

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΣΤΡΟΒΙΛΙΣΤΩΝ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ ΑΝΩΣΤΙΚΗΣ ΦΛΕΒΑΣ

Α. Πανίδης¹, Α. Ρωμαίος², Α. Γιανναδάκης², Κ. Περράκης¹

¹Εργαστήριο Τεχνικής Θερμοδυναμικής, Τμ. Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Πατρών, perrakis@upatras.gr

²Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ, ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία αφορά στην πειραματική διερεύνηση της επίδρασης στροβιλιστών (turbulators or vortex generators) στο πεδίο ταχυτήτων μιας ελεύθερης, κατακόρυφης, αξονοσυμμετρικής και τυρβώδους ανωστικής ροής δέσμης (buoyant jet) σε ομοιόμορφο περιβάλλον (T_a και ρ_a σταθερά). Χρησιμοποιήθηκαν στροβιλιστές τύπου «Δ» με διαφορετική γωνία πρόσπτωσης, οι οποίοι ήταν τοποθετημένοι στο στόμιο εκροής της δέσμης. Για την μέτρηση του πεδίου ταχυτήτων, χρησιμοποιήθηκε η ψηφιακή μέθοδος ταχυμετρίας απεικόνισης τροχιοδεικτικών σωματιδίων (DPIV). Το ροϊκό πεδίο μελετήθηκε για δύο διαφορετικές συνθήκες, για ροή δέσμης στην θερμοκρασία περιβάλλοντος (ισοθερμοκρασιακό jet) και για ροή δέσμης με διαφορά θερμοκρασίας σε σχέση με το περιβάλλον (θερμαινόμενο jet). Οι ανωστικές ροές δέσμης συναντώνται σε μια πληθώρα τεχνολογικών εφαρμογών. Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων ροών που παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι η έξοδος καυσαερίων από καπνοδόχους εργοστασίων και μηχανοκίνητων οχημάτων στην ατμόσφαιρα, η απόρριψη βιομηχανικών αποβλήτων σε υδάτινες μάζες και η λειτουργία αεριοστρόβιλων. Σε αρκετές τέτοιες εφαρμογές είναι επιθυμητή η εντατικοποίηση της μίξης του ρευστού της δέσμης με το περιβάλλον ρευστό. Για τον λόγο αυτό, έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι με στόχο την ταχύτερη μίξη του ρευστού. Η διερεύνηση τέτοιων τεχνικών εντατικοποίησης των ρυθμών μίξης στην βιβλιογραφία είναι σχετικά περιορισμένη και δεν έχουν διατυπωθεί γενικοί νόμοι που να τις περιγράφουν ικανοποιητικά. Η τοποθέτηση στροβιλιστών στο στόμιο εκροής διερευνάται ως μία από τις τεχνικές αύξησης του ρυθμού μίξης του ρευστού με το περιβάλλον και αποτελεί μια σχετικά απλή και αποτελεσματική μέθοδο.

Λέξεις Κλειδιά: Ροή δέσμης, ανωστική δέσμη, στροβιλιστές, πεδίο ταχυτήτων, PIV

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι ροές δέσμης, ανάλογα με τις αρχικές συνθήκες και το περιβάλλον στο οποίο αναπτύσσονται μπορούν να διακριθούν: σε ελεύθερες ή περιορισμένες, σε τυρβώδεις ή στρωτές, σε αξονοσυμμετρικές ή επίπεδες και σε κατακόρυφες ή υπό γωνία (Chen & Rodi, 1980).

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται μία ελεύθερη, τυρβώδη, αξονοσυμμετρική και ανωστική δέσμη η οποία εξελίσσεται υπό την επίδραση της ορμής και της άνωσης, λόγω αρχικής ταχύτητας και διαφορετικής πυκνότητας από το περιβάλλον ρευστό. Οι κατακόρυφες δέσμες (jets) χαρακτηρίζονται από τρεις περιοχές ανάπτυξης, τη μη ανωστική περιοχή που χαρακτηρίζεται ως αμιγής δέσμη (pure jet) όπου κυριαρχούν οι δυνάμεις αδράνειας, την ενδιάμεση περιοχή που αποτελεί ουσιαστικά τη μεταβατική περιοχή της δέσμης και την ανωστική περιοχή που χαρακτηρίζεται ως αμιγές πλούμιο

(pure plume) όπου κυριαρχούν οι ανωστικές δυνάμεις. Οι βασικοί αδιάστατοι αριθμοί που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν μία κατακόρυφη δέσμη (jet) είναι ο αριθμός Reynolds (Re), ο οποίος καθορίζει εάν η ροή θα είναι στρωτή ή τυρβώδης, και ο αριθμός Froude (F), ο λόγος των αδρανειακών δυνάμεων προς τις αντίστοιχες ανωστικές. Βάσει του αριθμού Froude, μία δέσμη εκροής μπορεί να ταξινομηθεί ως δέσμη εκροής (pure jet), αμιγές πλούμιο (pure plume), ανωστική δέσμη εκροής (buoyant jet) ή αρνητικά ανωστική δέσμη εκροής (negative buoyant jet) (Chen & Rodi, 1980).

Οι ανωστικές δέσμες είναι καθ' εαυτόν όμοιες σε κάθε μία από τις 2 περιοχές τους και έτσι οι ταχύτητες σε διαφορετικές διατομές κατά τον άξονα ανάπτυξής τους, με τη χρήση κατάλληλων αδιάστατων αριθμών, δίνουν κοινές κατανομές. Αν U_c είναι η κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας στον άξονα συμμετρίας της κάθε διατομής, η οριζόντια απόσταση, x , αδιαστατοποιείται με το ημιπλάτος της κατανομής ταχυτήτων, $r_{0.5U_c}$, δηλαδή το πλάτος της δέσμης όπου αντιστοιχεί σε $1/2U_c$ και η κατακόρυφη ταχύτητα αδιαστατοποιείται με την (κατακόρυφη) ταχύτητα στον άξονα συμμετρίας.

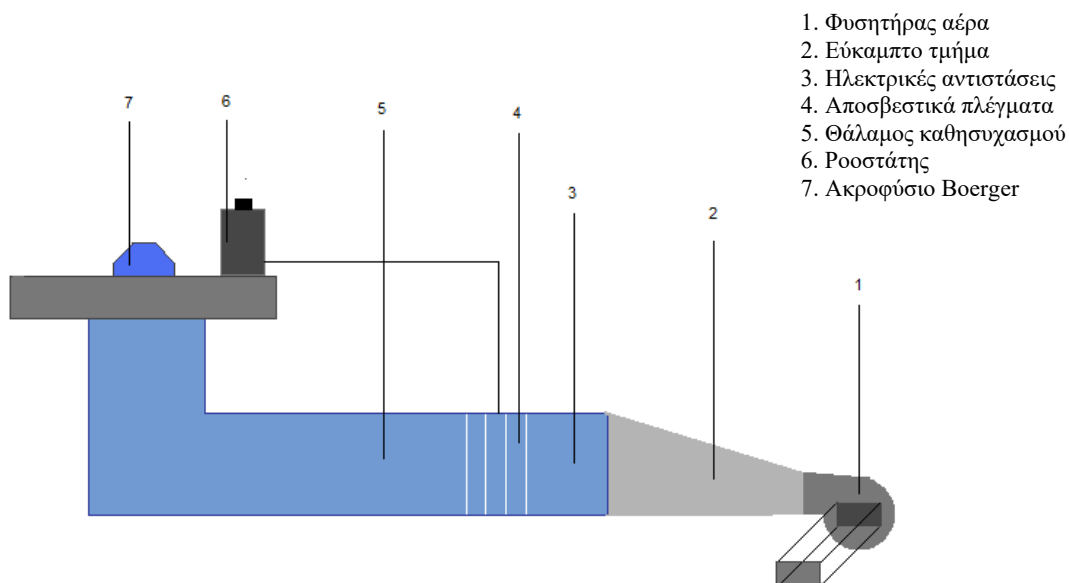
Προκειμένου να ενισχυθεί η διεργασία εισροής περιβάλλοντος ρευστού στη δέσμη, χρησιμοποιούνται αρκετές μέθοδοι με ποιο γνωστές και αποτελεσματικές αυτές των διατάξεων στροβιλιστών, λοβοειδών ακροφυσίων και συστημάτων περιδίνησης. Στην παρούσα εργασία διερευνάται η επίδραση στροβιλιστών τύπου "Δ" πτερυγίων, στην ανάπτυξη και εξέλιξη του θερμοκρασιακού πεδίου μιας κατακόρυφης ανωστικής δέσμης εκροής (Zaman et al. 1994, Lee et al. 2012).

2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ & ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

2.1 Πειραματική διάταξη

2.1.1 Η παράγωγος διάταξη

Η πειραματική διάταξη για τη δημιουργία της αξονοσυμμετρικής δέσμης παρουσιάζεται στο σχήμα 1. Αποτελείται από έναν φυγοκεντρικό φυσητήρα αέρα (1), εύκαμπτο τμήμα για την αποφυγή κραδασμών (2), δύο ηλεκτρικές αντιστάσεις 400W η καθεμία (3) συνδεδεμένες με ροοστάτη (6) για την ελεγχόμενη θέρμανση του αέρα, σειρές αποσβεστικών πλεγμάτων (4), έναν θάλαμο καθυσυγχασμού με διαστάσεις 80x20x20 cm (5) και ένα ακροφύσιο Boerger (7) για την τελική διαμόρφωση της ροής πριν το στόμιο εξόδου εσωτερικής διαμέτρου $D=30\text{mm}$.

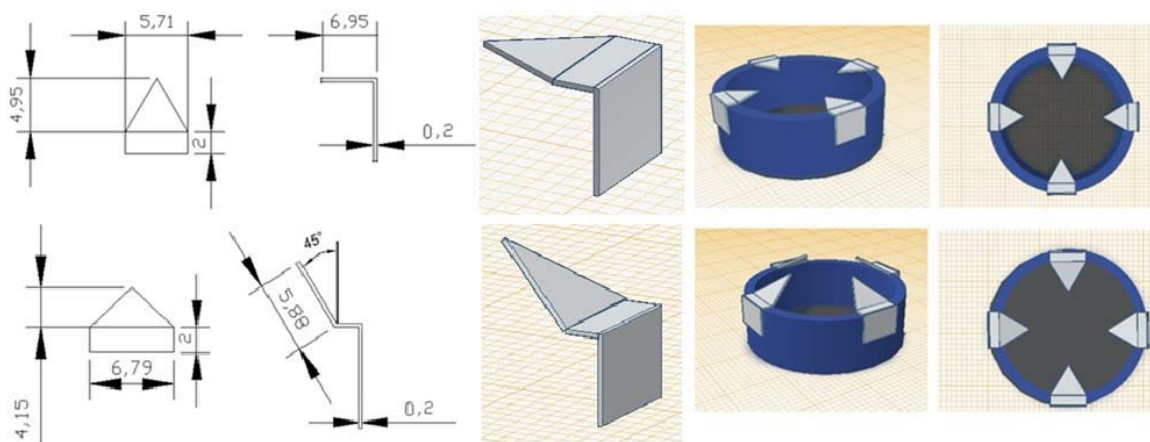


Σχήμα 1. Σχηματική απεικόνιση της παραγωγού διάταξης

2.1.2 Οι στροβιλιστές

Η επίδραση των στροβιλιστών στο πεδίο ταχυτήτων μελετήθηκε με την χρήση τεσσάρων στροβιλιστών συμμετρικά τοποθετημένων στο στόμιο εκροής της δέσμης. Οι στροβιλιστές που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τύπου "Δ" με διαφορετική γωνία πρόσπτωσης. Στο σχήμα 2 παρουσιάζονται αναλυτικά στοιχεία των στροβιλιστών που χρησιμοποιήθηκαν (Τσούκας, 2016).

Για την πραγματοποίηση της πειραματικής διαδικασίας κατασκευάστηκαν από τέσσερις πανομοιότυποι στροβιλιστές για την κάθε μία απ' τις δύο αυτές περιπτώσεις. Οι στροβιλιστές που επιλέχθηκαν είναι ισόπλευρα τρίγωνα και ο κάθε ένας εξ' αυτών καλύπτει το 2% της συνολικής διατομής του ακροφυσίου. Η διαφοροποίηση τους έγκειται ως προς την γωνία πρόσπτωσής της ροής, με το πρώτο σετ να είναι διατεταγμένο με τέτοιο τρόπο ώστε η ροή να προσπίπτει πάνω με γωνία 90° και το δεύτερο σετ ώστε η ροή να προσπίπτει με γωνία 45° . Στην εικόνα 1 παρουσιάζεται η διάταξη των στροβιλιστών.



Σχήμα 2 Οι στροβιλιστές με γωνία πρόσπτωσης 90° ως προς την ροή (επάνω) και οι στροβιλιστές με γωνία 45° (κάτω)

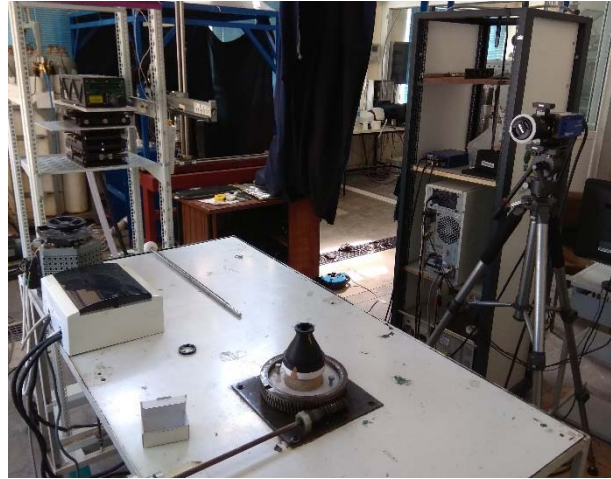
2.1.3 Η μετρητική διάταξη

Η μετρητική μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την λήψη των μετρήσεων είναι η Particle Image Velocimetry (PIV) (Adrian & Westerweel 2011, Raffel et al. 1998). Στην εικόνα 2 παρουσιάζεται το σύστημα που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία. Το σύστημα αυτό περιλαμβάνει ένα laser Nd: Yag δύο κεφαλών, μια CCD κάμερα ανάλυσης 1200x1600 pixels, ένα PTU για τον χρονισμό της διάταξης και έναν υπολογιστή. Για την παραγωγή των τροχιοδεικτικών σωματιδίων χρησιμοποιήθηκε νεφελοποιητής με διάλυμα νερού γλυκερίνης κατάλληλης αναλογίας και τα σωματίδια αυτά εισάγονται στην ροή από μια οπή στον θάλαμο εφησυχασμού. Η κάμερα τοποθετήθηκε κάθετα στο φύλλο φωτός του laser. Το επίπεδο λήψης μετρήσεων, ορίζεται από τον άξονα συμμετρίας της ροής και από μια διάμετρο του στομίου που περιλαμβάνει είτε τις κορυφές των "Δ" στροβιλιστών είτε σε ενδιάμεση γωνία (45 μοιρών).

Κατά την διάρκεια των πειραμάτων και με την χρήση συστημάτων μετατόπισης, η κάμερα και το laser μετακινούνται κατακόρυφα μέχρι να σαρωθεί όλο το πεδίο μετρήσεων το οποίο φθάνει μέχρι τις 22 διαμέτρους (22D). Οι φυσικές διαστάσεις του πεδίου σε μια συγκεκριμένη θέση είναι περίπου $9 \times 12 \text{ cm}^2$ και το μέγεθος του interrogation window 32×32 pixels με overlap 75%. Η συχνότητα δειγματοληψίας ήταν 7Hz και το time interval, δηλαδή ο χρόνος μεταξύ των 2 παλμών του laser, 108μs.



Εικόνα 1. Διάταξη των στροβιλιστών



Εικόνα 2. Η πειραματική διάταξη

2.2 Η πειραματική διαδικασία

Πραγματοποιήθηκαν πειράματα για ισοθερμοκρασιακή δέσμη και για θερμαινόμενη δέσμη. Στην περίπτωση του ισοθερμοκρασιακού πεδίου οι συνθήκες αυτές ήταν: αρχική ταχύτητα $U_0=3.5$ m/s, διαφορά θερμοκρασίας με το περιβάλλον $\Delta T_0=0$, αριθμός Reynolds $Re=6678$ και αριθμός Froude $F \rightarrow \infty$. Η αντίστοιχη θερμαινόμενη δέσμη είχε ταχύτητα $U_0=3.5$ m/s, διαφορά θερμοκρασίας με το περιβάλλον $\Delta T_0=40$ °C, αριθμό Reynolds $Re=5342$ και αριθμό Froude $F=311$. Βάσει αυτών των αρχικών συνθηκών της ροής, οι πειραματικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν καλύπτουν την περιοχή της ροής με χαρακτηριστικά δέσμης (pure jet) και το μεγαλύτερο μέρος της μεταβατικής.

Αρχικά, μετρήθηκε το ροϊκό πεδίο μιας ελεύθερης δέσμης (χωρίς την παρουσία στροβιλιστών) ως πεδίο αναφοράς και στη συνέχεια για 2 διαφορετικές περιπτώσεις στροβιλιστών. Τα 2 είδη στροβιλιστών που χρησιμοποιήθηκαν ήταν: i) ισόπλευρα τρίγωνα γωνίας προσβολής 45° , ii) ισόπλευρα τρίγωνα γωνίας προσβολής 90° (Σχήμα 2, Εικόνα 1). Τα δύο είδη διαστασιολογήθηκαν έτσι ώστε κατά την τοποθέτησή τους στο χείλος εξόδου του ακροφυσίου να καλύπτουν συνολικά το 8% της διατομής εξόδου.

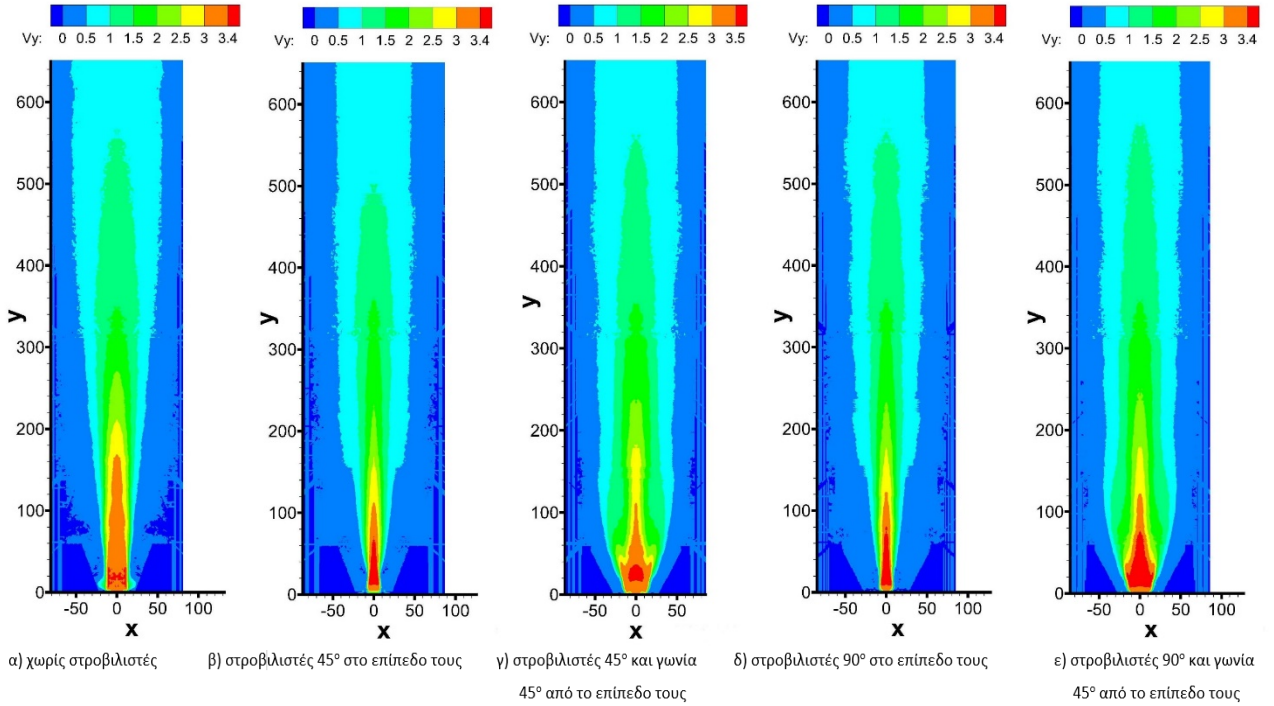
Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε επίπεδο που περνάει από τον άξονα της ροής και καλύπτει μια περιοχή από την έξοδο του ακροφυσίου μέχρι περίπου $22D$ (66cm) κατάντη στη ροή για όλες τις περιπτώσεις. Στις περιπτώσεις των στροβιλιστών πραγματοποιήθηκαν, επιπλέον, δύο καταγραφές: μία στο επίπεδο που περνάει από το κέντρο των (δύο εκ των τεσσάρων) στροβιλιστών και μία στο επίπεδο που σχηματίζει γωνία 45° με το προηγούμενο.

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

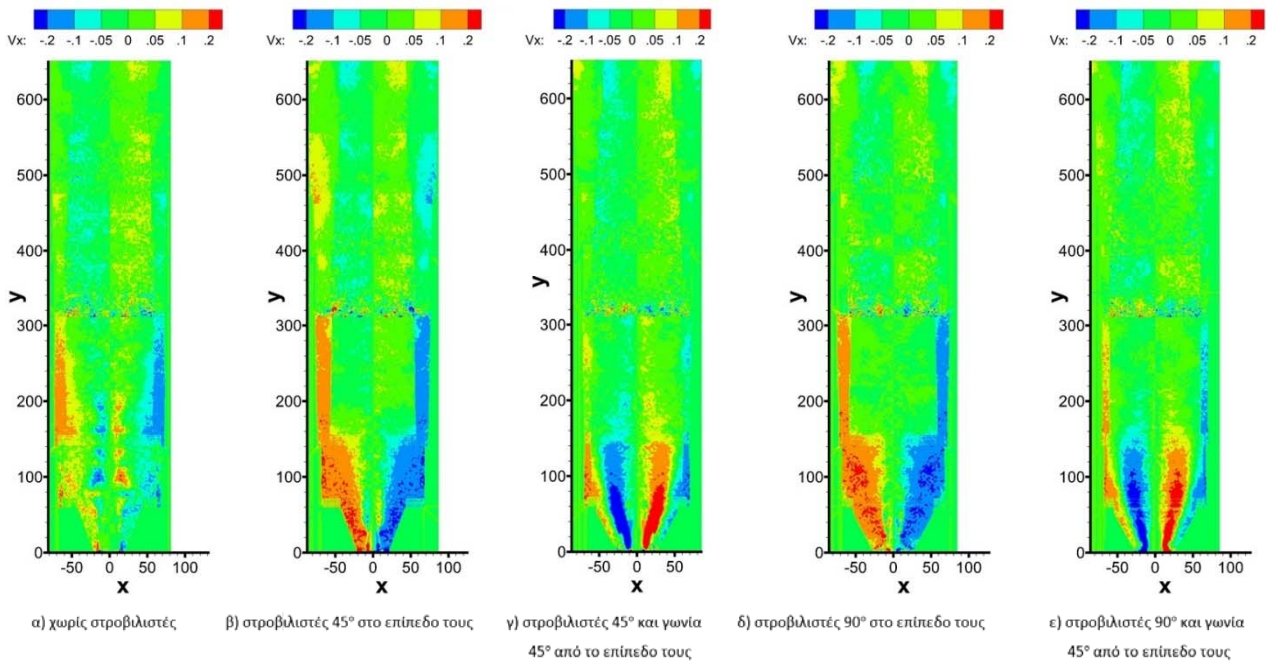
Το ροϊκό πεδίο της κατακόρυφης ανωστικής φλέβας μελετήθηκε παραμετρικά, σε σχέση με τη γωνία πρόσπτωσης των στροβιλιστών αλλά και σε σχέση με τη διάταξη των στροβιλιστών στο επίπεδο εκροής του ακροφυσίου. Οι διαφορετικές περιπτώσεις μέτρησης περιγράφονται παρακάτω:

- α) Jet χωρίς στροβιλιστές
- β) Jet με στροβιλιστές γωνίας πρόσπτωσης 45° στο επίπεδο των στροβιλιστών
- γ) Jet με στροβιλιστές γωνίας 45° και σε γωνία 45° απ' το επίπεδο των στροβιλιστών
- δ) Jet με στροβιλιστές γωνίας 90° στο επίπεδο των στροβιλιστών
- ε) Jet με στροβιλιστές γωνίας 90° και σε γωνία 45° απ' το επίπεδο των στροβιλιστών

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται στα διαγράμματα που ακολουθούν (Διαγράμματα 1 και 2). Η διάταξη των διαγραμμάτων είναι σύμφωνα με την παραπάνω κατηγοριοποίηση (α, β, γ, δ, ε).



Διάγραμμα 1. Κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας, V_y , για τις 5 περιπτώσεις του ισόθερμου jet



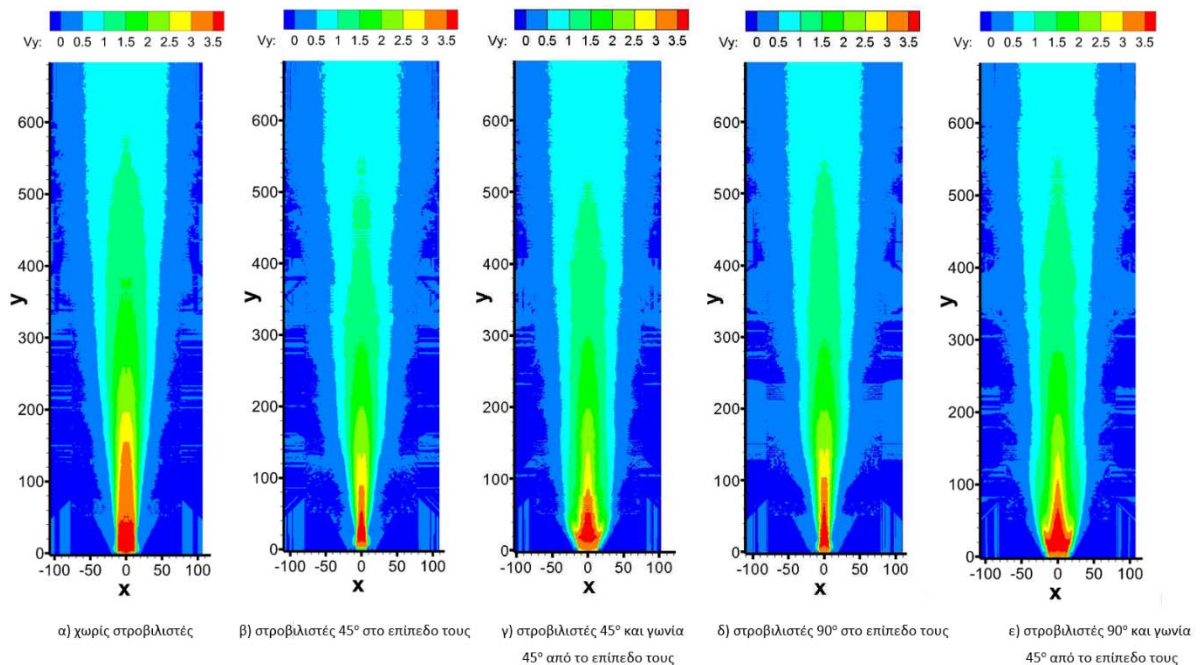
Διάγραμμα 2. Οριζόντια συνιστώσα της ταχύτητας, V_x , για τις 5 περιπτώσεις του ισόθερμου jet

Τα πρώτα αποτελέσματα που παρουσιάζονται είναι η κατανομή των ταχυτήτων σε όλο το πεδίο μετρήσεων αρχικά για το ισοθερμοκρασιακό jet και στην συνέχεια για το θερμαινόμενο. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται η κατακόρυφη ταχύτητα V_y , η οποία αποτελεί την κύρια συνιστώσα της ταχύτητας και δείχνει την εξέλιξη του jet, και η οριζόντια ταχύτητα V_x , η οποία δείχνει τα όρια ανάπτυξης του jet.

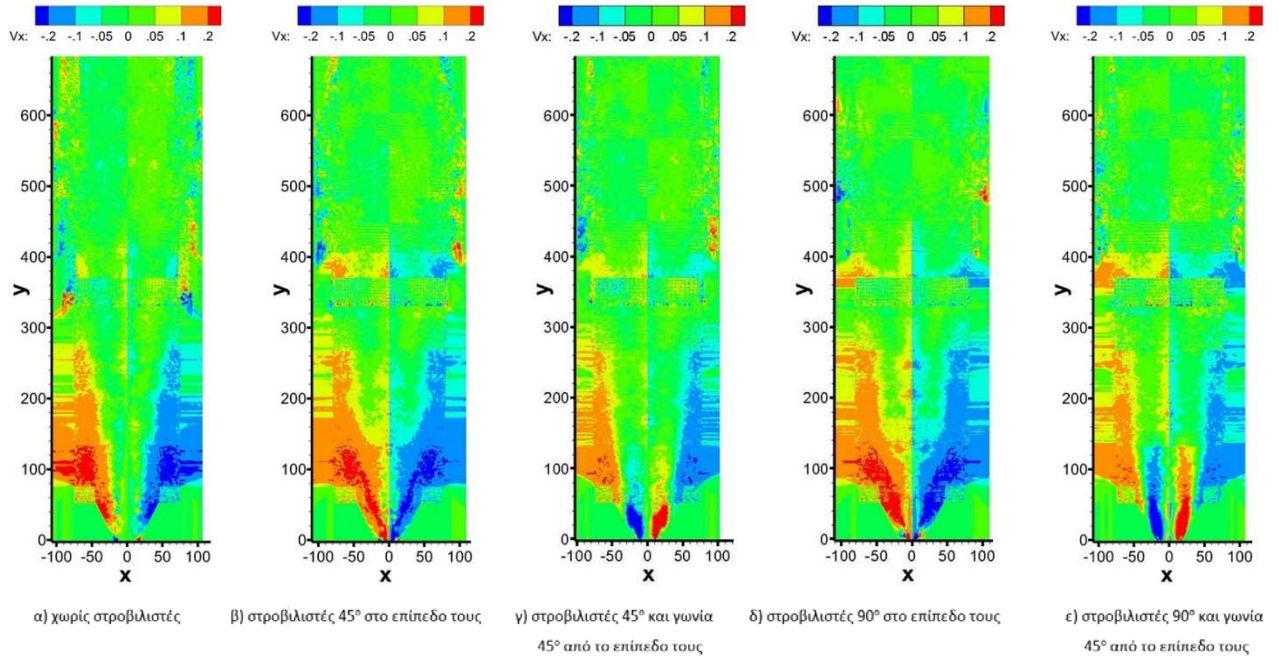
Τα προφίλ ταχυτήτων της κατακόρυφης ταχύτητας, στην περίπτωση του ισοθερμοκρασιακού jet (Διάγραμμα 1) δείχνουν παρόμοια συμπεριφορά. Η βασική διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι, ο ρυθμός απόσβεσης της κατακόρυφης συνιστώσας της ταχύτητας στην περίπτωση των στροβιλιστών είναι εμφανώς μεγαλύτερη στα πρώτα στάδια της ροής σε σχέση με αυτήν του ελεύθερου jet. Επίσης, στην περίπτωση των στροβιλιστών, αξίζει να σημειωθεί η γρήγορη αποδόμηση του δυναμικού πυρήνα του jet, η οποία συντελείται νωρίτερα από τις 4-5 διαμέτρους. Αυτό το στοιχείο αποτελεί ένδειξη της εντατικοποίησης της μίξης στις πρώτες διαμέτρους, που οφείλεται στην ύπαρξη των στροβιλιστών.

Στην περίπτωση της οριζόντιας ταχύτητας (Διάγραμμα 2) παρατηρείται ότι τα διαγράμματα παρουσιάζουν εντονότερες διαφορές μεταξύ τους. Αυτό μπορεί να αιτιολογηθεί λόγω της έντονης ασυμμετρίας που δημιουργούν οι 4 στροβιλιστές. Συγκεκριμένα, οι μετρήσεις στα επίπεδα που περνάνε από το κέντρο των στροβιλιστών δείχνουν στα πρώτα στάδια την έντονη κίνηση ρευστού προς το κέντρο της ροής, ενώ οι αντίστοιχες στα επίπεδα που σχηματίζουν γωνία 45° με τους στροβιλιστές υποδεικνύουν κίνηση προς τα άκρα. Επίσης, από τα αποτελέσματα φαίνεται η ύπαρξη στροβίλων που επαναλαμβάνονται και αφήνουν το αποτύπωμα τους στο μέσο πεδίο, κάτι που είναι πιο ευδιάκριτο στις περιπτώσεις του ελεύθερου jet και των περιπτώσεων των επιπέδων που σχηματίζουν γωνία 45° με τους στροβιλιστές, όπου φαίνεται ροή ρευστού προς το κέντρο σε x μακριά από το 0 και ροή ρευστού προς τα άκρα σε x κοντά στο 0.

Το αντίστοιχο πεδίο κατακόρυφων ταχυτήτων για το θερμαινόμενο jet (Διάγραμμα 3) παρουσιάζει σε γενικές γραμμές τα ίδια χαρακτηριστικά με το ισοθερμοκρασιακό. Το θερμαινόμενο jet διαφέρει από το ισόθερμο κυρίως ως προς τη μείωση των ταχυτήτων. Οι περιοχές του ισόθερμου jet επαναλαμβάνονται με παρόμοιο τρόπο και στο θερμαινόμενο, αλλά σε εμφανώς μικρότερη έκταση, κάτι που σημαίνει ότι η πτώση της ταχύτητας στο θερμαινόμενο είναι ταχύτερη. Αυτό ισχύει για όλες τις περιπτώσεις μετρήσεων. Τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά παραμένουν αναλλοίωτα: είναι εμφανής η επίδραση των στροβιλιστών στην πτώση της ταχύτητας και παρατηρείται ότι οι 3 περιπτώσεις εμφανίζουν τις ίδιες χαρακτηριστικές δομές με προηγούμενως.



Διάγραμμα 3. Κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας, V_y , για τις 5 περιπτώσεις του θερμαινόμενου jet



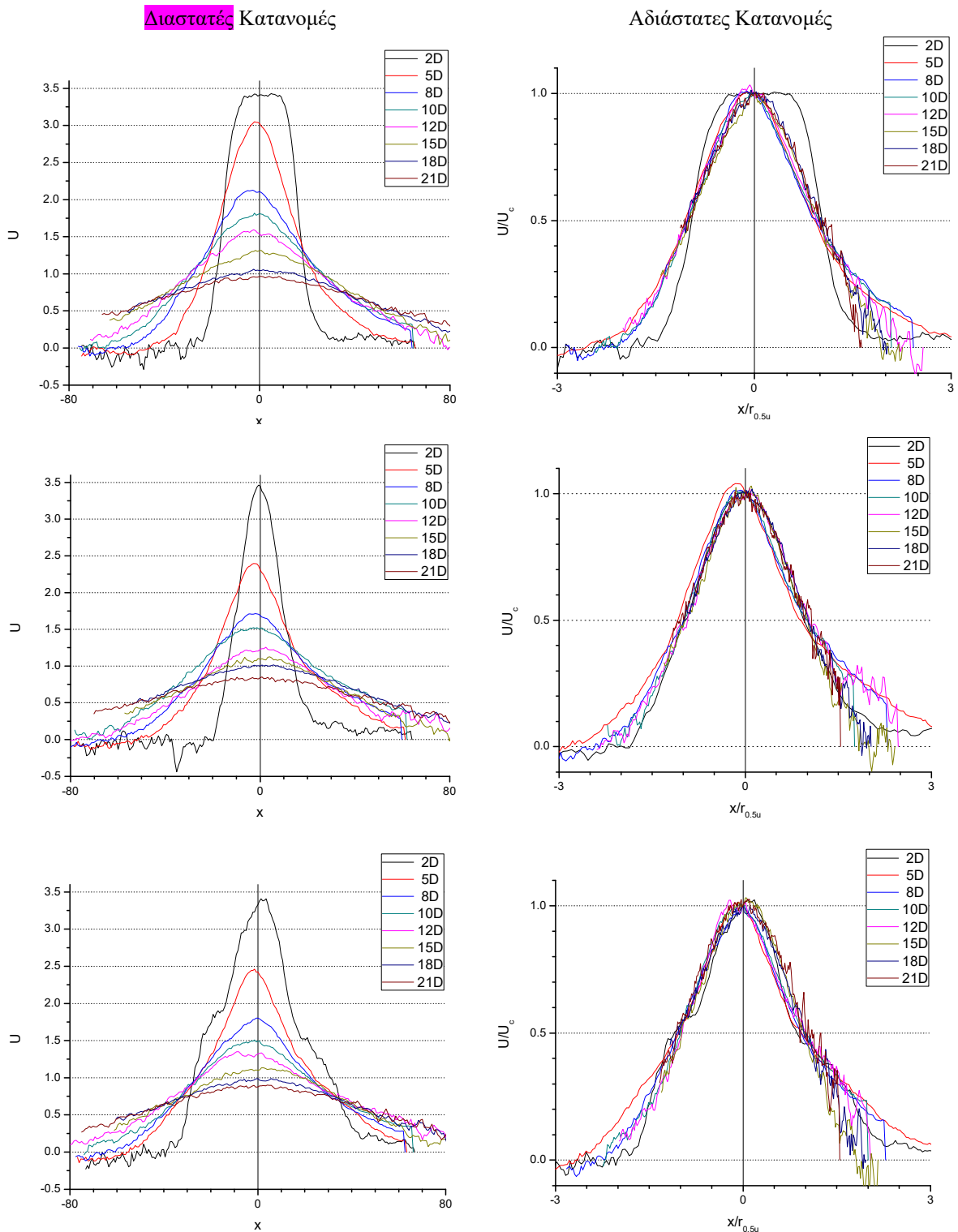
Διάγραμμα 4. Οριζόντια συνιστώσα της ταχύτητας, V_x , για τις 5 περιπτώσεις του θερμαινόμενου jet

Στο θερμαινόμενο jet το πεδίο οριζόντιων ταχυτήτων (Διάγραμμα 4) παρουσιάζει πολύ εντονότερη κίνηση σε σχέση με το αντίστοιχο ισοθερμοκρασιακό, καθώς οι ζώνες υψηλών ταχυτήτων έχουν αυξηθεί αισθητά. Συγκεκριμένα, η ζώνη της έντονης κίνησης ρευστού προς το κέντρο της ροής είναι εμφανής τόσο στο ελεύθερο jet, κάτι που δεν συνέβαινε προηγουμένως, όσο και στα jet με επίπεδο στους στροβιλιστές σε μεγαλύτερη έκταση. Το αντίστοιχο ισχύει και για τα jet με επίπεδο μακριά απ' αυτούς, ενώ η υπόλοιπη συμπεριφορά του jet είναι ίδια με προηγουμένως.

Στη συνέχεια (Διάγραμμα 5), παρουσιάζονται οι κατανομές της κατακόρυφης συνιστώσας της ταχύτητας για συγκεκριμένα ύψη, y , (απόσταση από το στόμιο). Οι κατανομές αυτές, όπως αναμενόταν, ακολουθούν κανονική κατανομή στις περιοχές της εδραιωμένης ροής. Επιπλέον, όλες οι κατανομές αδιαστατοποιήθηκαν με σκοπό τον έλεγχο της καθ' εαυτό ομοιότητας του jet. Οι αδιαστατοποιήσεις έγιναν για την ταχύτητα ως προς U_c , την κατακόρυφη ταχύτητα στον άξονα της ροής και για την απόσταση από τον άξονα ως προς $r_{0.5u}$, την οριζόντια συνιστώσα στην οποία η ταχύτητα είναι η μισή της κεντρικής. Τα διαγράμματα απεικονίζουν τα διαστατά $U(x)$ και τα αδιάστατα προφίλ $U/U_c(x/r_{0.5u})$ για 3 περιπτώσεις μετρήσεων και για διάφορες αποστάσεις από το στόμιο.

Όλες οι κατανομές ανήκουν στην περιοχή της εδραιωμένης ροής και προσεγγίζονται από καμπύλες κανονικής κατανομής, ακόμη και στις περιπτώσεις τοποθέτησης στροβιλιστών. Μοναδική εξαίρεση αποτελεί η πρώτη μέτρηση στο ελεύθερο jet (2D) που δείχνει ότι η ροή δέσμης έχει ακόμη την μορφή top hat, μορφή που χαρακτηρίζει το κομμάτι εδραίωσης της ροής. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται φανερό ότι στις περιπτώσεις των στροβιλιστών έχει μειωθεί αισθητά η έκταση της εδραίωσης της ροής.

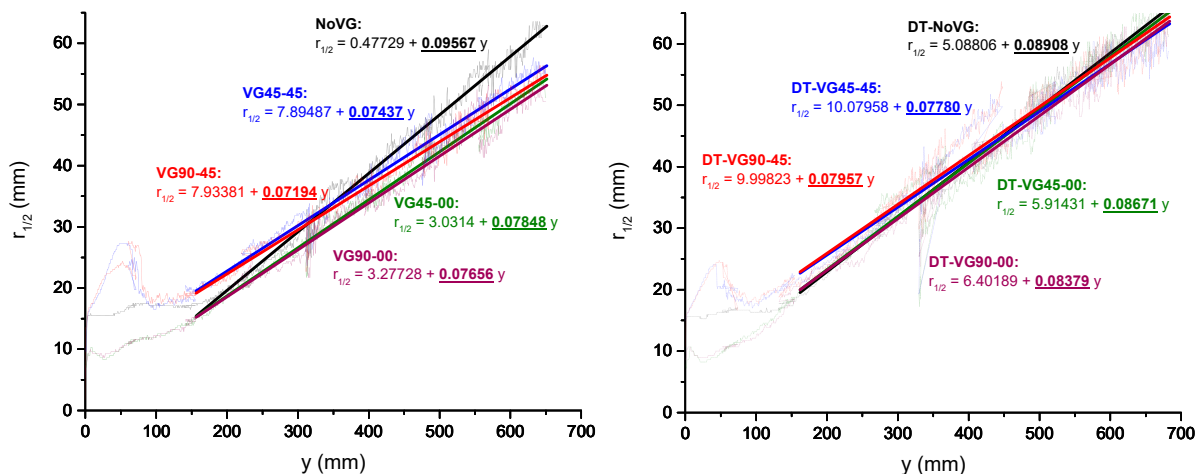
Οι αδιάστατες κατανομές έγιναν με σκοπό τον έλεγχο της αυτοομοιότητας της ανωστικής ροής δέσμης. Αυτή επιβεβαιώνεται σε όλες τις περιπτώσεις, ακόμη και με τοποθέτηση στροβιλιστών, καθώς τα αποτελέσματα συγκλίνουν σε μια μοναδική καμπύλη κανονικής κατανομής μέσα στα όρια της αβεβαιότητας.



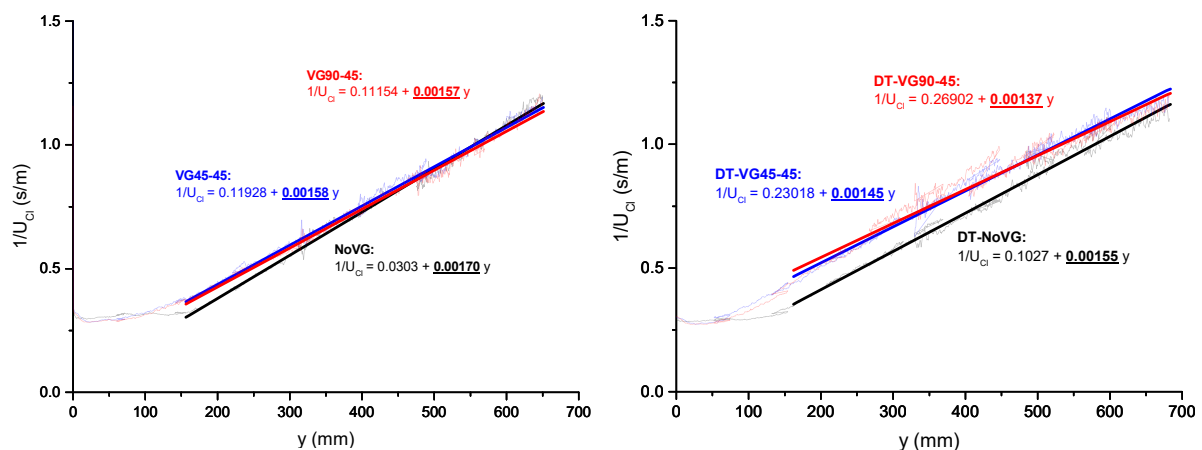
Διάγραμμα 5. Η κατανομή των ταχυτήτων σε διάφορα ύψη από την έξοδο του ακροφυσίου σε διαστατή (αριστερά) και αδιάστατη μορφή (δεξιά) στην περίπτωση χωρίς στροβιλιστές (επάνω), με στροβιλιστές 45° στο επίπεδο των στροβιλιστών (μέση), με στροβιλιστές 45° με επίπεδο προβολής 45° μακριά από τους στροβιλιστές (κάτω)

Στα επόμενα διαγράμματα (Διαγράμματα 6 και 7), παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάπτυξης της ανωστικής ροής συναρτήσει της απόστασης y από το ακροφύσιο για τις δύο περιπτώσεις διερεύνησης του ισοθερμοκρασιακού και θερμαινόμενου πεδίου. Πιο συγκεκριμένα, δίνονται τα διαγράμματα του ημιπλάτους $r_{0.5u}(y)$, που αποτελεί χαρακτηριστικό μέγεθος του ρυθμού μίξης, και της κεντρικής κατακόρυφης ταχύτητας, που σχετίζεται με τους νόμους απόσβεσης του jet, για τις περιπτώσεις μετρήσεων. Η εξέλιξη της ροής αναμένεται να έχει γραμμική συσχέτιση στην περίπτωση του ελεύθερου jet και σχεδόν γραμμική στις υπόλοιπες. Σε κάθε περίπτωση, υπολογίστηκε και η αντίστοιχη γραμμή τάσης (γραμμική προσομοίωση) που τα προσεγγίζει.

Παρατηρώντας τα διαγράμματα των ημιπλάτων (Διάγραμμα 6), παρατηρούμε ότι οι περιπτώσεις των μετρήσεων μπορούν να χωρισθούν με βάση την μορφή τους στις περιπτώσεις διερεύνησης. Η περίπτωση του ελεύθερου jet έχει την μεγαλύτερη κλίση απ' όλες και ενώ ξεκινάει από χαμηλές τιμές καταλήγει να έχει την μεγαλύτερη τιμή στο τέλος των μετρήσεων. Οι περιπτώσεις του jet με επίπεδο πάνω στους στροβιλιστές ξεκινάνε από τις χαμηλότερες τιμές. Αρχικά, ενώ η διαφορά τους από τις περιπτώσεις των jet με επίπεδο μακριά απ' τους στροβιλιστές είναι μεγάλη, μέχρι το τέλος των μετρήσεων οι διαφορές εξασθενούν, το jet συγκλίνει και τείνει να γίνει πάλι αξονοσυμμετρικό. Στο θερμαινόμενο jet οι διαφορές σε τιμές και κλίσεις είναι αισθητά μικρότερες από τις αντίστοιχες του ισοθερμοκρασιακού.



Διάγραμμα 6. Η εξέλιξη του ημιπλάτους για τις 5 περιπτώσεις του ισοθερμοκρασιακού πεδίου (αριστερά) και τις αντίστοιχες του θερμαινόμενου (δεξιά)



Διάγραμμα 7. Η εξέλιξη του $1/U_{Cl}$ συναρτήσει της απόστασης από το στόμιο για τις περιπτώσεις του ισοθερμοκρασιακού (αριστερά) και του θερμαινόμενου jet (δεξιά)

Στο διάγραμμα 7, παρουσιάζεται η εξέλιξη της ταχύτητας στον κεντρικό άξονα της ροής με τη μορφή $1/U_{cl}$. Ο όρος της ταχύτητας έχει την μικρότερη τιμή για το ελεύθερο jet σε όλο το εύρος των μετρήσεων, κάτι που είναι αναμενόμενο αφού στο jet αυτό έχουμε την μικρότερη πτώση ταχυτήτων. Αυτό είναι ακόμη πιο έντονο στο θερμαινόμενο jet. Ταυτόχρονα όμως, το ελεύθερο jet παρουσιάζει και την μεγαλύτερη κλίση, κάτι που δηλώνει ότι όσο απομακρυνόμαστε από το στόμιο η επιρροή των στροβιλιστών εξασθενεί, μέχρι (φαινομενικά) να εξαφανιστεί. Αυτό φαίνεται να έχει συμβεί στο ισοθερμοκρασιακό jet μέσα στο εύρος των μετρήσεων, ενώ στο θερμαινόμενο η διαφορά αυτή παραμένει μέχρι το τέλος και η ταύτιση γίνεται αργότερα. Οι γραμμικές προσεγγίσεις ακολουθούν πολύ πιστά τα αποτελέσματα ακόμη και στις περιπτώσεις των στροβιλιστών.

Η ανάλυση των δεδομένων έδειξε ότι:

- Οι κατανομές της ταχύτητας ακολουθούν την κανονική κατανομή με αποκλίσεις στα όρια της αβεβαιότητας των μετρήσεων ακόμη και μετά την τοποθέτηση στροβιλιστών.
- Η ροή εκτείνεται στη μη ανωστική και την ενδιάμεση περιοχή στο εύρος των μετρήσεων.
- Τα αδιαστατοποιημένα προφίλ ταχυτήτων είναι αυτοόμοια σε όλες τις περιπτώσεις.
- Οι στροβιλιστές επηρεάζουν έντονα τους ρυθμούς μίξης στα πρώτα στάδια της ανάπτυξης της ροής, ενώ με την αύξηση της κατάντη απόστασης η επιρροή τους εξασθενεί.
- Η εξέλιξη του ημιπλάτους παραμένει γραμμική σε όλες τις περιπτώσεις.
- Η εξέλιξη του U_e^{-1} παραμένει γραμμική σε όλες τις περιπτώσεις.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Adrian, R., & Westerweel, J. (2011). *Particle Image Velocimetry*. Cambridge: Cambridge University Press.

Chen, C., & Rodi, W. (1980). *Vertical Turbulent buoyant jets: a review of experimental data*. Pergamon Press.

Lee S.J., Jang Y.G., Choi Y.S., Stereoscopic-PIV measurement of turbulent jets issuing from a sharp-edged circular nozzle with multiple triangular tabs, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2012.

Raffel, M., Willert, C., & Kompenhans, J. (1998). *Particle Image Velocimetry: a practical guide*. Berlin Heidelberg New York: Springer.

Zaman K.B.M.Q., Reeder, M.F., Samimy, M. Control of an axisymmetric jet using vortex generators, *Phys. Fluids.*, Vol. 6, 1994.

Τσούκας Κ., Ρωμαίος Α., Περράκης Κ., Πανίδης Θ., 2016, 'Μελέτη της Επίδρασης Στροβιλιστών στο Θερμοκρασιακό Πεδίο Κατακόρυφης Ανωστικής Δέσμης Εκροής', 10η Επιστημονική Συνάντηση, Πανελλήνιο Συνέδριο για τα Φαινόμενα Μηχανικής Ρευστών, Πάτρα, 2-3 Δεκεμβρίου, 2016