



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΕΡΟΝΑΥΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ &

ΕΡΦΑΡΜΟΓΩΝ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΥ ΜΗ ΑΝΤΙΔΡΩΝΤΟΣ ΤΥΡΒΩΔΟΥΣ ΡΟΙΚΟΥ
ΠΕΔΙΟΥ ΣΕ ΔΙΑΤΑΞΗ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗΣ
ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΩΜΕΝΩΝ ΦΛΟΓΩΝ ΑΕΡΙΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ**

ΜΑΡΙΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ ΚΕΦΑΛΑΣ

1067335

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΣΟΥΦΛΑΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ, ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

Διπλωματική εργασία υποβληθείσα στο Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών του

Πανεπιστημίου Πατρών

ΠΑΤΡΑ, [03/2024]

Πανεπιστήμιο Πατρών, [ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ]

[ΜΑΡΙΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ ΚΕΦΑΛΑΣ]

© [5^ο έτος] – Με την επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – [Τομέας Ενέργειας Αεροναυτικής και



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΕΡΟΝΑΥΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ &

ΕΡΦΑΡΜΟΓΩΝ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάστηκε

από τον

ΜΑΡΙΟ ΙΩΑΝΝΗ ΚΕΦΑΛΑ

1067335

την 06/03/2024

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας δεν υποδηλοί την αποδοχή των γνώμων του συγγραφέα.
Κατά τη συγγραφή τηρήθηκαν οι αρχές της ακαδημαϊκής δεοντολογίας.

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – [Τομέας Ενέργειας Αεροναυτικής και

ΠΕΡΙΛΗΨΗ**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΥ ΜΗ ΑΝΤΙΑΡΩΝΤΟΣ ΤΥΡΒΩΔΟΥΣ ΡΟΙΚΟΥ
ΠΕΔΙΟΥ ΣΕ ΔΙΑΤΑΞΗ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗΣ
ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΩΜΕΝΩΝ ΦΛΟΓΩΝ ΑΕΡΙΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ****ΜΑΡΙΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ ΚΕΦΑΛΑΣ**

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζεται η πειραματική εγκατάσταση και οι μετρητικές μεθοδολογίες για την μελέτη του ισόθερμο ροϊκού πεδίου κατάντη διάταξης ομοαξονικών ροών υψηλού λόγου ταχυτήτων, με χρήση της Ταχυμετρίας Απεικόνισης Σωματιδίων (PIV). Η συγκεκριμένη εγκατάσταση, αεροδυναμικής σταθεροποίησης διαστρωματωμένων φλογών, αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Τεχνικής Θερμοδυναμικής και εφαρμογών στατιστικής μηχανικής του Πανεπιστημίου Πατρών. Αρχικά, παρουσιάζεται η μεθοδολογία PIV και μία σύντομη ιστορική αναδρομή για τις γενικότερες χρήσεις της στην επιστήμη. Εν συνεχεία, γίνεται μία σύντομη αναφορά στην θεωρία καύσης. Στη συνέχεια, αναλύεται το κομμάτι της τυρβώδους ροής και των ενεργειακών κλιμάκων της τύρβης αλλά και η βασική θεωρία των ομοαξονικών ροών με ή χωρίς ανακυκλοφορία. Επιπλέον, παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε αλλά και τα μέσα με την βοήθεια των οποίων πραγματοποιήθηκε η εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Επίσης, παρατίθεται και η μεθοδολογία ανάλυσης των αβεβαιοτήτων που σχετίζονται με τη συγκεκριμένη μεθοδολογία μέτρησης του πεδίου ταχυτήτων. Τέλος, γίνεται η εξαγωγή των αποτελεσμάτων του πειράματος που έχουν να κάνουν με τα προφίλ ταχυτήτων, την ένταση της τύρβης αλλά και την αβεβαιότητα της μεθόδου PIV.

Λέξεις κλειδιά

Ισόθερμο πεδίο ροής, ανακυκλοφορία, PIV, ομοαξονική ροή, τύρβη

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – [Τομέας Ενέργειας Αεροναυτικής και

ABSTRACT**EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE NON-REACTING TURBULENT
FLOW FIELD DOWNSTREAM CONFIGURATION SUITABLE FOR THE
AERODYNAMIC STABILIZATION OF STRATIFIED GASEOUS FLAMES****MARIOS IOANNIS KEFALAS**

In this student research project the experimental setup and measurement methodologies for the study of the isothermal flow field downstream of a high velocity ratio coaxial flow configuration, using Particle Imaging Velocimetry (PIV) are presented. This particular aerodynamic stabilization facility, of stratified flames, was developed at the Laboratory of Thermodynamics and Statistical Applications, University of Patras. Initially, the PIV methodology is presented and a brief history of its more general uses in science is given. Then, a brief presentation of combustion theory is provided. Moreover, the turbulent flow characteristics and the turbulent energy scales together with the basic theory of coaxial flows with or without recirculation are discussed. In addition, the experimental setup used and the means by which the results of the experiment were obtained are presented. Finally, the methodology and analysis of the uncertainties associated with the specific velocity field measurement methodology is also provided. Lastly, the results of the experiment related to the velocity profiles, turbulence intensity and the uncertainty of the PIV method are derived.

Key words

Isothermal flow field, recirculation, PIV, coaxial flow, turbulence

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1 Βασική ταξινόμηση φαινομένων καύσης	13
Πίνακας 2. Περιπτώσεις ροών που ερευνήθηκαν.....	35

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1 Βήμα προς βήμα η διαδικασία της μεθόδου PIV στα μέσα της δεκαετίας του 1980	4
Εικόνα 2 Τέλεια και Ατελής καύση	11
Εικόνα 3 Στοιχειομετρική καύση	12
Εικόνα 4 Στρωτή και Τυρβώδης ροή σε σωλήνα	14
Εικόνα 5 Φλόγες διάχυσης	15
Εικόνα 6 Φλόγες προανάμειξης	15
Εικόνα 7 Ενεργειακός καταρράκτης της τύρβης	21
Εικόνα 8 Εύρος κινητικής ενέργειας τύρβης σαν συνάρτηση του κυματαριθμού K	24
Εικόνα 9 Ταξινόμηση τυρβώδους φλόγας βάσει των αριθμών Damkohler και Karlovitz...	27
Εικόνα 10 Χάρτης τυρβώδους φλόγας	29
Εικόνα 11 Ομοαξονική ροή με εμφάνιση ανακυκλοφορίας	32
Εικόνα 12 Σπειροειδείς στρόβιλοι στην έξοδο του σωλήνα	33
Εικόνα 13 Πειραματική εγκατάσταση	37
Εικόνα 14 Σχηματική αναπαράσταση μέτρησης αντιδρώντος πεδίου με PIV	41
Εικόνα 15 Η κάμερα που χρησιμοποιήθηκε LaVision Imager Pro X 2 M CCD	42
Εικόνα 16 Σκίτσο αναπαράστασης διάταξης σωλήνα pitot	43
Εικόνα 17 Κίνηση σωματιδίου κατά την διεύθυνση μιας ροής	48
Εικόνα 18 Η χρονική απόκριση του σωματιδίου	50
Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – [Τομέας Ενέργειας Αεροναυτικής και	

Εικόνα 19 Αναπαράσταση των μέσων αξονικών ταχυτήτων του πειράματος με ροικές γραμμές	53
Εικόνα 20 Κατανομή αξονικών ταχυτήτων V_y.....	54
Εικόνα 21 Κατανομή ακτινικών ταχυτήτων V_x.....	55
Εικόνα 22 Κατανομή τιμών RMS V_y	56
Εικόνα 23 Κατανομή τιμών RMS V_x	56
<i>Εικόνα 24 Ακτινική ένταση τύρβης με δεδομένα απο την centerline</i>	<i>59</i>
<i>Εικόνα 25 Αξονική ένταση τύρβης με δεδομένα από την centerline</i>	<i>60</i>
<i>Εικόνα 26 Συνολική ένταση τύρβης με δεδομένα από την centerline.....</i>	<i>60</i>
<i>Εικόνα 27 Τραβέρσες για την ακτινική ένταση τύρβης</i>	<i>61</i>
<i>Εικόνα 28 Τραβέρσες για την αξονική ένταση τύρβης</i>	<i>62</i>
<i>Εικόνα 29 Τραβέρσες για την συνολική ένταση τύρβης</i>	<i>62</i>
<i>Εικόνα 30 Αβεβαιότητα λόγω εγκατάστασης.....</i>	<i>67</i>
<i>Εικόνα 31 Αβεβαιότητα λόγω δυναμικής σωματιδίων</i>	<i>70</i>
<i>Εικόνα 32 Αβεβαιότητα λόγω δειγματοληψίας.....</i>	<i>72</i>
<i>Εικόνα 33 Συνολική αβεβαιότητα λόγω του PIV.....</i>	<i>73</i>

ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

Re	Αριθμός Reynolds	-
ρ	Πυκνότητα	kg/m^3
V	Ταχύτητα ρευστού	m/s
E	Ενέργεια	J
H	Ενθαλπία	kJ/kg
g	Επιτάχυνση βαρύτητας	m/s^2
Z	Ύψος	m
U	Εσωτερική ενέργεια	kJ/kg
ν	Ειδικός όγκος	m^3/kg
P	Πίεση	Pa
Q	Έκλυση θερμότητας	J
s	Εντροπία	$kJ/(kg \cdot K)$
T	Θερμοκρασία	K
I	Ένταση της τύρβης	-
ε	Ρυθμός εκφυλισμού της τυρβώδους κινητικής ενέργειας	m^2/s^3
T _{ad}	Αδιαβατική θερμοκρασία φλόγας	K
T _u	Θερμοκρασία αντιδρώντων	K
Da	Αριθμός Damkohler	-
τ_c	Χημική χρονική κλίμακα	s
Ka	Αριθμός karlovitz	-
S _t	Ταχύτητα τυρβώδους φλόγας	m/s
S _{L,0}	Ταχύτητα στρωτής φλόγας	m/s
Sc	Αριθμός Schmidt	-
Pr	Αριθμός Prandtl	-
Le	Αριθμός Lewis	-
r _u	Λόγος ταχυτήτων	-
β	Λόγος διαμέτρων	-
A _r	Λόγος επιφανειών	-
ψ	Συντελεστής μεγέθυνσης	-
l	Μήκος κλίμακας βαθμονόμησης στην κατακόρυφη διεύθυνση	m
L	Μήκος στο επίπεδο εικόνας	pixel
F _D	Οπισθέλκουσα δύναμη	N

C_D	Συντελεστής αντίστασης	-
τ_p	Χρονική σταθερά απόκρισης σωματιδίου	s
d_p	Διάμετρος του σωματιδίου	m
t	Χρόνος	s
St_p	Αριθμός stokes σωματιδίου	-
d_h	Υδραυλική διάμετρος	m
w_s	Αβεβαιότητα από την δυναμική των σωματιδίων	-
V_r	Η πραγματική ταχύτητα του ρευστού	m/s
V_m	Η μετρούμενη ταχύτητα από το PIV	m/s

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	V
ABSTRACT.....	VII
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	IX
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	XII
ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ	XIV
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	XVII
1.0 ΣΚΟΠΟΣ.....	1
2.0 ΕΙΣΑΓΩΓΗ-ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ	3
3.0 ΘΕΩΡΙΑ ΚΑΥΣΗΣ ΚΑΙ ΧΡΗΣΙΜΟΙ ΝΟΜΟΙ	9
3.1 ΒΑΣΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΚΑΥΣΗΣ	9
3.2 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΚΑΥΣΗΣ	12
3.3 ΠΡΩΤΟΣ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΝΟΜΟΣ	16
3.4 ΔΕΥΤΕΡΟΣ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΝΟΜΟΣ.....	18
4.0 ΤΥΡΒΗ ΚΑΙ ΑΝΑΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ.....	20
4.1 Ο ΡΟΛΟΣ ΤΗΣ ΤΥΡΒΗΣ ΣΤΗΝ ΚΑΥΣΗ	20
4.2 ΚΛΙΜΑΚΕΣ ΤΗΣ ΤΥΡΒΗΣ.....	20
4.3 ΤΥΡΒΩΔΗΣ ΠΡΟΑΝΑΜΕΜΕΙΓΜΕΝΗ ΚΑΥΣΗ.....	25
4.4 ΟΜΟΑΞΟΝΙΚΗ ΡΟΗ ΚΑΙ ΑΝΑΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ.....	30
5.0 Η ΠΡΟΣ ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ.....	35

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – [Τομέας Ενέργειας Αεροναυτικής και

5.1	ΦΥΣΗΤΗΡΕΣ.....	37
6.0	Ο ΠΡΟΣ ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ.....	39
6.1	ΧΡΗΣΗ ΚΑΜΕΡΑΣ ΚΑΙ LASER ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ.....	41
6.2	ΣΩΛΗΝΑΣ ΡΙΤΟΤ.....	42
6.3	ΤΡΟΧΙΟΔΕΙΚΤΙΚΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ.....	43
6.4	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΟΥ ΡIV	44
7.0	ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ ΡIV.....	47
7.1	ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΑ ΟΡΓΑΝΑ.....	47
7.2	ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ ΛΟΓΩ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΤΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ	48
8.0	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ.....	53
8.1	ΥΠΟΛΙΣΜΟΣ ΠΕΔΙΟΥ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ.....	53
8.2	ΥΠΟΛΙΣΜΟΣ ΕΝΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΤΥΡΒΩΔΟΥΣ ΠΕΔΙΟΥ.....	58
8.3	ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΡIV	65
9.0	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ	75
9.1	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	75
9.2	ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.....	75
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	77

1.0 ΣΚΟΠΟΣ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η παρουσίαση μιας διάταξης ομοαξονικών ροών υψηλού λόγου ταχυτήτων με τη βοήθεια της μεθόδου Ταχυμετρίας απεικόνισης σωματιδίων (PIV) για την μελέτη του μη αντιδρώντος ροϊκού πεδίου.

Στη μηχανική των ρευστών, οι ερευνητές χρησιμοποιούν μια πειραματική μέθοδο που ονομάζεται Particle Image Velocimetry (PIV) για να μετρήσουν και να απεικονίσουν την ταχύτητα της ροής των ρευστών. Ο βασικός στόχος της χρήσης PIV μεθόδου σε ένα πείραμα είναι η συλλογή ακριβών μετρήσεων του πεδίου ταχύτητας ενός ρευστού. Αυτές οι μετρήσεις είναι ζωτικής σημασίας για την ανάλυση του τρόπου με τον οποίο το ρευστό συμπεριφέρεται και αλληλεπιδρά με άλλα ρευστά ή αντικείμενα.

Στα πειράματα με χρήση της μεθόδου PIV, οι ερευνητές χρησιμοποιούν μια δέσμη λέιζερ για να φωτίσουν σωματίδια σε ένα ρευστό. Τα σωματίδια αυτά καταγράφονται στη συνέχεια από μια κάμερα. Αναλύοντας την κίνηση αυτών των σωματιδίων μεταξύ δύο διαδοχικών εικόνων, οι ερευνητές μπορούν να προσδιορίσουν την ταχύτητα του ρευστού. Η PIV είναι μια ευέλικτη τεχνική που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη διαφόρων φαινομένων.

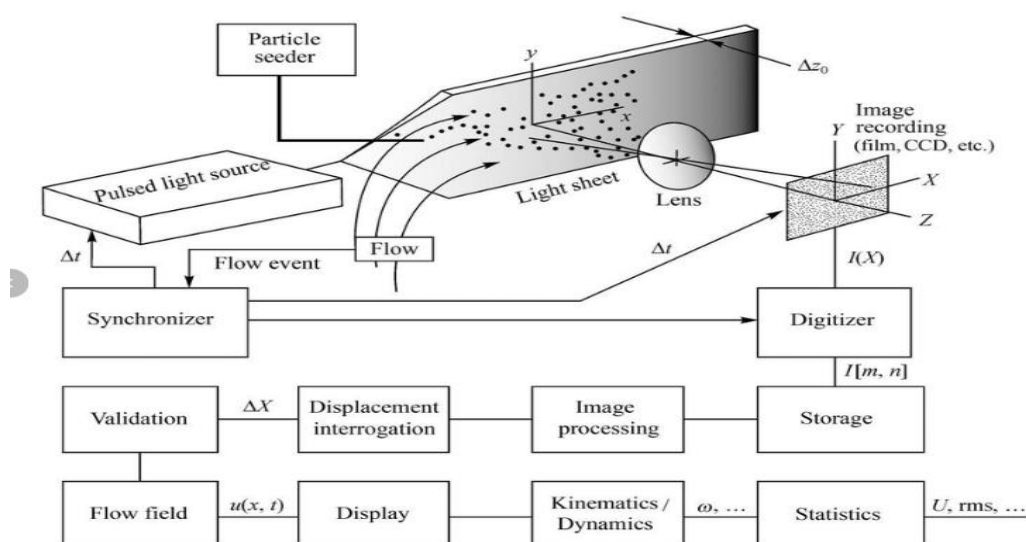
2.0 ΕΙΣΑΓΩΓΗ-ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα μελετηθεί η πειραματική διάταξη ομοαξονικής ροής αέρα υψηλού λόγου ταχυτήτων με ανακυκλοφορία σε μη αντιδρών πεδίο αλλά και ο πειραματικός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση της ροής αυτής. Γενικά η ομοαξονική ροή αέρα με ανακυκλοφορία είναι ένας συγκεκριμένος τύπος ροής αέρα που χρησιμοποιείται σε διάφορες εφαρμογές. Αυτού του είδους η ροή παρατηρείται σε διάφορες βιομηχανικές και μηχανολογικές εφαρμογές συμπεριλαμβανομένων θαλάμων καύσης συστημάτων ψύξης βιομηχανικών κλιβάνων και άλλου είδους εφαρμογές.

Πιο συγκεκριμένα η ανακυκλοφορία που εμφανίζεται στις ομοαξονικές ροές μπορεί να βοηθήσει στην ενίσχυση των επιπέδων τύρβης στην ροή του αέρα, γεγονός που επωφελεί συγκεκριμένες εφαρμογές όπως η καύση για καλύτερη ανάμιξη και για μεταφορά θερμότητας ενώ σε άλλες περιπτώσεις χρησιμοποιείται για την ρύθμιση της θερμοκρασίας της ροής αέρα, ειδικά σε συστήματα όπου ο ακριβής έλεγχος της θερμοκρασίας είναι απαραίτητος.

Τώρα όσον αφορά την μέθοδο με την οποία θα γίνει η ανάλυση της ροής αυτής παρατίθενται παρακάτω κάποια ιστορικά στοιχεία για την εξέλιξη της μεθόδου ενώ για τον τρόπο λειτουργίας της θα συζητηθεί σε επόμενα κεφάλαια.

Η ιστορική εξέλιξη της μεθόδου PIV (Particle Image Velocimetry) μπορεί να ανιχνευθεί πίσω στον μέσο του 19ου αιώνα, όταν η έννοια της οπτικοποίησης της ροής εισάχθηκε για πρώτη φορά. Κατά τη διάρκεια των ετών, αναπτύχθηκαν διάφορες τεχνικές για τη μέτρηση των ταχυτήτων των ρευστών, αλλά το PIV όπως το γνωρίζουμε σήμερα εμφανίστηκε τη δεκαετία του 1980 με την είσοδο των λέιζερ και των υψηλής ταχύτητας καμερών.



Εικόνα 1 Βήμα προς βήμα η διαδικασία της μεθόδου PIV στα μέσα της δεκαετίας του 1980

Αρχική ανάπτυξη:

Οι αρχές του PIV μπορούν να ανιχνευθούν πίσω στον 19ο αιώνα όταν τεχνικές όπως η οπτικοποίηση με καπνό, χρωστική ανίχνευση και οπτικοποίηση με σωματίδια που αιωρούνται χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη της ροής των ρευστών. Αυτές οι αρχικές μέθοδοι παρείχαν ποιοτικές πληροφορίες για τα πρότυπα ροής, αλλά έλειπαν οι ποσοτικές μετρήσεις των ταχυτήτων. Στον 20ό αιώνα, οι βελτιώσεις στην οπτική τεχνολογία και την τεχνολογία απεικόνισης οδήγησαν στην ανάπτυξη νέων μεθόδων μέτρησης των ταχυτήτων των ρευστών. Η πρωτοπορία ήρθε με τη χρήση των λέιζερ, οι οποίοι παρείχαν έναν πιο ακριβή και ακριβή τρόπο μέτρησης των ταχυτήτων. Το PIV (Particle Image Velocimetry) εμφανίστηκε στη δεκαετία του 1980 ως μια σημαντική τεχνική για τη μέτρηση των ταχυτήτων των ρευστών.

Ανάπτυξη της μεθόδου PIV:

Η τεχνική PIV (Particle Image Velocimetry) έχει υποστεί σημαντική ανάπτυξη και εξέλιξη από την ίδρυσή της. Με την εισαγωγή των ψηφιακών φωτογραφικών μηχανών, η δυνατότητα λήψης εικόνων υψηλής ανάλυσης και υψηλής ταχύτητας άνοιξε νέους ορίζοντες για την PIV. Η

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – [Τομέας Ενέργειας Αεροναυτικής και

συνεχής εξέλιξη του PIV περιλαμβάνει την εισαγωγή νέων τεχνικών και τη βελτίωση του εξοπλισμού και του λογισμικού. Παραδείγματα αυτών των βελτιώσεων περιλαμβάνουν τη χρήση συστημάτων στερεοφωνικής απεικόνισης για μεγαλύτερη ακρίβεια, την ανάπτυξη νέων αλγορίθμων ανίχνευσης σωματιδίων και τεχνικών ανάλυσης εικόνας, καθώς και την αυτοματοποίηση της διαδικασίας μέτρησης.

Εφαρμογές του PIV:

Η τεχνική PIV έχει εφαρμογές σε πολλά πεδία της επιστήμης και της τεχνολογίας. Στην αεροδυναμική, το PIV χρησιμοποιείται για τη μέτρηση των ταχυτήτων των αεροσκαφών, των εκροών από κινητήρες αεροσκαφών και των αεροδυναμικών συστημάτων. Στην αυτοκινητοβιομηχανία, το PIV χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της ροής αέρα γύρω από τα οχήματα και των αεροδυναμικών αλληλεπιδράσεων μεταξύ των οχημάτων και του περιβάλλοντος. Επιπλέον, το PIV χρησιμοποιείται σε περιβαλλοντικές μελέτες, όπως η μέτρηση της ροής των υδάτων σε ποτάμια και ωκεανούς, και σε εφαρμογές υγείας, όπως η παρακολούθηση της κυκλοφορίας του αίματος στον ανθρώπινο οργανισμό. Επίσης, η μέθοδος PIV χρησιμοποιείται στη μελέτη της δυναμικής των ρευστών σε διάφορες εφαρμογές, όπως η μεταφορά θερμότητας σε πολλαπλούς τομείς, η ανάπτυξη φαρμάκων και η βελτιστοποίηση διεργασιών παραγωγής. Συνοψίζοντας, το Particle Image Velocimetry (PIV) αποτελεί μια ισχυρή τεχνική μέτρησης της ταχύτητας των ρευστών που έχει εξελιχθεί σημαντικά από την αρχική της ανάπτυξη στις αρχές της δεκαετίας του 1980. Από την αρχική της εφαρμογή στην αεροδυναμική, έχει επεκταθεί σε πολλά πεδία της επιστήμης και της τεχνολογίας, παρέχοντας ανεκτίμητες πληροφορίες για τη ροή των ρευστών και τη δυναμική των ρευστών σε ποικίλες εφαρμογές. Οι συνεχείς βελτιώσεις στον εξοπλισμό και το λογισμικό του PIV έχουν αυξήσει την ακρίβεια και την αξιοπιστία των μετρήσεων, και έχουν ανοίξει νέους ορίζοντες στην έρευνα και τις εφαρμογές της τεχνικής.

Η ιστορική εξέλιξη της Particle Image Velocimetry (PIV) αποτελεί μια συναρπαστική διαδρομή στην επιστήμη και την τεχνολογία. Από τις αρχές της δεκαετίας του 1980, όταν Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – [Τομέας Ενέργειας Αεροναυτικής και

πρωτοεισήχθη ως μια καινοτόμος μέθοδος μέτρησης της ταχύτητας των ρευστών, έχει διανύσει έναν δρόμο γεμάτο προκλήσεις, βελτιώσεις και εφαρμογές.

Η αρχική ανάπτυξη της PIV ξεκίνησε από τον ερευνητή Adrian Elhajj στα τέλη της δεκαετίας του 1970, με τη χρήση της φωτογράφισης εικόνων για τον υπολογισμό της ταχύτητας των σωματιδίων σε ένα ρευστό. Η πρώτη εφαρμογή της PIV ήταν στην αεροδυναμική, όπου χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση των αεροδυναμικών φορτίων πάνω σε αεροσκάφη.

Η εξέλιξη της PIV συνεχίστηκε με την ανάπτυξη νέων τεχνικών και βελτιώσεων στον εξοπλισμό και το λογισμικό της. Η χρήση ψηφιακών καμερών και της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας επέτρεψε την ακριβέστερη και πιο αξιόπιστη μέτρηση των ρευστών. Το λογισμικό εξελίχθηκε γρήγορα, προσφέροντας προηγμένες αλγοριθμικές μεθόδους για τον αυτόματο υπολογισμό των ταχυτήτων, τον εντοπισμό των σωματιδίων και την ανάλυση των αποτελεσμάτων.

Στη δεκαετία του 1990, η PIV έγινε πιο προσβάσιμη και ευρέως χρησιμοποιούμενη σε ποικίλους τομείς της επιστήμης και της τεχνολογίας. Χρησιμοποιήθηκε σε αεροναυτική, αυτοκινητοβιομηχανία, ενεργειακή τεχνολογία, θαλάσσια τεχνολογία, ιατρική, βιοτεχνολογία και πολλούς άλλους τομείς της επιστήμης και της τεχνολογίας.

Επίσης, η PIV έχει επεκταθεί σε διάφορες μορφές της, όπως η Stereo PIV, η Micro PIV και η μέτρηση PIV με σωματίδια με μικρότερο μέγεθος, επιτρέποντας τη μέτρηση της ταχύτητας σε πιο ακριβείς κλίμακες και εφαρμογές, όπως η διερεύνηση της ροής σε μικρούς αγωγούς, τα κύτταρα του ανθρώπινου σώματος και τα περιβάλλοντα των νανοσωματιδίων.

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι η PIV έχει αναπτυχθεί και χρησιμοποιηθεί σε πολλούς επιστημονικούς και τεχνολογικούς τομείς σε όλο τον κόσμο, συμβάλλοντας στην πρόοδο της επιστήμης, της τεχνολογίας και της βιομηχανίας. Η συνεχής εξέλιξη της τεχνολογίας PIV ανοίγει νέους ορίζοντες στη μελέτη των ρευστών, επιτρέποντας προηγμένες μετρήσεις και αποτελεί μία σημαντική τεχνική μέτρησης της ταχύτητας των ρευστών, που έχει εξελιχθεί δραματικά κατά τη διάρκεια της ιστορίας της. Από τις πρώτες αρχές της που βασίζονταν στην αναλογική φωτογραφία και τη χρήση φιλμ, η PIV έχει προχωρήσει σε ψηφιακές μεθόδους με τη χρήση ψηφιακών καμερών και επεξεργασίας εικόνας, καθιστώντας την πιο ακριβή, γρήγορη και ευέλικτη. Η ανάπτυξη της

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – [Τομέας Ενέργειας Αεροναυτικής και

PIV έχει επιτρέψει τη χρήση της σε ποικίλους τομείς, όπως η αεροδυναμική, η υδροδυναμική, η μηχανική των ρευστών, η βιοϊατρική, η περιβαλλοντική επιστήμη, και άλλους. Έχει διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην κατανόηση της ροής των ρευστών, τη βελτίωση της απόδοσης των αεροδυναμικών σχεδίων, τη βελτίωση της ασφάλειας και της απόδοσης των οχημάτων, την ανάπτυξη νέων φαρμάκων και θεραπειών, και την καλύτερη προστασία του περιβάλλον.

3.0 ΘΕΩΡΙΑ ΚΑΥΣΗΣ ΚΑΙ ΧΡΗΣΙΜΟΙ ΝΟΜΟΙ

3.1 ΒΑΣΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΚΑΥΣΗΣ

Σε αυτό το υποκεφάλαιο παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία της θεωρίας της καύσης με σκοπό να γίνει κατανοητή η φυσικομαθηματική θεώρηση των φαινομένων που διέπουν την διεργασία της καύσης.

Οι κυριότερες ορολογίες που χρησιμοποιούνται στα προβλήματα καύσης είναι οι ακόλουθες:

1. **Καύση (Combustion):** Η χημική αντίδραση κατά τη διάρκεια της οποίας ένα καύσιμο οξειδώνεται και απελευθερώνεται μια μεγάλη ποσότητα θερμότητας. Το οξειδωτικό μέσο που χρησιμοποιείται περισσότερο στις διεργασίες καύσης είναι ο αέρας.
2. **Καύσιμο (Fuel):** Κάθε ουσία η οποία μπορεί να καεί και να απελευθερώσει σημαντικό ποσό ενέργειας.
3. **Φλόγα (Flame):** Ένα χημικά αντιδρών σύστημα, ικανό να διαδίδεται μέσα από ένα κατάλληλο συνεχές μέσο. Η φλόγα εκπέμπει έντονο φως (φωτόνια με συχνότητα που αντιστοιχεί στο ορατό φάσμα) ως αποτέλεσμα της εκλυόμενης θερμότητας, η οποία προκύπτει από τις χημικές αντιδράσεις.
4. **Μέτωπο φλόγας (Flame front):** Το όριο ή η μπροστινή επιφάνεια της φλόγας, η οποία διαχωρίζει το καμένο από το άκαυστο μείγμα. Στη γενική πρακτική, το μέτωπο (ή ζώνη) της φλόγας λέγεται και κύμα καύσης ή απλά φλόγα.
5. **Έναυση (Ignition):** Η πρόσδοση ποσού ενέργειας για την ενεργοποίηση της χημικής αντίδρασης της καύσης (π.χ. δημιουργία σπινθήρα με αναφλεκτήρα).

6. **Απόσβεση (Blow-off):** Η διακοπή της φλόγας ως αποτέλεσμα της διακοπής των χημικών αντιδράσεων.
7. **Σταθεροποίηση φλόγας (Flame stabilization):** Η διατήρηση του κύματος καύσης σε μια σταθερή θέση. Σε μια ευσταθή φλόγα μπορεί να υπάρχουν τοπικές αποσβέσεις (φλογίδια που ανάβουν και σβήνουν συνεχώς ανάλογα με τις τοπικές συνθήκες του μείγματος), αλλά όχι ολική απόσβεση.

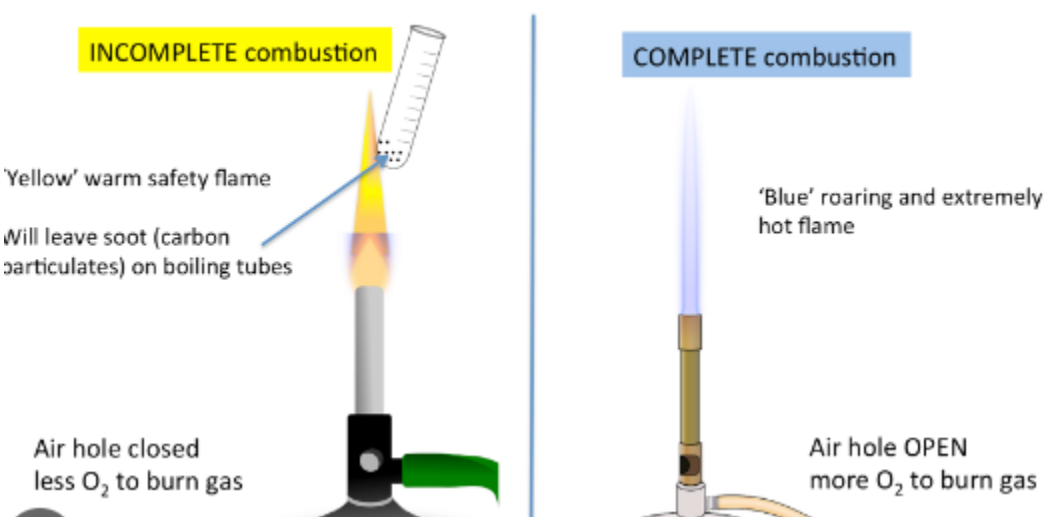
Η μελέτη της καύσης απαιτεί τον συνδυασμό ενός ευρέος φάσματος επιστημονικών πεδίων, όπως η θερμοδυναμική, η χημική κινητική, η ρευστομηχανική και τα φαινόμενα μεταφοράς.

1. **Θερμοδυναμική:** Υπολογισμός των ενεργειακών μεταβολών μεταξύ καταστάσεων ισορροπίας.
2. **Χημική κινητική:** Υπολογισμός του μηχανισμού και του ρυθμού με τον οποίο εξελίσσεται μια χημική αντίδραση.
3. **Ρευστομηχανική:** Περιγραφή του ροϊκού πεδίου.
4. **Φαινόμενα μεταφοράς:** Μελέτη της μεταφοράς θερμότητας (αγωγή, συναγωγή, ακτινοβολία), μάζας (διάχυση, συναγωγή) και ορμής (συνεκτικότητα, τύρβη).

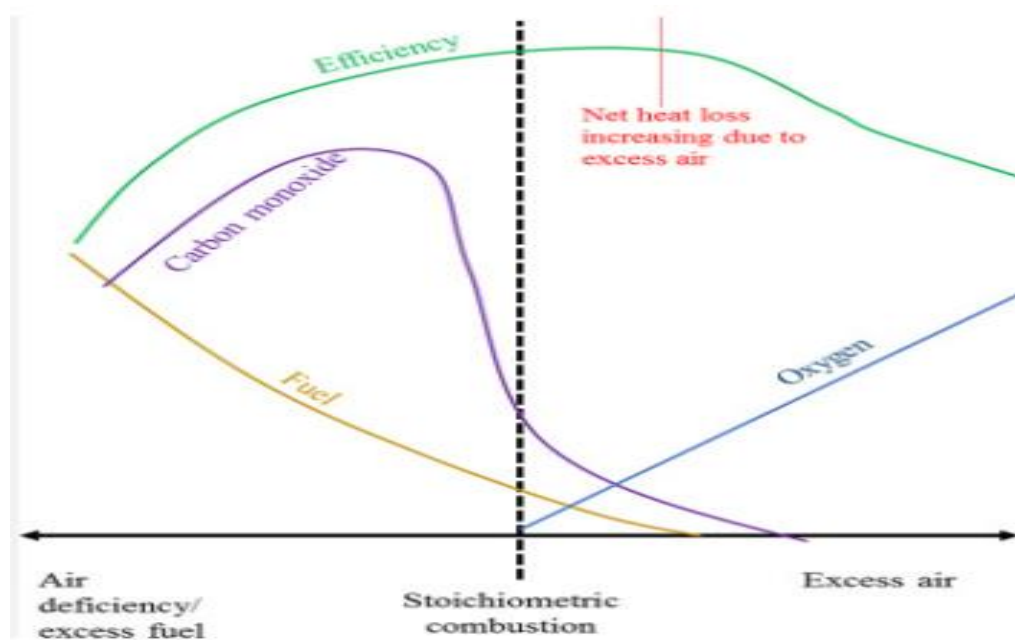
Τα καύσιμα, σε ατμοσφαιρικές συνθήκες δεν καίγονται από μόνα τους. Για να καούν χρειάζεται να θερμανθούν σε αρκετά υψηλές θερμοκρασίες όπου τα μόρια του καυσίμου σπάνε σε στοιχειώδη κομμάτια που αποκαλούνται ρίζες (radicals). Η ενέργεια που δίνεται για την παραγωγή των ριζών ονομάζεται ενέργεια ενεργοποίησης (activation energy). Αυτές οι ρίζες είναι γενικά ασταθείς σε ατμοσφαιρικές συνθήκες και επιστρέφουν πάλι στην αρχική τους κατάσταση (υδρογονάνθρακας) με την απουσία οξυγόνου (O_2). Βέβαια, τέτοιες ρίζες έχουν ισχυρή συνάφεια

με το O_2 με το οποίο αντιδρούν γρήγορα για τον σχηματισμό CO_2 και H_2O απελευθερώνοντας θερμότητα.

1. **Πλήρης καύση (“Complete combustion”)**: Αντιδρά όλη η ποσότητα του υδρογονάνθρακα και έχουμε παραγωγή CO_2 και H_2O .
2. **Ατελής καύση (“Incomplete combustion”)**: Δεν έχουμε ολική αντίδραση του υδρογονάνθρακα και ως εκ τούτου τα προϊόντα της καύσης να εμπεριέχουν ποσότητα άκαυστου καυσίμου, όπως C , H_2 , CO , ή OH . Τα βασικότερα αίτια της ατελούς καύσης είναι η έλλειψη O_2 και η ανεπαρκής ανάμειξη κατά τη διάρκεια του περιορισμένου χρόνου επαφής ανάμεσα στο καύσιμο και το οξυγόνο.
3. **Στοιχειομετρική καύση (“Stoichiometric combustion”)**: Η πλήρης καύση στην οποία δεν υπάρχει καθόλου ελεύθερο O_2 στα προϊόντα, δηλαδή το καύσιμο καίγεται πλήρως με την ελάχιστη ποσότητα αέρα που απαιτείται.



Εικόνα 2 Τέλεια και Ατελής καύση



Εικόνα 3 Στοιχειομετρική καύση

3.2 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΚΑΥΣΗΣ

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΤΗΣ ΚΑΥΣΗΣ	ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ
Χρονική εξάρτηση	Μόνιμη, μη μόνιμη
Χωρική εξάρτηση	Μονό-, Δι-, Τρι-διάστατο
Κατάσταση ανάμιξης των αρχικών αντιδρώντων	Προαναμιγμένα Μη προαναμιγμένα Μερικώς προαναμιγμένα
Συνθήκες ροής	Στρωτή, Τυρβώδης ροή
Φάσεις των αντιδρώντων	Μόνο-, Πολύ-φασικό

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – [Τομέας Ενέργειας Αεροναυτικής και

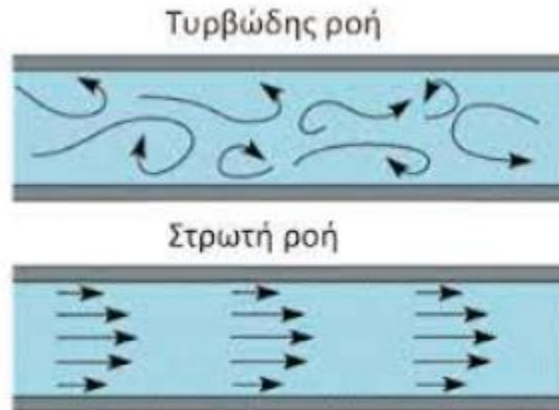
Τοπολογία των αντιδρώντων	Ομοιογενή, Ετερογενή
Ρυθμός αντίδρασης	Χημική ισορροπία Πεπερασμένος ρυθμός αντίδρασης-Χημική κινητική
Κατάσταση μετάδοσης θερμότητας	Φυσική-Εξαναγκασμένη
Επίδραση συμπιεστότητας	Ασυμπίεστο-Συμπίεστό
Ταχύτητα του κύματος καύσης	Υποηχητική Υπερηχητική

Πίνακας 1 Βασική ταξινόμηση φαινομένων καύσης

- **Στρωτή ροή (Laminar flow):** Στη στρωτή ροή γίνεται χρήση της παραδοχής ότι, το ρευστό αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό πολύ λεπτών στρωμάτων τα οποία ολισθαίνουν μεταξύ τους. Τα γειτονικά στρώματα του ρευστού σχηματίζουν λείες γραμμές ροής κατά την διάρκεια της κίνησης τους, χωρίς να δημιουργείται ανάμειξη μακροσκοπικής κλίμακας ανάμεσα σε δύο γειτονικά στρώματα. Η στρωτή ροή εντοπίζεται όταν οι δυνάμεις ιξώδους υπερνικούν την επίδραση των δυνάμεων αδράνειας.
- **Τυρβώδης ροή (Turbulent flow):** Στην τυρβώδη ροή τα σωματίδια του ρευστού έχουν ακανόνιστη, σχεδόν τυχαία, διακυμαινόμενη κίνηση με αποτέλεσμα η ταχύτητα σε κάθε σημείο του ρευστού να μεταβάλλεται στο χρόνο κατά μέτρο και διεύθυνση. Η δημιουργία της τύρβης προκαλείται από μια αστάθεια στην ροή. Καθώς αυξάνεται η ταχύτητα οι ιξώδεις δυνάμεις δεν αυξάνουν κατά τον ίδιο ρυθμό όσο οι δυνάμεις αδράνειας και δεν είναι σε κατάσταση να κατασιγάσουν τις διαταραχές, οι οποίες αυξάνονται και διασπών πλήρως τη ροή δημιουργώντας έντονη μακροσκοπική ανάμειξη. Ο αριθμός Reynolds είναι το αδιάστατο κλάσμα των δυνάμεων αδράνειας προς τις δυνάμεις ιξώδους και έτσι αποτελεί χαρακτηριστικό μέτρο για τη μετάβαση της ροής από στρωτή σε τυρβώδη.

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot L}{\mu} \quad (3.1)$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα του ρευστού, V η ροϊκή ταχύτητα, L ένα χαρακτηριστικό μήκος και μ το δυναμικό ιξώδες του ρευστού.



Εικόνα 4 Στρωτή και Τυρβώδης ροή σε σωλήνα

- **Προαναμιγμένη καύση (Premixed combustion):** Οι αντιδρώντες ουσίες έχουν αναμειχθεί πλήρως προτού αρχίσουν τις χημικές αντιδράσεις. Η εξέλιξη του φαινομένου της καύσης επηρεάζεται κατά βάση, από τη χημική κινητική (ρυθμό χημικών αντιδράσεων) και ρυθμίζεται από τη θερμοκρασία και τις τοπικές συγκεντρώσεις των συστατικών.
- **Μη-Προαναμιγμένη καύση (Non-Premixed combustion):** Τα αντιδρώντα είναι αρχικά διαχωρισμένα και προσέρχονται σε έναν κοινό χώρο όπου λαμβάνει χώρα η καύση, μέσα από διεργασίες ανάμειξης του καυσίμου με το οξειδωτικό. Η καύση αυτής της περίπτωσης καλείται και καύση διάχυσης (diffusion combustion), μιας και την πορεία του φαινομένου την καθορίζει ο ρυθμός διάχυσης θερμότητας, μάζας και ορμής. Σε αυτό το σημείο η καύση λαμβάνει χώρα στις διεπιφάνειες των δύο ρευμάτων των αντιδρώντων συστατικών.
- **Μερικώς Προαναμιγμένη καύση (Partial Premixed combustion):** Τα αντιδρώντα είναι μερικώς προαναμιγμένα πριν το ξεκίνημα των χημικών αντιδράσεων, δηλαδή

παρατηρούμε στο μείγμα ζώνες που είναι πλούσιες αλλά και φτωχές σε καύσιμο, χωρίς να αποκλείουμε το γεγονός πως κάποιες από αυτές να βρίσκονται εκτός των ορίων ευφλεκτότητας. Μια υποκατηγορία της μερικώς προαναμιγμένης καύσης είναι η καύση διαστρωμάτωσης (“stratified combustion”), όπου όλες οι περιοχές του αντιδρώντος μείγματος πρέπει να είναι οπωσδήποτε εντός των ορίων ευφλεκτότητας.



(a) Laminar diffusion flame



(b) Turbulent diffusion flame

Εικόνα 5 Φλόγες διάχυσης



(a) Laminar premixed flame



(b) Turbulent premixed flame

Εικόνα 6 Φλόγες προανάμειξης

3.3 ΠΡΩΤΟΣ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΝΟΜΟΣ

Ο πρώτος νόμος της θερμοδυναμικής είναι στην πραγματικότητα μια έκφραση της αρχής διατήρησης της ενέργειας. Το ισοζύγιο ενέργειας για κάθε σύστημα που υπόκειται σε μία οποιαδήποτε διεργασία γράφεται ως εξής:

$$E_{IN} - E_{OUT} = \frac{dE_{system}}{dt} \quad (3.2)$$

Όπου E_{IN} , E_{OUT} είναι ο ρυθμός μεταφοράς ενέργειας σε σχέση με τον χρόνο και το $\frac{dE_{system}}{dt}$ είναι ο ρυθμός μεταβολής ενέργειας για ολόκληρο το σύστημα.

Κατά τον χρόνο εκτέλεσης μιας διεργασίας σταθεροποιημένης ροής (steady flow process), το ρευστό ρέει μέσα στον όγκο ελέγχου με σταθερό ρυθμό και δεν υφίσταται χρονικές μεταβολές σε ένα συγκεκριμένο σημείο. Ως εκ τούτου, το ενεργειακό περιεχόμενο του όγκου ελέγχου διατηρείται σταθερό ($E_{IN}=E_{OUT}$) και γράφουμε την εξίσωση διατήρησης της ενέργειας ως:

$$\left(h + \frac{V^2}{2} + g \cdot z + q + w\right)_{IN} = \left(h + \frac{V^2}{2} + g \cdot z + q + w\right)_{OUT} \quad (3.4)$$

όπου h η ενθαλπία, V η ταχύτητα, g η επιτάχυνση της βαρύτητας, z το ύψος σε σχέση με ένα επίπεδο αναφοράς, q η θερμότητα και w το έργο. Οι μεταβλητές αυτές είναι εκφρασμένες ανά μονάδα μάζας και για αυτό τον λόγο τις γράφουμε με μικρά γράμματα. Οι δείκτες IN και OUT δείχνουν την εισροή και εκροή ενέργειας του όγκου ελέγχου.

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – [Τομέας Ενέργειας Αεροναυτικής και

Η ιδιότητα της ενθαλπίας ορίζεται μέσω της εξίσωσης:

$$h = u + P \cdot v \quad (3.5)$$

με u να είναι η εσωτερική ενέργεια, P η πίεση και v ο ειδικός όγκος του συστήματος. Η εσωτερική ενέργεια μας δείχνει την ενέργεια ενός μη ρέοντος ρευστού, ενώ αντίθετα η ενθαλπία μας δείχνει εκείνη ενός ρέοντος ρευστού. Οι μικροσκοπικές μορφές ενέργειας αποτελούνται από την:

- Χημική ενέργεια: Η ενέργεια των χημικών δεσμών των ατόμων του συστήματος.
- Αισθητή ενέργεια: Η ενέργεια που αντιστοιχεί στις κινητικές ενέργειες των μορίων που δημιουργούν το σύστημα.
- Λανθάνουσα ενέργεια: Η ενέργεια που σχετίζεται με τη φάση του συστήματος.
- Πυρηνική ενέργεια: Η ενέργεια που προέρχεται από τους ισχυρούς δεσμούς των σωματιδίων εντός του πυρήνα των ατόμων του συστήματος.

Η εξίσωση του ισοζυγίου ενέργειας μπορεί να εφαρμοσθεί τόσο σε αντιδρώντα όσο και σε μη αντιδρώντα συστήματα. Παρ' όλα αυτά, τα χημικώς αντιδρώντα συστήματα εμπεριέχουν μεταβολές στη χημική τους ενέργεια και για το λόγο αυτό είναι καταλληλότερο να ξαναγραφεί η εξίσωση του ενεργειακού ισοζυγίου έτσι ώστε να εκφράζονται ρητά οι μεταβολές των χημικών ενεργειών. Για συστήματα σταθεροποιημένης ροής, που δεν περιλαμβάνουν αλληλεπιδράσεις έργου, αγνοώντας τη μεταβολή της κινητικής και της δυναμικής ενέργειας, ο πρώτος νόμος λαμβάνει την απλοποιημένη μορφή:

$$Q = H_{PROD} - H_{REACT} \quad (3.6)$$

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – [Τομέας Ενέργειας Αεροναυτικής και

3.4 ΔΕΥΤΕΡΟΣ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΝΟΜΟΣ

Ο δεύτερος νόμος της θερμοδυναμικής είναι εκείνος που μας δείχνει την κατεύθυνση στην οποία διεκπεραιώνεται μια διεργασία και η εξίσωση με την οποία δίνουμε την μαθηματική του έκφραση είναι η ανισότητα Clausius:

$$ds \geq \frac{\delta q}{T} \quad (3.7)$$

Όπου είναι η εντροπία ανά μονάδα μάζας ($\frac{kJ}{kg \cdot K}$) και T η απόλυτη θερμοκρασία (K). Η περίπτωση που έχουμε ισότητα ισχύει μόνο για αντιστρεπτές μεταβολές, δηλαδή για εκείνες τις μεταβολές όπου μετά την ολοκλήρωση τους σύστημα και περιβάλλον μπορούν να επανέλθουν άμεσα στην πρότερη τους κατάσταση. Θα πρέπει να τονιστεί ότι, κάποιο σύστημα μπορεί να έλθει στην πρότερη του κατάσταση με το να ακολουθήσει μια οποιαδήποτε διεργασία, χωρίς να έχει ιδιαίτερη σημασία αν αυτή είναι αντιστρεπτή. Αντίθετα στην περίπτωση των αντιστρεπτών διεργασιών, αυτή η επαναφορά γίνεται δίχως να αφήσει κάποιο ίχνος στο περιβάλλον. Μερικά παραδείγματα μη αντιστρεπτότητας είναι η τριβή, η ανάμειξη ρευστών, η μεταφορά θερμότητας διαμέσου μιας πεπερασμένης θερμοκρασιακής διαφοράς, οι χημικές αντιδράσεις κ.α.

Η εντροπία (S) μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα ποσοτικό μέτρο της μικροσκοπικής αταξίας ενός συστήματος. Το μέγεθος αυτό έχει πολλούς εναλλακτικούς ορισμούς και αποτελεί μια χρήσιμη θερμοδυναμική εκτατική ιδιότητα.

4.0 ΤΥΡΒΗ ΚΑΙ ΑΝΑΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ

4.1 Ο ΡΟΛΟΣ ΤΗΣ ΤΥΡΒΗΣ ΣΤΗΝ ΚΑΥΣΗ

Η τυρβώδης καύση παρατηρείται στα περισσότερα πρακτικά συστήματα καύσης, όπως στους πυραύλους, στους κινητήρες εσωτερικής καύσης ή στους κινητήρες αεροσκαφών, στους βιομηχανικούς καυστήρες και στους κλιβάνους κ.λπ. Ως εκ τούτου, η μελέτη και η μοντελοποίηση των διεργασιών τυρβώδους καύσης είναι ένα σημαντικό ζήτημα για την ανάπτυξη και τη βελτίωση των πρακτικών συστημάτων (δηλαδή για την αύξηση της απόδοσης και τη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου και του σχηματισμού ρύπων).

Η τυρβώδης καύση προκύπτει από την αμφίδρομη αλληλεπίδραση της χημείας και της τύρβης. Όταν μια φλόγα αλληλεπιδρά με μια τυρβώδη ροή, η τύρβη τροποποιείται από την καύση λόγω των ισχυρών επιταχύνσεων της ροής μέσω του μετώπου της φλόγας που προκαλούνται από την έκλυση θερμότητας και λόγω των μεγάλων μεταβολών του κινηματικού ιξώδους που συνδέονται με τις μεταβολές της θερμοκρασίας. Αυτός ο μηχανισμός δημιουργεί τύρβη, η οποία ονομάζεται τύρβη που δημιουργείται από τη φλόγα. Από την άλλη πλευρά, η τύρβη μεταβάλλει τη δομή της φλόγας, η οποία μπορεί να ενισχύσει τη χημική αντίδραση αλλά και, σε ακραίες περιπτώσεις, να την αναστείλει πλήρως, οδηγώντας σε σβήσιμο της φλόγας.

4.2 ΚΛΙΜΑΚΕΣ ΤΗΣ ΤΥΡΒΗΣ

Η ιδέα έχει ως εξής οι μεγαλύτερες δίνες, οι οποίες συχνά δημιουργούνται από αδρανειακές αστάθειες στη μέση ροή, υπόκεινται και οι ίδιες σε αδρανειακές δυνάμεις και γρήγορα "διαλύονται" και μεταβιβάζουν την ενέργειά τους σε ακόμη μικρότερους στροβίλους. Στην πραγματικότητα, η διάρκεια ζωής ενός τυπικού στροβίλου είναι μάλλον σύντομη, της τάξης του λεγόμενου χρόνου εναλλαγής, $1/u$. Φυσικά, οι μικρότερες δίνες είναι και οι ίδιες παροδικές και αυτές, με τη σειρά τους, μεταβιβάζουν την ενέργειά τους σε ακόμη μικρότερες δομές, και ούτω καθεξής. Έτσι, σε κάθε χρονική στιγμή, υπάρχει ένας συνεχής καταρράκτης ενέργειας από τη

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – [Τομέας Ενέργειας Αεροναυτικής και

μεγάλη κλίμακα προς τα κάτω στη μικρή. Είναι κρίσιμο να ειπωθεί, ότι το ιζώδες δεν παίζει κανένα ρόλο σε αυτόν τον ενεργειακό καταρράκτη. Δηλαδή, εφόσον το $Re = (\rho u L) / \nu$ είναι μεγάλο, οι ιζώδεις τάσεις που δρουν στις μεγάλες δίνες είναι αμελητέες. Αυτό ισχύει και για τους απογόνους τους μιας και ολόκληρη η διαδικασία οδηγείται ουσιαστικά από αδρανειακές δυνάμεις. Ωστόσο, ο καταρράκτης σταματάει όταν το μέγεθος της δίνης γίνεται τόσο μικρό ώστε το Re , με βάση το μέγεθος των μικρότερων στροβίλων, να είναι της τάξης της μονάδας. Σε αυτό το σημείο οι ιζώδεις δυνάμεις γίνονται σημαντικές και η διάχυση αρχίζει να γίνεται σημαντική. Έτσι έχουμε μια εικόνα μεγάλων στροβίλων που δημιουργούνται συνεχώς από τη μέση ροή και αυτές οι δίνες μεταβιβάζουν την ενέργειά τους σε μικρότερες, οι οποίες με τη σειρά τους μεταβιβάζουν ενέργεια σε ακόμα πιο μικροσκοπικές δομές. Η ενέργεια καταστρέφεται μόνο στα τελικά στάδια αυτής της διαδικασίας, όταν οι δομές είναι τόσο μικροσκοπικές ώστε το Re , με βάση τις δομές μικρής κλίμακας, να είναι της τάξης της μονάδας. Υπό αυτή την έννοια, το ιζώδες παίζει μάλλον παθητικό ρόλο, απορροφώντας την όποια ενέργεια κατεβαίνει από πάνω.



Εικόνα 7 Ενεργειακός καταρράκτης της τύρβης

Η ίδια η τύρβη είναι ίσως το πιο πολύπλοκο φαινόμενο στη μη αντιδρώσα ρευστομηχανική. Εμπλέκονται διάφορες κλίμακες χρόνου και μήκους και η δομή και η περιγραφή της τύρβης παραμένουν ανοικτά ερωτήματα. Δεδομένης της πολύπλοκης φύσης της τύρβης, ο στατιστικός μέσος όρος εμφανίζεται συχνά ως κατάλληλο εργαλείο για την περιγραφή των τυρβωδών ροών. Η τύρβη εμφανίζεται όταν οι ιξώδεις δυνάμεις διάχυσης κυριαρχούνται από δυνάμεις αδράνειας και μπορεί να χαρακτηριστεί από μέσες και κυμαινόμενες τοπικές ιδιότητες. Δεδομένης της στατιστικής μέσης τιμής ($\bar{f}$) και των διακυμαινόμενων τιμών (f'), κάθε ιδιότητα (f) μπορεί να χαρακτηριστεί ως το άθροισμα της μέσης και της διακυμαινόμενης συνεισφοράς.

$$f = \bar{f} + f' \quad (4.1)$$

Η ισχύς της τύρβης χαρακτηρίζεται γενικά από την ένταση της τύρβης I , η οποία είναι ο λόγος μεταξύ της μέσης τετραγωνικής ρίζας των διακυμάνσεων f' και της μέσης τιμής $\bar{f}$:

$$I = \frac{\sqrt{f'^2}}{\bar{f}} \quad (4.2)$$

Παρόλα αυτά, η ένταση της τύρβης δεν είναι επαρκής παράμετρος για τον χαρακτηρισμό της τύρβης. Οι μεταβολές του πεδίου ταχύτητας στο χώρο και στο χρόνο, οι οποίες δημιουργούν στροβιλισμούς ποικίλων μεγεθών, γνωστούς ως δίνες, είναι το κύριο χαρακτηριστικό των τυρβωδών ροών. Αυτές οι δίνες δημιουργούν την αστάθεια και την ακανόνιστη ροή καθώς αλληλεπιδρούν μεταξύ τους μέσω μιας διαδικασίας καταρράκτη, όπου μεγάλες κλίμακες διασπώνται σε μικρές δίνες. Η διαδικασία αυτή περιγράφεται από τη θεωρία Kolmogorov και επαναλαμβάνεται μέχρι τις μικρότερες κλίμακες, όπου τα ιξώδη φαινόμενα καθίστανται κυρίαρχα. Συνεπώς, η τύρβη είναι ένα φαινόμενο που μετατρέπει την κινητική ενέργεια, από τις μεγαλύτερες κλίμακες, σε θερμότητα, στις μικρότερες κλίμακες.

Μια σημαντική παράμετρος για τον χαρακτηρισμό της τύρβης είναι το πώς κατανέμεται η ενέργεια της τύρβης στις διάφορες κλίμακες μήκους που υπάρχουν στο πεδίο ροής και ποιες κλίμακες μήκους μεταφέρουν αρκετή ενέργεια ώστε να αλληλεπιδρούν με το μέτωπο της φλόγας. Οι τυρβώδεις διακυμάνσεις συνδέονται με διάφορες κλίμακες που κυμαίνονται από τη

μεγαλύτερη, την integral length scale lt , έως τη μικρότερη, την Kolmogorov length scale nk . Για κάθε κλίμακα τύρβης εισάγεται ένας αριθμός Reynolds $Re(r)$ ως εξής:

$$Re(r) = \frac{u'(r) \cdot r}{\nu} \quad (4.3)$$

όπου $u'(r)$ είναι η χαρακτηριστική ταχύτητα της κίνησης μεγέθους r και ν είναι το κινηματικό ιξώδες της ροής. Επίσης, μια τυρβώδης χρονική κλίμακα μπορεί να οριστεί ως εξής:

$$\tau(r) = \frac{r}{u'(r)} \quad (4.4)$$

Δεδομένου ότι ο αριθμός Reynolds αντιπροσωπεύει τον λόγο των δυνάμεων αδράνειας προς τις ιξώδεις δυνάμεις, οι μεγαλύτερες κλίμακες σε μια τυρβώδη ροή ελέγχονται κυρίως από την αδράνεια και δεν επηρεάζονται από την ιξώδη διασπορά.

Στις τυρβώδεις ροές μπορούν να αναγνωριστούν τρεις διαφορετικές ζώνες:

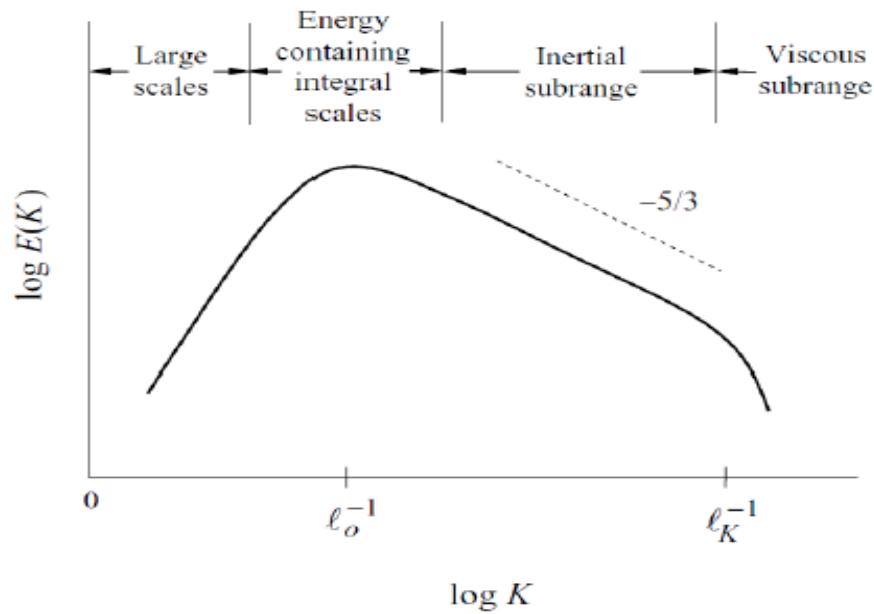
Integral zone (integral length scale): Αυτή η ζώνη χαρακτηρίζεται από τις χαμηλότερες συχνότητες και περιγράφει τις μεγάλες δίνες που μεταφέρουν την ενέργεια της τυρβώδους κίνησης. Αυτή η κλίμακα περιέχει επίσης τις μεγαλύτερες και πιο ενεργητικές δομές που σχετίζονται με την ολοκληρωτική κλίμακα μήκους, lt .

Ο ολοκληρωτικός αριθμός Reynolds δίνεται από:

$$Ret = Re(lt) = (u'(lt) \cdot lt) / \nu \quad (4.5)$$

Inertial zone (Taylor scale): Σε αυτή τη ζώνη, οι μεγάλες δίνες γίνονται ασταθείς και διασπώνται σε μικρότερες δίνες μέσω της διαδικασίας "καταρράκτη". Επίσης, τεντώνονται και παραμορφώνονται μέσω διατμητικών δυνάμεων και αλληλεπιδράσεων με μεγαλύτερες δίνες. Αυτές οι πολύπλοκες διαδικασίες αλληλεπίδρασης είναι τρισδιάστατες και δεν ανιχνεύεται διάσπαση των στροβίλων, ενώ η ενέργεια μεταφέρεται από τις μεγαλύτερες στις μικρότερες δομές ακολουθώντας έναν νόμο $k^{-5/3}$ για ισότροπη τύρβη. Αυτή η ενδιάμεση κλίμακα Taylor έχει αποδειχθεί ότι είναι δευτερεύουσας σημασίας στην περιγραφή της τυρβώδους καύσης.

Inertial zone (Taylor scale): Η ζώνη αυτή χαρακτηρίζεται από τις υψηλότερες συχνότητες και περιέχει τις μικρότερες δομές που ονομάζονται κλίμακες Kolmogorov. Τα ιξώδη φαινόμενα γίνονται κυρίαρχα και η ενέργεια μετατρέπεται σε θερμότητα λόγω του κινηματικού ιξώδους ν .



Εικόνα 8 Εύρος κινητικής ενέργειας τύρβης σαν συνάρτηση του κυματαριθμού K

Η ενέργεια από τις μεγάλες κλίμακες (integral length scale) ρέει προς τις μικρότερες κλίμακες μέσω του ενεργειακού καταρράκτη Kolmogorov. Αυτή η ροή ενέργειας είναι σταθερή μεταξύ των κλιμάκων για ισότροπη τύρβη και δίνεται από τη μετατροπή ενέργειας ε ως εξής.

$$\varepsilon = \frac{w'(r)^3}{r} \quad (4.6)$$

Ο ρυθμός διάχυσης της κινητικής ενέργειας μπορεί επίσης να εκφραστεί ανά μονάδα μάζας ως εξής:

$$\varepsilon = 2 \cdot \nu \cdot S_{ij} \cdot S_{ij} \quad (4.7)$$

Όπου S_{ij} είναι ο τανυστής παραμόρφωσης $S_{ij} = \frac{1}{2}[(\partial u_i / \partial x_j) + (\partial u_j / \partial x_i)]$. Η έκφραση αυτή υποδηλώνει ότι η μετατροπή της ενέργειας εντός μιας τυρβώδους ροής συγκεντρώνεται στις δίνες κλίμακας Kolmogorov και ότι η μετατροπή λαμβάνει χώρα σε περιοχές στιγμιαίων κλίσεων ταχύτητας όπου η διατμητική τάση είναι μεγάλη.

Καθ' όλη τη διάρκεια του καταρράκτη ο αριθμός Reynolds $Re(r)$ μειώνεται σε τιμές κοντά στη μονάδα, όταν οι δυνάμεις αδράνειας και ιξώδους εξισορροπούνται. Αυτό το όριο καθορίζει τις μικρότερες κλίμακες τύρβης (Kolmogorov). Η κλίμακα μήκους n_k της κλίμακας Kolmogorov δίνεται από τη σχέση:

$$n_k = \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon}\right)^{1/4} \quad (4.8)$$

και αντιστοιχεί σε μοναδιαίο αριθμό Reynolds.

Επομένως, ο λόγος integral length scale l_t , προς την Kolmogorov length scale, n_k , που συγκρίνει τις μεγαλύτερες και τις μικρότερες στροβιλώδεις δίνες είναι:

$$l_t / n_k = R_{e_t}^{3/4} \quad (4.9)$$

4.3 ΤΥΡΒΩΔΗΣ ΠΡΟΑΝΑΜΕΜΕΙΓΜΕΝΗ ΚΑΥΣΗ

Η τυρβώδης προαναμεμειγμένη καύση χαρακτηρίζεται από τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των δινών της ροής που κυμαίνονται από την integral έως την κλίμακα Kolmogorov και του μετώπου της φλόγας. Τα χημικά φαινόμενα στο μέτωπο της φλόγας μπορούν να χαρακτηριστούν από μια χημική χρονική κλίμακα που ορίζεται ως:

$$\tau_c = \frac{\delta L^0}{S_{L,0}} \quad (4.10)$$

Όπου δL^0 είναι το πάχος της στρωτής φλόγας και $S_{L,0}$ είναι η ταχύτητα της στρωτής φλόγας. Το πάχος στρωτής φλόγας, δL^0 , μπορεί να εκτιμηθεί ως προς το δL για σταθερή θερμοχωρητικότητα και αριθμό Prandtl ως εξής: $\delta L^0 \approx 2\delta L \cdot (1 + \tau_T) \cdot 0.7$, όπου $\tau_T = \left(\frac{T_{ad}}{T_u}\right) - 1$ είναι η παράμετρος έκλυσης θερμότητας, T_{ad} είναι η αδιαβατική θερμοκρασία της φλόγας και T_u Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – [Τομέας Ενέργειας Αεροναυτικής και

είναι η θερμοκρασία των αντιδρώντων. δL είναι το πάχος Zel'dovich που περιγράφεται ως εξής: $\delta L \approx a_{m,u}/S_{L,0}$, όπου η θερμική διαχυτότητα, $a_{m,u}$ αναφέρεται στο άκαυστο μίγμα και $S_{L,0}$ είναι η ταχύτητα στρωτής φλόγας. Προκειμένου να περιγραφεί η αλληλεπίδραση της φλόγας με τις διάφορες τυρβώδεις δομές, έχουν εισαχθεί αριθμοί χωρίς διαστάσεις, όπως οι αριθμοί Damköhler και Karlovitz.

Ο αριθμός Damköhler εκφράζει το λόγο μεταξύ της ολοκληρωτικής χρονικής κλίμακας ($\tau_t = l_t/U'$) και της χημικής χρονικής κλίμακας και ορίζεται ως εξής:

$$Da = \frac{\tau_t}{\tau_c} = \frac{l_t/\delta L^0}{U'/S_{L,0}} \quad (4.11)$$

Επίσης το γινόμενο του αριθμού Reynolds επί τον αριθμό Damköhler περιγράφεται ως εξής:

$$Re_t \cdot Da = \left(l_t/\delta L^0\right)^2 \quad (4.12)$$

Για $Da \gg 1$ το μέτωπο της φλόγας είναι λεπτό και η εσωτερική δομή του δεν επηρεάζεται από τις τυρβώδεις κινήσεις που μόνο ρυτιδώνουν, τεντώνουν και συστέλλουν την επιφάνεια της φλόγας. Αυτό το καθεστώς φλόγας ή καθεστώς λεπτής ρυτιδωμένης φλόγας εμφανίζεται όταν οι τυρβώδεις κινήσεις είναι πολύ αργές για να επηρεάσουν τη δομή της φλόγας που προκύπτει από τον τυρβώδη χρόνο των κλιμάκων Kolmogorov τ_k που είναι μεγαλύτερος από τ_c . Ως εκ τούτου, η ζώνη αντίδρασης μπορεί να μοντελοποιηθεί με ένα στοιχείο στρωτής φλόγας γνωστό ως "flamelet".

Για το $Da \ll 1$ ο χημικός χρόνος είναι μεγαλύτερος από τους τυρβώδεις χρόνους και η τύρβη έχει μεγαλύτερο αντίκτυπο καθώς τα αντιδρώντα και τα προϊόντα αναμειγνύονται πριν από την αντίδραση. Ως εκ τούτου, ο συνολικός ρυθμός αντίδρασης ελέγχεται από τη χημεία.

Συνήθως συναντώνται και τα δύο καθεστώτα, καθώς η οξείδωση του καυσίμου στην περιοχή αντίδρασης συμβαίνει σε γρήγορους χημικούς χρόνους ($Da \gg 1$), ενώ ο σχηματισμός ρύπων χαρακτηρίζεται από βραδύτερους χρόνους αντίδρασης ($Da \ll 1$).

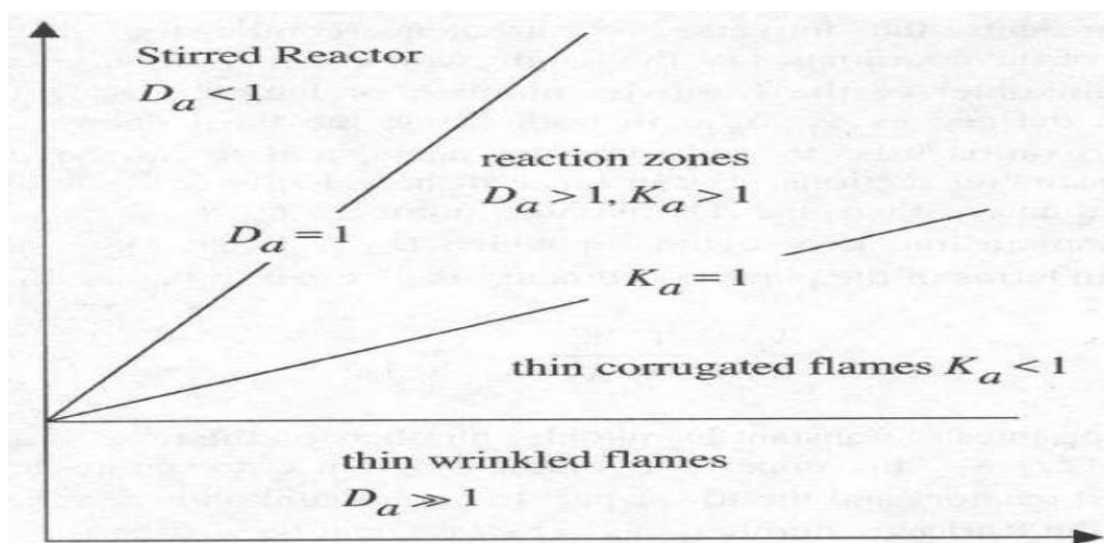
Ο αριθμός Karlovitz αντιστοιχεί στις μικρότερες δίνες (Kolmogorov) και εκφράζεται ως ο λόγος της χημικής χρονικής κλίμακας προς τη χρονική κλίμακα Kolmogorov ως εξής:

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – [Τομέας Ενέργειας Αεροναυτικής και

$$Ka = \frac{\tau_c}{\tau_k} = \frac{\delta L^0 U'}{nkSL,0} \quad (4.13)$$

Λαμβάνοντας υπόψη την έκφραση του Re_t της εξίσωσης 4.12 το Re_t μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$Re_t = D_a^2 \cdot K_a^2 \quad (4.14)$$



Εικόνα 9 Ταξινόμηση τυρβώδους φλόγας βάσει των αριθμών Damkohler και Karlovitz

Τυρβώδη συστήματα καύσης με προανάμιξη

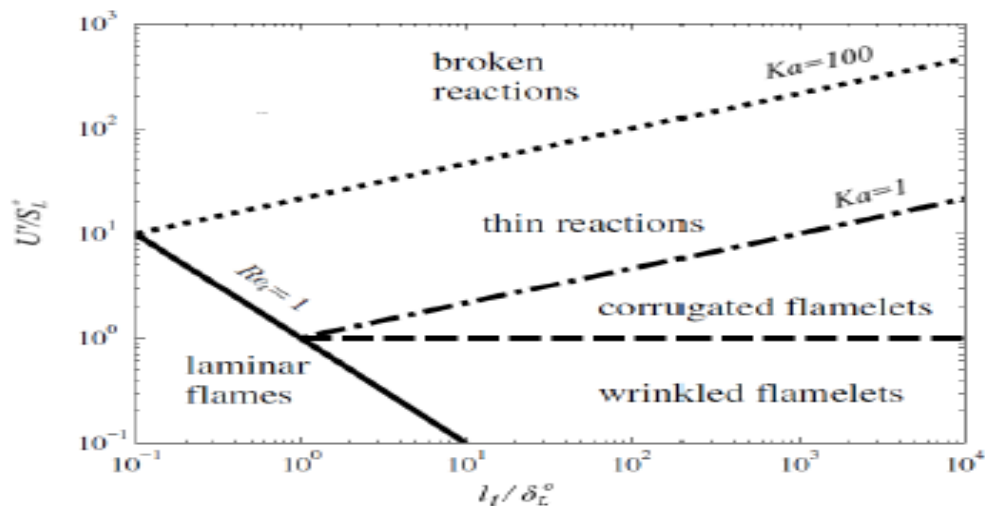
Τα διάφορα συστήματα καύσης είναι μοναδικά ως προς τον βαθμό στον οποίο το πεδίο ροής μπορεί να αλληλεπιδράσει με τη φλόγα, ο οποίος εξαρτάται από την τύρβη του πεδίου ροής, καθώς και από τη δομή και την ταχύτητα διάδοσης των στρωτών φλογών. Το σύστημα καύσης επηρεάζει έντονα τη φυσική που περιλαμβάνεται στη μοντελοποίηση και την ερμηνεία των πειραματικών δεδομένων που σχετίζονται με τη σταθεροποίηση της φλόγας. Σύμφωνα με την προσέγγιση Peters τα δύο κύρια ερωτήματα σχετικά με την αλληλεπίδραση της τύρβης της φλόγας είναι: αν οι διακυμάνσεις της ταχύτητας αρκετά μεγάλες ώστε να μετατοπίζουν το μέτωπο της φλόγας και αν είναι οι τυρβώδεις κλίμακες αρκετά μικρές ώστε να διαταράξουν τη δομή της

φλόγας. Τα χαρακτηριστικά των τυρβωδών φλογών προανάμιξης μπορούν να ταξινομηθούν σε γενικές γραμμές με βάση τη σχέση μεταξύ της έντασης της τύρβης $\frac{U'}{S_{L,0}}$ και της κλίμακας μήκους τύρβης (κανονικοποιημένη με το αντίστοιχο πάχος της φλόγας στρωτής ροής), $\frac{l_t}{\delta_{L,0}}$ όπως φαίνεται από το διάγραμμα στην εικόνα 9, όπου έχουν οριστεί πέντε διαφορετικά καθεστώτα φλόγας:

1. Το **laminar flame regime**(καθεστώς στρωτής φλόγας) χαρακτηρίζεται ως η περιοχή όπου ο τυρβώδης αριθμός Reynolds είναι μικρότερος από ένα, $Re_t < 1$. Η γραμμή $Re_t = 1$ στο διάγραμμα σηματοδοτεί το όριο μεταξύ στρωτής και τυρβώδους φλόγας και έτσι, τα καθεστώτα τυρβώδους καύσης χαρακτηρίζονται όλα από $Re_t > 1$.
2. Το **Wrinkled flame regime**(καθεστώς ρυτιδωμένης φλόγας) ($\frac{U'}{S_{L,0}} < 1$). Όταν, $Ka < 1$, το πάχος της φλόγας είναι μικρότερο από την κλίμακα Kolmogorov και η αλληλεπίδραση μεταξύ φλόγας και τύρβης είναι ελάχιστη. Η επιφάνεια της φλόγας είναι ελαφρώς διαταραγμένη και μπορεί να συσχετιστεί με μια στρωτή φλόγα.
3. Το **Corrugated flame regime**(Καθεστώς της κυματοειδούς φλόγας) ($\frac{U'}{S_{L,0}} > 1$). Στο καθεστώς της κυματοειδούς φλόγας ισχύει επίσης το καθεστώς της λεπτής ρυτιδωτής φλόγας, αλλά η επιφάνεια της φλόγας είναι καμπυλωμένη και τεντωμένη. Τόσο στο σύστημα ρυτιδωμένης όσο και στο σύστημα κυματοειδούς φλόγας η μικρότερη κλίμακα τύρβης, η κλίμακα Kolmogorov, είναι μεγαλύτερη από το πάχος της στρωτής φλόγας και έτσι διατηρείται η στρωτή δομή της φλόγας. Επίσης, δεδομένου ότι η δομή της στρωτής φλόγας διατηρείται σε αυτές τις περιοχές, η διάδοση της φλόγας μπορεί να μοντελοποιηθεί χρησιμοποιώντας έννοιες στρωτής φλόγας.
4. **Καθεστώς λεπτών ζωνών αντίδρασης (thin reaction zone regime)**, όπου $Re_t > 1$, $1 < Ka < 100$, $Kar < 1$ και $Da > 1$. Σε αυτό το καθεστώς το πάχος της ζώνης αντίδρασης δ_r είναι μεγαλύτερο από την κλίμακα Kolmogorov n_k , μπορεί να αλληλεπιδράσει με τη ζώνη προθέρμανσης της φλόγας, ενισχύοντας τη μεταφορά θερμότητας και μάζας. Η ζώνη προθέρμανσης εν συνεχεία παχαίνει, ενώ η ζώνη αντίδρασης, η οποία είναι λεπτότερη από

την κλίμακα μήκους Kolmogorov ($Ka_r < 1$), δεν επηρεάζεται και διατηρεί τη στρωτή δομή της.

5. **Καθεστώς διαταραγμένης ζώνης αντίδρασης ή καθεστώς καλά αναδευόμενου αντιδραστήρα (broken reaction zone regime or well-stirred reactor regime)**, όπου $Re_t > 1$, $Ka > 100$, $Ka_r > 1$ και $Da < 1$. Σε αυτό το καθεστώς η κλίμακα Kolmogorov είναι μικρότερη από το πάχος της ζώνης αντίδρασης δ_r και τόσο η προθέρμανση όσο και η ζώνη αντίδρασης διαταράσσονται από την τυρβώδη κίνηση. Οι μικρότερες δίνες διεισδύουν στη ζώνη αντίδρασης, αυξάνοντας τη διάχυση και τον ρυθμό μεταφοράς θερμότητας στη ζώνη προθέρμανσης. Η ροή συμπεριφέρεται σαν ένας καλά αναδευόμενος αντιδραστήρας χωρίς διακριτή στρωτή δομή.



Εικόνα 10 Χάρτης τυρβώδους φλόγας

Οι περισσότερες από τις πρακτικές εφαρμογές καύσης ανήκουν στο καθεστώς των φλογοσωλήνων και χαρακτηρίζονται από $Da \gg 1$.

6. Στο **καθεστώς φλογοσωλήνων (wrinkled and corrugated flamelets regimes)** η τυρβώδης κίνηση τροποποιεί την ταχύτητα της στρωτής φλόγας με το να τσαλακώνει το μέτωπο της φλόγας. Η σχέση μεταξύ της στρωτής ($S_{L,0}$) και της τυρβώδους ταχύτητας φλόγας (St) είναι:

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – [Τομέας Ενέργειας Αεροναυτικής και

$$S_t/S_{L,0} \approx 1 + \frac{U'}{S_{L,0}} \quad (4.15)$$

Ως αποτέλεσμα, η ταχύτητα της τυρβώδους φλόγας μπορεί να αυξηθεί από μεγάλες διακυμάνσεις της ταχύτητας.

4.4 ΟΜΟΑΞΟΝΙΚΗ ΡΟΗ ΚΑΙ ΑΝΑΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ

Στο συγκεκριμένο υποκεφάλαιο παρατίθενται μερικές θεωρητικές πληροφορίες σχετικές με την ανακυκλοφορία που δημιουργείται στην εξεταζόμενη πειραματική διάταξη.

Οι ομοαξονικές ροές τύπου δέσμης είναι μια επιλογή, όπου έχει ευρύ φάσμα εφαρμογής σε διαδικασίες σχετικές με την διάχυση φλόγας. Μάλιστα αν και γίνονται αρκετά συχνά χρήση δεν έχει κατανοηθεί σε καλό βαθμό ο τρόπος λειτουργίας τους.

Οι ομοαξονικές ροές αποτελούνται από δύο περιοχές δυνητικών πυρήνων και η ροή του πεδίου εμφανίζει αστάθειες που οδηγούν σε απόρρεμα (wake-like) αλλά και σε διάτμηση (shear-like). Όσον αφορά τον εσωτερικό δυνητικό πυρήνα το μέγεθος του εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον λόγο ταχυτήτων που προέρχεται από τα δύο ρεύματα:

$$r_u = u_0/u_i \quad (4.19)$$

Όπου u_0 και u_i είναι οι μέσες ταχύτητες για το εξωτερικό και εσωτερικό ρεύμα της ομοαξονικής ροής. Το μέγεθος του εξωτερικού πυρήνα σε αντίθεση με εκείνο του εσωτερικού επηρεάζεται σε πολύ μικρό βαθμό από τον λόγο των ταχυτήτων του εσωτερικού και εξωτερικού ρεύματος ενώ επηρεάζεται αρκετά πιο πολύ από τον λόγο των διαμέτρων των δύο αγωγών.

$$\beta = D_0/D_i \quad (4.20)$$

Αν γίνει αύξηση του λόγου β αυξάνεται το μήκος του εξωτερικού δυνητικού πυρήνα. Όταν $u_i \ll u_o$ το εξωτερικό ρεύμα αέρα εκτρέπεται προς τον κεντρικό άξονα και μπορεί να δημιουργηθεί ανακυκλοφορία (στις περιπτώσεις που γίνεται ανάλυση παρατηρείται ανακυκλοφορία για την περίπτωση NR_ru_1 και NR_ru_2 ενώ ανακυκλοφορία δεν υφίσταται στην περίπτωση NR_ru_3 και NR_ru_4). Η ζώνη της ανακυκλοφορίας που δημιουργείται, τοποθετείται μεταξύ του σημείου όπου συγχωνεύεται η ροή (merging point) και στο τέλος της ζώνης του εσωτερικού δυναμικού πυρήνα.

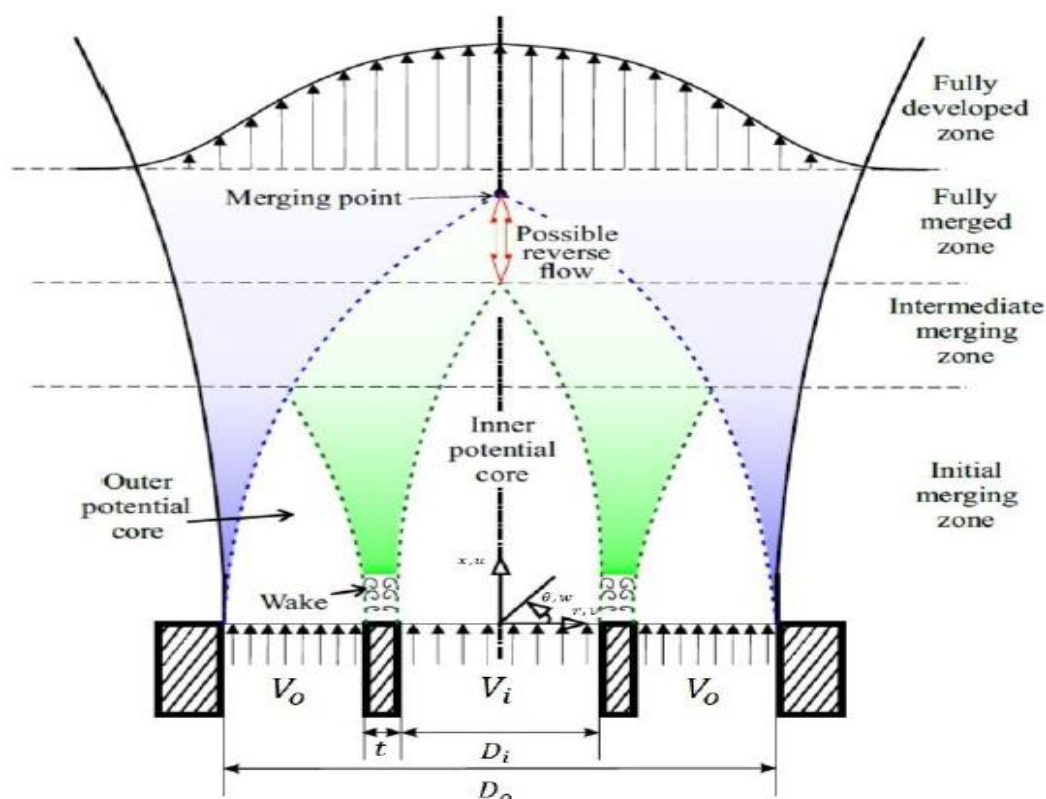
Επιπρόσθετα παράμετροι που πρέπει να παρθούν για τις ομοαξονικές ροές είναι τα εμβαδά του εσωτερικού και του εξωτερικού ομόκεντρων κυλίνδρων στην έξοδο, όπου δίνονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$A_i = \frac{\pi D_i^2}{4} \quad (4.21)$$

$$A_o = \frac{\pi(D_o^2 - (D_i + 2 \cdot b^2))}{4} \quad (4.22)$$

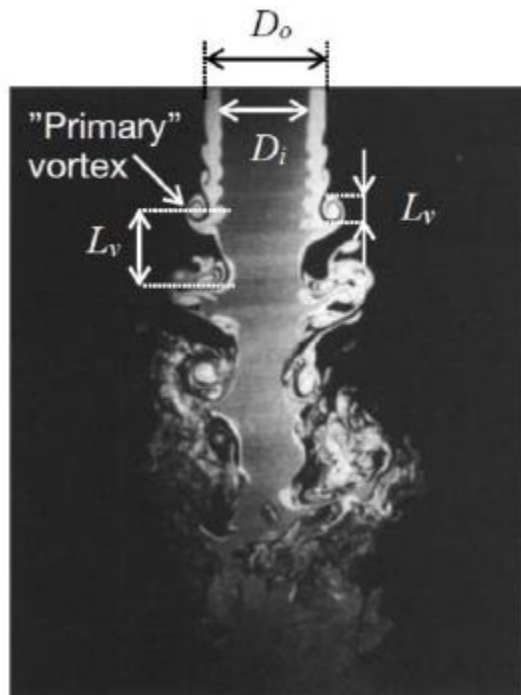
όπου b είναι το πάχος του χείλους και είναι για τον εσωτερικό αγωγό στην περίπτωση αυτή. Ο λόγος ανάμεσα στις επιφάνειες βρίσκεται από τον τύπο:

$$A_r = \frac{A_o}{A_i} \quad (4.23)$$



Εικόνα 11 Ομοαξονική ροή με εμφάνιση ανακυκλοφορίας

Αναφορικά στο παραπάνω σχήμα, το πεδίο ροής υφίσταται διαχωρισμό σε 4 περιοχές. Το initial merging zone ξεκινά από το σημείο όπου το ρεύμα ροής κάνει την έξοδο του μέχρι το κομμάτι που φτάνει σε τέλος ο εξωτερικός δυναμικός πυρήνας, ενώ η fully merged zone αρχίζει εκεί όπου το εσωτερικό και εξωτερικό ρεύμα έχουν φτάσει στην φάση της πλήρους συγχώνευσης και αποκτούν συμπεριφορά ενιαίου ρεύματος. Αξίζει να σημειωθεί ότι, πρέπει να υπάρξει μία απόσταση ώστε να θεωρηθεί πλήρως ανεπτυγμένο (“fully developed”) και ταυτόχρονα αυτό-όμοιο (“self-similar”) το προφίλ ταχύτητας στην περιοχή πλήρους συγχώνευσης. Επιπροσθέτως, μιας και η ταχύτητα εμφανίζει διαφορές ανάμεσα στο εσωτερικό και εξωτερικό ρεύμα της ροής, $(\mathbf{u}_o - \mathbf{u}_i)$, δημιουργούνται εσωτερικά και εξωτερικά στρώματα ανάμειξης (ζώνες με μπλε και πράσινο χρώμα), όπου δημιουργούνται αστάθειες Kelvin-Helmholtz και ως εκ τούτου να γίνεται εμφάνιση σπειροειδούς στροβίλου καθώς η ροή εξέρχεται από τον σωλήνα (βλ. παρακάτω σχήμα).



Εικόνα 12 Σπειροειδείς στρόβιλοι στην έξοδο του σωλήνα

Το L_v είναι κλίμακα μήκους που δείχνει είτε την απόσταση ανάμεσα στους στρόβιλους είτε το πόσο μεγάλος είναι ο στρόβιλος.

5.0 Η ΠΡΟΣ ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Για την εκτέλεση των αναγκών του πειράματος κατασκευάστηκε μια πειραματική διάταξη δύο ομοαξονικών κυλινδρικών αγωγών. Στον εσωτερικό αγωγό ρέει αέρας χαμηλής ταχύτητας, ενώ από τον εξωτερικό αγωγό ρέει δέσμη αέρα υψηλής ταχύτητας. Αέρας διοχετεύεται εντός των αγωγών μέσω των φυσητήρων (blowers) και λόγω αυτής της αλληλεπίδρασης των δύο ρευμάτων αέρα, σχηματίζεται σε απόσταση ανάντη του επιπέδου εξόδου μια κεντρική ζώνη ανακυκλοφορίας.

Η πειραματική διάταξη των δύο ομοαξονικών κυλίνδρων παροχής αέρα που χρησιμοποιήθηκε για τις ανάγκες του πειράματος με εσωτερική διάμετρο 55mm και εξωτερική τα 90mm. Για τις 4 περιπτώσεις που ερευνήθηκαν η ταχύτητα του εξωτερικού αγωγού ήταν 30m/s ενώ του εσωτερικού ήταν 3m/s, 4m/s, 4.5m/s, 5m/s για την κάθε περίπτωση ξεχωριστά.

Έτσι διαμορφώνεται ο παρακάτω πίνακας όπου βλέπουμε διάφορα στοιχεία για την ροή:

Περιπτώσεις	Μέση αξονική ταχύτητα εσωτερικού αγωγού (m/s)	Μέγιστη αξονική ταχύτητα εσωτερικού αγωγού (m/s)	Μέση αξονική ταχύτητα εξωτερικού αγωγού (m/s)	Μέγιστη αξονική ταχύτητα εξωτερικού αγωγού (m/s)	Λόγος ταχυτήτων	Μέγιστη ταχύτητα ανακυκλοφορίας (m/s)	Μήκος ανακυκλοφορίας (mm)	Reynolds αριθμός εσωτερικού αγωγού ($\times 10^4$)
NR_ru_1	3.33	3.88	24.01	30.84	8	-3.84	42	1.21
NR_ru_2	3.98	4.42	24.14	30.83	7	-1.39	20	1.45
NR_ru_3	4.25	4.71	23.98	30.86	6.6	-	-	1.54
NR_ru_4	4.51	5.06	24.08	30.86	6.1	-	-	1.64

Πίνακας 2. Περιπτώσεις ροών που ερευνήθηκαν

Τα μη αντιδρώντα πεδία ροής, για τέσσερις διαφορετικές τιμές λόγου ταχυτήτων μεταξύ των δύο ρευμάτων αέρα, διερευνήθηκαν προκειμένου να εκτιμηθούν τα αναπτυσσόμενα πεδία ροής κατάντη του καυστήρα και να καθοριστούν οι συνθήκες υπό τις οποίες σχηματίζεται ζώνη ανακυκλοφορίας στην τρέχουσα πειραματική διάταξη. Οι μέγιστες ταχύτητες κάθε υπό διερεύνηση περίπτωσης αντιστοιχούν στη μέγιστη τιμή της αξονικής ταχύτητας στο επίπεδο εξόδου (exit plane). Πιο συγκεκριμένα **επίπεδο εξόδου(exit plane)** στην συγκεκριμένη εγκατάσταση είναι κοντά στα 0mm ένα σημείο όπου η ροή κάνει την έξοδο της από τους ομοαξονικούς κυλίνδρους και εν συνεχεία ξεκινάει η συγχώνευση των δύο ροών.

Οι αριθμοί Reynolds υπολογίστηκαν με βάση τη μέση χρονική αξονική ταχύτητα του εσωτερικού ρεύματος για κάθε διερευνώμενη περίπτωση στο επίπεδο εξόδου και τη διάμετρο του εσωτερικού αγωγού.

Όσον αφορά τις μέσες αξονικές ταχύτητες για τον κάθε αγωγό υπολογίστηκαν ως εξής:

$$U_{in,out} = \frac{\dot{m}_{in,out}}{A \cdot \rho} \quad (5.1)$$

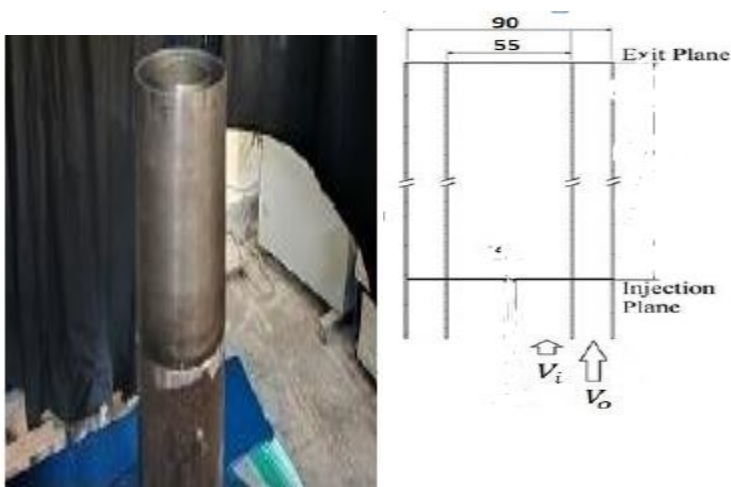
Όπου A είναι η επιφάνεια του κάθε αγωγού και ρ είναι η πυκνότητα του αέρα

Οι ροές μάζας για τους αγωγούς των 55mm και 90mm υπολογίστηκαν στις διατομές του επιπέδου εξόδου για τις περιπτώσεις του έσω και έξω αγωγού ως εξής:

$$\dot{m}_{air,in} = \int_0^{r_{d,in}} 2\pi r \rho u \, dr \quad (5.2)$$

$$\dot{m}_{air,out} = \int_{r_{d,in}}^{r_{d,out}} 2\pi r \rho u \, dr \quad (5.3)$$

Όπου u μέση χρονική αξονική ταχύτητα στο exit plane που μετράται από το PIV.



Εικόνα 13 Πειραματική εγκατάσταση

5.1 ΦΥΣΗΤΗΡΕΣ

Για να υπάρχει παροχή αέρα στον έσω και έξω αγωγό γίνεται χρήση **φυσητήρων**. Για την ενεργοποίηση τους γίνεται χρήση ηλεκτρολογικού πίνακα και με τη βοήθεια αυτού γίνεται ρύθμιση της συχνότητας όπου θα πρέπει να λειτουργούν. Οι φυσητήρες αυτοί προσφέρουν σταθερή παροχή αέρα αφού πρώτα τους γίνουν οι κατάλληλες ρυθμίσεις σε κατάλληλη συχνότητα λειτουργίας. Κάνοντας χρήση σωληνώσεων και μιας διάταξης τύπου «Ψ» τα ρεύματα από τους φυσητήρες οδηγούνται στους αγωγούς. Είναι πολύ βασικό να γίνουν μετρήσεις της ταχύτητας του ρεύματος αέρα σε αρχικό στάδιο σε σχέση με την συχνότητα λειτουργίας του φυσητήρα, ώστε να οριστούν οι συχνότητες λειτουργίας για τις τελικές μετρήσεις.

6.0 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ

Για να επιτευχθεί η απεικόνιση της ροής γίνεται συχνά χρήση σωματιδίων πολύ μικρών διαστάσεων. Τα συγκεκριμένα σωματίδια επονομάζονται ιχνηθέτες (seeds) και διασπείρονται στην ροή. Μάλιστα ιδανικά τοποθετούνται στο ρεύμα της ροής μας πολύ πριν το σημείο όπου θα πραγματοποιηθεί η μέτρηση του PIV. Ακόμα, τα σωματίδια αυτά εξαιτίας της μικρής διαμέτρου που έχουν, θεωρείται ότι η άνωσή τους είναι μηδαμινή.

Στο κομμάτι όπου επρόκειτο να γίνει η καταμέτρηση της ροής, γίνεται χρήση ενός φύλλου φωτός, το οποίο δημιουργείται με την πάροδο μιας διπλής παλμικής ακτίνας laser διαμέσου μια οπτικής διάταξης, η οποία διαθέτει κυλινδρικούς φακούς. Τα σωματίδια όπου τώρα πια ακολουθούν την ροή θα φωτιστούν δύο φορές μέσα σε ένα πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Αυτή η μετατόπιση των σωματιδίων που έχει συμβεί ανάμεσα στους δύο παλμούς laser καταγράφεται ως μια μόνο εικόνα διπλής έκθεσης ή πιο συχνά ως ζεύγος δύο εικόνων μονής έκθεσης.

Το πεδίο μετατόπισης των σωματιδίων που καταγράφηκε, μετράται σε pixel σε όλο το εύρος του πεδίου εικόνων. Εν συνεχεία γίνεται η μετατροπή σε φυσικές διαστάσεις μήκους αφού ληφθεί υπόψη ότι η εικόνα είναι μεγεθυμένη και ύστερα την διαιρείται με το επιλεγμένο χρονικό διάστημα ανάμεσα στους δύο παλμούς. Με αυτήν την διαδικασία δίνεται η δυνατότητα να επιτευχθεί ο υπολογισμός της διανυσματικής ταχύτητας ροής σε όλα τα σημεία του επιπέδου που καταγράφονται.

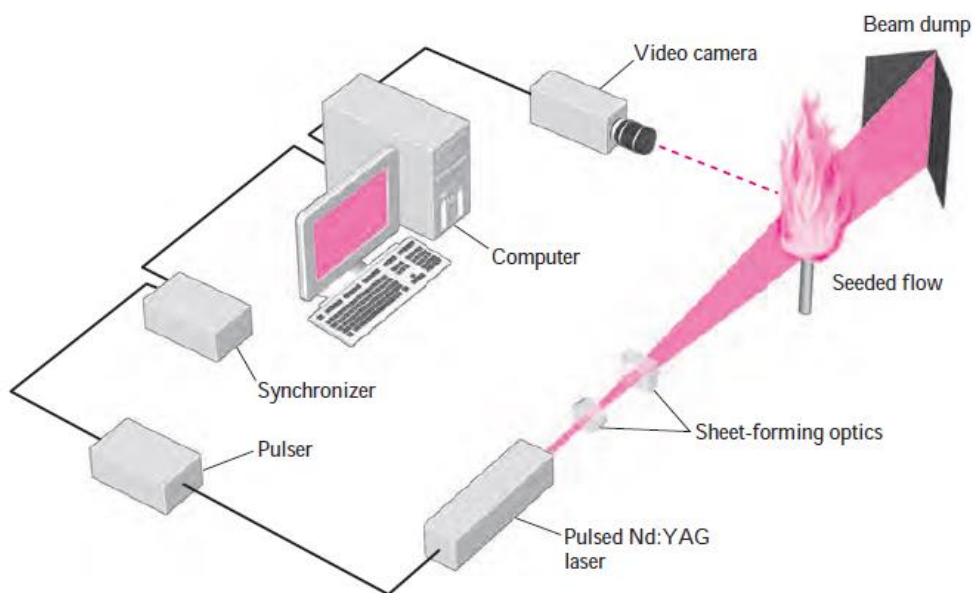
Επιπροσθέτως αναγκαία καθίσταται η κατοχή και χρησιμοποίηση κάμερας ώστε να γίνει εφικτή η καταγραφή του πεδίου ροής. Στην περίπτωση του PIV κάνουμε τοποθέτηση μιας κάμερας CCD σε ένα επίπεδο κάθετο προς το φύλλο του φωτός laser και καταγράφει σε εικόνες το φως που έχει διασκορπιστεί από τα σωματίδια που έχουμε σπείρει στην ροή. Μάλιστα για την καταγραφή, είναι απαραίτητο να επιλεγεί μια κατάλληλη χρονοκαθυστέρηση των παλμών, όπου

θα εξαρτάται από την ταχύτητα της ροής και τον συντελεστή μεγέθυνσης του φακού. Για την επιλογή της τιμής αυτής (της χρονικής καθυστέρησης) πιθανώς να χρειαστεί ένας αριθμός επαναλήψεων που θα αφορά τα πρώτα στάδια σάρωσης του πεδίου. Η χρονική καθυστέρηση θα πρέπει να είναι αρκετή ώστε τα σωματίδια να έχουν κάνει επαρκείς μετατοπίσεις οι οποίες θα φανούν στις εικόνες σωματιδίων στο CCD. Ως εκ τούτου, με αυτήν την χρονοκαθυστέρηση ανάμεσα στους δύο φωτισμούς και προφανώς εξαιτίας της μετατόπισης των σωματιδίων εντός του χρονικού διαστήματος που μεσολάβησε, είναι δυνατός αυτός ο επιθυμητός υπολογισμός του διανυσματικού πεδίου των ταχυτήτων.

Για να αξιολογηθούν οι εικόνες των σωματιδίων που λαμβάνονται, υποθέεται ότι τα τροχιοδεικτικά σωματίδια ακολουθούν κατά γράμμα την τοπική ταχύτητα ροής ανάμεσα στους δύο φωτισμούς. Η ψηφιακή εικόνα της διάταξης PIV χωρίζεται σε πιο μικρά κομμάτια επανομαζόμενα ως παράθυρα διερεύνησης. Για την διερεύνηση στο συγκεκριμένο επίπεδο, είναι αναγκαία η γνώση τεχνικών στατιστικής χωρικής συσχέτισης, με τις οποίες γίνεται προσδιορισμός του τοπικού διανύσματος θέσης για κάθε κομμάτι του παραθύρου διερεύνησης. Όταν είναι βασικό να οριστεί ένα κατάλληλο μέγεθος για το παράθυρο διερεύνησης, με αποτέλεσμα όλα τα σωματίδια που υπάρχουν μέσα σε αυτό, να κινούνται με ομοιογένεια κατευθυνόμενα κατά την ίδια διεύθυνση και μήκος. Για να είναι ικανοποιητικά τα αποτελέσματα είναι αναγκαίο το πλήθος των σωματιδίων εντός του παραθύρου διερεύνησης να είναι τουλάχιστον 10. Για την ύπαρξη ικανοποιητικών αξιολογήσεων στις εικόνες των σωματιδίων, χρειάζεται κατάλληλη καταγραφή προφανώς από την κάμερα. Η μια περίπτωση καταγραφής είναι η εκείνη της καταγραφής της θέσης των σωματιδίων σε μια εικόνα στο χρονικό διάστημα δύο φωτισμών. Οι συγκεκριμένες εικόνες μπορούν να χαίρουν επεξεργασίας με αυτοσυσχέτιση.

Κάποια από τα πλεονεκτήματα του PIV είναι ότι το καθιστά μια μη-παρεμβατική μέθοδο, όπου με λίγα λόγια δεν έχει καμία επιρροή στην ροή και τις ιδιότητές της και κατά βάση δίνει παροχή πληροφοριών υψηλής χωρικής ανάλυσης για το στιγμιαίο διάνυσμα της ταχύτητας συγχρόνως σε όλη την έκταση του πεδίου ροής.

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – [Τομέας Ενέργειας Αεροναυτικής και



Εικόνα 14 Σχηματική αναπαράσταση μέτρησης αντιδρώντος πεδίου με PIV

6.1 ΧΡΗΣΗ ΚΑΜΕΡΑΣ ΚΑΙ LASER ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ

Η **κάμερα** όπου χρησιμοποιήθηκε κάνει την καταγραφή της ροής αφού τα σωματίδια δεχθούν τη δέσμη laser. Η κάμερα έχει τοποθετηθεί κάθετα στο επίπεδο ως προς την κατεύθυνση που ο φακός κοιτάει την δέσμη ενώ ταυτόχρονα την έχει υψωθεί με απώτερο σκοπό την σωστή καταγραφή των μετρήσεων. Η κάμερα αυτή ονομάζεται LaVision Imager Pro X 2 M CCD.

Για να φωτίσει τον χώρο του πεδίου είναι αναγκαία η χρήση **laser**, μιας και έχει στην διάθεση του την ικανότητα να δημιουργήσει δέσμη φωτός μεγάλης ισχύος με παλμούς μικρής διάρκειας με αποτέλεσμα το χρονικό διάστημα που διατίθεται σε όλε τις εικόνες να είναι μικρό.

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – [Τομέας Ενέργειας Αεροναυτικής και

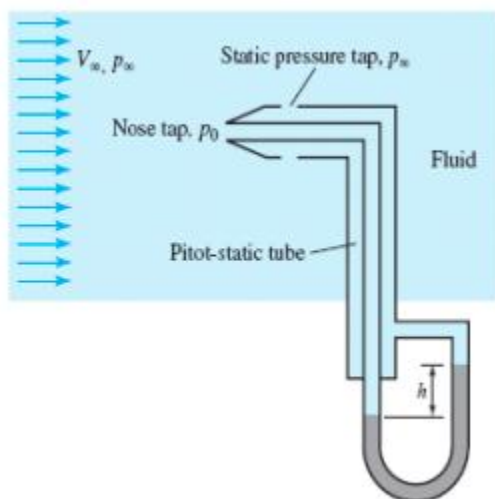
Τα laser τα οποία συχνά γίνονται χρήση σε οποιαδήποτε πειραματική διάταξη PIV είναι Nd:YAG και η εκπομπή τους έχει μήκος κύματος 1064 nm . Η δέσμη έχει την δυνατότητα να περάσει από φιλτράρισμα και μπορεί να απομονωθεί το μήκος κύματος 532 nm το οποίο είναι ορατό στον άνθρωπο. Οι φακοί από τους οποίους συνθέτονται τα οπτικά στοιχεία έχουν σχήμα σφαίρας(κάνει έλεγχο του πάχους για φύλλο φωτός) και κυλίνδρου(κάνει έλεγχο στον τρόπο που αναπτύσσεται η κυλινδρική δέσμη στο φύλλο φωτός).



Εικόνα 15 Η κάμερα που χρησιμοποιήθηκε LaVision Imager Pro X 2 M CCD.

6.2 ΣΩΛΗΝΑΣ ΠΙΤΟΤ

Για τις αρχικές μετρήσεις των ταχυτήτων χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρονική μετρητική διάταξη Pitot. Ο σωλήνας Pitot είναι μια απλουστευμένη και συνηθισμένη μετρητική διάταξη για μέτρηση ολικής πίεσης. Έχει στην διάθεση του έναν ανοιχτό σωλήνα, ο οποίος τοποθετείται με το ανοιχτό του άκρο παράλληλα στην κατεύθυνση της ροής. Μιας και στο ανοιχτό ακρο που διαθέτει η διάταξη αυτή έχουμε ανακοπή τη ροής, η μετρούμενη πίεση είναι ολική, μιας και η στατική πίεση ταυτίζεται στο σημείο αυτό με την ολική. Με την χρήση ενός U – μανόμετρου, υπάρχει η δυνατότητα με χρήση Pitot να γίνει μέτρηση της ολικής πίεσης και πίεσης ανακοπής.



Εικόνα 16 Σκίτσο αναπαράστασης διάταξης σωλήνα pitot

6.3 ΤΡΟΧΙΟΔΕΙΚΤΙΚΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ

Τα τροchioδεικτικά σωματίδια που χρησιμοποιήθηκαν είναι σωματίδια από διοξείδιο του τιτανίου - TiO_2 . Πρόκειται για μια ουσία που συναντάται σε μορφή σκόνης και μπορεί να βρεθεί στο εμπόριο. Για να λάβουν τα σωματίδια τις επιθυμητές διαστάσεις είναι απαραίτητο να προηγηθεί ένα άλεσμα έτσι ώστε οι διάμετρος που θα έχουν να είναι η επιθυμητή, της τάξης των $10^{-6}m$. Τα σωματίδια αυτά τοποθετούνται σε κατάλληλο χώρο (seeders) αρχικά. Στη συνέχεια, με χρήση αέρα που τροφοδοτείται από συμπιεστή και μέσω μικρών σωλήνων καθοδηγούνται προς τα ρεύματα της εργαστηριακής εγκατάστασης. Από εκεί και πέρα ακολουθούν τα ρεύματα κι εν τέλει εμφανίζονται στο πέρας των αγωγών και στην περιοχή η οποία θα διερευνηθεί και θα καταγραφεί με την PIV.

6.4 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΟΥ PIV

Πραγματοποιήθηκε αναπαράσταση του πεδίου ροής με χρήση του PIV 2D της LaVision. Το σύστημα αυτό συναποτελείται από ένα laser QUANTEL EVERGREEN double-pulsed Nd:YAG στα 532 nm όπου δημιουργεί φύλλο φωτός με ένα πάχος περίπου στο 1 mm . Επιπλέον με αυτό χρειάστηκε μια κάμερα LaVision Imager Pro X 2M CCD που όπως προαναφέρθηκε τοποθετήθηκε κάθετα προς το φύλλο φωτός. Η συγκεκριμένη κάμερα έχει στη διάθεση της έναν φακό AF Micro Nikkor 60mm με $f/5.6$ στον οποίο έχει ενσωματωθεί **οπτικό φίλτρο ζώνης** με μήκος κύματος στα 532 nm με 10 nm πλήρες πλάτος στο μισό μέγιστο έτσι ώστε να γίνει απομόνωση της ακτίνας laser.

Ο χρονισμός για όλη την εγκατάσταση έγινε με τη βοήθεια ενός **προγράμματος μονάδας χρονισμού LaVision (PTU 9)** όπου έχει τις καλύτερες ρυθμίσεις. Αυτό το πρόγραμμα μονάδας χρονισμού (timing units) έκανε τα παρακάτω:

- Εκκίνηση λείζερ: Ενεργοποιεί το λείζερ ώστε να εκπέμπει παλμούς φωτός σε ακριβή χρονικά διαστήματα για να φωτίσει τα σωματίδια του ιχνηθέτη.
- Ενεργοποίηση κάμερας: Συγχρονίζει την κάμερα για τη λήψη εικόνων τη σωστή στιγμή που οι παλμοί λείζερ φωτίζουν τα σωματίδια.
- Ρυθμός λήψης εικόνας: Ρυθμίζει τον ρυθμό καρτέ με τον οποίο καταγράφονται οι εικόνες, εξασφαλίζοντας ότι ευθυγραμμίζονται με τον χρόνο των παλμών λείζερ.
- Έλεγχος καθυστέρησης: Μπορεί να εισαγάγει καθυστερήσεις για να διασφαλίσει ότι η λήψη εικόνων πραγματοποιείται σε συγκεκριμένα σημεία του κύκλου ροής.

Το σύστημα αυτό είχε ρυθμό δειγματοληψίας 10 Hz και 1000 ζεύγη εικόνων για κάθε περίπτωση που λήφθηκαν προς επεξεργασία από το λογισμικό της LaVision DaVis 8.0, μιας και θεωρήθηκε ότι αυτό το πλήθος είναι αρκετό για να αναπαρασταθεί ικανοποιητικά το ροϊκό πεδίο σε κάθε περίπτωση. Ο αριθμός των δειγμάτων ήταν αποτέλεσμα ανάλυσης για την σύγκλιση των Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – [Τομέας Ενέργειας Αεροναυτικής και

διακυμαινόμενων ταχυτήτων (convergence analysis). Τα ζεύγη εικόνων υποβλήθηκαν σε επεξεργασία χρησιμοποιώντας πολλαπλά περάσματα με επικάλυψη.

7.0 ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ PIV

Οι εκτιμήσεις αβεβαιότητας που σχετίζονται με τις μετρήσεις PIV βασίστηκαν σε δύο πηγές αβεβαιότητας που σχετίζονται με τα όργανα και τη δυναμική των σωματιδίων.

7.1 ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΑ ΟΡΓΑΝΑ

Ενώ υπάρχουν πολλές πιθανές πηγές σφάλματος που προκύπτουν από τα χρησιμοποιούμενα όργανα, μόνο οι εκτιμήσεις αβεβαιότητας για τον παράγοντα μεγέθυνσης κλίμακας και για την ακρίβεια χρονισμού θα αντισταθμιστούν στην παρούσα εργασία, δεδομένου ότι οι πειραματικές συνθήκες ελέγχθηκαν προσεκτικά. Ο συντελεστής μεγέθυνσης κλίμακας συσχετίζει τις μονάδες φυσικού μήκους με τις μονάδες εικονοστοιχείου, ενώ η ακρίβεια χρονισμού αναφέρεται στην αξιολόγηση του χρόνου διαχωρισμού μεταξύ διαδοχικών ζευγών εικόνων PIV. Ο συντελεστής μεγέθυνσης (ψ) μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$\psi = l/L \quad (5.1)$$

Όπου l είναι το μήκος της κλίμακας βαθμονόμησης σε μονάδες μήκους στην κατακόρυφη κατεύθυνση και L είναι το μήκος στο επίπεδο εικόνας σε μονάδες εικονοστοιχείων. Επίσης, ο συντελεστής μεγέθυνσης μπορεί να εκφραστεί ως προς την απόσταση μεταξύ της κλίμακας βαθμονόμησης και του φακού και την εστιακή απόσταση του φακού (f).

Για να εκτιμηθεί η αβεβαιότητα που σχετίζεται με τον υπολογισμό του συντελεστή μεγέθυνσης, πρέπει να είναι γνωστή η απόσταση στην πλάκα βαθμονόμησης. Όσον αφορά τον συντελεστή (L) λήφθηκαν υπόψη δύο πηγές σφάλματος την παραμόρφωση της εικόνας που προκαλείται από το φακό της φωτογραφικής μηχανής κατά μήκος της κλίμακας βαθμονόμησης w_{L1} και μια ακόμη πηγή αβεβαιότητας προέρχεται από τα σημεία που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της απόστασης στην πλάκα βαθμονόμησης w_{L2} . Επιπλέον, για να είναι ακριβής ο συντελεστής μεγέθυνσης της κλίμακας, η πλάκα βαθμονόμησης έπρεπε να τοποθετηθεί ακριβώς κατά μήκος του φύλλου λείζερ.

Η ακρίβεια του χρονισμού των ζευγών εικόνων δίνεται από την αβεβαιότητα του χρόνου παλμού λέιζερ w_{t1} και το <<τρεμούλιασμα>>(καθυστέρηση μεταξύ της λήψης των εικόνων) της προγραμματιζόμενης μονάδας χρονισμού της κάμερας (PTU) w_{t2} . Στη συνέχεια, αφού κάνουμε συνδυασμό της αβεβαιότητας λόγω του συντελεστή μεγέθυνσης κλίμακας και της ακρίβειας χρονισμού των οργάνων, η αβεβαιότητα των υπολογισμένων συνιστωσών της αξονικής και ακτινικής ταχύτητας, δίνεται από:

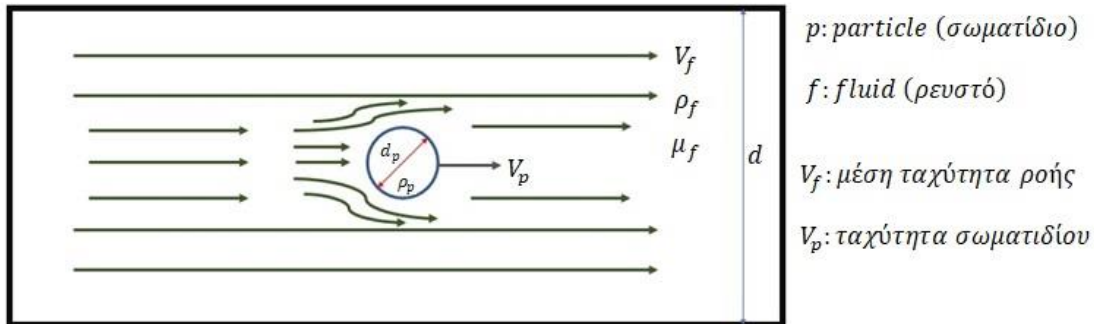
$$W_u = \sqrt{u^2 \left[\left(\frac{l}{L} w_l \right)^2 + \left(-\frac{l}{L^2} w_{L1} \right)^2 + \left(-\frac{l}{L^2} w_{L2} \right)^2 + \left(\frac{l}{hL} w_h \right)^2 \right] + \left(-\frac{ul}{\Delta t} \left(\frac{l}{L} \right) \right)^2 \cdot (w_{t1}^2 + w_{t2}^2)}$$

(5.2)

όπου u είναι η μέτρηση της ταχύτητας PIV και Δt είναι ο χωρισμός του παλμού λέιζερ σε σχέση με το χρόνο.

7.2 ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ ΛΟΓΩ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΤΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

Στο παρόν πείραμα, οι μετρήσεις PIV επιτεύχθηκαν με διασπορά στο εσωτερικό της ροής στερεών σωματιδίων υπό μορφή λεπτής σκόνης. Η κίνηση ενός σωματιδίου κατά μία διεύθυνση της ροής δείχνεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 17 Κίνηση σωματιδίου κατά την διεύθυνση μιας ροής και σύμφωνα με τον 2^ο Νόμο του Νεύτωνα:

$$m_p \cdot \frac{dV_p}{dt} = F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho_f \cdot C_D \cdot \left(\pi \cdot \frac{d_p^2}{4} \right) \cdot |V_f - V_p| \cdot (V_f - V_p) \Rightarrow$$

$$\frac{dV_p}{dt} = \frac{1}{\tau_p} (V_f - V_p) \quad (5.3)$$

όπου, F_D είναι η αντίσταση ή οπισθέλκουσα (“drag”), C_D ο συντελεστής αντίστασης (“drag coefficient”), d_p η διάμετρος του σωματιδίου (θεωρείται σφαιρικό σωματίδιο) και τ_p η χρονική σταθερά απόκρισης του σωματιδίου (“particle relaxation time”), η οποία αναπαριστά το χρόνο που απαιτείται για να αντιδράσει το σωματίδιο σε αλλαγές στη ροή του ρευστού.

Ο αριθμός Reynolds για το σωματίδιο, Re_p , υπολογίζεται με χρήση της εξίσωσης:

$$Re_p = \frac{d_p \cdot |V_f - V_p| \cdot \rho_f}{\mu_f} \quad (5.4)$$

με το C_D να αποτελεί συνάρτηση αυτού:

$$C_{D_{sphere}} \begin{cases} \frac{24}{Re_p}, & \text{για } Re_p < 0.1 \text{ (Stokes)} \\ \frac{24}{Re_p} + 4.5, & \text{για } 0.1 < Re_p < 1 \text{ (Oseen)} \\ \max \left[\frac{24}{Re_p} (1 + 0.15 Re_p^{0.687}), 0.44 \right], & \text{για } 1 < Re_p < 10^5 \text{ (Schiller – Naumann)} \\ 0.18, & \text{για } Re_p > 10^5 \end{cases} \quad (5.5)$$

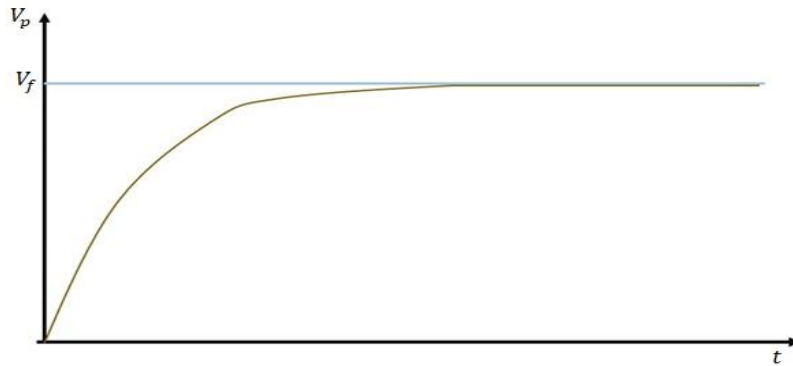
Αν το Re_p είναι πιο μικρό του ένα ($Re_p < 1$) τότε υπάρχει ροή Stokes, ή διαφορετικά έρπουσα ροή (“creeping flow”), και ως εκ τούτου το τ_p να βγαίνει από την παρακάτω εξίσωση:

$$\tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18 \mu_f}, \quad \text{για } Re_p < 1 \quad (5.6)$$

Αν θεωρηθεί η ύπαρξη μηδενικής αρχικής συνθήκης ($V_p = 0$, για $t = 0$), η διαφορική εξίσωση για την κίνηση του σωματιδίου είναι:

$$V_p(t) = V_f (1 - e^{-t/\tau_p}) \quad (5.7)$$

και δείχνει την απόκριση του σωματιδίου (“particle response”)



Εικόνα 18 Η χρονική απόκριση του σωματιδίου

Όσο περνάει ο χρόνος γίνεται εκθετική αύξηση του V_p σε V_f και πιο συγκεκριμένα τόσο γρηγορότερα όσο πιο μικρή είναι η τιμή του τ_p (όσο πιο μικρά ρ_p και d_p).

Αν υπάρχει δισδιάστατη ροή, η κίνηση του σωματιδίου περιγράφεται από μία εξίσωση για κάθε διεύθυνση.

Ο αριθμός Stokes του σωματιδίου, St_p , είναι ένας αδιάστατος αριθμός όπου δείχνει την δυναμική συμπεριφορά του σωματιδίου στη ροή και εκφράζεται ως:

$$St_p \equiv \frac{[\text{χρονική απόκριση σωματιδίου}]}{[\text{χρονική κλίμακα ρευστού}]} = \frac{\tau_p}{\tau_f} \quad (5.8)$$

Μάλιστα είναι γνωστό ότι:

$St_p \ll 1$ τότε το σωματίδιο ακολουθεί τη ροή του ρευστού

$St_p \gg 1$ τότε το σωματίδιο δε επηρεάζεται από τη δράση του ρευστού

Αν η ροή είναι τυρβώδης υπάρχουν πολλές κλίμακες χρόνου (κατ' αντιστοιχία με τις κλίμακες μήκους), έτσι ώστε το St_p να μην έχει μία τυπική μορφή, αλλά να είναι εξαρτώμενο από την τυρβώδη χρονική κλίμακα που γίνεται χρήση.

Αν θεωρηθεί η ολοκληρωματική κλίμακα ως χαρακτηριστική και πιο συγκεκριμένα ότι $\tau_f \equiv \tau_0$, τότε:

$$St_p = \frac{\tau_p}{\tau_0} \quad (5.9)$$

Μάλιστα αν είναι μια πλήρως ανεπτυγμένη ροή εντός αγωγού, η ολοκληρωματική κλίμακα μήκους (l_0) υπολογίζεται ότι είναι προσεγγιστικά ίση με το 3.8 % της υδραυλικής διαμέτρου του αγωγού d_h .

$$l_0 = 0.038d_h \quad (5.10)$$

όπου, για την περίπτωση κυκλικού αγωγού με εσωτερική διάμετρο d ισχύει $d_h = d$.

Η πιο απλή προσέγγιση που γίνεται να επιτευχθεί για να υπολογιστεί η χρονική κλίμακα είναι με τη βοήθεια της υπόθεσης του Taylor όπου μιλάει για παγωμένη τύρβη (“Taylor’s frozen turbulence hypothesis”), η οποία με τη σειρά της λείει το εξής:

$$l_0 = V_f \cdot \tau_0 \quad (5.11)$$

Με χρήση των παραπάνω προσεγγίσεων, ο αριθμός Stokes υπολογίζεται ως:

$$St_p = \frac{\tau_p}{\tau_f} = \frac{\tau_p}{\tau_0} = \frac{\tau_p}{l_0/V_f} = \frac{\rho_p \cdot d_p^2 / 18\mu_f}{0.038d/V_f} = \frac{V_f \cdot \rho_p \cdot d_p^2}{0.684 \cdot d \cdot \mu_f} \quad (5.12)$$

Τελικά, η αβεβαιότητα που δημιουργείται από τη δυναμική των σωματιδίων, W_s , δίνεται από την εξίσωση:

$$W_s = \frac{V_r - V_m}{V_r} \quad (5.13)$$

με

$$V_r = \frac{V_m}{1 - e^{-t/\tau_p}} \quad (5.14)$$

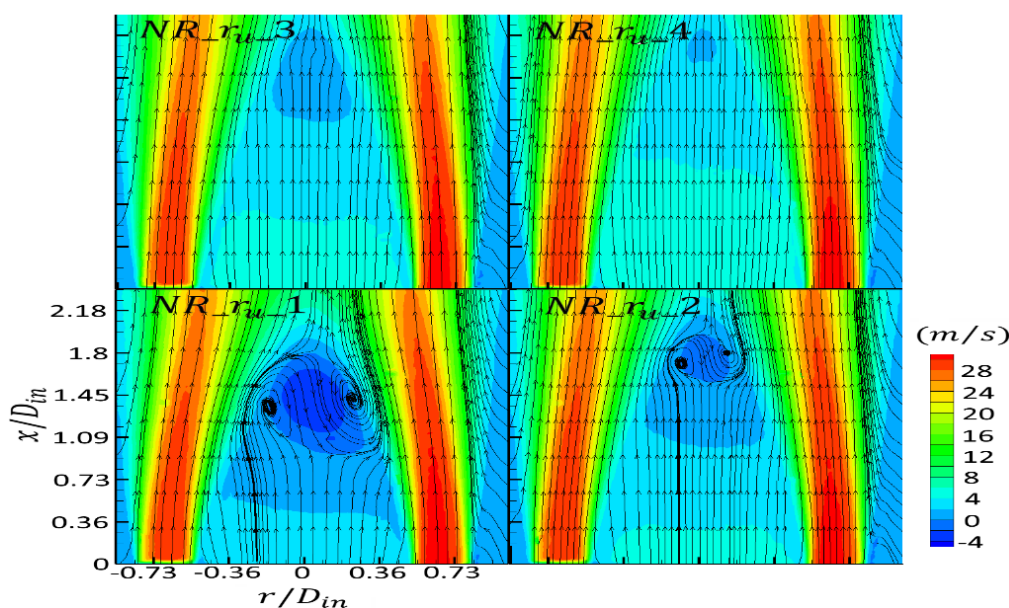
όπου, V_r είναι η πραγματική ταχύτητα του ρευστού και $V_m (\equiv V_p)$ η μετρούμενη ταχύτητα που παίρνεται από το PIV.

8.0 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που εξάχθηκαν από το πείραμα όσον αφορά τις ταχύτητες αξονικές και ακτινικές. Στη συνέχεια παρατίθενται και γίνεται σχολιασμός της έντασης της τύρβης στο ροικό πεδίο που δημιουργείται από την ομοαξονική ροή που δημιουργείται. Τέλος γίνεται ανάλυση της αβεβαιότητας της μεθόδου PIV που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων και τις αποκλίσεις που παρουσιάζονται.

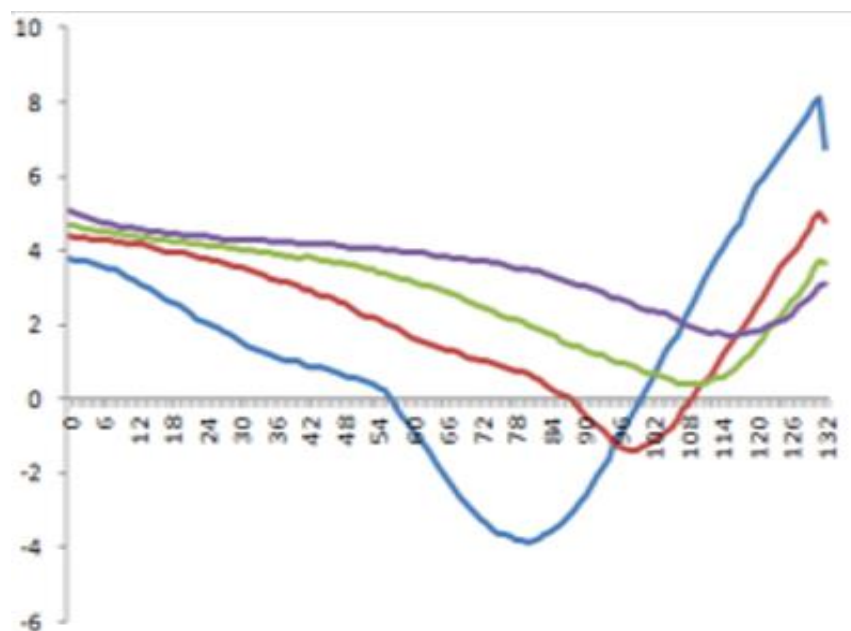
8.1 ΥΠΟΓΙΣΜΟΣ ΠΕΔΙΟΥ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ

Στην πιο κάτω εικόνα παρουσιάζονται τα πεδία των μέσων αξονικών ταχυτήτων του πειράματος με ροικές γραμμές που βοηθούν στην καλύτερη κατανόηση της ανακυκλοφορίας (που ακριβώς βρίσκεται, την έκταση της και τις περιπτώσεις που εμφανίζεται για τους λόγους ταχυτήτων που



μελετήθηκαν).

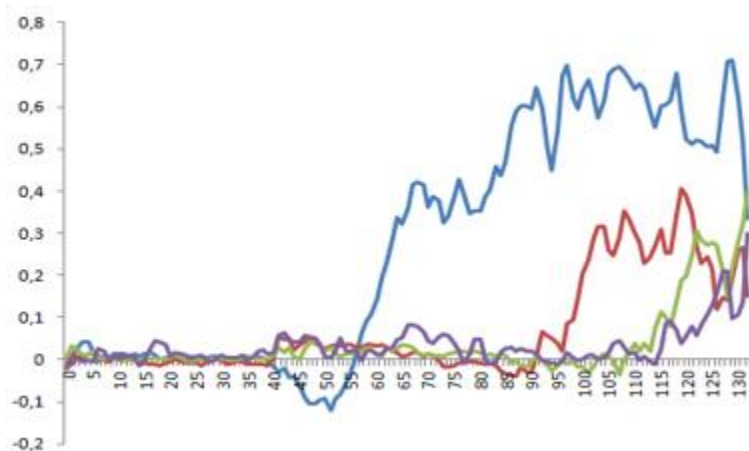
Εικόνα 19 Αναπαράσταση των μέσων αξονικών ταχυτήτων του πειράματος με ροικές γραμμές

Εικόνα 20 Κατανομή αξονικών ταχυτήτων V_x

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται η κατανομή των αξονικών ταχυτήτων της ροής μας. Καθώς οι ταχύτητες προσεγγίζουν τις αρνητικές τιμές είναι το σημείο κατά το οποίο ξεκινάει η ανακυκλοφορία. Στην περίπτωση NR_ru_1 και στην NR_ru_2 δημιουργείται ανακυκλοφορία μιας και παρατηρούνται αρνητικές τιμές της ταχύτητας πράγμα που δηλώνει την αλλαγή κατεύθυνσης της ροής. Η αρχή της ανακυκλοφορίας βέβαια ξεκινάει λίγο πριν τις αρνητικές τιμές κοντά στο 0 όπου η αλλαγή της ταχύτητας από σημείο σε σημείο δεν παρουσιάζει μεγάλες αλλαγές. Στο σημείο αυτό το διάνυσμα της ροής έχει αλλάξει κατεύθυνση και οδεύει προς τις αρνητικές τιμές οπότε η αρχή της ανακυκλοφορίας για την περίπτωση NR_ru_1 είναι στο σημείο των 56mm και τελειώνει στα 99mm κατάντη του επιπέδου εξόδου, ενώ για την περίπτωση NR_ru_2 ξεκινάει στα 87mm και τελειώνει στα 108mm.

Στις δύο περιπτώσεις που εμφανίζεται ανακυκλοφορία παρατηρείται μια μέγιστη αρνητική ταχύτητα για την περίπτωση NR_ru_1 στα 80mm ίση με 3,85m/s και για την NR_ru_2 στα 98mm

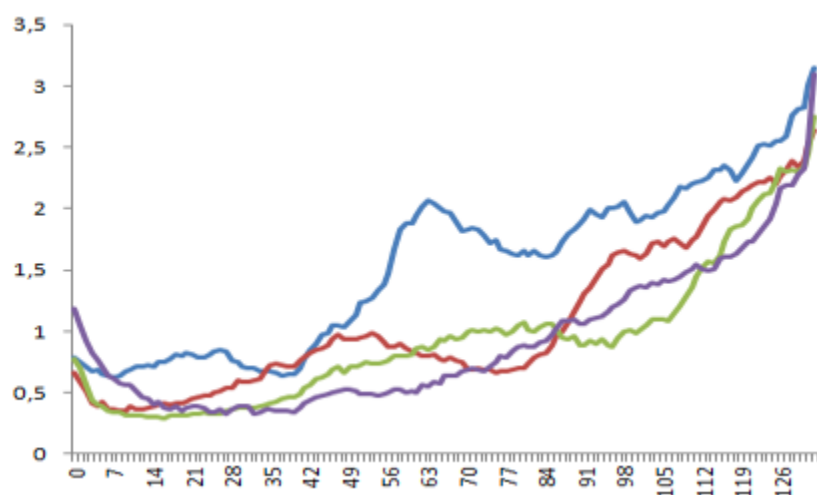
ίση με 1,39m/s και συμπεραίνεται μια μείωση της μέγιστης αρνητικής ταχύτητας της τάξης του 64% με την αύξηση του λόγου ταχυτήτων.



Εικόνα 21 Κατανομή ακτινικών ταχυτήτων Vx

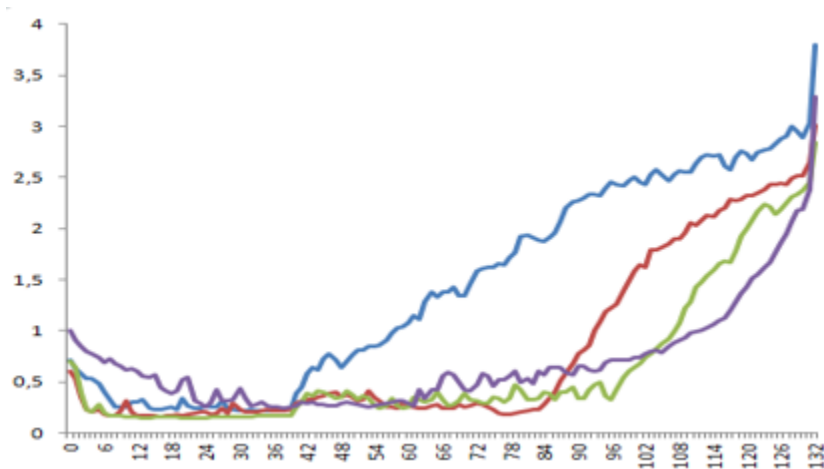
Παρατηρείται στην κατανομή των ακτινικών ταχυτήτων ότι όσο μειώνεται ο λόγος ταχυτήτων εμφανίζονται έντονες διακυμάνσεις. Συγκεκριμένα παρατηρείται ότι στην αρχή όλες οι περιπτώσεις συμβαδίζουν και λαμβάνουν πανομοιότυπη τιμή μέχρι περίπου το ύψος των 40mm.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι τιμές RMS και για τις αξονικές αλλά και για τις ακτινικές ταχύτητες οι οποίες μας δείχνουν την ένταση του τυρβώδους πεδίου σε κάθε σημείο. Όσο μεγαλύτερη τιμή τόσο πιο έντονη η τύρβη. Έτσι από τα διαγράμματα γίνεται αντιληπτό ότι όσο μεγαλύτερος λόγος ταχυτήτων τόσο πιο έντονη τύρβη θα υπάρχει.



Εικόνα 22 Κατανομή τιμών RMS Vy

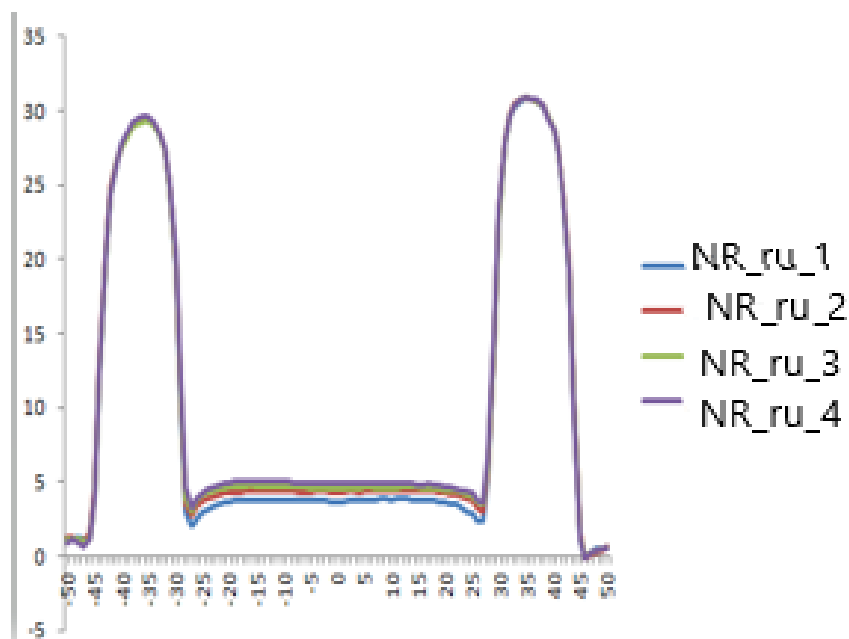
Παρατηρείται από το συγκριτικό διάγραμμα των RMS τιμών της αξονικής συνιστώσας της ταχύτητας ότι και στις 4 περιπτώσεις ακολουθείται σχεδόν παρόμοια πορεία. Πιο συγκεκριμένα παρατηρείται μια χαμηλή αρχική τιμή γύρω στο 1m/s η οποία αυξάνεται σε ένα αρκετά μεγάλο ύψος και φτάνει κοντά στην τιμή 3.5 m/s.



Εικόνα 23 Κατανομή τιμών RMS Vx

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – [Τομέας Ενέργειας Αεροναυτικής και

Για το διάγραμμα για την RMS ακτινικής συνιστώσας εμφανίζεται πανομοιότυπη εικόνα με εκείνο της αξονικής. Δηλαδή χαμηλές τιμές στην αρχή κοντά στο 1m/s και αύξηση κοντά στα 3.5m/s σε μεγάλη απόσταση.



Εικόνα 5 Ακτινική κατανομή αξονικών ταχυτήτων στο επίπεδο εξόδου

Από την εικόνα παρατηρείται ότι οι ταχύτητες στον εξωτερικό σωλήνα παρουσιάζουν μια πολύ καλή συμμετρία ενώ ταυτόχρονα έχουν περίπου τις ίδιες τιμές για όλους τους λόγους ταχυτήτων. Αντίθετα στον εσωτερικό σωλήνα παρατηρείται ότι υπάρχει η ίδια κατανομή για όλους τους λόγους ταχυτήτων αλλά με μικρές διαφορές στις τιμές της ταχύτητας.

8.2 ΥΠΟΛΙΣΜΟΣ ΕΝΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΤΥΡΒΩΔΟΥΣ ΠΕΔΙΟΥ

Η ένταση της τύρβης είναι μια σημαντική παράμετρος στον τομέα της δυναμικής των ρευστών που προσδιορίζει ποσοτικά το επίπεδο της τύρβης σε μια ροή ρευστού. Παρέχει πληροφορίες για τις διακυμάνσεις της ταχύτητας εντός της ροής και είναι σημαντική σε διάφορες μηχανολογικές και επιστημονικές εφαρμογές, όπως η αεροδυναμική, η υδροδυναμική και οι βιομηχανικές διεργασίες.

Ορισμός: Η ένταση της τύρβης (TI) ορίζεται ως ο λόγος της μέσης τετραγωνικής ρίζας (RMS) των διακυμάνσεων της ταχύτητας προς τη μέση ταχύτητα της ροής. Ποσοτικοποιεί τη σχετική ισχύ των τυρβωδών διακυμάνσεων σε σύγκριση με τη μέση ταχύτητα της ροής.

$$TI (\%) = (\text{RMS διακυμάνσεις ταχύτητας} / \text{μέση ταχύτητα}) \times 100\%$$

Πιο συγκεκριμένα υπολογίζεται η συνολική ταχύτητα εξόδου και ύστερα η συνολική RMS ταχύτητα από τους παρακάτω τύπους:

$$V_{out} = \sqrt{\frac{1}{2} (V_x^2 + V_y^2)}$$

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{3} (V_{y_{rms}}^2 + 2 \cdot V_{x_{rms}}^2)}$$

Στη συνέχεια υπολογίζονται οι εντάσεις της τύρβης στην αξονική και την ακτινική διεύθυνση αλλά και την συνολική ένταση τύρβης σύμφωνα με τους παρακάτω τύπους:

$$I_x = \frac{V_{x\,rms}}{V_{out}}$$

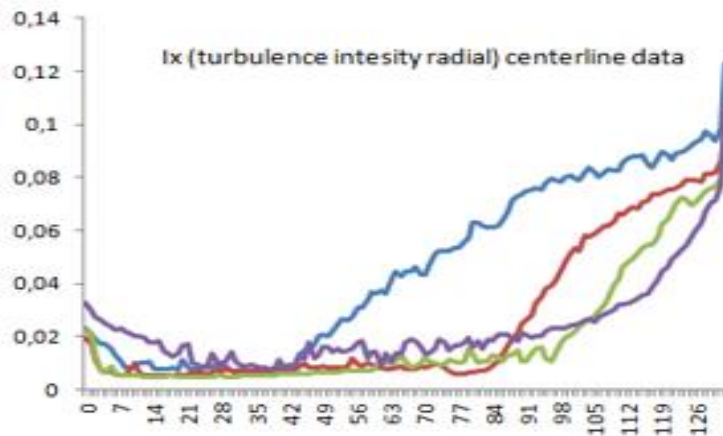
$$I_y = \frac{V_{y\,rms}}{V_{out}}$$

$$I_{total} = \frac{V_{rms}}{V_{out}}$$

Παίρνοντας τα δεδομένα από τα centerlines βγαίνουν τα παρακάτω διαγράμματα για την περίπτωση των I_x , I_{total} , I_y .

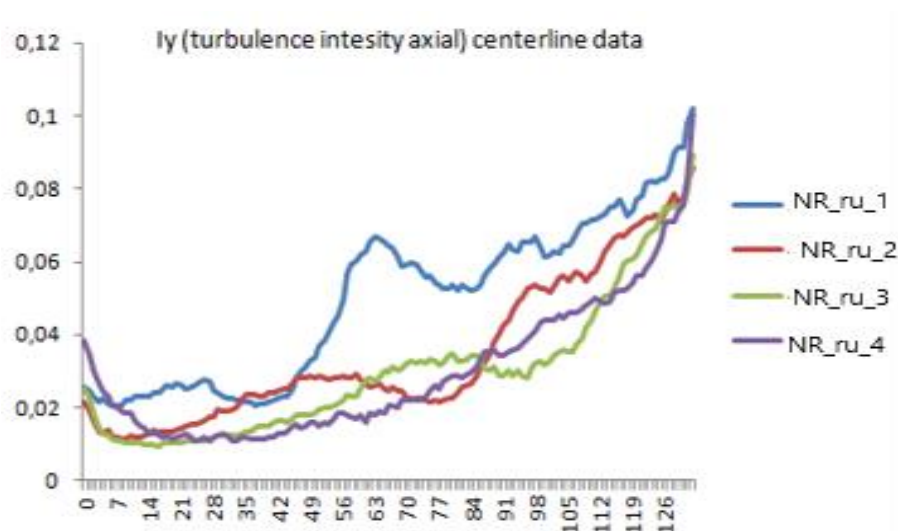
Οι εντάσεις τύρβης I_x , I_y προέκυψαν από τον λόγο των RMS ταχυτήτων προς την ταχύτητα V_{out} . Η συνολική ένταση τύρβης I_{total} αντιπροσωπεύει τη μη διαστασιοποιημένη κινητική ενέργεια τύρβης της ροής και υπολογίστηκε ως $\frac{V_{rms}}{V_{out}}$.

Στα παρακάτω διαγράμματα ο κατακόρυφος άξονας προσδιορίζει την εκάστοτε ένταση τύρβης ενώ οριζόντιος το ύψος των δύο ομόκεντρων σωλήνων μετρούμενος σε mm.

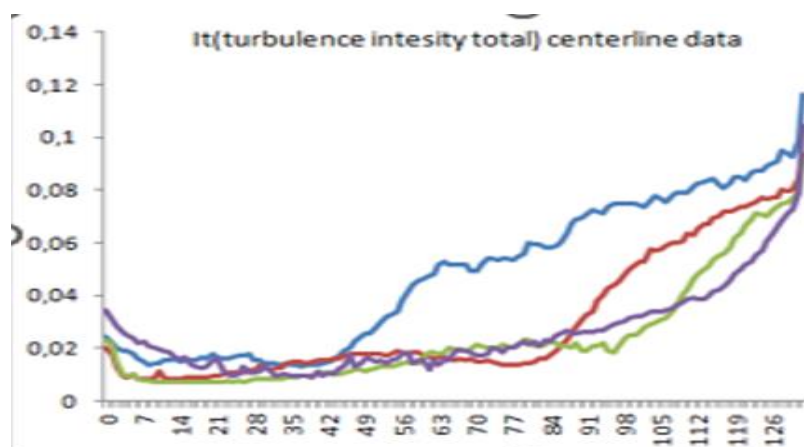


Εικόνα 24 Ακτινική ένταση τύρβης με δεδομένα από την centerline

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – [Τομέας Ενέργειας Αεροναυτικής και



Εικόνα 25 Αξονική ένταση τύρβης με δεδομένα από την centerline



Εικόνα 26 Συνολική ένταση τύρβης με δεδομένα από την centerline

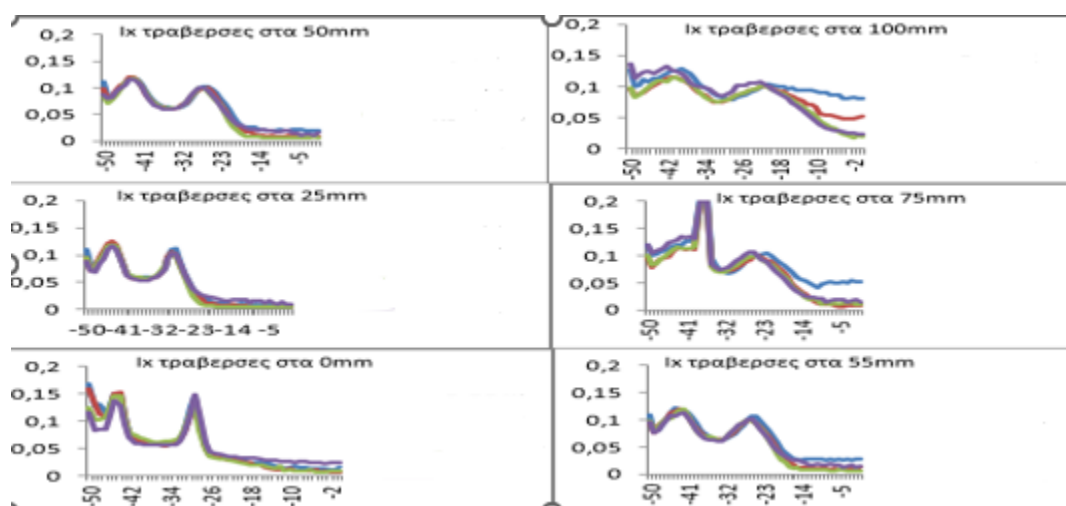
Στις παραπάνω εικόνες παρατηρείται ότι για τις τιμές της ανακυκλοφορίας 56 με 100 mm για την περίπτωση NR_ru_1 και 87 με 108 mm για την περίπτωση NR_ru_2 οι τιμές της έντασης της τύρβης είναι μεγαλύτερες σε σχέση με εκείνες των περιπτώσεων NR_ru_3 και NR_ru_4 ενώ ταυτόχρονα εμφανίζουν έντονες διακυμάνσεις. Επίσης, παρατηρείται ότι άσχετα από την ανακυκλοφορία μιας και έχουμε ροές ίδιου τύπου με την μόνη διαφορά τον λόγο ταχυτήτων τους

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – [Τομέας Ενέργειας Αεροναυτικής και

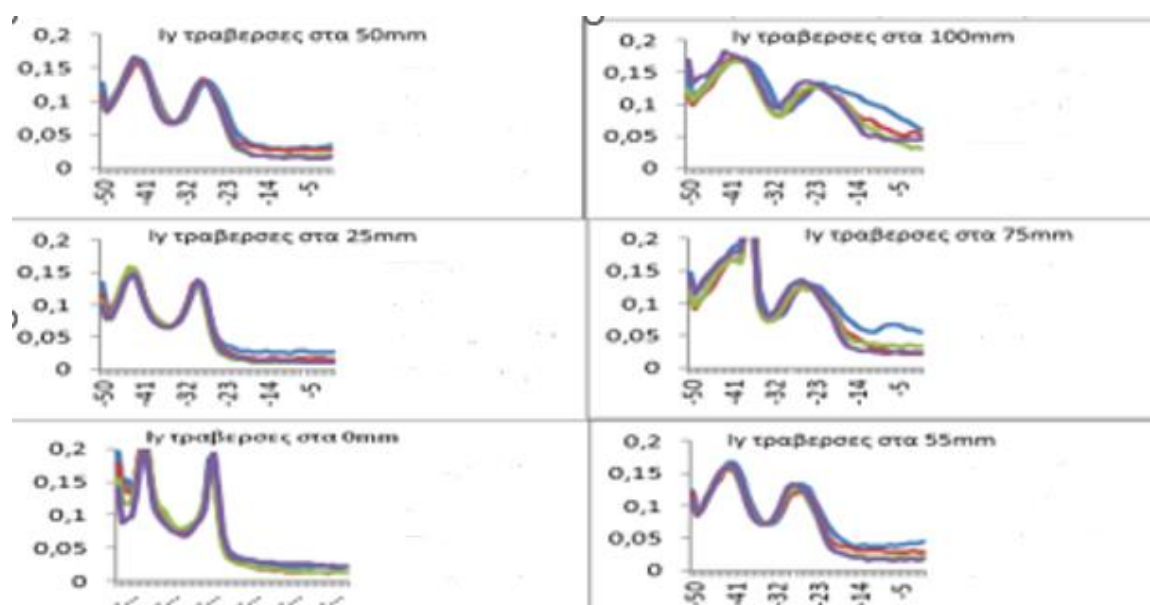
ότι στην περίπτωση της αξονικής διεύθυνσης σε μεγαλύτερους λόγους ταχυτήτων θα παρουσιάζεται σταδιακά μεγαλύτερη ένταση τύρβης κάτι που οφείλεται στους μεγαλύτερους αριθμούς Reynolds που επιτυγχάνονται μιας και οδηγούν σε ένα πιο τυρβώδες πεδίο.

Επιπροσθέτως, όσο πιο ψηλά στην ροή των ομόκεντρων σωλήνων φαίνεται μια πολύ γρήγορη αύξηση των τιμών της έντασης της τύρβης μιας και εκεί είναι που φτάνει στο σημείο συγχώνευσης των δύο ροών. Γεγονός που οδηγεί στην δημιουργία στροβιλισμών που αυτοί με την σειρά τους οδηγούν σε αύξηση αυτών των τιμών.

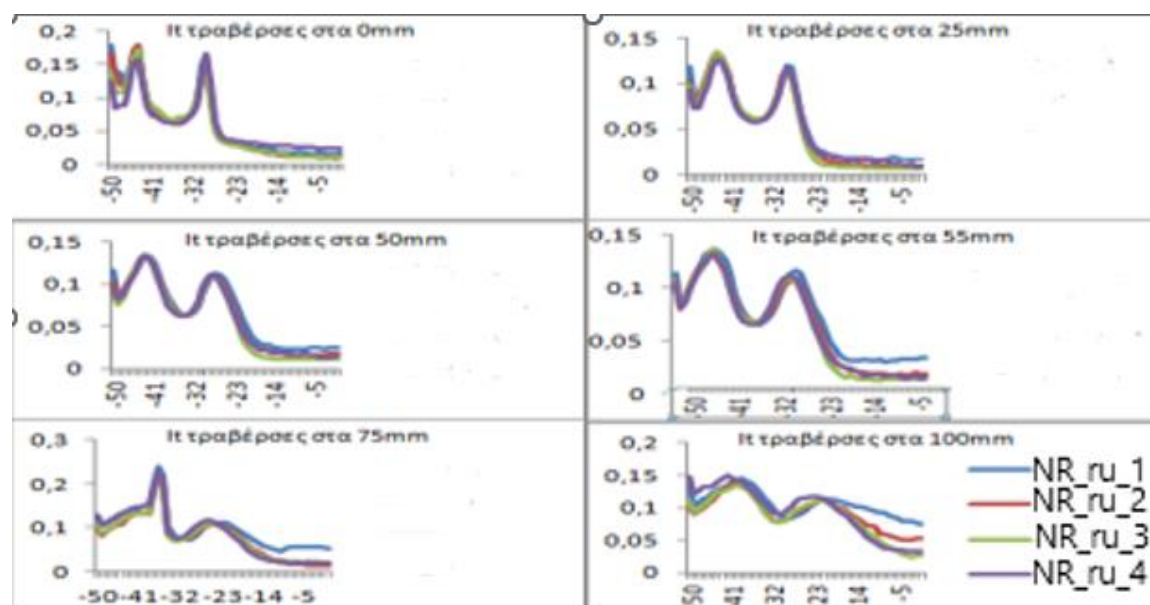
Στα παρακάτω διαγράμματα ο οριζόντιος άξονας είναι το ακτινικό μήκος των δύο ομόκεντρων σωλήνων ενώ ο κατακόρυφος οι τιμές της έντασης της τύρβης στην εκάστοτε περίπτωση.



Εικόνα 27 Τραβέρσες για την ακτινική ένταση τύρβης



Εικόνα 28 Τραβέρσες για την αξονική ένταση τύρβης



Εικόνα 29 Τραβέρσες για την συνολική ένταση τύρβης

Στα παραπάνω διαγράμματα φαίνεται η κατανομή της έντασης της τύρβης σε οριζόντιες διευθύνσεις (τραβέρσες οι οποίες ξεκινούν από την άκρη του εξωτερικού σωλήνα μέχρι το κέντρο των δύο ομόκεντρων κυλίνδρων μιας και η ροή είναι συμμετρική) σε διάφορα ύψη της ροής που απασχολεί το πείραμα αυτό δηλαδή τα ύψη 0mm (exit plane), 25mm, 50mm, 55mm, 75mm, 100mm.

Σε όλες τις περιπτώσεις δηλαδή I_x , I_y , I_t παρατηρείται ότι στο exit plane εμφανίζονται μεγάλες τιμές έντασης της τύρβης και στην συνέχεια σε μεγαλύτερα ύψη της ροής οι τιμές αυτές μειώνονται. Η υψηλή ένταση της τύρβης στο επίπεδο εξόδου μιας ροής (exit plane) μπορεί να προκληθεί από διάφορους παράγοντες:

1. Μετάβαση ροής: Εάν η ροή υφίσταται μετάβαση από στρωτή σε τυρβώδη ροή εντός του πεδίου ροής, η ένταση της τύρβης μπορεί να αυξηθεί καθώς η ροή προχωρεί προς τα κάτω. Αυτό συμβαίνει συχνά σε ροές σε σωλήνες, όπου η τύρβη αναπτύσσεται καθώς το ρευστό ταξιδεύει κατά μήκος του σωλήνα.
2. Εμπόδια ροής: Τα εμπόδια ροής ή τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά κοντά στην έξοδο μπορούν να δημιουργήσουν τύρβη. Αυτά τα χαρακτηριστικά μπορούν να δημιουργήσουν δίνες ή διαχωρισμό της ροής, οδηγώντας σε αυξημένη ένταση τύρβης κατάντη.
3. Ανάμιξη ροής: Στο επίπεδο εξόδου, διαφορετικά ρεύματα ρευστού ή στρώματα ροής μπορεί να συναντηθούν και να αναμιχθούν. Αυτή η ανάμιξη μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένη ένταση τύρβης, καθώς οι διαφορετικές συνιστώσες ταχύτητας αλληλεπιδρούν και αναμιγνύονται με τύρβη.
4. Οριακά στρώματα: Εάν υπάρχουν οριακά στρώματα κοντά στην έξοδο, ιδίως κοντά σε τοίχους ή στερεές επιφάνειες, μπορεί να συμβάλλουν στην τύρβη. Η τύρβη συχνά ενισχύεται εντός των οριακών στρωμάτων λόγω των φαινομένων διάτμησης.

Στα ύψη 25mm, 50mm και 55mm φαίνονται χαμηλότερες τιμές έντασης τύρβης μιας και δεν βρίσκονται στο ύψος της ροής όπου γίνεται η ανακυκλοφορία. Έτσι στο σημείο των 75mm παρατηρούνται αυξημένες τιμές ενώ ταυτόχρονα παρατηρείται ότι στα 0mm της ακτινικής Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – [Τομέας Ενέργειας Αεροναυτικής και

διεύθυνσης βλέπουμε ότι η περίπτωση NR_ru_1 έχει αρχίσει και διαφοροποιείται από τις άλλες περιπτώσεις στην τραβέρσα των 50mm που σημαίνει ότι ήδη έχει αρχίσει η ανακυκλοφορία και για την περίπτωση NR_ru_2 παρατηρούμε αυτή την διαφοροποίηση μόνο για την τραβέρσα στα 100mm.

Αξίζει να προστεθεί ότι στο ύψος των 100mm παρατηρείται ότι αν και οι τιμές της έντασης της τύρβης είναι πιο μικρές έχουμε έντονες διακυμάνσεις και σημαντικές διαφορές στις τιμές των αποτελεσμάτων για όλους τους λόγους ταχυτήτων ενώ ταυτόχρονα για τους λόγους NR_ru_1 και NR_ru_2 των δύο ροών οι τιμές είναι όπως θα αναμενόταν μεγαλύτερες. Αυτό συμβαίνει μιας και έχει γίνει η συγχώνευση.

Επιπλέον στον οριζόντιο άξονα στα 25mm και στα 45mm (ακτινική διεύθυνση) παρατηρείται η δημιουργία δύο κορυφών όπου έχουμε υψηλές τιμές έντασης τύρβης. Αυτό γίνεται γιατί στα 25mm έχουμε ανάμιξη του διατρητικού στρώματος των δύο ροών όπου έρχονται σε επαφή ενώ στα 45mm έχουμε ανάμιξη των δύο ροών με τον εξωτερικό αέρα. Για την περίπτωση της ακτινικής έντασης τύρβης ισχύει ότι και για την αξονική στα 25 και 45mm της ακτινικής διεύθυνσης αλλά χωρίς να είναι σε τόσο έντονο βαθμό.

Στα 0mm της ακτινικής διεύθυνσης βλέπουμε ότι η περίπτωση NR_ru_1 έχει αρχίσει και διαφοροποιείται από τις άλλες περιπτώσεις στην τραβέρσα των 50mm που σημαίνει ότι ήδη έχει αρχίσει η ανακυκλοφορία και για την περίπτωση NR_ru_2 παρατηρούμε αυτή την διαφοροποίηση μόνο για την τραβέρσα στα 100mm.

8.3 ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΡIV

Αβεβαιότητα που οφείλεται στην εγκατάσταση

Η αβεβαιότητα που οφείλεται στην εγκατάσταση έχει να κάνει με τις παρακάτω παραμέτρους:

- Καλιμπράρισμα κάμερας: Το σύστημα βαθμονόμησης των φωτογραφικών μηχανών και των φακών εισάγει αβεβαιότητες. Τυχόν ανακρίβειες στον προσδιορισμό των εσωτερικών και εξωτερικών παραμέτρων της κάμερας μπορούν να επηρεάσουν την ακρίβεια των μετρήσεων ταχύτητας.
- Καλιμπράρισμα λέιζερ: Η ισχύς και το προφίλ δέσμης του λέιζερ που χρησιμοποιείται για τον φωτισμό πρέπει να είναι καλά βαθμονομημένα. Οι μεταβολές στην ισχύ του λέιζερ ή τα μη ομοιόμορφα προφίλ δέσμης μπορούν να εισάγουν αβεβαιότητες στην ποιότητα της εικόνας των σωματιδίων.
- Παραμορφώσεις φακών: Οι παραμορφώσεις του φακού της κάμερας μπορεί να επηρεάσουν την ακρίβεια των μετρήσεων ΡIV. Η κατάλληλη διόρθωση των παραμορφώσεων του φακού είναι απαραίτητη για την ελαχιστοποίηση των αβεβαιοτήτων.
- Μέγεθος εικονοστοιχείου της κάμερας: Η ακρίβεια των μετρήσεων ΡIV επηρεάζεται από το μέγεθος των εικονοστοιχείων στις εικόνες. Τα μικρά μεγέθη εικονοστοιχείων μπορούν να βελτιώσουν τη χωρική ανάλυση, αλλά μπορεί επίσης να αυξήσουν την ευαισθησία στο θόρυβο.

Οι πηγές αβεβαιότητας που σχετίζονται με την εγκατάσταση παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα. Σύμφωνα με την αβεβαιότητα μιας μέτρησης ταχύτητας ΡIV λόγω σφαλμάτων του εξοπλισμού μπορεί να εκφραστεί ως εξής (εξίσωση 5.2):

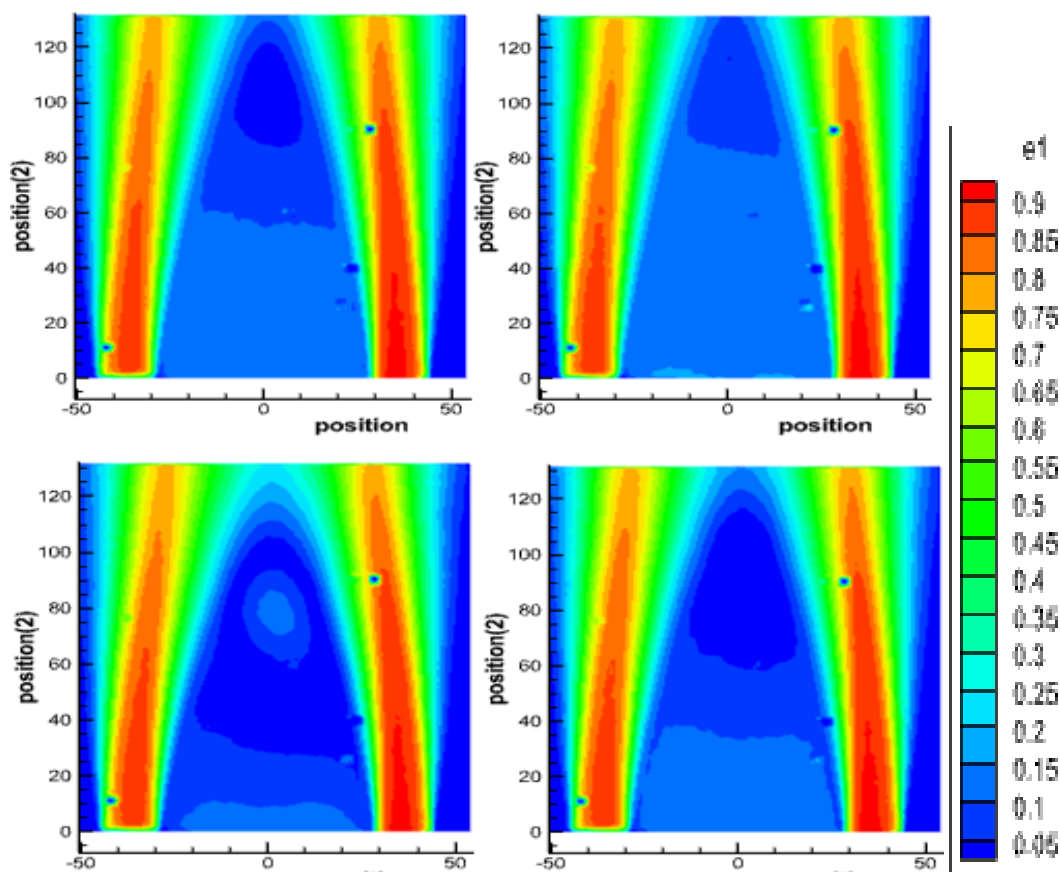
Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – [Τομέας Ενέργειας Αεροναυτικής και

$$W_u = \sqrt{u^2 \left[\left(\frac{l}{L} w_l \right)^2 + \left(-\frac{l}{L^2} w_{L1} \right)^2 + \left(-\frac{l}{L^2} w_{L2} \right)^2 + \left(\frac{l}{hL} w_h \right)^2 \right] + \left(-\frac{ul}{\Delta t} \left(\frac{l}{L} \right) \right)^2 \cdot (w_{t1}^2 + w_{t2}^2)}$$

Συμβολισμός	Περιγραφή	Τιμή	Μονάδα μέτρησης
L	Μήκος της κλίμακας καλιμπραρίσματος	0.01	M
L	Μέγεθος εικόνας	1219	px
W _l	Σφάλμα στην απόσταση της πλάκας καλιμπραρίσματος	1E-05	m
WL ₁	σφάλμα στην απόσταση του κάδρου της εικόνας	1	px
WL ₂	Σφάλμα στην παραμόρφωση εικόνας λόγω εκτροπών	1	px
λ	απόσταση της πλάκας καλιμπραρίσματος από τον φακό	0.5	m
W _λ	Σφάλμα στην τοποθέτηση της κλίμακας καλιμπραρίσματος	5E-04	m
Δt	Χρονικός διαχωρισμός παλμών λείζερ	2E-08	s
W _{t1}	Σφάλμα στον χρονισμό των παλμών λείζερ	2E-09	s
W _{t2}	Σφάλμα στην ακρίβεια στην γεννήτρια καθυστέρησης	1E-09	s

Οι αντίστοιχες κατανομές αβεβαιότητας παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα , για τις περιπτώσεις που διερευνήθηκαν. Στο σχήμα παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της εξίσωσης 5.2 που διαιρείται με τη μέγιστη ταχύτητα του εξωτερικού ρεύματος, ενώ ταυτόχρονα η μέγιστη αβεβαιότητα φτάνει σε τιμές έως και 1,5 %.

$$W_u = \sqrt{u^2 \left[\left(\frac{l}{L} w_l \right)^2 + \left(-\frac{l}{L^2} w_{L1} \right)^2 + \left(-\frac{l}{L^2} w_{L2} \right)^2 + \left(\frac{l}{hL} w_h \right)^2 \right] + \left(-\frac{ul}{\Delta t} \left(\frac{l}{L} \right) \right)^2 \cdot (w_{t1}^2 + w_{t2}^2)}$$



Εικόνα 30 Αβεβαιότητα λόγω εγκατάστασης

Αβεβαιότητα που οφείλεται στην δυναμική των σωματιδίων

Η αβεβαιότητα που οφείλεται στην δυναμική των σωματιδίων έχει να κάνει με τις παρακάτω παραμέτρους:

- Κατανομή μεγέθους σωματιδίων: Η μεταβλητότητα στην κατανομή μεγέθους των σωματιδίων εισαγωγής μπορεί να εισάγει αβεβαιότητες στον προσδιορισμό της ταχύτητας του ρευστού. Είναι σημαντικό να χαρακτηριστεί και να ελεγχθεί η κατανομή μεγέθους των σωματιδίων ως μέρος της ανάλυσης αβεβαιότητας.
- Αποκλίσεις της τροχιάς των σωματιδίων: Η δυναμική των σωματιδίων, συμπεριλαμβανομένων των αποκλίσεων από τις ιδανικές τροχιές λόγω τύρβης ή δευτερευουσών ροών, μπορεί να εισαγάγει αβεβαιότητες στις μετρήσεις ταχύτητας. Η κατανόηση και η ποσοτικοποίηση αυτών των αποκλίσεων είναι ζωτικής σημασίας.
- Ποιότητα εικόνας σωματιδίων: Οι διακυμάνσεις στην ποιότητα της εικόνας των σωματιδίων, όπως θολές εικόνες ή επικαλυπτόμενα σωματίδια, μπορούν να εισάγουν αβεβαιότητες στη διαδικασία εντοπισμού των σωματιδίων και στις επακόλουθες μετρήσεις ταχύτητας.

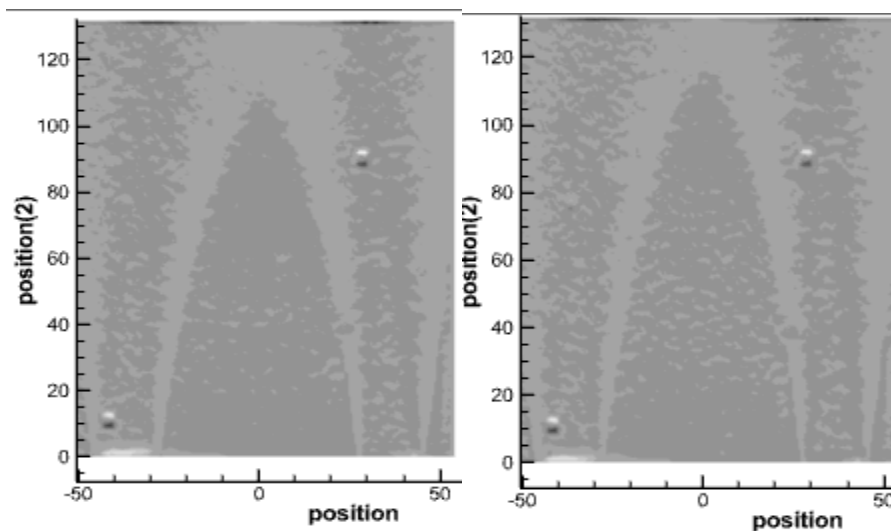
Για να εκτιμηθεί η ικανότητα των επιλεγμένων σωματιδίων ανίχνευσης να παρακολουθούν με ακρίβεια τη ροή, η δύναμη αντίστασης του Stokes που ασκείται σε αυτά έχει ληφθεί υπόψη. Με βάση το νόμο του Stokes και θεωρώντας ένα σωματίδιο χαμηλού αριθμού Reynolds η σχέση μεταξύ της ταχύτητας ροής (u_f) και της μετρούμενης ταχύτητας σωματιδίων (u_p) μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

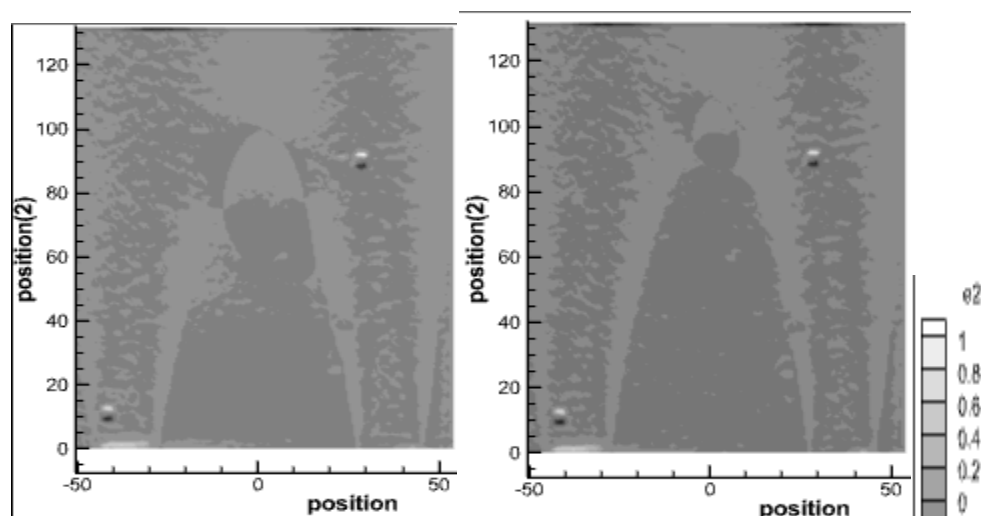
$$u_f - u_p = \frac{1}{18} \frac{\rho_p d_p^2}{\mu_f} \left(\frac{\partial u_p}{\partial x_p} \frac{\partial x_p}{\partial t} + \frac{\partial u_p}{\partial y_p} \frac{\partial y_p}{\partial t} \right)$$

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – [Τομέας Ενέργειας Αεροναυτικής και

Όπου $\rho_p = 4000 \text{ kg/m}^3$ είναι η μέση πυκνότητα των σωματιδίων, $d_p = 5 \mu\text{m}$ είναι η μέση διάμετρος των σωματιδίων, $\mu_f = 1.825 \cdot 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$ είναι το δυναμικό ιξώδες του αέρα στους 20°C .

Παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα οι αβεβαιότητες που οφείλονται στη δυναμική των σωματιδίων.





Εικόνα 31 Αβεβαιότητα λόγω δυναμικής σωματιδίων

Αβεβαιότητα που οφείλεται στην δειγματοληψία

Η αβεβαιότητα που οφείλεται στην δυναμική των σωματιδίων έχει να κάνει με τις παρακάτω παραμέτρους:

- Χωρική δειγματοληψία: Η χωρική ανάλυση του PIV επηρεάζεται από την πυκνότητα των σωματιδίων στο φωτιζόμενο επίπεδο. Η ανεπαρκής πυκνότητα σωματιδίων ή η ανομοιόμορφη διανομή τους μπορεί να οδηγήσει σε αβεβαιότητες στις μετρήσεις ταχύτητας, ιδίως σε περιοχές με χαμηλή συγκέντρωση σωματιδίων.
- Χρονική δειγματοληψία: Ο ρυθμός λήψης καρέ της κάμερας καθορίζει τη χρονική ανάλυση. Η ανεπαρκής χρονική δειγματοληψία μπορεί να οδηγήσει σε αβεβαιότητες όσον αφορά την ακριβή καταγραφή των μεταβατικών φαινομένων ροής.
- Μέγεθος παραθύρου διερεύνησης: Το μέγεθος του παραθύρου διερεύνησης που χρησιμοποιείται κατά τη διαδικασία διασταυρούμενης συσχέτισης επηρεάζει την ακρίβεια

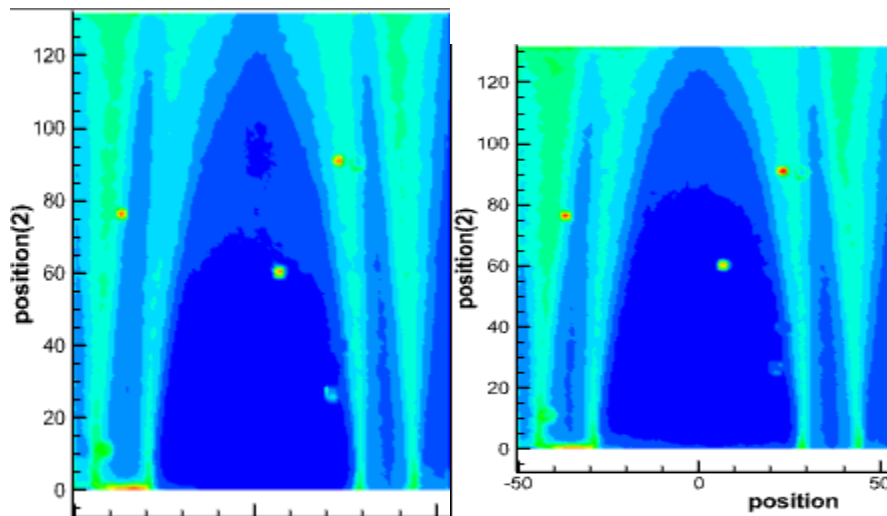
των μετρήσεων ταχύτητας. Τα μικρότερα παραθυρά βελτιώνουν τη χωρική ανάλυση, αλλά μπορεί να αυξήσουν τις αβεβαιότητες σε θορυβώδεις περιοχές.

- Στατιστική δειγματοληψία: Ο αριθμός των δειγμάτων και η στατιστική σπουδαιότητα του συνόλου δεδομένων που χρησιμοποιείται για την ανάλυση μπορεί να επηρεάσει την αβεβαιότητα του τελικού πεδίου ταχύτητας.

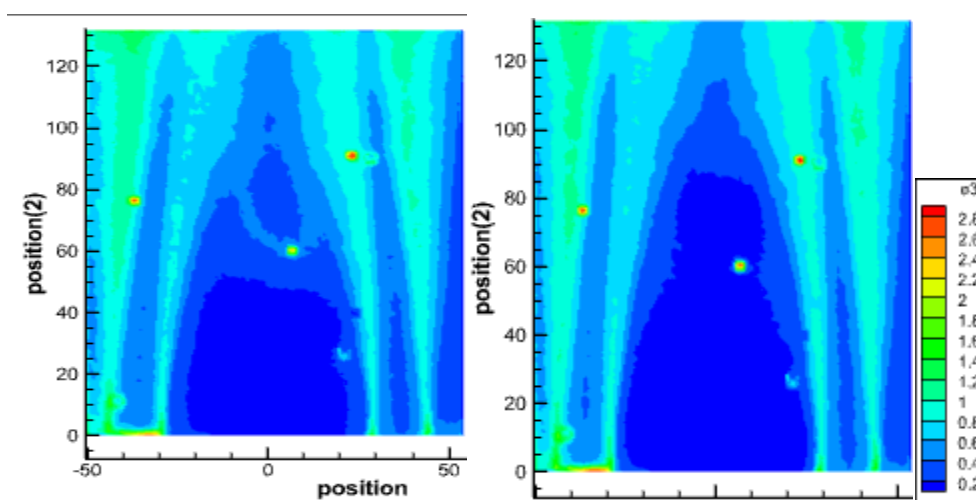
Η αβεβαιότητα των μετρήσεων του μέσου διανύσματος ταχύτητας PIV λόγω της δειγματοληψίας έχει επίσης εκτιμηθεί για ένα διαστήμα εμπιστοσύνης 95%, ως εξής:

$$\varepsilon_s = \frac{z_{\alpha/2}}{\sqrt{N}} * \frac{u'}{U_{out}} \%$$

Όπου $z_{\alpha/2} = 1.96$, N είναι ο αριθμός ζευγών εικόνων του PIV και u' είναι η μεταβλητή της μεταβαλλόμενης αξονικής ταχύτητας. Η αβεβαιότητα λόγω της δειγματοληψίας παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



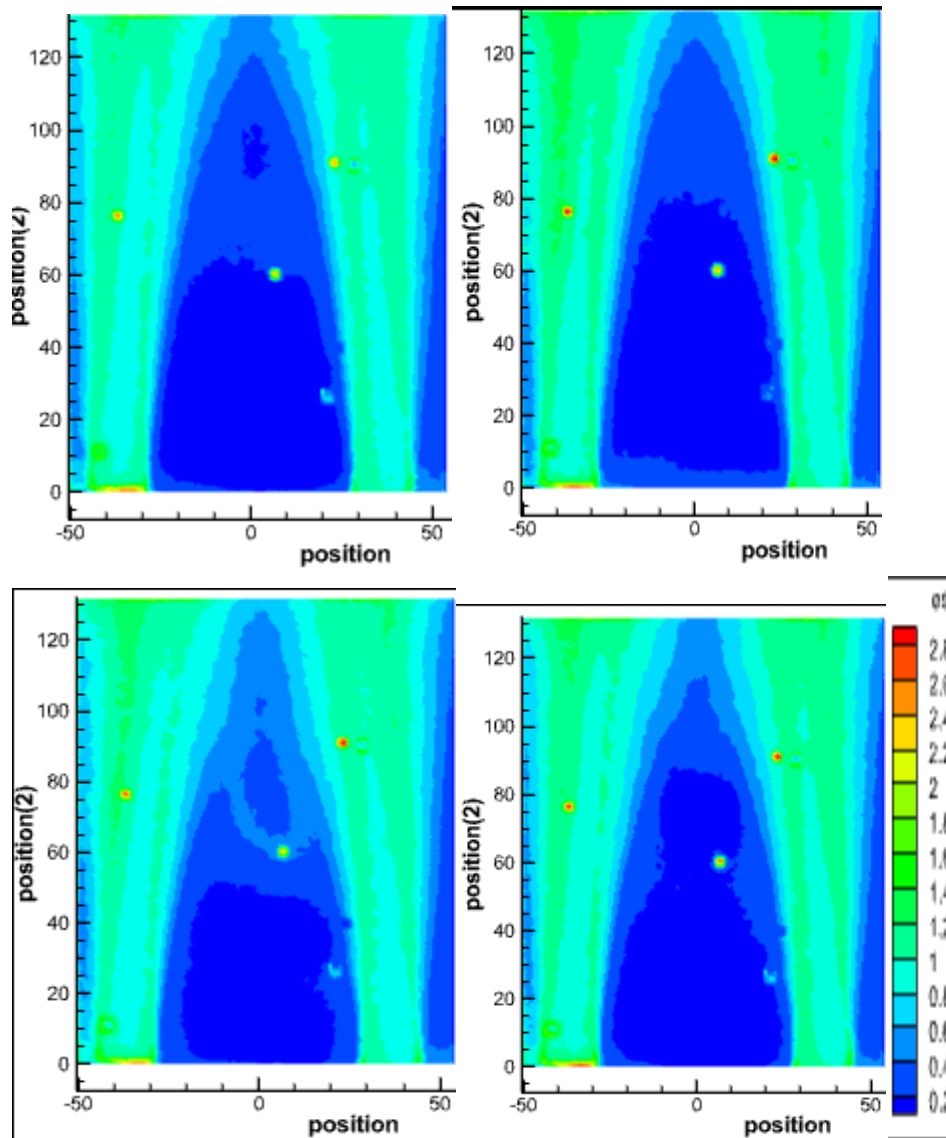
Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – [Τομέας Ενέργειας Αεροναυτικής και



Εικόνα 32 Αβεβαιότητα λόγω δειγματοληψίας

Συνολική αβεβαιότητα

Τελικά η συνδυαστική αβεβαιότητα λόγω του PIV παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 33 Συνολική αβεβαιότητα λόγω του PIV

9.0 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

9.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με βάση τα αποτελέσματα που εμφανίστηκαν είναι δυνατό να εξαχθούν συμπεράσματα αλλά και ο τρόπος λειτουργίας της εγκατάστασης. Οι διαφορετικοί λόγοι ταχυτήτων έχουν ως αποτέλεσμα η ανακυκλοφορία να εμφανίζεται σε υψηλούς λόγους ταχυτήτων (περιπτώσεις NR_ru_1 και NR_ru_2). Μάλιστα η ανακυκλοφορία της ροής μπορεί να συμβάλει στην αεροδυναμική σταθεροποίηση των αέριων φλογών με την δημιουργία περιοχών ελεγχόμενης ροής ρευστού, η ανακυκλοφορία μπορεί να παρέχει σταθερά περιβάλλοντα για τη διάδοση της φλόγας. Αυτή η σταθερότητα μπορεί να είναι ζωτικής σημασίας σε εφαρμογές όπου η διατήρηση μιας σταθερής και ελεγχόμενης φλόγας είναι απαραίτητη. Στο ίδιο συμπέρασμα μπορούμε να φτάσουμε και από την ανάλυση της έντασης του τυρβώδους πεδίου μιας και στις περιπτώσεις που επιτυγχάνεται η ανακυκλοφορία έχουμε υψηλές τιμές έντασης τύρβης κάτι που φανερώνει την θέση των διατμητικών στρωμάτων και τα όρια της ανακυκλοφορίας, όπου αναμένεται να σταθεροποιηθεί ή φλόγα. Τέλος, μετά από ανάλυση της αβεβαιότητας της μεθόδου PIV με την οποία εξήχθησαν τα αποτελέσματα του πειράματος παρατηρήθηκε ότι για όλες τις περιπτώσεις αβεβαιότητας τα ποσοστά σφάλματος ήταν μικρά, κάτι που καταδεικνύει την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της έρευνας αυτής.

9.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Μια πρόταση για μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να είναι η μελέτη του αντιδρώντος πεδίου στην εργαστηριακή εγκατάσταση αλλά ταυτόχρονα και χρήση διαφορετικού καυσίμου(πχ προπάνιο,

αμμωνία κλπ.) έτσι ώστε να μελετηθεί η αεροδυναμική σταθεροποίηση διαστρωματομένων φλογών σε αντίστοιχους λόγους ταχυτήτων και πώς διαφέρει συγκριτικά με αυτή του προπάνιου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Stephen R. Turns.,(2012), An Introduction To Combustion: Concepts And Applications, McGraw-Hill Companies, New York
2. P.A. Davidson,(2015), TURBULENCE: An Introduction For Scientists And Engineers, Oxford University Press
3. Souflas K., (2019), Turbulent mixing and reacting flow characteristics of axisymmetric bluff-body stabilized propane-air flames, under inlet mixture stratification and preheat (Doctoral Dissertation, University of Patras, Patras, Greece)
4. E. Lazar, B. DeBlauw, N. Glumac, C. Dutton, G. Elliott, A Practical Approach to PIV Uncertainty Analysis, in: 27th AIAA Aerodyn. Meas. Technol. Gr. Test. Conf., 2010
5. S.B. Pope, Turbulent flows, Cambridge University Press, 2000.
6. J.O. Hinze, Turbulence, McGraw-Hill, New York, 1975.
7. Paterakis G., (2020), EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF ISOTHERMAL AND REACTING FLOW CHARACTERISTICS DOWNSTREAM OF AXISYMMETRIC BLUFF BODY STABLIZERS UNDER STRATIFIED OR FULLY PREMIXED INLET MIXTURE CONDITIONS (Doctoral Dissertation, University of Patras, Patras, Greece), Retrieved from <https://nemertes.library.upatras.gr/jspui/>
8. R.J. Adrian, Twenty years of particle image velocimetry, Exp. Fluids. 39 (2005)
9. F. CHEN, H. LIU, Particle image velocimetry for combustion measurements: Applications and developments, Chinese J. Aeronaut. 31 (2018)

10. Yunus A. Cengel, Michael A. Boles,(2018), 8^η Έκδοση, Θερμοδυναμική για Μηχανικούς, Εκδόσεις Τζίολα
11. Yunus A. Cengel, Afshin J. Ghajar,(2018), 5^η Έκδοση, Μεταφορά Μάζας Και Θερμότητας Βασικές Αρχές Και Εφαρμογές, Εκδόσεις Τζίολα
12. T. Poinso, D. Veynante, Theoretical and numerical combustion, J. Chem. Inf. Model.(2013)
13. R. Blint, The relationship of the laminar flame width to flame speed, Combust. Sci. Technol. (1986).
14. Κολαΐτης Δ., Φούντη Μ., ΘΕΩΡΙΑ ΚΑΥΣΗΣ, (2014), Fountas, Αθήνα, Ελλάδα
15. Παπανίκας Δ.Γ., (2010), ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗ (4η έκδοση), Εκδόσεις Παπανίκας, Πάτρα-Αθήνα, Ελλάδα
16. Στεφανόπουλος Γεώργιος, (2022), ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΠΕΔΙΟΥ ΡΟΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΜΕΙΞΗΣ ΣΕ ΠΡΩΤΟΤΥΠΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΩΜΕΝΩΝ ΦΛΟΓΩΝ ΑΕΡΙΩΝ ΜΕΙΓΜΑΤΩΝ, Πάτρα, Ελλάδα
17. Πάνου Σταύρος-Μάριος, (2022), Πειραματική διερεύνηση του λόγου χημειοφωταύγειας OH^*/CH^* σε αεροδυναμικά σταθεροποιημένες φλόγες, με διαστρωμάτωση του εισερχόμενου μείγματος, Πάτρα, Ελλάδα
18. René van Hout , Sudharson Murugan , Abhijit Mitra and Beni Cukurel,(2021), Coaxial Circular Jets—A Review

19. Eli Lazar , Bradley DeBlauw , Nick Glumac , Craig Dutton and Gregory Elliott,(2010), A Practical Approach to PIV Uncertainty Analysis, University of Illinois