

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΡΙΔΙΝΟΥΜΕΝΩΝ ΟΜΟΑΞΟΝΙΚΩΝ ΡΟΩΝ

Ναζάκης Α., Περράκης Κ., Πανίδης Θ.

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών  
26504 Πανεπιστημιούπολη Ρίο, email: andreasnaxakis@upatras.gr, panidis@upatras.gr

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

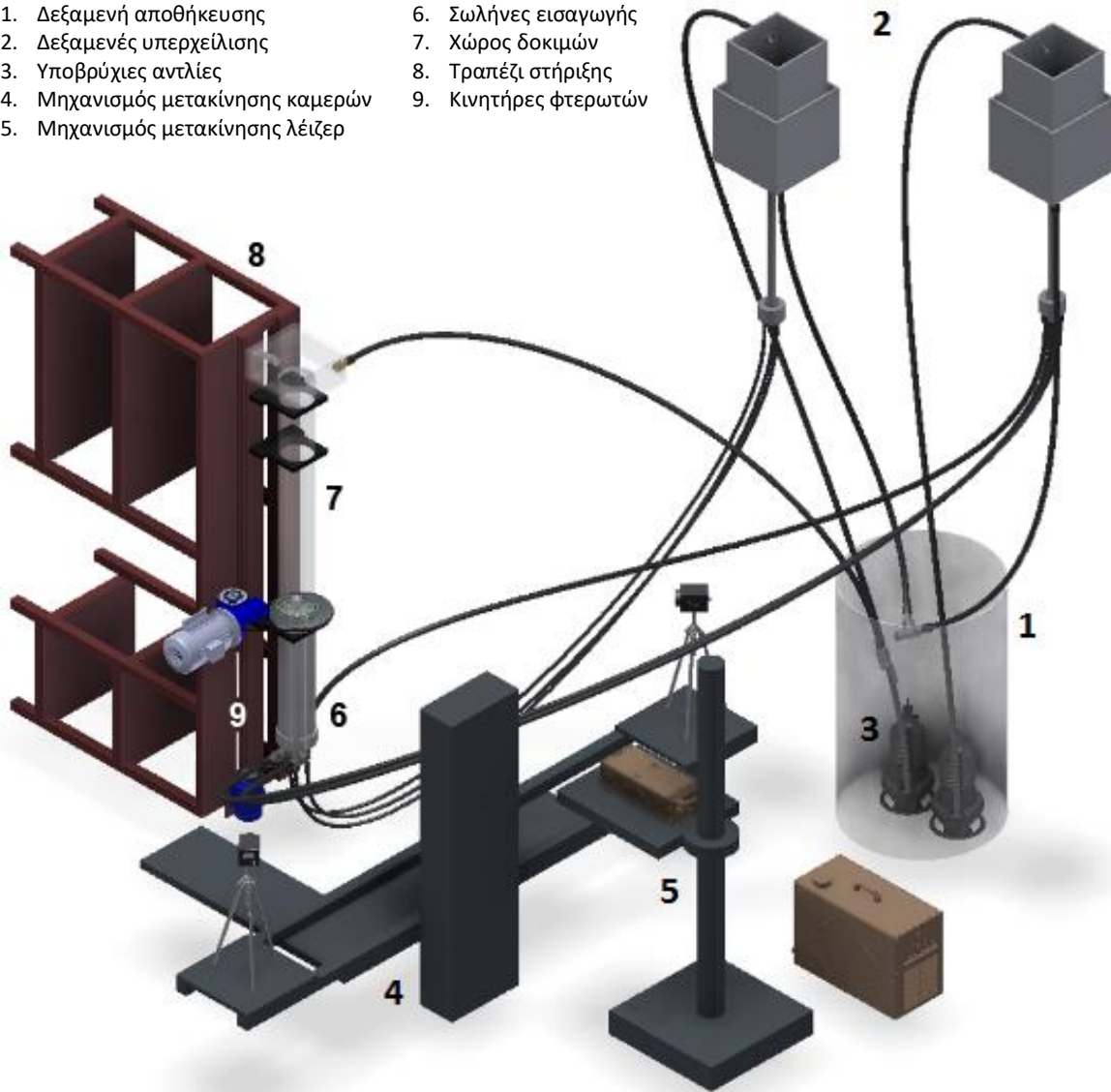
Παρουσιάζονται πειραματικά αποτελέσματα από τη μελέτη ομοαξονικών ροών με περιδίνηση, με στόχο την κατανόηση των περιδινούμενων ροών κοντά σε συνθήκες αποδόμησης του αξονικού μακροστροβίλου (vortex breakdown). Η πειραματική διάταξη αποτελείται από δύο ομοαξονικούς ευθύγραμμους σωλήνες. Οι ροές νερού που αναπτύσσονται στον εσωτερικό σωλήνα και τον δακτυλιοειδή αγωγό που τον περιβάλλει, αλληλεπιδρούν μετά το τέλος του εσωτερικού σωλήνα. Η περιδίνηση επιβάλλεται επιλεκτικά σε κάθε ροή, με τη χρήση περιστρεφόμενων φτερωτών τοποθετημένων πριν το σημείο αλληλεπίδρασης. Το ροϊκό πεδίο καταγράφεται με σύστημα στερεοσκοπικής ταχυμετρίας ψηφιακής εικόνας σωματιδίων (3D DPIV). Παρουσιάζονται αποτελέσματα για δύο παροχές της εσωτερικής ροής και μια της εξωτερικής, σε συνδυασμό με έναν ρυθμό περιστροφής της φτερωτής της εσωτερικής ροής και δύο ρυθμών της εξωτερικής. Οι αριθμοί Reynolds μαζί τους αριθμούς περιδίνησης (swirl ratio) της εσωτερικής και της εξωτερικής ροής και τον αριθμό Rossby είναι οι αδιάστατοι αριθμοί που χαρακτηρίζουν το φαινόμενο. Παρουσιάζονται και σχολιάζονται η ανάπτυξη και η τοπολογία του ροϊκού πεδίου με βάση τις κατανομές των μέσων τιμών των τριών συνιστωσών της ταχύτητας και μιας συνιστώσας της στροβιλότητας καθώς και των τυρβωδών χαρακτηριστικών της ροής, σε ένα διάμηκες αξονικό επίπεδο στο εγγύς πεδίο. Δημιουργείται φυσαλίδα ανακυκλοφορίας, η τοπολογία της οποίας φαίνεται να επηρεάζεται σημαντικά από την περιδίνηση της εξωτερικής ροής.

**Λέξεις Κλειδιά:** Ροές με περιδίνηση, αποδόμηση αξονικού μακροστροβίλου, 3D PIV

### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι περιδινούμενες ροές είναι φαινόμενα που παρατηρούνται πολύ συχνά τόσο στη φύση (ανεμοστρόβιλοι, τυφώνες) όσο και σε τεχνολογικές εφαρμογές. Οι μηχανικοί τις μελετούν εδώ και δεκαετίες για να εκμεταλλευτούν τις θετικές τους ιδιότητες και να ελέγξουν τις αρνητικές τους πτυχές. Οι περιδινούμενες ροές βελτιώνουν τη ανάμιξη, ενισχύουν τη διάχυση, αυξάνουν την στροβιλότητα και βοηθούν στη σταθεροποίηση της ροής. Έτσι, οι ροές αυτού του τύπου, χρησιμοποιούνται ευρέως για τεχνολογικούς σκοπούς σε τομείς της μηχανικής, όπως σε μηχανήματα ψεκασμού (Lefebvre et al., 2017), στους κυκλωνικούς διαχωριστές (Rocha et al., 2015), σε συσκευές πρόωσης, σε πυραυλικά συστήματα (Wang et al., 2017), στους εναλλάκτες θερμότητας (Sheikholeslami et al., 2015), σε συστήματα ελέγχου της ρύπανσης (Zhixiang et al., 2017), στους στροβιλοκινητήρες (Peake et al., 2012) και στον σχεδιασμό θαλάμων καύσης (Terhaar et al., 2017, Lilley, 1977). Η περιδίνηση, μπορεί να παραχθεί με διάφορους μηχανισμούς, όπως με ακτινικά ή με αξονικά οδηγά πτερύγια, ή με έναν συνδυασμό και των δύο, με εραπτομενικούς εγχυτήρες, με περιστρεφόμενους σωλήνες κλπ. (Lucca-Negro et al., 2001). Έχει παρατηρηθεί ότι ισχυρή περιδίνηση προκαλεί την παραγωγή εσωτερικών ζωνών ανακυκλοφορίας και ισχυρή αντιστροφή της ροής. Ένα κυρίαρχο χαρακτηριστικό γνώρισμα αυτού του τύπου ροής, είναι η αποδόμηση αξονικού μακροστροβίλου (vortex breakdown) που

- |                                   |                       |
|-----------------------------------|-----------------------|
| 1. Δεξαμενή αποθήκευσης           | 6. Σωλήνες εισαγωγής  |
| 2. Δεξαμενές υπερχειλίσσης        | 7. Χώρος δοκιμών      |
| 3. Υποβρύχιες αντλίες             | 8. Τραπέζι στήριξης   |
| 4. Μηχανισμός μετακίνησης καμερών | 9. Κινητήρες φτερωτών |
| 5. Μηχανισμός μετακίνησης λείζερ  |                       |

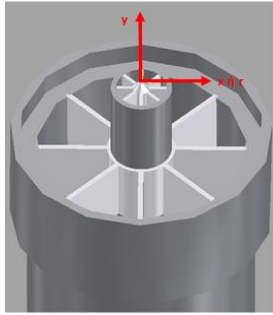


**Σχήμα 1:** Πειραματική διάταξη

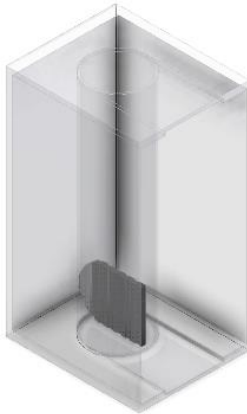
παρατηρήθηκε αρχικά σε πτέρυγες δέλτα από τους Petcham και Atkinson (1957). Ο Leibovich (1978), όρισε την αποδόμηση αξονικού μακροστροβίλου (vortex breakdown) ως μια διαταραχή που χαρακτηρίζεται από το σχηματισμό ενός εσωτερικού στάσιμου σημείου στον άξονα του στροβίλου, ακολουθούμενο από αντιστροφή της ροή σε μια περιοχή περιορισμένης αξονικής έκτασης.

## 2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

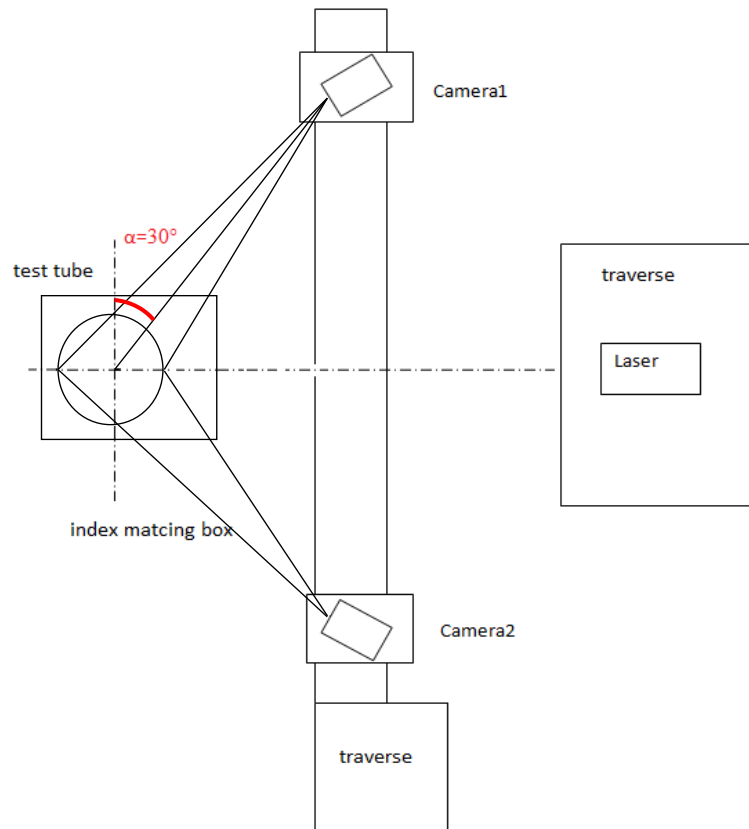
Η πειραματική διάταξη (Σχήμα 1), επιτρέπει την μελέτη της αλληλεπίδρασης περιδινούμενων ομοαξονικών ροών νερού. Ως ρευστό εργασίας χρησιμοποιείται απιονισμένο νερό. Η εξωτερική δακτυλιοειδής ροή αναπτύσσεται σε σωλήνα με εσωτερική διάμετρο,  $D_o=120\text{mm}$ , ενώ η εσωτερική σε σωλήνα με εσωτερική διάμετρο,  $D_i=29\text{mm}$ . Οι δύο σωλήνες εισαγωγής είναι μήκους 1 m και είναι κατασκευασμένοι από αεροναυπηγικό αλουμίνιο για να εξασφαλίζεται σταθερή διατομή σε όλο το μήκος τους. Οι δύο ροές έρχονται σε αλληλεπίδραση στο τμήμα δοκιμών που είναι κατασκευασμένο από ενιαίο σωλήνα plexiglass με εσωτερική διάμετρο  $D_o$  και μήκος 1 m. Το νερό τροφοδοτείται στο κύκλωμα και ανακυκλοφορεί, με την βοήθεια δύο υποβρύχιων αντλιών που βρίσκονται βυθισμένες μέσα σε μια δεξαμενή αποθήκευσης 200 λίτρων, στην οποία και επιστρέφει. Η σταθερότητα των επιβαλλόμενων παροχών στην εσωτερική και την δακτυλιοειδή ροή, εξασφαλίζεται με την χρήση συστημάτων δεξαμενών υπερχειλίσσης.



**Σχήμα 2:** Φτερωτές περιδίνησης & σύστημα συντεταγμένων



**Σχήμα 3:** Κιβώτιο και πλακέτα βαθμονομησης



**Σχήμα 4:** Σύστημα ταχυμετρίας εικόνας σωματιδίων

Η περιδίνηση εισάγεται από δύο περιστρεφόμενες φτερωτές μήκους  $L_1=40\text{mm}$  για την δακτυλιοειδή και  $L_2=100\text{mm}$  για την εσωτερική ροή, που βρίσκονται ακριβώς πριν από το σημείο αλληλεπίδρασης (Σχήμα 2). Μεγάλη προσοχή δόθηκε στην ευθυγράμμιση και τη μείωση της τύρβης των ροών πριν τη δημιουργία της περιδίνησης, με τη χρήση διαδοχικών πλεγμάτων (σίτες) και κυψελίδων (honeycombs) στα αρχικά τμήματα των ομοαξονικών σωλήνων. Το πλέγμα των σιτών είναι μεγέθους 1 mm και το μήκος των κυψελίδων 65 mm και βρίσκονται τοποθετημένες αμέσως μετά τα τμήματα εισόδου, μέσα στον εσωτερικό και τον δακτυλιοειδή σωλήνα αντίστοιχα και πριν τις φτερωτές. Οι αρχικές συνθήκες, οι παροχές και οι ρυθμοί περιστροφής μπορούν να ελεγχθούν παραμετρικά. Ρυθμιστές στροφών (inverters), καθοδηγούν δυο κινητήρες που ελέγχουν την γωνιακή ταχύτητα της εσωτερικής και της δακτυλιοειδούς φτερωτής.

## 2.1 Σύστημα μέτρησης

Οι μετρήσεις σε ροές με περιδίνηση ενέχουν μεγάλες δυσκολίες λόγω του σύνθετου ροϊκού πεδίου που σχηματίζεται και της ανακυκλοφορίας που συχνά παρατηρείται σε αυτού του τύπου τις ροές. Στο παρελθόν, οι παρεμβατικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνταν είχαν το μειονέκτημα ότι οι αισθητήρες που εισέρχονται μέσα στην ροή επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά της, σε μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό. Στις μέρες μας, έχουν αναπτυχθεί και διαρκώς εξελίσσονται αρκετές μη παρεμβατικές μέθοδοι μέτρησης ροών, όπως η ταχυμετρία Laser Doppler (LDV), και η ταχυμετρία εικόνας σωματιδίων (PIV) μεταξύ άλλων (Adrian, 1991), και έχουν κάνει δυνατή την ακριβή μέτρηση μιας ευρείας κλίμακας αρκετά πολύπλοκων ροϊκών πεδίων. Για τις παρούσες μετρήσεις, το μέσο και το τυρβώδες πεδίο ροής μετρήθηκαν στο αξονικό κεντρικό επίπεδο, χρησιμοποιώντας στερεοσκοπική ταχυμετρία εικόνας σωματιδίων (3D-PIV, Prasad, 2000, Σχήμα 4).

Η επιλογή αυτή, επιτρέπει την ταυτόχρονη παρακολούθηση των στιγμιαίων πεδίων και των τριών συνιστωσών της ταχύτητας σε ένα καθορισμένο επίπεδο που σχηματίζεται από το φύλλο φωτός ενός λέιζερ. Ως τροχοδεικτικά σωματίδια χρησιμοποιούνται κοίλα σφαιρίδια γυαλιού μέσου μεγέθους

60  $\mu\text{m}$  που εισάγονται στη δεξαμενή αποθήκευσης (Melling, 1997). Το φύλλο φωτός, πάχους 2 mm, παράγεται από ένα σύστημα laser Nd:YAG (Quantel EverGreen) διπλού παλμού στα 532 nm και διαμορφώνεται με έναν αποκλίνοντα κυλινδρικό φακό, τοποθετημένο στην κεφαλή του λέιζερ. Το φως που σκεδάζεται στα τροχιοδεικτικά σωματίδια καταγράφεται σε δύο κάμερες CCD (LaVision Imager Pro X 2M) εξοπλισμένες με φακούς Nikon AF Micro Nikkor 60 mm (f/4) και με φίλτρα ζώνης διέλευσης με φασματικό εύρος 525-550nm. Η γωνία απόκλισης της κάθε κάμερας από το κεντρικό επίπεδο είναι 30° (Σχήμα 4). Για να επιτευχθεί καλή ποιότητα εστίασης χρησιμοποιείται ένας προσαρμογέας Scheimpflug σε κάθε κάμερα. Για την εξάλειψη οπτικών στρεβλώσεων εφαρμόζεται η τεχνική ταιριάσματος των δεικτών διάθλασης (Budwig, 1994, Wiederseiner et al., 2011). Για τον σκοπό αυτό γύρω από τον κυλινδρικό χώρο δοκιμών τοποθετείται στεγανά ένα ορθογώνιο κιβώτιο μεγέθους 305mmx246mmx530mm από Plexiglas, το οποίο γεμίζεται με γλυκερίνη, ώστε να μειωθεί η επίδραση των στρεβλώσεων που προκαλεί η διάθλαση λόγω της καμπυλότητας του σωλήνα και των διαφορετικών δεικτών διάθλασης στην οπτική διαδρομή θέασης. Η βαθμονόμηση του μετρητικού συστήματος πραγματοποιείται πάντα πριν από κάθε μέτρηση. Για αυτό το σκοπό κατασκευάστηκε κιβώτιο βαθμονόμησης από plexiglass με ένα σωλήνα γεμάτο με νερό εσωτερικά και γλυκερίνη εξωτερικά, πανομοιότυπο με αυτά του τμήματος δοκιμών που τοποθετείται παράλληλα στο τμήμα δοκιμών. Όλο μαζί το σύστημα των καμερών μετακινείται, χρησιμοποιώντας έναν ενιαίο μηχανισμό μετακίνησης και οι κάμερες εστιάζουν στην πλακέτα βαθμονόμησης (ιδιοκατασκευή σύμφωνα με το σχέδιο 11-3d της LaVision) που είναι τοποθετημένη κατάλληλα στο αντίστοιχο επίπεδο μέτρησης. Μετά την καταγραφή των εικόνων βαθμονόμησης, το κιβώτιο βαθμονόμησης αποσύρεται και το οπτικό σύστημα μετακινείται πίσω στο χώρο δοκιμών. Η περιοχή φωτογράφισης, πλάτους 126 mm και ύψους 168 mm καταγράφεται από αισθητήρες CCD με ανάλυση 1200x1600 pixel, που αντιστοιχεί σε μέγεθος pixel 7.4  $\mu\text{m}$ . Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας λήφθηκαν τουλάχιστον 800 ζεύγη φωτογραφιών σε κάθε συνθήκη μέτρησης με συχνότητα δειγματοληψίας 7 Hz για να εξασφαλιστεί επαρκής σύγκλιση των αποτελεσμάτων. Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων γίνεται με το λογισμικό Davis 8.2.2 της LaVision. Χρησιμοποιήθηκε παράθυρο διερεύνησης 64 x 64 pixels με επικάλυψη 50%, για τις πρώτες τρεις επεξεργασίες και 32 x 32 pixels με επικάλυψη 75% για την τελευταία επεξεργασία μεγάλης ακρίβειας.

Οι μετρήσεις αναφέρονται σε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων, το οποίο συσχετίζεται με το κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων ως προς τον άξονα των σωλήνων ως εξής: Οι συντεταγμένες x και y βρίσκονται πάνω στο αξονικό επίπεδο που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις, με την x στην εγκάρσια (ακτινική) διεύθυνση και την y να συμπίπτει με τον άξονα των σωλήνων στην κατακόρυφη διεύθυνση. Η αρχή των αξόνων βρίσκεται στο επίπεδο εκροής του εσωτερικού σωλήνα. Η συντεταγμένη z είναι κάθετη στο επίπεδο xy, αντιστοιχώντας στην εφαπτομενική διεύθυνση (Σχήμα 2).

### 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται αποτελέσματα για δύο παροχές της εσωτερικής ροής και μια της εξωτερικής, σε συνδυασμό με έναν ρυθμό περιστροφής της φτερωτής της εσωτερικής ροής και δύο ρυθμών της εξωτερικής. Οι αριθμοί Reynolds, που μαζί με τον αριθμό Rossby και τους αριθμούς (λόγους) περιδίνησης,  $S$ , είναι οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση των μετρήσεων και για την περιγραφή των χαρακτηριστικών του πεδίου ροής (Fitzgerald et al. 2004), παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Οι τιμές των  $V_{y,i}$  και  $V_{y,o}$ , αντιστοιχούν στις παροχές εισόδου της εσωτερικής και της δακτυλιοειδούς ροής αντίστοιχα. Οι  $V_{z,i}$  και  $V_{z,o}$ , είναι τυπικές εφαπτομενικές ταχύτητες αναφοράς, με βάση τη γωνιακή ταχύτητα,  $\omega$ , της εσωτερικής και της εξωτερικής φτερωτής, στην ακτίνα του εσωτερικού ακροφυσίου. Στον Πίνακα 2 φαίνονται οι τιμές των μεταβλητών και οι αδιάστατοι αριθμοί που χαρακτηρίζουν τις τέσσερις περιπτώσεις συνθηκών που διερευνήθηκαν.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων με διαγράμματα των κατανομών των τριών συνιστωσών της μέσης ταχύτητας και της κάθετης στο επίπεδο μέτρησης συνιστώσας της στροβιλικότητας και των αντίστοιχων τυρβωδών χαρακτηριστικών (στατιστικές ροπές), με αναφορά στην τοπολογία του ροϊκού πεδίου για κάθε συνδυασμό συνθηκών. Στα όλα τα διαγράμματα, περιλαμβάνονται ροϊκές γραμμές οι οποίες δημιουργήθηκαν λαμβάνοντας υπόψη μόνο τις συνιστώσες της μέσης ταχύτητας στο επίπεδο xy. Δεδομένου ότι το ροϊκό πεδίο είναι τρισδιάστατο με σημαντικές τιμές της κάθετης στο επίπεδο xy συνιστώσας της ταχύτητας, οι γραμμές αυτές δεν παριστάνουν τροχιές

**Πίνακας 1:** Χαρακτηριστικοί αδιάστατοι αριθμοί

Αριθμός Reynolds εσωτερικής ροής	$Re_{y,i} = \frac{V_{y,i} D_i}{\nu}$	Λόγος περιδίνησης	$S_j = \frac{2V_{z,j}}{V_{y,j}}$
Αριθμός Reynolds εξωτερικής ροής	$Re_{y,o} = \frac{V_{y,o} (D_o - D_i)}{\nu}$	Αριθμός Rossby	$Ro = \frac{V_{y,i} - V_{y,o}}{V_{z,i} + V_{z,o}}$

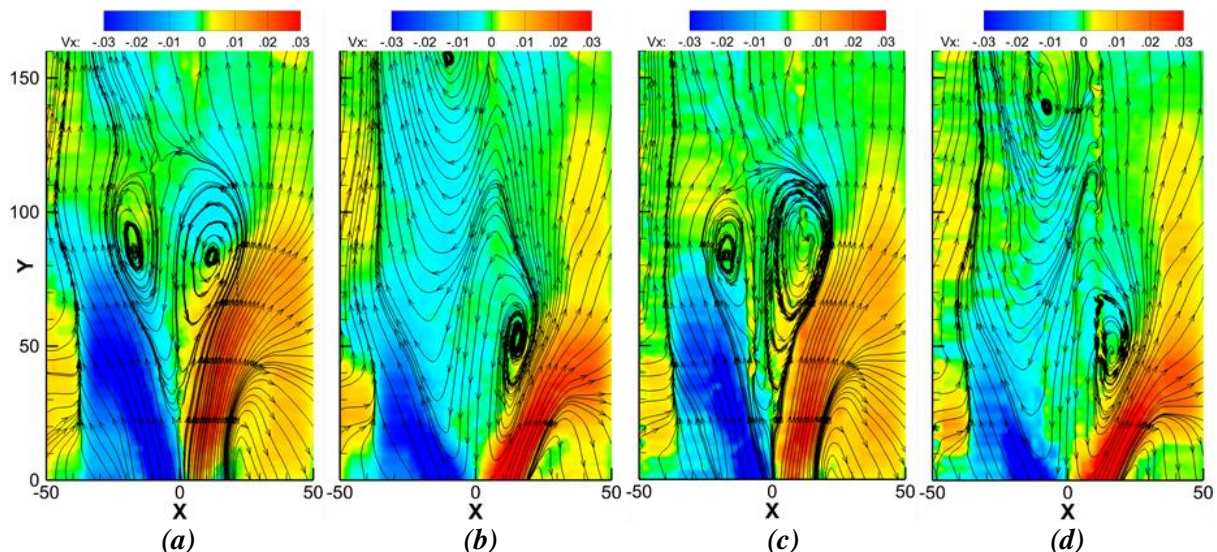
$D_i, D_o$ : εσωτερική διάμετρος, του εσωτερικού και του εξωτερικού σωλήνα.  
 $Re_{y,i}, Re_{y,o}$ : αξονικός αριθμός Reynolds της εσωτερικής και της δακτυλιοειδούς ροής.  
 $V_{y,i}, V_{y,o}$ : μέση αξονική ταχύτητα της εσωτερικής και της δακτυλιοειδούς ροής αντίστοιχα.  
 $V_{z,i}, V_{z,o}$ : τυπικές εφαπτομενικές ταχύτητες αναφοράς, με βάση τη γωνιακή ταχύτητα,  $\omega$ , της εσωτερικής και της εξωτερικής φτερωτής, στην ακτίνα του εσωτερικού ακροφυσίου.

**Πίνακας 2:** Συνθήκες πειράματος (περιπτώσεις δοκιμών)

Δοκιμή	$Q_i$ (l/h)	$Q_o$ (l/h)	$\omega_i$ (rad/s)	$\omega_o$ (rad/s)	$V_{y,i}$ (m/s)	$V_{y,o}$ (m/s)	$V_{z,i}$ (m/s)	$V_{z,o}$ (m/s)	$Re_{y,i}$ (-)	$Re_{y,o}$ (-)	$Si$ (-)	$So$ (-)	$Ro$ (-)
a	400	330	7.85	4.53	0.168	0.0086	0.114	0.066	4859	729	1.35	15.25	-0.89
b	400	330	7.85	5.93	0.168	0.0086	0.114	0.086	4859	729	1.35	19.97	-0.80
c	375	335	7.85	4.53	0.158	0.0087	0.114	0.066	4555	740	1.44	15.03	-0.83
d	375	335	7.85	5.93	0.158	0.0087	0.114	0.086	4555	740	1.44	19.67	-0.75

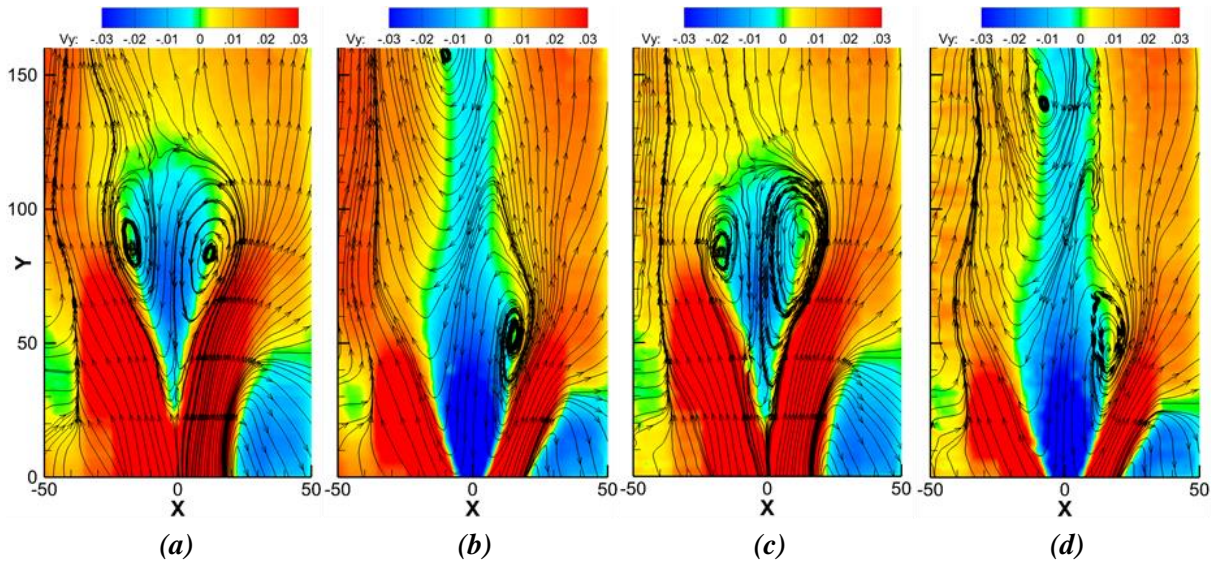
της πραγματικής μέσης ροής, αλλά βοηθούν στην κατανόηση και τη συζήτηση για τα χαρακτηριστικά του ροϊκού πεδίου και της τοπολογίας του.

Στα σχήματα 5 και 6 παρουσιάζονται οι συνιστώσες της ταχύτητας επάνω στο επίπεδο μέτρησης, xy. Μια φυσαλίδα ανακυκλοφορίας, σταθεροποιημένη κατάντι της εξόδου του εσωτερικού ακροφυσίου περιδίνησης είναι η κυρίαρχη συνεκτική δομή που εμφανίζεται στην τοπολογία των ροϊκών γραμμών, που βασίζονται σε αυτές τις δύο συνιστώσες. Είναι χαρακτηριστικό ότι στις περιπτώσεις με χαμηλό ρυθμό περιστροφής της εξωτερικής φτερωτής (a και c), η φυσαλίδα φαίνεται πλήρως σχηματισμένη στο μέσο πεδίο, με την εμφάνιση δύο σχεδόν συμμετρικών πυρήνων ανακυκλοφορίας (ματιών) ενώ στις δύο άλλες περιπτώσεις (b και d) είναι εμφανής ο πυρήνας της ζώνης ανακυκλοφορίας (μάτι) στην δεξιά πλευρά του ροϊκού πεδίου ενώ στην αριστερή πλευρά, φαίνεται να σχηματίζεται ένα κέντρο ανακυκλοφορίας αρκετά ψηλότερα, στο επάνω όριο της περιοχής διερεύνησης. Πέρα από την επίδραση της μεταπτωτικής κίνησης της φυσαλίδας, η τοπολογία στις δύο τελευταίες περιπτώσεις υποδεικνύει



**Σχήμα 5:** Διδιάστατες γραμμές ροής και κατανομές της εγκάρσιας (ακτινικής) μέσης ταχύτητας,  $V_x$

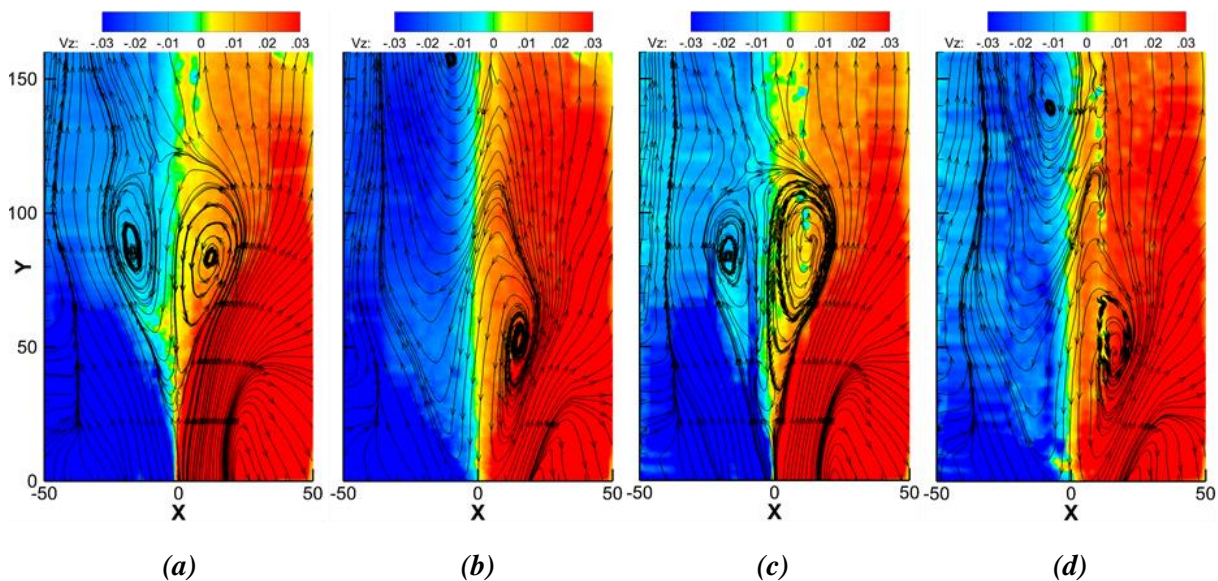




**Σχήμα 6:** Κατανομές της διαμήκουσ μέσης ταχύτητας,  $V_y$

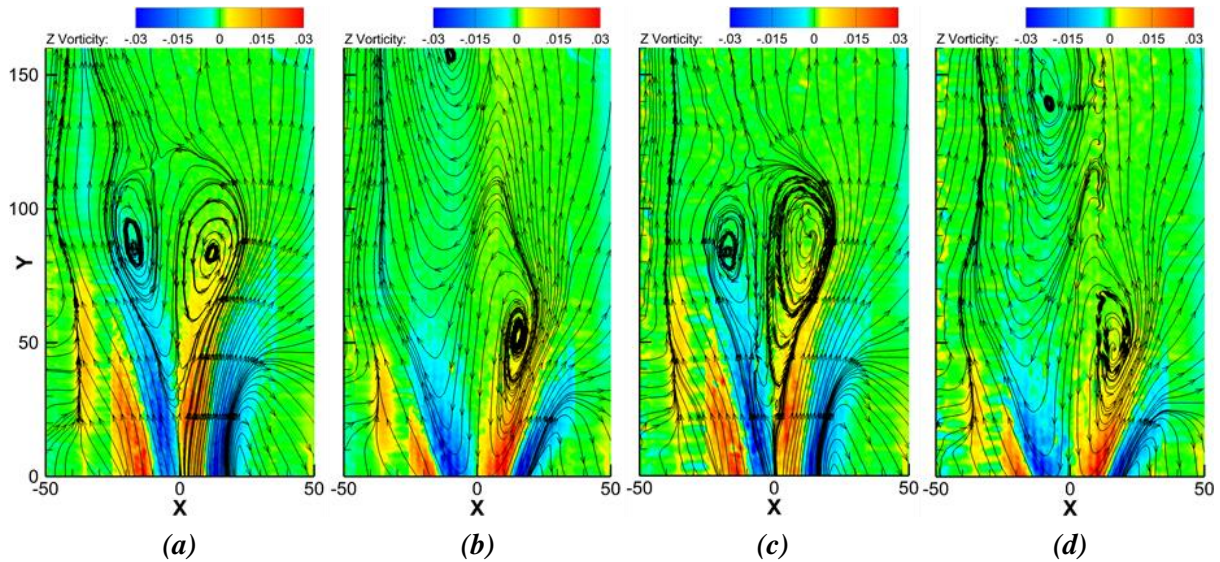
μια απόκλιση από την τυπική μορφή της αποδόμησης τύπου φυσαλίδας και μια μετατόπιση της αρχής της φυσαλίδας πλησιέστερα στο εσωτερικό ακροφύσιο. Η μείωση της εσωτερικής παροχής, συγκρίνοντας την περίπτωση (a) με την (c) και την (b) με την (d) έχει μικρότερη επίδραση στην αλλαγή της τοπολογίας, με μικρή μετατόπιση της δομής προς τα κάτω. Οι τάσεις αυτές φαίνεται να ακολουθούν το τροποποιημένο αριθμό Rossby που χρησιμοποιείται σε αυτή την εργασία.

Το κυρίαρχο χαρακτηριστικό των κατανομών της εγκάρσιας (ακτινικής) συνιστώσας της μέσης ταχύτητας,  $V_x$  (σχήμα 5), είναι οι μεγάλες απόλυτες, φυγόκεντρες τιμές της, καθώς η εσωτερική ροή εξαπλώνεται γύρω από το μπροστινό μέρος της φυσαλίδας ανακυκλοφορίας. Η έκταση που καταλαμβάνουν αυτές οι τιμές μικραίνει και περιορίζεται πιο κοντά στο ακροφύσιο με την αύξηση της περιστροφής της εξωτερικής φτερωτής και δευτερευόντως με τη μείωση της εσωτερικής παροχής. Κατά τα λοιπά οι κατανομές αναδεικνύουν το ροϊκό πεδίο της ανακυκλοφορίας και της παράλληλης ροής κατάντι της φυσαλίδας. Οι κατανομές της διαμήκουσ μέσης ταχύτητας,  $V_y$  (σχήμα 6), παρουσιάζουν μεγάλες θετικές τιμές έξω από τα όρια της φυσαλίδας ανακυκλοφορίας και ιδιαίτερα στην περιοχή που η εσωτερική ροή παρακάμπτει το μπροστινό τμήμα της. Η περιοχή της φυσαλίδας χαρακτηρίζεται από μικρές σχετικά θετικές τιμές στα όριά της και σχετικά μεγάλες αρνητικές τιμές στο εσωτερικό της. Η αύξηση της εξωτερικής περιστροφής έχει ως αποτέλεσμα την επέκταση της περιοχής αρνητικών τιμών



**Σχήμα 7:** Κατανομές της κάθετης στο επίπεδο (εφαπτομενικής) μέσης ταχύτητας,  $V_z$



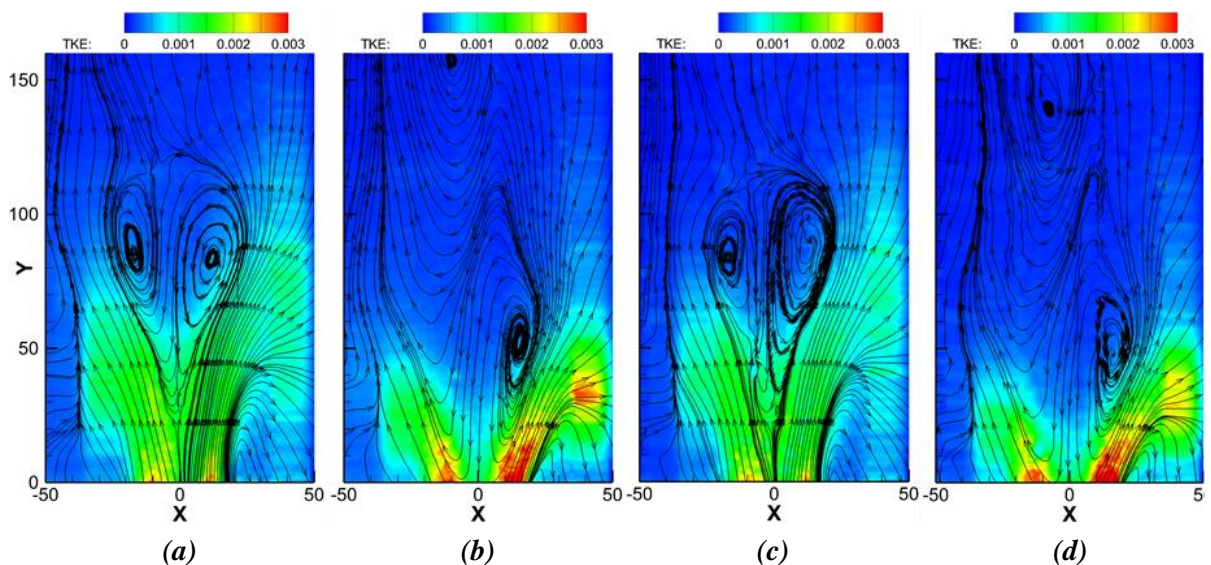


**Σχήμα 8:** Κατανομές της κάθετης στο επίπεδο (εφαπτομενικής) στροβιλότητας,  $\Omega_z$

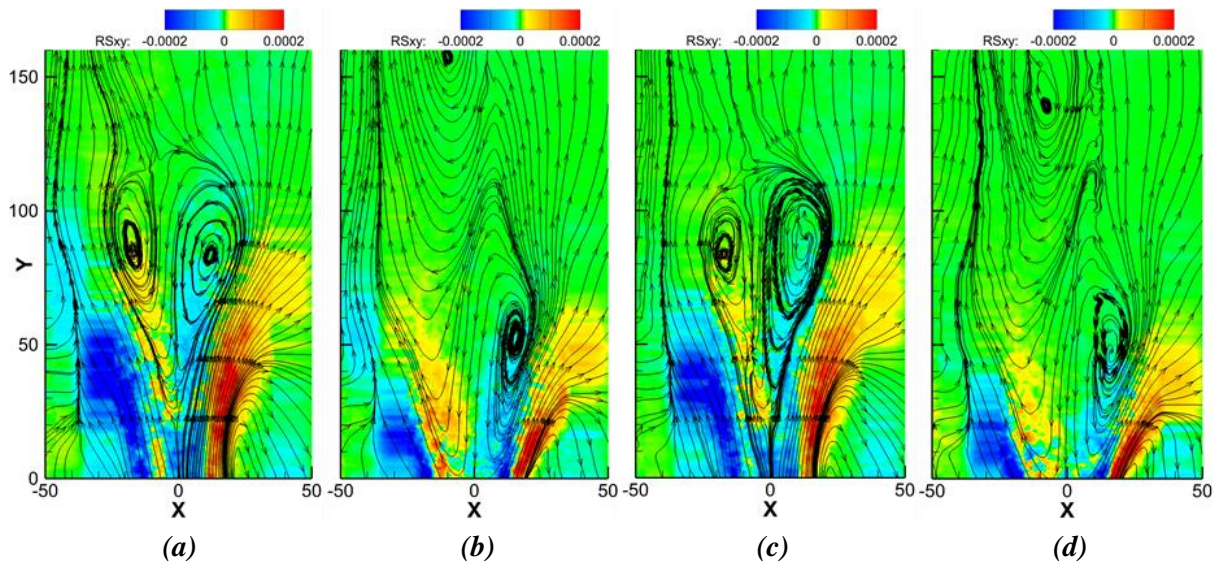
σε όλο το μήκος της περιοχής διερεύνησης κοντά στον άξονα και την αύξηση τους κατ' απόλυτη τιμή στο μπροστινό τμήμα.

Το σχήμα 7 απεικονίζει την κατανομή της κάθετης στο επίπεδο (εφαπτομενικής) συνιστώσας της μέσης ταχύτητας,  $V_z$ . Οι απόλυτες τιμές αυξάνονται από τον άξονα προς την περίμετρο, παρουσιάζοντας μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με τις άλλες συνιστώσες, ιδίως στα πρώτα στάδια ανάπτυξης της ροής. Σε μεγαλύτερες αποστάσεις από το ακροφύσιο παρουσιάζονται μειωμένες τιμές στο εσωτερικό και κατάντι της φουσαλίδας ανακυκλοφορίας για τον μικρότερο ρυθμό περιστροφής της εξωτερικής φτερωτής (περιπτώσεις a και c), σε αντίθεση με τον μεγαλύτερο (b και d) για τον οποίο έντονοι ρυθμοί αξονικής περιστροφής παρατηρούνται σε μεγαλύτερη έκταση στην περιοχή ανακυκλοφορίας.

Οι κατανομές της εφαπτομενικής (κάθετης στο επίπεδο) συνιστώσας της στροβιλότητας,  $\Omega_z$  (σχήμα 8), αναδεικνύουν την στροβιλότητα που οφείλεται στα διατμητικά στρώματα γύρω από το μπροστινό τμήμα της φουσαλίδας ανακυκλοφορίας, με αντίθετα πρόσημα σε αυτά μεταξύ της εσωτερικής – εξωτερικής ροής και εσωτερικής ροής – περιοχής ανακυκλοφορίας σε κάθε πλευρά του ροϊκού πεδίου. Η στροβιλότητα στον πυρήνα ανακυκλοφορίας είναι σχετικά μικρή, λόγω των μικρών ταχυτήτων που



**Σχήμα 9:** Κατανομές της τυρβώδους κινητικής ενέργειας ( $\frac{1}{2}(\overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2})$ )



**Σχήμα 10:** Κατανομές της διατμητικής τάσης Reynolds,  $\overline{v_x v_y}$ .

παρουσιάζονται σε αυτήν την περιοχή και είναι δύσκολο να προσφέρουν περαιτέρω πληροφορίες σχετικά με την ανάπτυξη της φυσαλίδας ανακυκλοφορίας.

Οι κατανομές της τυρβώδους κινητικής ενέργειας ( $k = \frac{1}{2}(\overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2})$ ), που παρουσιάζονται στο σχήμα 9, αποδίδουν αρκετά πιστά και τις αντίστοιχες κατανομές των τυρβωδών ορθών τάσεων Reynolds,  $\overline{v_j^2}$ , που δεν παρατίθενται εδώ. Οι κατανομές αυτές δείχνουν ότι έντονες τυρβώδεις διακυμάνσεις παρουσιάζονται κυρίως στην περιοχή που η εσωτερική ροή παρακάμπτει το μπροστινό μέρος της περιοχής ανακυκλοφορίας, σε έκταση και ένταση που ακολουθούν τις ίδιες τάσεις με αυτές των μέσων ταχυτήτων στην διαμήκη και την εγκάρσια διεύθυνση, σε σχέση με τις μεταβολές της εσωτερικής παροχής ή του ρυθμού εξωτερικής περιστροφής, σε συμφωνία με τον τροποποιημένο αριθμό Rossby. Εντός της περιοχής ανακυκλοφορίας και στο κατάντι πεδίο οι τυρβώδεις διακυμάνσεις είναι σχετικά μικρές. Πρέπει να σημειωθεί ότι από τους όρους των ορθών τάσεων Reynolds μεγαλύτερες τιμές παρουσιάζει ο όρος της εφαπτομενικής τάσης, ακολουθούμενος από τον όρο της διαμήκου, με μικρότερο τον όρο της ακτινικής τάσης.

Στο σχήμα 10 παρουσιάζονται οι διατμητικές τάσεις Reynolds,  $\overline{v_x v_y}$ . Μέγιστες τιμές με αντίθετα πρόσημα εμφανίζονται στα διατμητικά στρώματα που αναπτύσσονται στο μπροστινό τμήμα της περιοχής ανακυκλοφορίας παρουσιάζοντας μια εικόνα παρόμοια με αυτήν της κατανομής της κάθετης στο επίπεδο στροβιλότητας με αντίθετα πρόσημα. Και από αυτή τη μεταβλητή φαίνεται ότι οι τυρβώδεις διακυμάνσεις είναι μικρές τόσο στο εσωτερικό της περιοχής ανακυκλοφορίας όσο και στο κατάντι ροϊκό πεδίο.

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μελετήθηκε η διαμόρφωση του πεδίου αλληλεπίδρασης δύο στροβιλιζόμενων ομοαξονικών ροών. Η οπτικοποίηση της ροής και οι πειραματικές μετρήσεις έγιναν με στερεοσκοπική ταχυμετρία εικόνας σωματιδίων 3D-PIV, για δύο παροχές της εσωτερικής ροής και μια της εξωτερικής, σε συνδυασμό με έναν ρυθμό περιστροφής της εσωτερικής ροής και δύο ρυθμών της εξωτερικής. Κοντά στην έξοδο του εσωτερικού ακροφυσίου στροβιλισμού σχηματίζεται φυσαλίδας ανακυκλοφορίας, η τοπολογία και η θέση της οποίας εξαρτώνται από την ένταση της επιβαλλόμενης εξωτερικής περιστροφής, ενώ οι παροχές της εσωτερικής ροής που διερευνήθηκαν είχαν μικρότερη επιρροή. Οι κατανομές των μέσων και τυρβωδών όρων της εγκάρσιας και της διαμήκου συνιστώσας της ταχύτητας χαρακτηρίζονται από την εξάπλωση της εσωτερικής ροής γύρω από το μπροστινό μέρος της φυσαλίδας ανακυκλοφορίας και την ανάπτυξη διατμητικών στρωμάτων μεταξύ εσωτερικής – εξωτερικής ροής και εσωτερικής ροής – περιοχής ανακυκλοφορίας. Οι τάσεις αυτές φαίνεται να ακολουθούν τον τροποποιημένο αριθμό Rossby.



## 5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Giannadakis A., Perrakis K. and Panidis Th. (2008), "A swirling jet under the influence of a coaxial flow", *Experimental Thermal and Fluid Science* 32, p. 1548–1563.
- Leibovich, S. (1978), "The Structure of Vortex Breakdown", *Annual Review of Fluid Mechanics* 10, p.221-246.
- Naxakis A., Perrakis K. and Panidis Th. (2018), "Experimental Study on Swirling Jets", *International Review of Mechanical Engineering (I.RE.M.E.)* Vol. xx, p. x
- Naxakis A., Perrakis K. and Panidis Th., "Experimental Study on The Interaction Between Coaxial Flows with Swirl", 7th International Conference on "Experiments/Process/System Modeling/Simulation/Optimization", 7th IC-EPSMSO, Athens, 5-8 July 2017.
- Peckham, D.H. and Atkinson, S., "Preliminary results of low speed wind tunnel tests on a Gothic wing of aspect ratio 1.0", Royal Aircraft Establishment, Technical note AERO Vol. 2504 CP. No. 508, (1957)
- Lefebvre, A.H. and McDonell, V.G. (2017), "Atomization and Sprays. Combustion: An International Series", 2nd edition, CRC Press, Taylor & Francis.
- Rocha, A.D., Bannwarta, A.C. and Ganzarolli, M.M. (2015), "Numerical and experimental study of an axially induced swirling pipe flow", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 53, p. 81-90.
- Wang, X. and Yang, V. (2017), "Supercritical Mixing and Combustion of Liquid-Oxygen/ Kerosene Bi-Swirl Injectors", *Journal of propulsion and power*, Vol. 33, p. 316-322.
- Sheikholeslami, M., Gorji-Bandpy, M., and Ganji, D.D. (2015), "Review of heat transfer enhancement methods: Focus on passive methods using swirl flow devices", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 49, p. 444-469.
- Zhixiang, C., Wang, Y., Duan, M. and Zhu, H. (2017), "Study of the vortex principle for improving the efficiency of an exhaust ventilation system", *Energy and Buildings*, Vol. 142, p. 39-48.
- Peake, N. and Parry, A.B. (2012), "Modern Challenges Facing Turbomachinery Aeroacoustics", *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 44, p. 227-248.
- Terhaar, S., Reichel, T.G., Schrödinger, C., Rukes, L., Paschereit, C.O. and Oberleithner, K. (2015), "Vortex Breakdown Types and Global Modes in Swirling Combustor Flows with Axial Injection", *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 31, p. 219-229, 2015.
- Lilley, D.G. (1977), "Swirl Flows in Combustion: A Review", *AIAA journal*, Vol. 15, p. 1063-1078.
- Lucca-Negro, O. and O' Doherty, T. (2001), "Vortex breakdown: a review", *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 27, p. 431-481, 2001.
- Adrian, R.J. (1991), "Particle-Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics", *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 23, p. 261-304.
- Prasad, A.K. (2000), "Stereoscopic particle image velocimetry", *Experiments in Fluids*, Vol. 29, p. 103-116.
- Melling, A. (1997), "Tracer particles and seeding for particle image velocimetry", *Measurement Science and Technology*, Vol. 8, p. 1406-1416.
- Budwig, R. (1994), "Refractive Index Matching Methods for Liquid Flow Investigations", *Experiments in Fluids*, Vol. 17, p. 350-355.
- Wiederseiner, S., Andreini, N., Epely-Chauvin, G. and Ancey, C. (2011), "Refractive-index and density matching in concentrated particle suspensions: a review", *Experiments in Fluids*, Vol. 50, p. 1183-1206.
- Fitzgerald, A.J., Hourigan, K. and Thompson, M.C. (2004), "Towards a Universal Criterion for Predicting Vortex Breakdown in Swirling Jets", 15th Australasian Fluid Mechanics Conference, The University of Sydney, Sydney, Australia.

## **EXPRIMENTAL INVESTIGATION ON THE INTERACTION OF COAXIAL SWIRLING FLOWS**

**Naxakis A., Perrakis K., Panidis Th.**

Mechanical Engineering and Aeronautics Department, University of Patras  
26504 Panepistimioupoli Rio, e-mail: andreasnaxakis@upatras.gr, panidis@upatras.gr

### **ABSTRACT**

This paper presents experimental results on coaxial swirling flows, aiming to contribute to the investigation and understanding of swirling flows close to vortex breakdown conditions. The interaction of two coaxial swirling flows, issuing from parallel coaxial straight tubes in a coaxial tube of diameter equal to the largest tube, is studied. Swirl is introduced by two rotating vanes located close to the inner and annular jet outlets respectively. Initial conditions, flow rates and angular velocities of the vanes can be parametrically controlled. The mean and turbulent flow fields are monitored on the axial central plane, based on measurements of all three velocity components, using stereoscopic 3D-PIV. In the present experiments four test cases are presented with different combinations of inner and annular tube flow rates and rotation. The Reynolds numbers along with the Rossby number and the Swirl numbers are the nondimensional parameters used to interpret the measurements and to describe the attributes of the flow field. The mean velocity components as well as the turbulent characteristics of the flow field are investigated. A recirculation bubble stabilized downstream the exit of the internal swirl nozzle is the predominant coherent structure formed due to the expansion of the inner swirling jet and the interaction with the annular swirling flow.

**Key Words:** Swirling Flows, Vortex Breakdown, 3D PIV