγχυσης καυσίμου προπανίου ρυθμίστηκαν από έναν ελεγκτή ροής μάζας Bronkhorst®F-201AV-70K-AAD-22-V με αβεβαιότητα $\pm (0,5\% \text{ ανάγνωση} + 0,1\% \text{ FS})$.



Σχήμα 1: Πειραματική εγκατάσταση και διαμόρφωση καυστήρα.

Τα προφίλ ταχυτήτων μετρήθηκαν χρησιμοποιώντας ένα 2D LaVision® PIV σύστημα. Το σύστημα αυτό αποτελούταν από ένα QUANTEL ENERGREEN®double-pulsed Nd:YAG laser στα 532 nm που παρήγαγε φύλλο φωτός πάχους 1 mm και μία LaVision® Imager Pro X 2M CCD κάμερα τοποθετημένη σε γωνία 90 μοιρών από το φύλλο φωτός. Η κάμερα χρησιμοποιούσε έναν AF Micro Nikkor 60 mm φακό (f/4), ακόμη είχε ενσωματωθεί και ένα φίλτρο οπτικής ζώνης με κεντρικό μήκος κύματος (CWL) στα 532nm με 10nm πλήρες πλάτος στο μισό μέγιστο (FWHM) προκειμένου να απομονωθεί η ακτίνα του λέιζερ. Ο χρονισμός (timing) του συνολικού συστήματος ρυθμίστηκε μέσω μιας προγραμματιζόμενης μονάδας χρονισμού LaVision® (PTU 9). Το σύστημα PIV είχε ρυθμό δειγματοληψίας 10 Hz και 800 ζεύγη εικόνων για κάθε περίπτωση αποκτήθηκαν προς επεξεργασία με το λογισμικό DaVis8.0®LaVision®. Ο αριθμός των ζευγών εικόνων επιλέχθηκε για να βελτιστοποιηθεί η διάρκεια δειγματοληψίας και η επαναληψιμότητα των μετρήσεων. Τα ζευγάρια εικόνων υποβλήθηκαν σε επεξεργασία με χρήση πολλαπλών περασμάτων με επικάλυψη (overlap). Τα παράθυρα διερεύνησης αρχικά είχαν μέγεθος 64x64 και πραγματοποιήθηκε ένα διπλό πέρασμα με 50% αλληλεπικάλυψη και κατέληξε σε 32x32 με ένα μονό πέρασμα με 75% επικάλυψη.

Για τα πειραματικές μετρήσεις με τη χρήση PIV, στην κύρια ροή αέρα εκχύθηκαν σωματίδια διοξειδίου του Τιτανίου (TiO_2) διαμέτρου 5 μm μέσω τεσσάρων εισόδων σε απόσταση 550mm από την έξοδο του σωλήνα ώστε να διασφαλιστεί η ενσωμάτωσή τους στη ροή. Το σύστημα έγχυσης σωματιδίων αποτελούταν από ένα αεροσυμπιεστή, έναν μηχανισμό τροφοδοσίας των σωματιδίων στην ροή του αεροσυμπιεστή και έναν αφυγραντή, ώστε να αποκλείεται οποιαδήποτε υγρασία στο ρεύμα των σωματιδίων και να αποφεύγεται η δημιουργία συσσωματωμάτων.

Οι κατανομές του πεδίου ροής και η απόδοση ανάμειξης του καυστήρα επίσης εξαρτώνται από την ανάντη περιοχή των κοιλοτήτων. Καταβλήθηκε σημαντική προσπάθεια για την πρόσβαση σε αυτήν

την περιοχή, αλλά μια σειρά δυσκολιών που οφείλονται στην οπτική πρόσβαση και τη διάθλαση της δέσμης λέιζερ εντός των κοιλοτήτων, εμπόδιζε την εξαγωγή δεδομένων με επαρκή ακρίβεια και αποδεκτή αβεβαιότητα. Παρόλα αυτά, η ποιότητα των επιδόσεων ανάμιξης εντός της κοιλότητας, προς τα ανάντη του σταθεροποιητικού δίσκου, απεικονίζεται επαρκώς και αντανακλάται διαμέσου των μετρήσεων της ταχύτητας εισόδου και των προφίλ ανάμιξης στο επίπεδο εξόδου. Οι εκτιμήσεις των αβεβαιοτήτων που προέκυψαν στις μετρήσεις PIV βασίστηκαν σε δύο πηγές αβεβαιότητας που σχετίζονται με τα εμπλεκόμενο εξοπλισμό και τη δυναμική των τροχοδεικτικών σωματιδίων. Ο υπολογισμός τους παρουσιάζεται αναλυτικά στην αναφορά (Konstantinos Souflas and Koutmos 2018).

Για τις μετρήσεις της σύνθεσης του μείγματος χρησιμοποιήθηκε ένα microprobe για τη λήψη δειγμάτων του τοπικού μείγματος καυσίμου-αέρα και μετέπειτα πραγματοποιήθηκε ανάλυση των δειγμάτων, με αναλυτή FTIR PerkinElmer® Spectrum 2, για να ληφθούν τα τοπικά επίπεδα συγκέντρωσης των συστατικών του μείγματος. Τα δείγματα αερίου αναλύθηκαν σε ένα κελί ελέγχου χρησιμοποιώντας το λογισμικό Spectrum 10® (PerkinElmer®). Οι μετρήσεις ελήφθησαν στην φασματική περιοχή 450 έως 4000 cm^{-1} , ενώ η ανάλυση ρυθμίστηκε σε 0,5 cm^{-1} . Προκειμένου να ποσοτικοποιηθούν οι συγκεντρώσεις των συστατικών στα δείγματα αερίων, ο αναλυτής βαθμονομήθηκε χρησιμοποιώντας δείγματα αναφοράς γνωστών κλασμάτων καυσίμου-αέρα. Τα δείγματα αναφοράς δημιουργήθηκαν με sonic nozzles υψηλής ακρίβειας ($\pm 0,5\%$), βαθμονομημένα ειδικά για τα αέρια που χρησιμοποιήθηκαν με ψηφιακούς ρυθμιστές πίεσης Omega® DPG2001B με ακρίβεια $\pm 0,25\%$. Η αβεβαιότητα των μετρημένων σχετικών λόγων καυσίμου αέρα για όλα τα δείγματα αναφοράς που χρησιμοποιήθηκαν ήταν μικρότερη από 0,79%. Η διαδικασία αυτή επέτρεψε την αξιολόγηση των αντίστοιχων προφίλ των σχετικών λόγων καυσίμου αέρα, από τα δείγματα αερίων που λαμβάνονται σε όλο το απόρευμα του bluff-body, για το φάσμα των συνθηκών λειτουργίας με συνολική αβεβαιότητα περίπου 8%.

3. ΜΕΙΚΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΡΟΪΚΕΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΠΟΥ ΜΕΛΕΤΗΘΗΚΑΝ

Στη παρούσα μελέτη διερευνήθηκαν τα πεδία ροής και ανάμιξης που διαμορφώνονται κατάντη του καυστήρα για μη αντιδρώσες (non-reacting-NR) περιπτώσεις σε διάφορες συνθήκες εισερχόμενου μείγματος (δ) και θερμοκρασίας προθέρμανσης (T_{PR}). Οι χαρακτηριστικές παράμετροι των περιπτώσεων που μελετήθηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Περιπτώσεις	Φ_{global}		Μέγιστη μέση ταχύτητα u (m/s)	Ολική ταχύτητα U_0 (m/s)	MBV (m/s)	Μήκος ΠΑ (x/D_b)	Θερμοκρασία ΠΑ (K)	Re_D
	$\delta=3\%$	$\delta=25\%$						
NR_T _{PR} 0	0.239	0.281	8.57	6.77	-2.9	0.835	302.0	13936
NR_T _{PR} 1	0.21	0.253	11.61	9.54	-3.87	0.786	422.8	10502
NR_T _{PR} 2	0.171	0.206	15.42	12.78	-5.33	0.789	568.1	8452
NR_T _{PR} 3	0.129	0.155	21.05	16.50	-6.96	0.784	737.8	7828
Όπου:								
δ (%): επί τοις εκατό απόκλιση από την απόσβεση $\delta = (m_{\text{Fuel}} - m_{\text{Fuel, LBO}})/m_{\text{Fuel, LBO}}$ (%)								
NR_T _{PR} 0, 1, 2 και 3 αντιστοιχούν σε θερμοκρασίες προθέρμανσης 300, 423, 573 και 743 K αντίστοιχα								
MBV: Μέγιστη αρνητική ταχύτητα								
Φ_{global} : γενικός σχετικός λόγος καυσίμου αέρα βασιζόμενος στις ολικές παροχές καυσίμου και αέρα								
Re_D : αριθμός Reynolds με βάση τη διατομή του φλογοσταθεροποιητή								

Πίνακας 1: Ροϊκές και αναμεικτικές διαμορφώσεις που μελετήθηκαν.

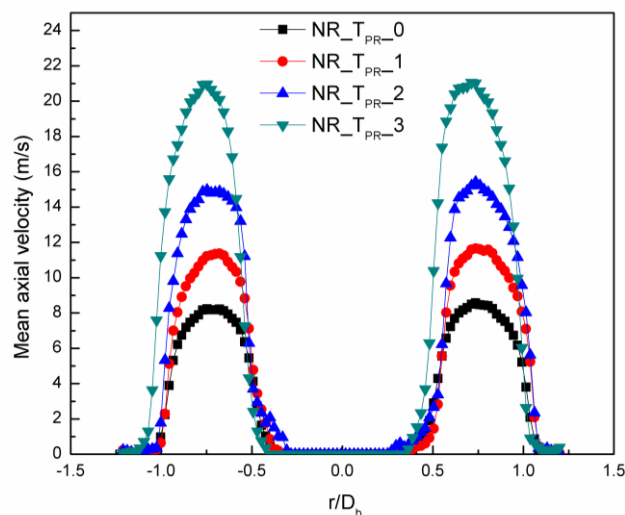
Η περίπτωση $\delta = 3\%$ έχει επιλεγεί προκειμένου να διερευνηθούν οι συνθήκες που αντιπροσωπεύουν ένα εξαιρετικά φτωχό / οριακό μείγμα (φλόγα) και η περίπτωση $\delta = 25\%$ αποτελεί μία ελαφρώς πλουσιότερη και πιο σταθερή διαμόρφωση. Ως εκ τούτου, η επίδραση της προθέρμανσης έχει διερευνηθεί σε μια σειρά πρακτικών ρυθμίσεων μείγματος καυσίμου αέρα. Το Φ_{Global} προέρχεται από τις εισερχόμενες μάζες καυσίμου και αέρα με αβεβαιότητα 3, 4, 5 και 6% για τις τέσσερις περιπτώσεις προθέρμανσης αντίστοιχα. Το Φ_{peak} προήλθε από τις μετρήσεις με FTIR που ενσωματώνουν μια αβεβαιότητα, περίπου 8%.

Ο αριθμός Reynolds (Re_D) υπολογίστηκε με βάση τη μέγιστη αξονική ταχύτητα (u) στο επίπεδο εξόδου και τη διάμετρο του σταθεροποιητικού σώματος. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 2, ο αριθμός Reynolds μειώνεται ανάλογα με τις θερμοκρασίες προθέρμανσης που τείνουν να στρωματοποιήσουν και να ομογενοποιήσουν τη ροή. Για να υπολογιστεί το Re_D , το μείγμα θεωρήθηκε ως απλός αέρας και οι ιδιότητές του υπολογίστηκαν με βάση τα προφίλ θερμοκρασίας εισόδου, στο επίπεδο εξόδου του καυστήρα.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

4.1 Μέσα πεδία ταχυτήτων

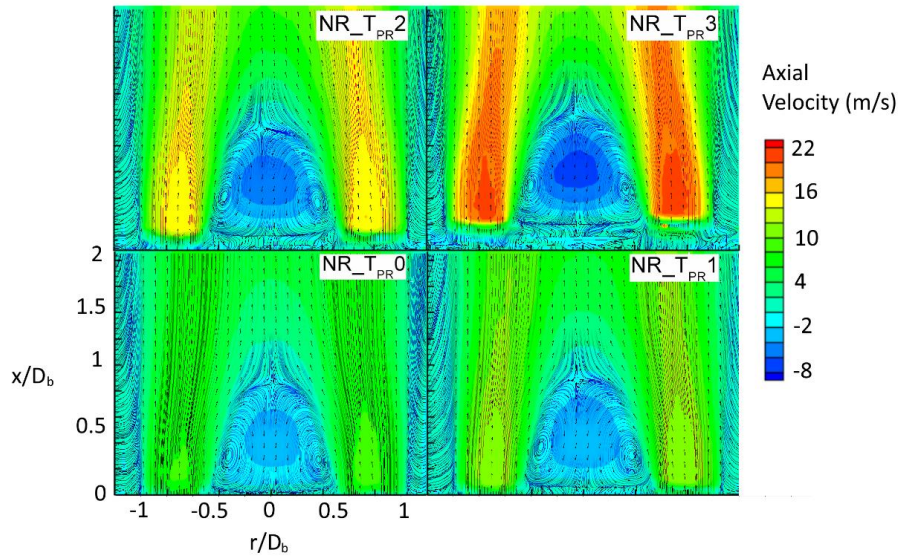
Οι ακτινικές κατανομές των προφίλ μέσων ταχυτήτων του εισερχόμενου μείγματος, για τις διαφορετικές συνθήκες προθέρμανσης, στο πεδίο εξόδου του σταθεροποιητικού σώματος, παρίστανται στον Σχήμα 2.



Σχήμα 2: Ακτινικές κατανομές των μέσων αξονικών πεδίων ταχυτήτων στο επίπεδο εξόδου του καυστήρα.

Τα προφίλ υποδεικνύουν πλήρως αξονοσυμμετρικές συνθήκες εισόδου για όλες τις προθερμάνσεις που μελετήθηκαν. Επιπλέον, η διόγκωση του προφίλ ταχύτητας εισόδου, που προκύπτει από τις μεταβολές της πυκνότητας λόγω προθέρμανσης, επιτυγχάνει επίπεδα διαδοχικά αυξημένα κατά 35, 80 και 145% σε σχέση με τη βασική περίπτωση, NR_{TPR_0} .

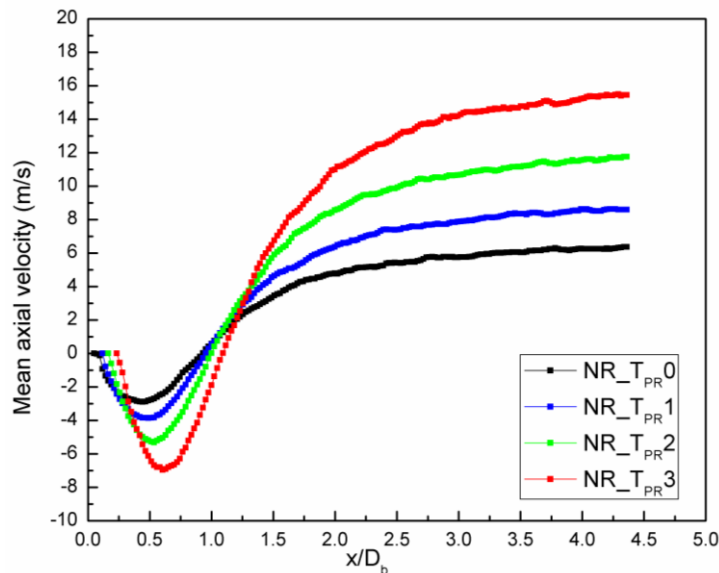
Οι προκύπτουσες συνολικές μέσες, μη αντιδρώσες, μεταβολές του πεδίου ταχυτήτων στην περιοχή απορεύματος του διερευνηθέντος σταθεροποιητικού σώματος παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.



Σχήμα 3: Μέσες κατανομές του πεδίου ταχυτήτων στην περιοχή της ανακυκλοφορίας για διαφορετικά επίπεδα προθέρμανσης.

Για όλες της συνθήκες προθέρμανσης του εισερχόμενου μείγματος, το μήκος της περιοχής ανακυκλοφορίας (ΠΑ) παραμένει ουσιαστικά ανεπηρέαστο καθώς η ταχύτητα εισόδου αυξάνεται, έως και 250%, που προκύπτει από τη μείωση της πυκνότητας του ρεύματος εισόδου.

Μια τέτοια συμπεριφορά έχει επίσης παρατηρηθεί σε παρόμοιες μελέτες ανάμειξης και σε έναν μικρο-καυστήρα με χρήση σταθεροποιητικού σώματος (Duraio and Whitelaw 1978). Ο λόγος απόφραξης και το σχήμα του φλογοσταθεροποιητή φαίνεται να είναι οι παράγοντες ελέγχου της τοπολογίας της ζώνης ανακυκλοφορίας, π.χ. (A.R.Masri, B.B.Dally, R.S.Barlow 1994). Οι απόλυτες μέσες αρνητικές ταχύτητες διατηρούν μια αναλογική αύξηση 44, 53 και 46% σε σχέση με τις θερμοκρασίες προθέρμανσης (T_{PR1} , T_{PR2} και T_{PR3}), όπως επίσης φαίνεται από το διάγραμμα στον άξονα συμμετρίας του Σχήματος 4.



Σχήμα 4: Αξονική κατανομή των μέσων αξονικών ταχυτήτων.

4.2 Διακυμαινόμενα πεδία ταχυτήτων

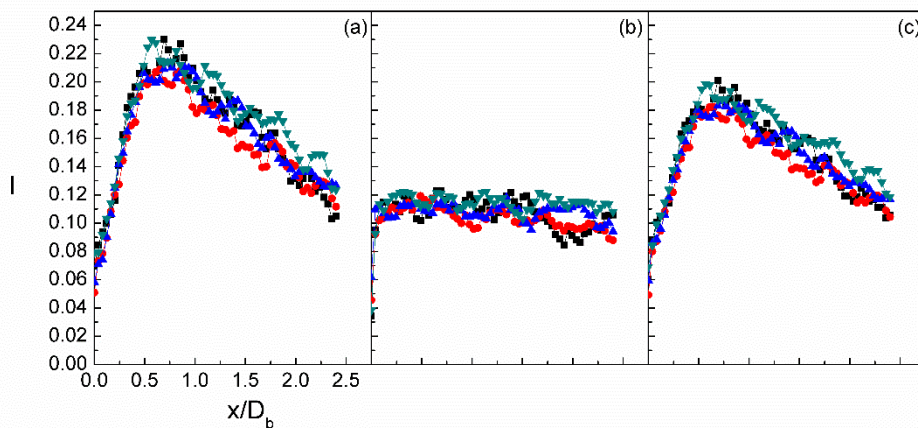
Η ανάπτυξη των πεδίων διακυμαινόμενης ταχύτητας, για τις παραπάνω μη αντιδρώσες περιπτώσεις, όπως λαμβάνονται από τις μετρήσεις PIV, παρουσιάζονται και συζητούνται σε αυτό το τμήμα. Το Σχήμα 5 απεικονίζει τις κατανομές (α) ακτινικών, I_v και (β) αξονικών, I_w συνιστωσών, καθώς και (γ) της ολικής έντασης τύρβης I_0 , κατά μήκος του άξονα συμμετρίας. Οι εντάσεις της τύρβης, I_v και I_w , προήλθαν από τις χρονικές διακυμάνσεις της ταχύτητας αδιαστατοποιημένες με την αντίστοιχη ολική ταχύτητα εισόδου (U_0). Στην κεντρική περιοχή δακτυλιοειδούς διακένου ($x/D_b = 0$ και $r/D_b = 0,75$), οι χρονικά μέσες αξονικές διακυμάνσεις διατηρούν χαμηλές τιμές, περίπου 7,5%.

Η συνολική ένταση της τύρβης I_0 που φαίνεται στο σχήμα 5(c), αντιπροσωπεύει την αδιαστατοποιημένη τυρβώδη κινητική ενέργεια της ροής και υπολογίστηκε ως:

$$I_0 = U' / U_0 = \sqrt{1/3(u'^2 + 2v'^2)} / U_0 \quad (1)$$

Όπου η αξιμουθιακή συνιστώσα w' λαμβάνεται ως $w' \approx v'$

Η ανάπτυξη των δύο διακυμαινόμενων συνιστωσών (α), (β) και της συνολικής έντασης τύρβης (γ) στην κατακόρυφη διεύθυνση απεικονίζονται στο Σχήμα 5 κατά μήκος του άξονα συμμετρίας. Είναι προφανές ότι για όλα τα επίπεδα προθέρμανσης τα αδιάστατα προφίλ είναι πολύ κοντά, πράγμα που υποδηλώνει ότι τα χαρακτηριστικά της τύρβης ελέγχονται κυρίως από τις γεωμετρικές παραμέτρους του σταθεροποιητικού σώματος, όπως επίσης αναφέρεται στο (A.R.Masri, B.B.Dally, R.S.Barlow 1994). Τα προφίλ αξονικής έντασης τύρβης, Σχήμα 5(b), παρουσιάζουν μια ομοιόμορφη τιμή, περίπου 11%, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας. Η κύρια συνεισφορά στην κορυφή που παρατηρήθηκε στη συνολική ένταση τύρβης, Σχήμα 5(c), προέρχεται από τις αντίστοιχες κατανομές ακτινικής συνιστώσας της έντασης της τύρβης, Σχήμα 5(a), και η μέγιστη τιμή της παίρνει τιμές περίπου 22%, στη περιοχή επανασύνδεσης, $x/D_b \approx 0,8$.



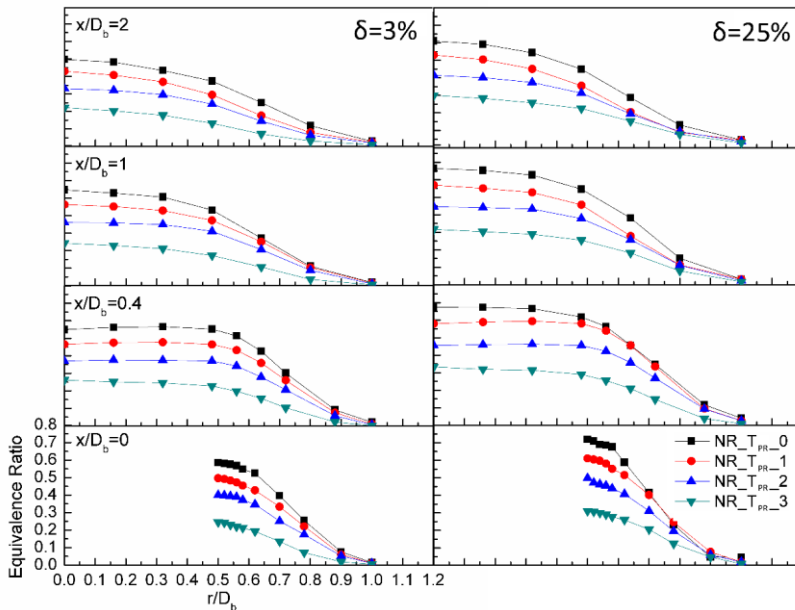
Σχήμα 5 : Ακτινικές (α) αξονικές συνιστώσες (β) και ολική ένταση της τύρβης (γ) κατά μήκος του άξονα συμμετρίας.

Αξίζει να σημειωθεί ότι στην κεντρική περιοχή του δακτυλιοειδούς διακένου ($x/D_b = 0$ και $r/D_b = 0,75$), οι χρονικά μέσες αξονικές διακυμάνσεις της έντασης της τύρβης διατηρούν χαμηλές τιμές, περίπου 7,5%.

4.3 Πεδίο ανάμειξης καυσίμου-αέρα

Αρχικά αναλύεται το ισόθερμο πεδίο ανάμειξης καυσίμου-αέρα για τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν. Οι αξονικές και ακτινικές κατανομές του σχετικού λόγου καυσίμου αέρα στο απόρευμα του

σταθεροποιητικού σώματος παρουσιάζονται στα Σχήματα 6 και 7 για τις περιπτώσεις παροχής καυσίμου $\delta=3\%$ και 25% .



Σχήμα 6: Ακτινικές κατανομές του σχετικού λόγου καυσίμου αέρα για $\delta=3\%$ και $\delta=25\%$.

Οι κατανομές του Σχήματος 6 στη θέση $x/D_b=0$ αντιστοιχούν στην ακτινική διαστρωμάτωση του μείγματος καυσίμου αέρα στο επίπεδο εξόδου του σταθεροποιητικού σώματος. Οι μέγιστες τιμές των ακτινικών προφίλ στην περιοχή κοντά στο χείλος του δίσκου ($x/D_b=0$, Σχ.7) είναι πολύ κοντά με τις μέγιστες τιμές που παρουσιάζονται εντός της ανακυκλοφορίας κατά μήκος του άξονα συμμετρίας από $x/D_b=0$ up μέχρι $x/D_b=1$ (Σχ.7) για όλες τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν. Αυτή η διαπίστωση παραπέμπει στο ότι το καύσιμο που παροχετεύεται στην περιοχή της ανακυκλοφορίας προέρχεται κυρίως από έναν ακτινικό δακτύλιο περιμετρικά του σταθεροποιητικού σώματος ο οποίος φέρει τις μέγιστες τιμές του ακτινικού προφίλ στο επίπεδο εξόδου. Αυτό σημαίνει ότι ελέγχοντας την ακτινική κατανομή του καυσίμου στο επίπεδο εισόδου μπορούμε να ελέγξουμε την σύσταση της περιοχής ανακυκλοφορίας και κατ' επέκταση την σταθεροποίηση της φλόγας.

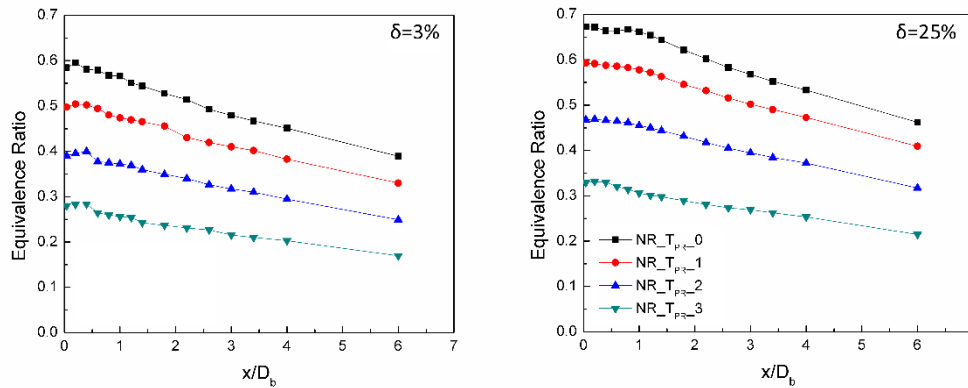
Καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία εισόδου των αντιδρώντων, η σύσταση του μείγματος εισόδου, που είναι ικανή να σταθεροποιήσει καύση, μειώνονται σημαντικά μέχρι τιμές του ολικού σχετικού λόγου καυσίμου αέρα της τάξης του 0.13 για T_{PR3} , με αντίστοιχο μέγιστο στην κατανομή της διαστρωμάτωσης στην είσοδο, της τάξης του 0.3. Οι τιμές του λόγου του ολικού προς τον μέγιστο σχετικό λόγο καυσίμου αέρα παρουσιάζονται στον Πίνακα 2 για τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν.

Cases	$\Phi_{global}/\Phi_{peak}$	
	$\delta=3\%$	$\delta=25\%$
NR_T_PR0	0.41	0.39
NR_T_PR1	0.42	0.41
NR_T_PR2	0.43	0.42
NR_T_PR3	0.53	0.5

Πίνακας 2: Λόγος ολικού και μέγιστου σχετικού λόγου καυσίμου αέρα για διαφορετικά επίπεδα προθέρμανσης του μείγματος.

Για όλες τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν τα Φ_{global} και Φ_{peak} μειώνονται καθώς αυξάνεται το επίπεδο προθέρμανσης με το λόγο τους να μειώνεται. Αυτό υποδηλώνει ότι το Φ_{peak} είναι πιο ευαίσθητο στις μεταβολές της θερμοκρασίας εισόδου σε σχέση με το Φ_{global} .

Από τις κατανομές των Σχημάτων 6 και 7 μπορούμε να συμπεράνουμε ότι στην περιοχή της ανακυκλοφορίας και μέχρι $x/D_b=1$ έως r/D_b περίπου 0.5, τα επίπεδα της σύστασης του μείγματος καυσίμου-αέρα είναι πολύ κοντά με τις τιμές που παροχετεύονται από το δακτυλιοειδές διάκενο. Απομακρυνόμενοι από το επίπεδο εξόδου η σύσταση του μείγματος μειώνεται γραμμικά έως την αξονική απόσταση $x/D_b=6$ σε περίπου 65% από τις αντίστοιχες μέγιστες τιμές των ακτινικών κατανομών στη είσοδο όπως φαίνεται στα Σχήματα 6 και 7.



Σχήμα 7: Αξονικές κατανομές του σχετικού λόγου καυσίμου αέρα για $\delta=3\%$ και 25% .

Επιπλέον, η σταθεροποίηση σε πολύ χαμηλούς λόγους καυσίμου αέρα επιτυγχάνεται και διατηρείται λόγω της αυξημένης αντιδραστικότητας του προθερμασμένου μείγματος.

5. ΣΥΝΟΨΗ

Στην παρούσα πειραματική εργασία μελετήθηκε η επίδραση της προθέρμανσης του διαστρωματομένου μείγματος καυσίμου αέρα στα μέσα και τυρβώδη ροϊκά χαρακτηριστικά της περιοχής ανακυκλοφορίας κατόπιν ενός σταθεροποιητικού σώματος για ισόθερμες, μη αντιδρώσες, συνθήκες. Η επιλογή των ισόθερμων περιπτώσεων που μελετήθηκαν αντιπροσωπεύουν αντίστοιχες αντιδρώσες συνθήκες. Για κάθε επίπεδο αύξησης της θερμοκρασίας του μείγματος, οι μέγιστες αρνητικές ταχύτητες αυξάνονται κατά 50% καθώς το μήκος και πλάτος της ανακυκλοφορίας έμειναν αμετάβλητα. Μέγιστες τιμές της έντασης της τύρβης, της τάξης του 25%, παρατηρήθηκαν στα ακτινικά διατρητικά στρώματα που πρόκεινται στην περιοχή της ανακυκλοφορίας και πλησίον του σημείου επανασύνδεσης της ροής. Με την αύξηση της θερμοκρασίας προθέρμανσης ο ολικός σχετικός λόγος καυσίμου αέρα που διατηρεί καύση μειώνεται έως $\Phi=0.13$ και αντίστοιχο μέγιστο στο επίπεδο εισόδου της τάξης του 0.3. Η σταθεροποίηση της φλόγας σε αυτές τις συνθήκες είναι δυνατή λόγω της αυξημένης αντιδραστικότητας στην περιοχή κοντά στο χείλος του σταθεροποιητικού σώματος και της διαστρωμάτωσης του εισαγόμενου μείγματος.

6. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

A.R.Masri, B.B.Dally, R.S.Barlow, C.D.Carter. 1994. "The Structure of the Recirculation Zone of a Bluff-Body Combustor." *Twenty-Fifth Symposium (International) on Combustion* 25 (1): 1301–8. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(06\)80771-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0082-0784(06)80771-X).

Chatterjee, Sandipan, and Ömer L. Gülder. 2018. "Soot Concentration and Primary Particle Size in Swirl-Stabilized Non-Premixed Turbulent Flames of Ethylene and Air." *Experimental Thermal and Fluid Science*. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2018.01.035>.

Chen, R.H, J.F. Driscoll, J. Kelly, R. W. Schefer, and M. Namazian. 1990. "A Comparison of Bluff-Body and Swirl-Stabilized Flames." *Combustion Science and Technology*. <https://doi.org/10.1080/00102209008951632>.

- Chterev, Ianko, Ben Emerson, and Tim Lieuwen. 2018. “Velocity and Stretch Characteristics at the Leading Edge of an Aerodynamically Stabilized Flame.” *Combustion and Flame*. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2018.02.024>.
- Davies, T. W., and J. M. Beér. 1971. “Flow in the Wake of Bluff-Body Flame Stabilizers.” *Symposium (International) on Combustion*. [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(71\)80065-6](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(71)80065-6).
- Durao, D. F G, and J. H. Whitelaw. 1978. “Velocity Characteristics of the Flow in the near Wake of a Disk.” *Journal of Fluid Mechanics* 85 (May 1977): 369–85. <https://doi.org/10.1017/S0022112078000683>.
- Hedley, A.B., and E.W. Jackson. 1965. “Recirculation and Its Effects in Combustion Systems.” *Journal of Institute of Fuel* 38: 290–97.
- Karagiannaki, C., E. Dogkas, G. Paterakis, K. Souflas, E.Z. Psarakis, P. Vasiliou, and P. Koutmos. 2014. “A Comparison of the Characteristics of Disk Stabilized Lean Propane Flames Operated under Premixed or Stratified Inlet Mixture Conditions.” *Experimental Thermal and Fluid Science* 59. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2014.04.002>.
- Karagiannaki, C., G. Paterakis, K. Souflas, E. Dogkas, and P. Koutmos. 2015. “Performance Evaluation of a Model Swirl Burner under Premixed or Stratified Inlet Mixture Conditions.” *Journal of Energy Engineering* 141 (2). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EY.1943-7897.0000242](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000242).
- Meraner, Christoph, Tian Li, Mario Ditaranto, and Terese Løvås. 2018. “Cold Flow Characteristics of a Novel Bluff Body Hydrogen Burner.” *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.02.062>.
- R. Chowdhury, Bikram, and Baki M. Cetegen. 2018. “Effects of Free Stream Flow Turbulence on Blowoff Characteristics of Bluff-Body Stabilized Premixed Flames.” *Combustion and Flame*. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2017.12.002>.
- Souflas, K., and P. Koutmos. 2017. “Flow, Mixing, and Combustion Characteristics of High Velocity Ratio Plane Coaxial and Convoluted Trailing Edge Nozzles.” *Journal of Energy Engineering* 143 (2). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EY.1943-7897.0000408](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000408).
- Souflas, Konstantinos, and Panayiotis Koutmos. 2018. “On the Non-Reacting Flow and Mixing Fields of an Axisymmetric Disk Stabilizer, under Inlet Mixture Stratification and Preheat.” *Experimental Thermal and Fluid Science*. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2018.08.008>.
- Taylor, A. M.K.P., and J. H. Whitelaw. 1984. “Velocity Characteristics in the Turbulent near Wakes of Confined Axisymmetric Bluff Bodies.” *Journal of Fluid Mechanics* 139: 391–416. <https://doi.org/10.1017/S0022112084000410>.
- Zukoski, E.F., and F.E. Marble. 1955. “The Role of Wake Transition in the Process of Flame Stabilization on Bluff Bodies.” *AGARD Combustion Researches and Reviews*, 167–80.