

Μελέτη ροϊκού πεδίου οπτικής μηχανής εσωτερικής καύσης με την τεχνική PIV

Τσιόγκας Δ. Βασίλειος, Χρανιώτης Αναστάσιος, Κολοκοτρώνης Δημήτριος,
Τουρλιδάκης Αντώνιος
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας,
Κοζάνη, 50100
vtsiogkas@uowm.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η απόδοση και οι εκπομπές κινητήρων με απ' ευθείας έγχυση καυσίμου (Gasoline Direct Injection), εξαρτώνται σε πολύ μεγάλο βαθμό από τη διεργασία της ανάμιξης. Επομένως είναι κρίσιμος ο έλεγχος της ροής και της τύρβης στα στάδια του θερμοδυναμικού κύκλου όπου λαμβάνει χώρα η παραπάνω διεργασία. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τα πειραματικά πεδία ταχυτήτων στον θάλαμο καύσης μίας μονοκύλινδρης μηχανής εσωτερικής καύσης, με δύο βαλβίδες εισαγωγής και δύο βαλβίδες εξαγωγής. Η ροή σε αυτή την εφαρμογή είναι χωρίς καύση και οι μετρήσεις έγιναν σε εννέα διαφορετικά σημεία του χρόνου της εισαγωγής και της συμπίεσης, στις 1000 και 1500 στροφές ανά λεπτό με πλήρως ανοιχτή πεταλούδα εισαγωγής και με 25% άνοιγμα πεταλούδας. Οι μετρήσεις έγιναν για 3 διαφορετικά επίπεδα. Η απεικόνιση των διανυσμάτων ταχύτητας είναι χωρικός μέσος όρος 2000 ζευγών εικόνων που ελήφθησαν με την τεχνική PIV. Ακόμη υπολογίστηκε ο μέσος όρος της τυρβώδους κινητικής ενέργειας και ο λόγος περιδίνησης (TR). Από τα αποτελέσματα παρατηρείται μέγιστη ΤΚΕ στις 1500 ΣΑΛ στην φάση της εισαγωγής. Ακόμη ο η απόλυτη τιμή του λόγου περιδίνησης είναι πολύ μεγαλύτερη στο επίπεδο όπου παρατηρήθηκε η μεγάλη δίνη στην εγκάρσια τομή του κυλίνδρου.

Λέξεις κλειδιά: Particle image velocimetry (PIV), Μηχανές εσωτερικής καύσης, κρύα ροή, αξονική περιδίνηση / συστροφή.

Αρκτικόλεξα

ΣΑΛ: Στροφές ανά λεπτό

ΓΣΑ: Γωνία στροφαλοφόρου άξονα

ΑΝΣ: Άνω νεκρό σημείο

ΚΝΣ: Κάτω νεκρό σημείο

ΤΚΕ: Τυρβώδης κινητική ενέργεια

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Για την προώθηση της αειφορίας και τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, τα μελλοντικά αποθέματα καυσίμων θα περιέχουν σημαντικές ποσότητες βιολογικών συστατικών (αλκοόλες), καθώς οι μέθοδοι παραγωγής τους είναι ανανεώσιμες. Η χρήση μιγμάτων βενζίνης με αλκοόλες θα αλλάξει τόσο τη διεργασία της ανάμιξης, ειδικά όταν πρόκειται για κινητήρες απ' ευθείας έγχυσης καυσίμου (Gasoline Direct Injection), όσο και την ίδια τη διεργασία μετατροπής του καυσίμου καθώς τα παραπάνω βιοκαύσιμα έχουν διαφορετικές φυσικές και χημικές ιδιότητες από τη βενζίνη [1][2][3]. Όσον αφορά στη διεργασία της ανάμιξης, είναι κρίσιμος ο έλεγχος της τύρβης και ειδικότερα της δίνης που δημιουργείται στο επίπεδο που περνάει από τον άξονα συμμετρίας του κυλίνδρου μιας μηχανής εσωτερικής καύσης (tumble)[4][5], η οποία είναι μια αποθήκη κινητικής ενέργειας που προσδίδεται στο αέριο για την ανάμιξη, κατά τη διάσπασή της. Σε προηγούμενες δημοσιευμένες εργασίες, γίνεται έλεγχος μόνο του εγκάρσιου επιπέδου (swirl), [6][7] ή μόνο του αξονικού επιπέδου (tumble) [8][9][10],

κάτι το οποίο δεν μπορεί να δώσει τα πλήρη χαρακτηριστικά των δινών που αναπτύσσονται μέσα στον θάλαμο καύσης. Σε αυτή την εργασία έγινε μελέτη της σε τέσσερα διαφορετικά επίπεδα του θαλάμου καύσης, προκειμένου να γίνει πλήρης χαρακτηρισμός των δομών που δημιουργούνται μέσα εκεί. Υπολογίστηκαν τα διανύσματα ταχύτητας, και στην φάση της εισαγωγής έγιναν επιπλέον μετρήσεις με 25% άνοιγμα πεταλούδας για να βρεθούν οι διαφορές στον σχηματισμό της δίνης, υπολογίστηκε η τυρβώδης κινητική ενέργεια, καθώς και ο λόγος περιδίνησης (TR). Σκοπός αυτών των διερευνήσεων ήταν ο πλήρης χαρακτηρισμός του πεδίου ροής και των χαρακτηριστικών της τύρβης, ο έλεγχος της επαναληψιμότητας της δίνης, ώστε σε επόμενο στάδιο να γίνει έλεγχος της διαδικασίας έγχυσης και καύσης διαφόρων βιοκαυσίμων και μειγμάτων τους, που μπορούν να οδηγήσουν στην καύση πιο φτωχών ομογενών μιγμάτων με μεγαλύτερη απόδοση και μειωμένες εκπομπές οξειδίων του αζώτου και άκαυστων υδρογονανθράκων.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Η βασική πειραματική διάταξη αποτελείται από έναν ερευνητικό κινητήρα εσωτερικής καύσης ανάφλεξης με σπινθηριστή (Spark Ignition), ο οποίος έχει κυβισμό 475cc, με τέσσερις βαλβίδες, διαθέτει σύστημα απευθείας έγχυσης καυσίμου εντός του θαλάμου καύσης (Gasoline Direct Injection) και ταυτόχρονα έχει τη δυνατότητα για μη άμεσο ψεκασμό (Port Fuel Injection) στον αυλό εισαγωγής. Τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά της μηχανής αναφέρονται στον Πίνακα 1.

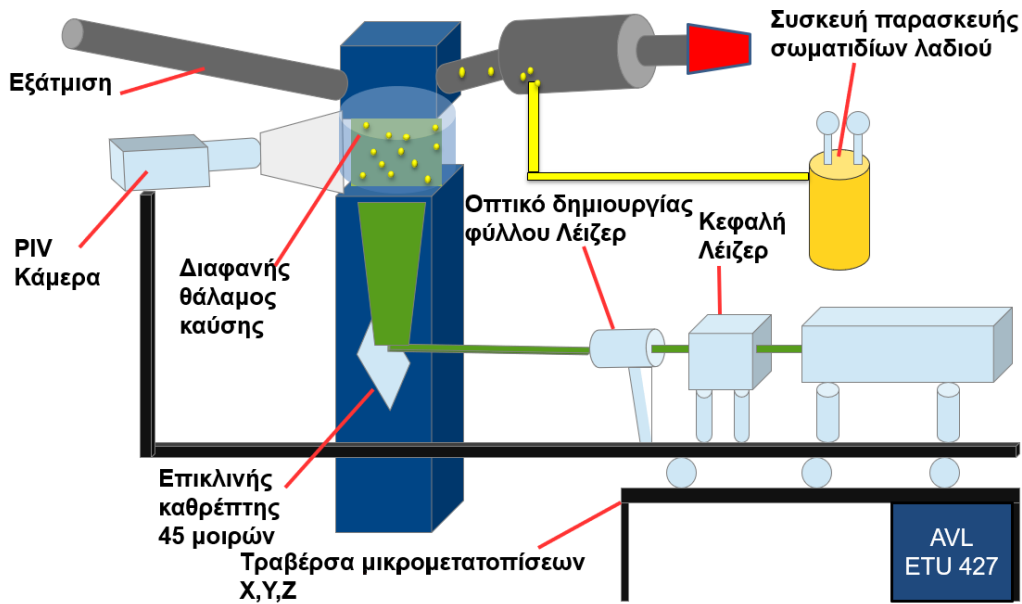
Πίνακας 1: Τύπος μηχανής της πειραματικής διάταξης

Τύπος μηχανής	Μονοκύλινδρη, 4χρονη, Ανάφλεξη με σπινθηριστή
Μέγιστη ταχύτητα περιστροφής	3000 ΣΑΛ
Διάμετρος εμβόλου	82mm
Διαδρομή εμβόλου	90mm
Τύπος πιστονιού	Επίπεδο πιστόνι
Μέγιστο βύθισμα βαλβίδων εισαγωγής	10.54mm

Για να χαρακτηριστεί η ροή μέσα στον κύλινδρο χρησιμοποιήθηκε η δισδιάστατη τεχνική μέτρησης του πεδίου ροής Particle Image Velocimetry (2D – Digital PIV)[13]. Σε αυτά τα πειράματα έγινε χρήση της μεθόδου δύο εικόνων από δύο διαφορετικούς παλμούς του λέιζερ (double frame / double exposure). Για την επεξεργασία των εικόνων έγινε διαχωρισμός της κάθε εικόνας σε παράθυρα ελέγχου (interrogation windows) μεγέθους 32x32 pixel και επικάλυψη (overlap) των δύο παραθύρων ελέγχου κατά 50%. Για να μπορέσουν να εξαχθούν αποτελέσματα σχετικά με την μετατόπιση των σωματιδίων που έχουν εισαχθεί στο ρευστό έγινε συσχέτιση του αντίστοιχου ζεύγους εικόνων με την μέθοδο σταυρωτής συσχέτισης (cross correlation).[14]

$$R_{i,j} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n I(i,j)S(i + \delta i, j + \delta j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n I^2(i,j) \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n S^2(i + \delta i, j + \delta j)}} \quad (1)$$

όπου R είναι ο συντελεστής συσχέτισης που μπορεί να πάρει τιμές από 0 έως 1, I είναι η ένταση φωτός στη θέση (i, j) στο παράθυρο ελέγχου (interrogation window) και S είναι η ένταση φωτός στη θέση $(i+\delta i, j+\delta j)$ στο παράθυρο ελέγχου της δεύτερης εικόνας. Το $m \times n$ είναι το μέγεθος του παραθύρου ελέγχου.



Εικόνα 1: Πειραματική διάταξη εργαστηρίου

Εκτός από την μονοκύλινδρο οπτικά προσβάσιμη μηχανή εσωτερικής καύσης (AVL Optical ICE) η πειραματική διάταξη του εργαστηρίου συμπληρώνεται από ένα λέιζερ συχνότητας 10Hz της Continuum που παράγει ορατό φως, με μήκος κύματος $\lambda=532\text{nm}$, μία κάμερα ανάλυσης 1600×1200 pixels και μέγιστου ρυθμού δειγματοληψίας 10 Hz, μια μονάδα χρονισμού μηχανής της AVL (AVL ETU 427), ένα πρόγραμμα διαχείρισης της δειγματοληψίας (LaVision DaVis 7.2.2) καθώς και μία συσκευή η οποία παράγει σωματίδια αραβοσιτελαίου σταθερής διαμέτρου (Oil droplet seeder PIVTEC GmbH) που ακολουθούν πλήρως την ροή του αέρα και είναι κατάλληλα για την εφαρμογή, όπως αναφέρεται και στην βιβλιογραφία [15]. Σχηματικά στην Εικόνα 1 παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη του εργαστηρίου.

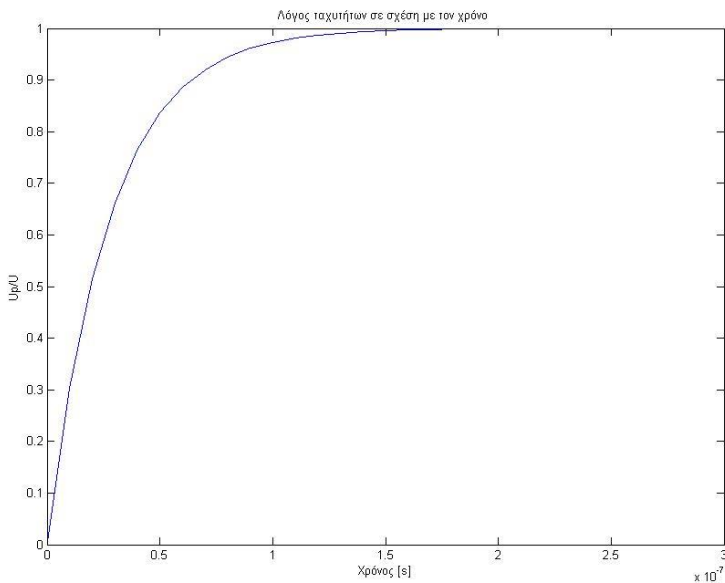
Η υπολογισμός της χρονικής υστέρησης των σωματιδίων στ δυνατότητα τους να ακολουθήσουν την ροή δόθηκε από την εξίσωση 2[14][16]:

$$\tau_s = d_p^2 \frac{\rho_p}{18\mu} \quad (2)$$

όπου d_p είναι η διάμετρος των σωματιδίων, ρ_p είναι η πυκνότητα των σωματιδίων και μ το δυναμικό ιξώδες του ρευστού. Με τη χρήση αυτής της σχέσης μπορεί να γίνει υπολογισμός της ταχύτητας των σωματιδίων μέσα στο ρευστό από την εξίσωση 3[14][16]:

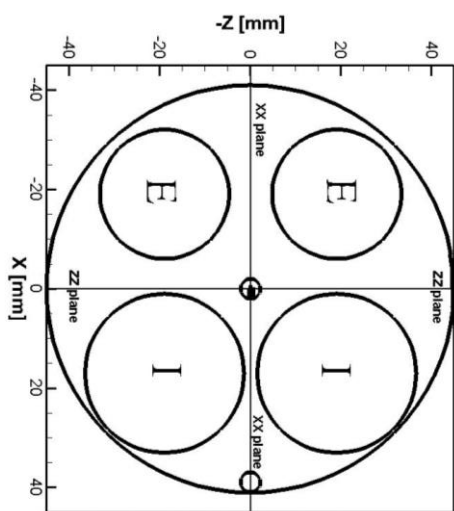
$$U_p(t) = U \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_s}\right) \right] \quad (3)$$

όπου U_p είναι η ταχύτητα των σωματιδίων, και U η ταχύτητα του ρευστού. Αν είναι γνωστός ο λόγος U_p / U μπορεί να αξιολογηθεί το πόσο καλά τα σωματίδια ακολουθούν την ροή. Όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 2, η ταχύτητα των σωματιδίων γίνεται ίδια με την ταχύτητα της ροής σε $1.5 \cdot 10^{-7} \text{s}$. Αυτή η ταχύτητα είναι ικανοποιητική για την εφαρμογή καθώς ο χρόνος που μεσολαβεί μεταξύ 2 εικόνων PIV είναι $20 \cdot 10^{-6} \text{s}$, άρα τα σωματίδια θα έχουν ακολουθήσει τυχόν μεταβολές της ροής. Ακόμη η χρονική κλίμακα παρόμοιων ροών που υπάρχουν στη βιβλιογραφία [17], είναι της τάξης των 10^{-3}s για 1000 – 1500 ΣΑΛ, άρα και σε αυτή την περίπτωση τα σωματίδια αποκρίνονται επαρκώς.

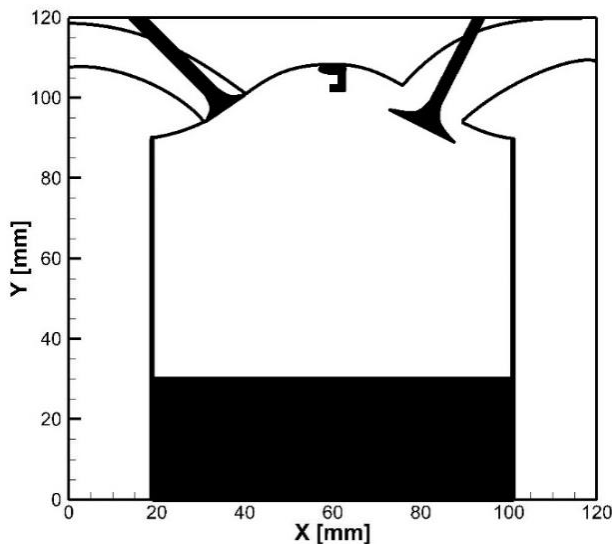


Εικόνα 2: Απόκριση σωματιδίων εντός της ροής.

Οι μετρήσεις ελήφθησαν στο χρόνο της εισαγωγής και της συμπίεσης από τις 340° μέχρι και 20° πριν το άνω νεκρό σημείο της καύσης (ΠΑΝΣ), με βήμα 40°. Αυτές οι μετρήσεις έγιναν σε τρία διαφορετικά επίπεδα: το κατακόρυφο που περνάει από τον άξονα συμμετρίας του θαλάμου καύσης και χωρίζει το ένα ζεύγος βαλβίδων εισαγωγής-εξαγωγής από το άλλο, και ονομάζεται XX επίπεδο (παρουσιάζεται στην Εικόνα 4). Ένα επίπεδο κάθετο στο προηγούμενο, που περνάει τέμνει το μπουζί και χωρίζει τις βαλβίδες εισαγωγής από τις βαλβίδες εξαγωγής (ZZ επίπεδο), και τέλος το εγκάρσιο επίπεδο σε απόσταση 10mm από το ΑΝΣ όπου έγιναν οι μετρήσεις από -300° έως -100° και 2mm από το ΑΝΣ όπου έγιναν μετρήσεις από τις -60° έως τις -20° πριν το έμβολο φτάσει στο άνω νεκρό σημείο. Τα 2 τελευταία επίπεδα αντιστοιχούν σε αυτό ακριβώς που παρατηρεί ο αναγνώστης στην Εικόνα 3.



Εικόνα 3: Επίπεδο YY



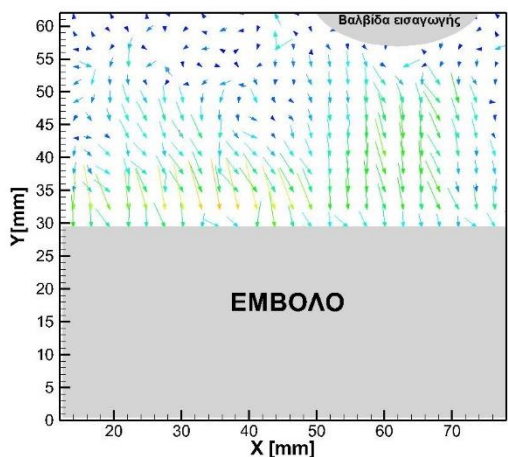
Εικόνα 4: Επίπεδο XX

Επιπλέον έγιναν μετρήσεις στη φάση της εισαγωγής, όσο οι βαλβίδες είναι ανοιχτές, με μεταβολή του ανοίγματος της πεταλούδας στο 25% που ως είχε αποτέλεσμα την πτώση της πίεσης εισαγωγής στα 500mbar.

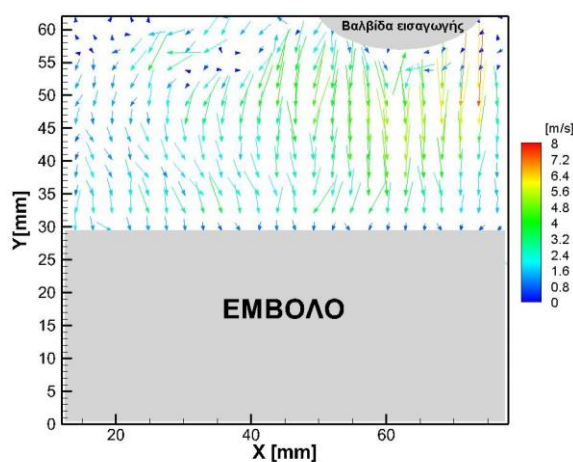
Το δείγμα των εικόνων ήταν ακόμη ένα βασικό ερώτημα που απασχόλησε κατά τις μετρήσεις, καθώς τα αποτελέσματα του πεδίου ροής προέρχονται από τον μέσο όρο των στιγμιαίων πεδίων ταχύτητας για μία συγκεκριμένη γωνία του στροφαλοφόρου άξονα. Μετά από έλεγχο που έγινε σε δείγματα 500, 1000 και 1500 εικόνων σε σχέση με τις 2000 εικόνες διαπιστώθηκε πως υπάρχει μεγάλη διαφορά στα αποτελέσματα του πεδίου ταχυτήτων καθώς και της τυρβώδους κινητικής ενέργειας. Έτσι τελικά η δειγματοληψία παρέμεινε στις 2000 εικόνες για όλες τις μετρήσεις, δείγμα το οποίο είναι μεγαλύτερο από το δείγμα των δημοσιευμένων άρθρων[11][18][9].

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

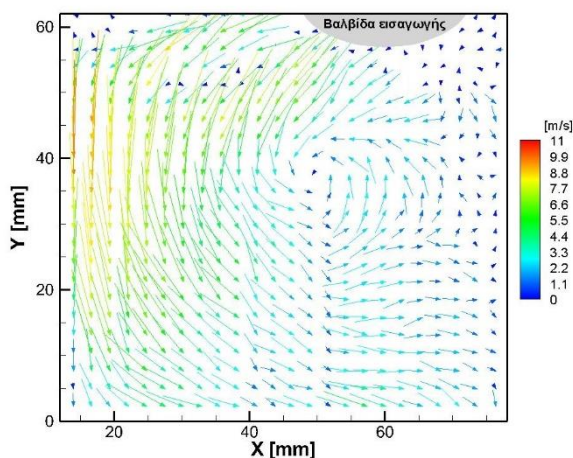
Μετά τη βασική επεξεργασία των εικόνων που αναφέρθηκε στην ενότητα της μεθοδολογίας και ανάλυσης των πειραμάτων, έγινε ο υπολογισμός των διανυσμάτων ταχύτητας με την χρήση του λογισμικού DaVis 7.2 της La Vision. Στις εικόνες 5 – 10 παρουσιάζονται ενδεικτικά αποτελέσματα με άνοιγμα της πεταλούδας (throttle) 25% και πίεση εισαγωγής 500mbar καθώς και για άνοιγμα πεταλούδας 100% με πίεση εισαγωγής 1000mbar στην φάση της εισαγωγής.



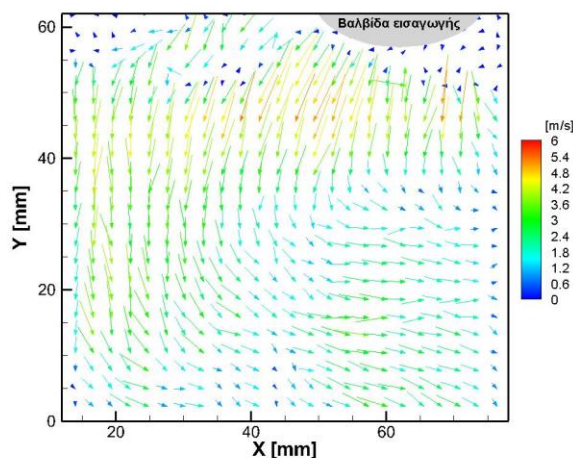
Εικόνα 5: -300° ΑΝΣ στις 1500 ΣΑΛ 25% άνοιγμα πεταλούδας



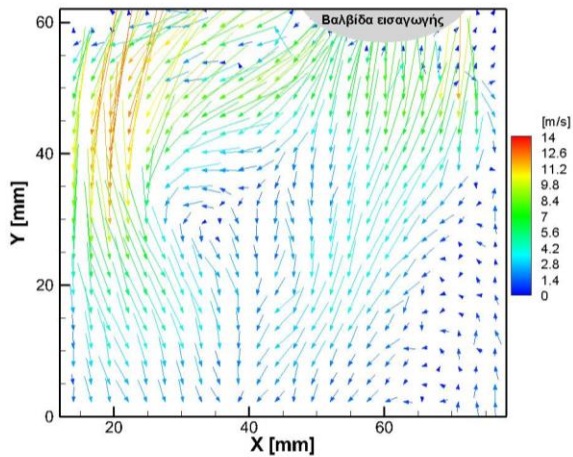
Εικόνα 6: -300° ΑΝΣ στις 1500 ΣΑΛ 100% άνοιγμα πεταλούδας



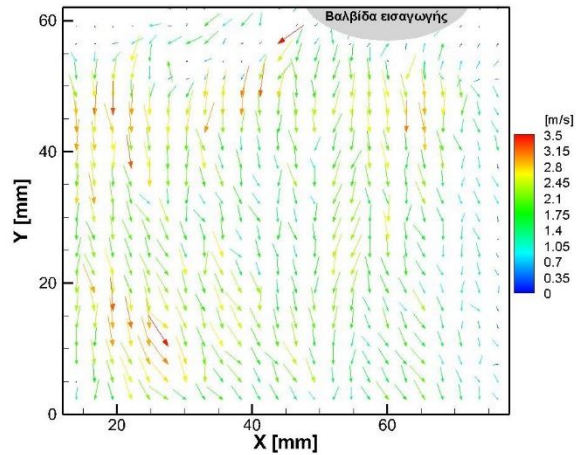
Εικόνα 7: -260° ΑΝΣ στις 1500 ΣΑΛ 25% άνοιγμα πεταλούδας



Εικόνα 8: -260° ΑΝΣ στις 1500 ΣΑΛ 100% άνοιγμα πεταλούδας



Εικόνα 9: -220° ANΣ στις 1500 ΣΑΛ 25% άνοιγμα πεταλούδας

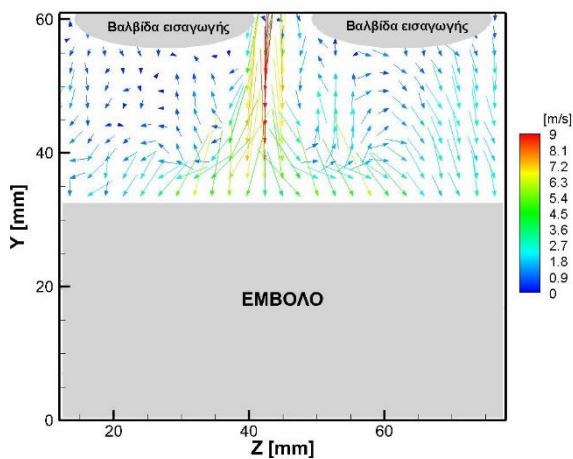


Εικόνα 10: -220° ANΣ στις 1500 ΣΑΛ 100% άνοιγμα πεταλούδας

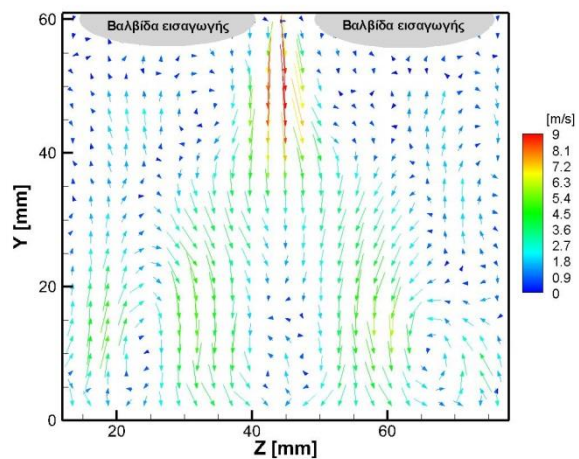
Αυτό που παρατηρείται και στις δύο περιπτώσεις είναι πως στην αρχή της εισαγωγής, -300^0 από το ANΣ (Εικόνα 5, Εικόνα 6), υπάρχουν μεγαλύτερες ταχύτητες κάτω από τη βαλβίδα εισαγωγής. Στη συνέχεια και καθώς οι βαλβίδες εισαγωγής είναι πλήρως ανοιχτές -260^0 από το ANΣ (Εικόνα 7, Εικόνα 8), παρατηρείται αύξηση της ταχύτητας του ρευστού στην αριστερή πλευρά των βαλβίδων εισαγωγής που από εκεί εισέρχεται η μεγαλύτερη μάζα του ρευστού κάτι που συμφωνεί και με τη βιβλιογραφία [19]. Αυτή η κίνηση δημιουργεί μία μεγάλη αξονική περιδίνηση / συστροφή (tumble) με φορά αντίθετη των δεικτών του ρολογιού (Εικόνα 7, Εικόνα 8). Στην συνέχεια της φάσης της εισαγωγής και καθώς οι βαλβίδες κλείνουν, στις -220^0 από το ANΣ (Εικόνα 9, Εικόνα 10), η μόνη επίδραση στο ρευστό είναι η κίνηση του εμβόλου προς τα κάτω που επιφέρει και την καταστροφή της αξονικής περιδίνησης / συστροφής (tumble break down) λίγο πριν το κάτω νεκρό σημείο (KNΣ).

Επιπλέον στις -260^0 και στις -220^0 πριν το ANΣ της συμπίεσης ενώ οι βαλβίδες εισαγωγής είναι πλήρως ανοιχτές και αρχίζουν να κλείνουν, στην περίπτωση που η πεταλούδα εισαγωγής είναι ανοιχτή κατά 25%, παρατηρούνται αυξημένες ταχύτητες σε σχέση με τις αντίστοιχες περιπτώσεις με πλήρες άνοιγμα της πεταλούδας. Αυτή η αύξηση της ταχύτητας του ρευστού που εισέρχεται στον θάλαμο καύσης αποδίδεται στην επίδραση της ταχύτητας του εμβόλου.

Για την περεταίρω διερεύνηση και τον χαρακτηρισμό του πεδίου ροής έγινε λήψη και του κάθετου στο προηγούμενο επίπεδο ZZ το οποίο έχει οριστεί στην Εικόνα 3. Από αυτές τις εικόνες εξήχθησαν τα διανύσματα ταχύτητας κοντά στις βαλβίδες εισαγωγής που στο XX επίπεδο δεν μπορούσαν να υπολογιστούν επειδή δημιουργούνταν αντανάκλασεις. Από τις Εικόνα 11 και Εικόνα 12 φαίνεται πως κοντά στις βαλβίδες παρουσιάζονται ταχύτητες της τάξης των 9 m/s.

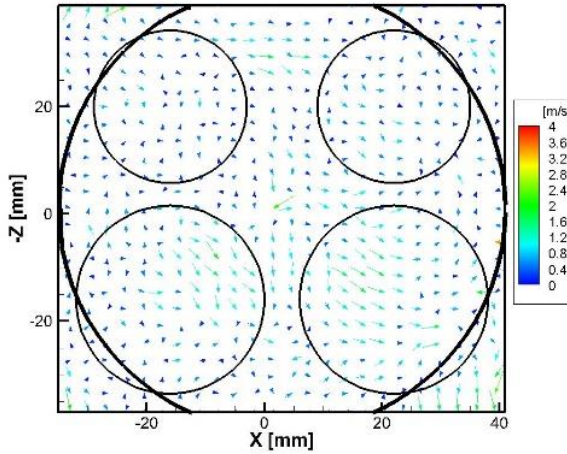


Εικόνα 11: -300° ANΣ στις 1500 ΣΑΛ

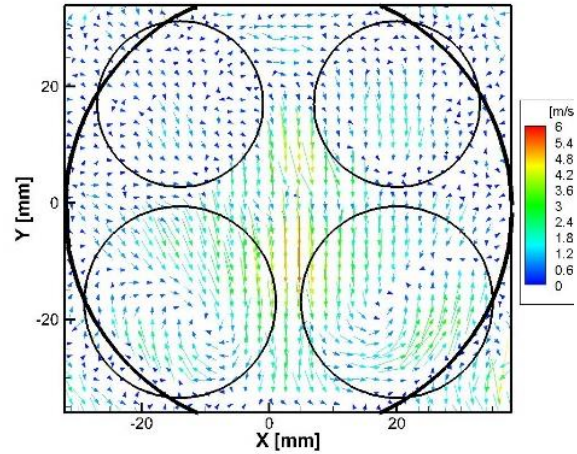


Εικόνα 12: -260° ANΣ στις 1500 ΣΑΛ

Επιπρόσθετα μετρήσεις έγιναν και στο επίπεδο YY όπως αυτό φαίνεται στην Εικόνα 3 . Τα διανυσματικά πεδία που παρουσιάζονται στην Εικόνα 13 και Εικόνα 14 είναι στις 1500 στροφές ανά λεπτό και παρατηρείται αύξηση των ταχυτήτων σε αυτό το επίπεδο στις 20° πριν από το ΑΝΣ της έναυσης. Στην Εικόνα 14 παρατηρούνται δύο συμμετρικές δίνες κάτω από τις βαλβίδες εξαγωγής.[20]



Εικόνα 13: -60° ΑΝΣ στις 1500 ΣΑΛ



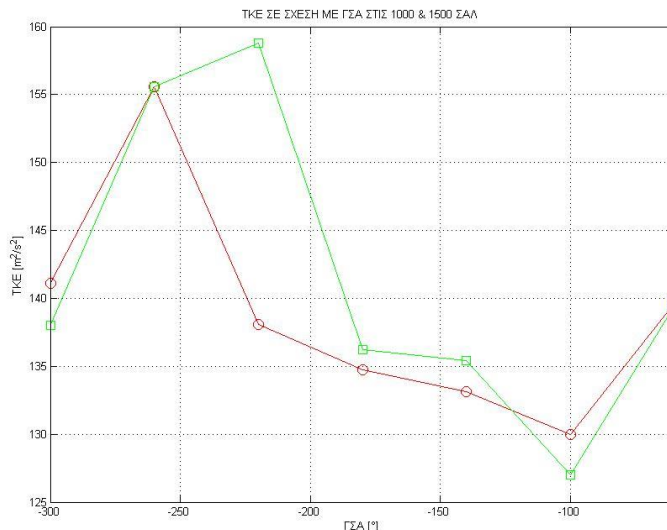
Εικόνα 14: -20° ΑΝΣ στις 1500 ΣΑΛ

Στην συνέχεια υπολογίστηκαν τα επίπεδα της τυρβώδους κινητικής ενέργειας με τη χρήση της παρακάτω σχέσης:

$$E_{tke} = \frac{1}{2} (U'_i)^2 + \frac{1}{2} (V'_i)^2 + \frac{1}{4} (U'_i + V'_i)^2 \quad (4)$$

όπου U'_i είναι τυπική απόκλιση της συνιστώσας της ταχύτητας στον άξονα x για κάθε σημείο και V'_i η αντίστοιχη συνιστώσα στον άξονα y.

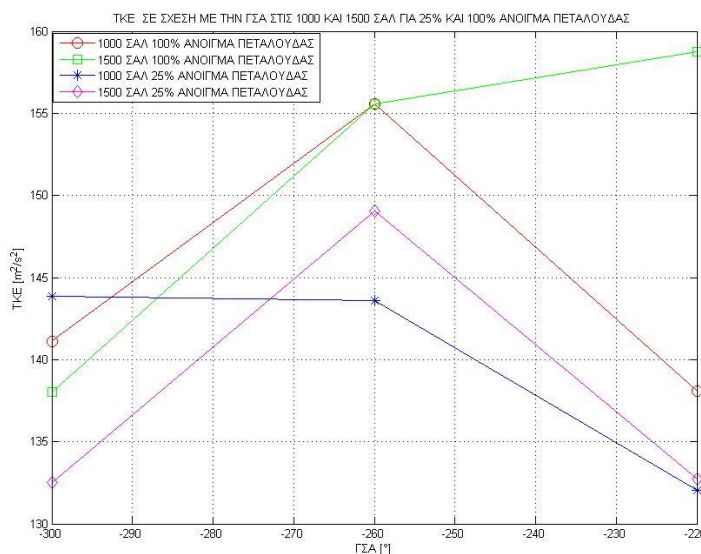
Επειδή η τεχνική που χρησιμοποιήθηκε είναι δυσδιάστατη (2D), και κατ' επέκταση δεν μπορεί να υπολογίσει το διάνυσμα της ταχύτητας στον άξονα Z, σαν τρίτη συνιστώσα W'_i , προσεγγιστικά εισήχθη ο μέσος όρος των άλλων δύο συνιστωσών $\frac{1}{2} (U'_i + V'_i)^2$ και έτσι έγινε κατά προσέγγιση υπολογισμός της τυρβώδους κινητικής ενέργειας. Η μέτρηση έγινε για όλα τα σημεία στα οποία υπήρχαν έγκυρα αποτελέσματα και καλύπτουν το μεγαλύτερο μέρος του θαλάμου καύσης στο επίπεδο μέτρησης.



Εικόνα 15: ΤΚΕ σε σχέση με την γωνία του στροφαλοφόρου άξονα για πλήρως ανοιχτή πεταλούδα εισαγωγής στο επίπεδο XX

Από την Εικόνα 15, τα αποτελέσματα της μέσης ΤΚΕ στο επίπεδο XX παρουσιάζουν ποιοτικές ομοιότητες με αυτά της βιβλιογραφίας [4][21][22]. Ως γενικό συμπέρασμα η τυρβώδης κινητική ενέργεια που εξαρτάται από την ταχύτητα του ρευστού, αυξάνεται κατά την φάση της εισαγωγής. Όταν οι βαλβίδες εισαγωγής κλείσουν και λόγω της επίδρασης της κίνησης του εμβόλου τα επίπεδα της μειώνονται, και αυξάνονται ξανά κατά τα τελευταία στάδια στη φάση της συμπίεσης. Στις 1500 ΣΑΛ και -220° πριν το ΑΝΣ παρατηρούνται τα υψηλότερα επίπεδα ΤΚΕ καθώς δεν έχει γίνει ακόμα η διάσπαση της αζονικής περιδίνησης (tumble).

Στην Εικόνα 16, παρουσιάζεται η σύγκριση της ΤΚΕ στο επίπεδο XX στην φάση της εισαγωγής για 1000 ΣΑΛ και 1500 ΣΑΛ με άνοιγμα πεταλούδας 25% και 100%. Φαίνεται πως η τυρβώδης κινητική ενέργεια είναι αυξημένη όταν η πεταλούδα είναι πλήρως ανοιχτή. Στην περίπτωση των 1000 ΣΑΛ και 25% άνοιγμα της πεταλούδας παρατηρείται αυξημένη ΤΚΕ στην αρχή της εισαγωγής σε σχέση με τις άλλες περιπτώσεις.



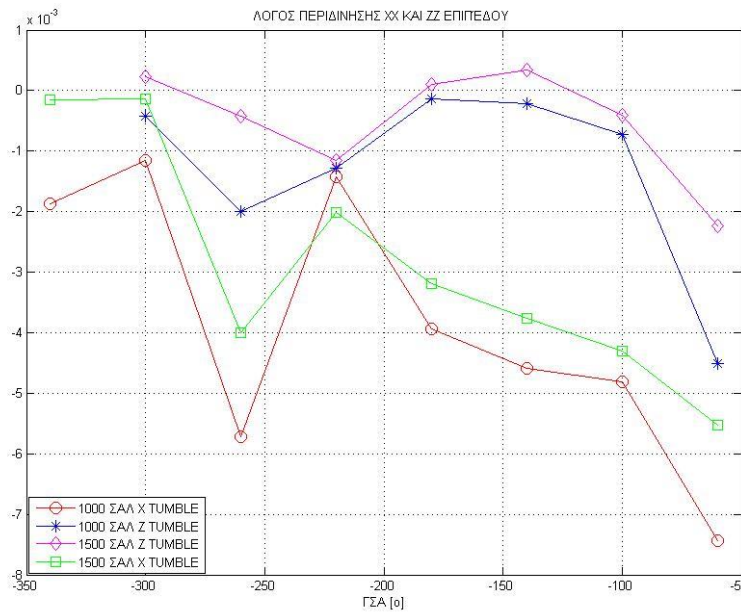
Εικόνα 16: ΤΚΕ σε σχέση με την γωνία του στροφαλοφόρου άξονα για διαφορετικά ανοίγματα πεταλούδας στο επίπεδο XX

Για να ποσοτικοποιηθεί η ένταση της αξονικής περιδίνησης έγινε υπολογισμός του Λόγου Περιδίνησης (TR, Tumble Ratio)[12][10]. Ο λόγος αυτός προκύπτει από τον υπολογισμό του στροβιλισμού (vorticity) του κάθε σημείου της εικόνας του πεδίου ταχυτήτων διαιρεμένος με την γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του στροφαλοφόρου άξονα (ω) και τον αριθμό των διανυσμάτων ταχύτητας. Αυτό το μέγεθος αδιαστατοποιεί την γωνιακή ταχύτητα της δίνης με την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Ο τύπος υπολογισμού της δίνης σε κάθε επίπεδο έγινε με τον παρακάτω τύπο.

$$TR_{XX} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial v}{\partial X} - \frac{\partial u}{\partial Y} \right) i}{2n\omega} \quad (5)$$

$$TR_{ZZ} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial v}{\partial Z} - \frac{\partial w}{\partial Y} \right) i}{2n\omega} \quad (6)$$

όπου $\frac{\partial v}{\partial X}$ είναι η μερική παράγωγος της ταχύτητας v ως προς τον άξονα X , $\frac{\partial u}{\partial Y}$ είναι η μερική παράγωγος της ταχύτητας u ως προς τον άξονα Y , και αντίστοιχά, $\frac{\partial v}{\partial Z}$ είναι η μερική παράγωγος της ταχύτητας v ως προς τον άξονα Z , $\frac{\partial w}{\partial Y}$ είναι η μερική παράγωγος της ταχύτητας w ως προς τον άξονα Y , και n είναι ο αριθμός των διανυσμάτων της ταχύτητας και ω η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του στροφαλοφόρου άξονα του κινητήρα.



Εικόνα 17: Λόγος περιδίνησης σε σχέση με τις στροφές του στροφαλοφόρου άξονα.

Στην Εικόνα 17, όπου οι τιμές είναι αρνητικές σημαίνει πως η φορά της δίνης είναι αντίθετη από τη φορά των δεικτών του ρολογιού, σύμφωνα με το σύστημα αξόνων που έχει επιλεγεί, και όπου οι τιμές είναι θετικές, η δίνη ακολουθεί την φορά του ρολογιού. Στο επίπεδο XX παρατηρείται σε όλο τον κύκλο ότι η φορά περιστροφής είναι αντίθετη της φοράς των δεικτών του ρολογιού. Ακόμη παρατηρείται αύξηση της απόλυτης τιμής του λόγου περιδίνησης όταν οι βαλβίδες είναι πλήρως ανοιχτές καθώς και στο τέλος της φάσης της συμπίεσης. Ομοίως στο επίπεδο ZZ παρατηρείται αύξηση κοντά στο τέλος της συμπίεσης.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα μελέτη έγινε χαρακτηρισμός του πεδίου ροής σε δύο εγκάρσια επίπεδα XX και ZZ καθώς και στα κυλινδρικά επίπεδα που βρίσκονται σε απόσταση -10mm και -2mm από το άνω νεκρό σημείο. Βρέθηκε πως μία δίνη (Tumble) σχηματίζεται κατά την φάση τις εισαγωγής και περιστρέφεται αντίθετα της φοράς των δεικτών του ρολογιού. Παρατηρήθηκε το μέγιστο της ΤΚΕ στις -220° από το άνω νεκρό σημείο της καύσης στις 1500 ΣΑΛ και ακόμη ότι τα επίπεδα της ΤΚΕ συνολικά αυξάνονται με την αύξηση των στροφών του κινητήρα. Ακόμη όταν η πεταλούδα εισαγωγής είναι στο 25% τότε η ΤΚΕ είναι μειωμένη σε σχέση με το 100% άνοιγμα πεταλούδας. Ένα ακόμη συμπέρασμα είναι πως η απόλυτη τιμή του λόγου περιδίνησης (TR) στο επίπεδό XX είναι αυξημένη σε σχέση με το επίπεδο ZZ και στις 1000 αλλά και στις 1500 ΣΑΛ.

Είναι σε εξέλιξη σχεδιασμός μετρήσεων με τη χρήση PIV υψηλής χρονικής ανάλυσης για να μπορέσουν να εξαχθούν τα πλήρη χαρακτηριστικά της τύρβης, χρονικά και χωρικά, στον θάλαμο καύσης της μηχανής. Ακόμη για να εξαχθούν ολοκληρωμένα συμπεράσματα για την ανάμιξη του καυσίμου καθώς και για την εξάπλωση της φλόγας, που είναι και ο στόχος της εργασίας αυτής, θα γίνει οπτικοποίηση της έγχυσης του καυσίμου, αρχικά με καύσιμο αναφοράς το ισοοκτάνιο και στη συνέχεια με άλλα μίγματα βιοκαυσίμων, ενώ θα οπτικοποιηθεί και η φλόγα έτσι ώστε να συσχετιστούν τα χαρακτηριστικά της με το πεδίο ροής τόσο κατά τη διάρκεια της καύσης όσο και κατά τη διάρκεια της ανάμιξης.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

«Το έργο συγχρηματοδοτείται από την Ελλάδα και την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού, Εκπαίδευση και Διά Βίου Μάθηση», στο πλαίσιο της Πράξης «Ενίσχυση του ανθρώπινου ερευνητικού δυναμικού μέσω της υλοποίησης διδακτορικής έρευνας» (MIS-5000432), που υλοποιεί το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών (ΙΚΥ).»



Επιχειρησιακό Πρόγραμμα
Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού,
Εκπαίδευση και Διά Βίου Μάθηση

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] S. Liu, E. R. Cuty Clemente, T. Hu, and Y. Wei, “Study of spark ignition engine fueled with methanol/gasoline fuel blends,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 27, no. 11–12, pp. 1904–1910, 2007.
- [2] X. Wu, R. Daniel, G. Tian, H. Xu, Z. Huang, and D. Richardson, “Dual-injection: The flexible, bi-fuel concept for spark-ignition engines fuelled with various gasoline and biofuel blends,” *Appl. Energy*, vol. 88, no. 7, pp. 2305–2314, 2011.
- [3] P. G. Aleiferis, M. K. Behringer, D. OudeNijeweme, and P. Freeland, “Insights into Stoichiometric and Lean Combustion Phenomena of Gasoline–Butanol, Gasoline–Ethanol, Iso-Octane–Butanol, and Iso-Octane–Ethanol Blends in an Optical Spark-Ignition Engine,” *Combust. Sci. Technol.*, vol. 189, no. 6, pp. 1013–1060, 2017.
- [4] B. Murali Krishna and J. M. Mallikarjuna, “Tumble Flow Analysis in an Unfired Engine Using Particle Image Velocimetry,” pp. 430–435, 2009.
- [5] J. Dannemann, K. Pielhop, and M. Klaas, “Cycle-Resolved Multi-Planar Particle-Image Velocimetry Measurements of the In-Cylinder Flow of a Four-Valve Combustion Engine,” pp. 2–5, 2009.
- [6] M. Reeves, D. P. Towers, B. Tavender, and C. H. Buckberry, “High-speed all-digital technique for cycle-resolved 2-D flow measurement and flow visualization within SI engine cylinders,” *Opt. Lasers Eng.*, vol. 31, no. 4, pp. 247–261, 1999.
- [7] J. Benajes, J. V. Pastor, A. García, and J. Monsalve-Serrano, “Redesign and Characterization of a Single-Cylinder Optical Research Engine to Allow Full Optical Access and Fast Cleaning

- during Combustion Studies,” *Exp. Tech.*, vol. 42, no. 1, pp. 55–68, 2018.
- [8] B. Khalighi, “Study of the intake tumble motion by flow visualization and particle tracking velocimetry,” *Exp. Fluids*, vol. 10, pp. 230–236, 1991.
- [9] T. Justham, S. Jarvis, A. Clarke, C. P. Garner, G. K. Hargrave, and N. a Halliwell, “Simultaneous Study of Intake and In-Cylinder IC Engine Flow Fields to Provide an Insight into Intake Induced Cyclic Variations,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 45, pp. 146–153, 2006.
- [10] P. Stansfield, G. Wigley, T. Justham, J. Catto, and G. Pitcher, “PIV analysis of in-cylinder flow structures over a range of realistic engine speeds,” *Exp. Fluids*, vol. 43, no. 1, pp. 135–146, 2007.
- [11] B. Murali Krishna and J. M. Mallikarjuna, “Effect of Manifold Inclination on an Unfired Engine Equipped with Flat Piston Using Non- Intrusive Technique – Experimental Flow Structure Analysis,” vol. 2, no. 21, pp. 1804–1809, 2015.
- [12] R. F. Huang, H. S. Yang, and C. N. Yeh, “In-cylinder flows of a motored four-stroke engine with flat-crown and slightly concave-crown pistons,” *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 32, no. 5, pp. 1156–1167, 2008.
- [13] J. Westerweel, “Fundamentals of digital particle image velocimetry,” vol. 8, pp. 1379–1392, 1997.
- [14] M. Raffel, C. E. Willert, S. T. Wereley, and J. Kompenhans, *Particle Image Velocimetry*, Second Edi., vol. 79, no. 1. Berlin, 2007.
- [15] A. Melling, “Tracer particles and seeding for particle image velocimetry,” *Meas. Sci. Technol.*, vol. 8, no. 12, pp. 1406–1416, 1997.
- [16] D. Kolokotronis, “Experimental Investigation of the Internal Flow Field of Model Fuel Injectors,” University of London, 2007.
- [17] P. G. Aleiferis, M. K. Behringer, and J. S. Malcolm, *Integral Length Scales and Time Scales of Turbulence in an Optical Spark-Ignition Engine*, vol. 98, no. 2. Flow, Turbulence and Combustion, 2017.
- [18] P. Druault, P. Guibert, and F. Alizon, “Use of proper orthogonal decomposition for time interpolation from PIV data: Application to the cycle-to-cycle variation analysis of in-cylinder engine flows,” *Exp. Fluids*, vol. 39, no. 6, pp. 1009–1023, 2005.
- [19] F. Becker, B. Wieneke, J. Yuan, and C. Schnorr, “Structure and in-cycle evolution of an in-cylinder tumbling flow,” *14th Int Symp Appl. Laser Tech. to Fluid Mech. Lisbon, Port.*, no. Elsinga 2006, pp. 05–08.
- [20] J. Vernet, “Detailed study of steady incylinder flow and turbulence using stereo-PIV,” pp. 1–62, 2012.
- [21] D. Karhoff, I. Bücker, M. Klaas, and W. Schröder, “Time-Resolved stereoscopic PIV measurements of cyclic variations in an internal combustion engine,” *10TH Int. Symp. Part. image Velocim. -PIV13*, 2013.
- [22] B. Murali Krishna and J. M. Mallikarjuna, “PIV Experiments and In-Cylinder Flow Structure Analysis of a Motored Engine Equipped with Inclined Crown Pistons,” vol. 3, no. September, pp. 130–139, 2015.