



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΣΤΡΟΒΙΛΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΤΟΠΟΘΕΤΗΜΕΝΩΝ ΠΑΝΩ ΣΕ
ΕΠΙΠΕΔΗ ΠΛΑΚΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ STEREO - PIV**

**PARAMETRIC STUDY OF VORTEX GENERATORS ON A FLAT PLATE WITH USE OF
STEREO – PIV METHOD**

Εμμανουήλ – Μάριος Νάνος

Επιβλέπων:
Αν. Καθηγητής
Βουτσινάς Σπυρίδων

Αθήνα, Δεκέμβριος 2013

Γράφοντας αυτές τις γραμμές κλείνω ένα σημαντικό κεφάλαιο της ζωής μου, αυτό της φοίτησης μου στο τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ.

Η εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας ήταν με διαφορά η πιο δύσκολη, προσοδοφόρα και ευχάριστη ενασχόληση μου στα πλαίσια των σπουδών μου. Σε αυτό το σημείο θέλω να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Μαρίνο Μανολέσο. Ο Μαρίνος ήταν αυτός που με βοήθησε να κάνω τα πρώτα μου βήματα στη πειραματική Μηχανική των Ρευστών. Ήταν κάθε μέρα εκεί πρόθυμος πάντα να μου μάθει ότι ο ίδιος ήξερε. Χωρίς τη βοήθειά του η εκπόνηση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας θα ήταν αδύνατη.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέπων καθηγητή Σπύρο Βουτσινά ο οποίος με την αναλυτική και μεθοδική του σκέψη βοήθησε τα μέγιστα να εμβαθύνω στο αντικείμενο της εργασίας. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω το Λέκτορα Βασίλη Ριζιώτη ο οποίος με τη μεταδοτικότητά του με βοήθησε να αποκτήσω τις πρώτες μου γνώσεις στην Αεροδυναμικής γεγονός που μου έδωσε το ερέθισμα να ασχοληθώ και στη διπλωματική μου με αυτό το τομέα. Τις θερμές μου ευχαριστίες και στο Καθηγητή Κωνσταντίνο Μαθιουλάκη ο οποίος πρόθυμα βοήθησε όσες φορές χρειάστηκα τη πείρα του πάνω στη πειραματική Μηχανική των Ρευστών.

Αξίζει να αναφέρω επίσης τους προπτυχιακούς φοιτητές Γιώργο Χρυσοκέντη και Αριστοτέλη Νταρουϊ. Με τον Γιώργο διανύσαμε μαζί από την αρχή ως το τέλος τη διαδρομή αυτή. Θέλω να τον ευχαριστήσω όχι μόνο για τη συνεργασία μας στα πλαίσια των διπλωματικών μας εργασιών αλλά πολύ περισσότερο για τη φιλία μας η οποία βοήθησε και αυτή με τον τρόπο της σημαντικά την ολοκλήρωση της εργασίας. Τον Τέλη θέλω να τον ευχαριστήσω για τη βοήθεια που μου έδωσε σε σημεία της διπλωματικής διαθέτοντάς μου αρκετό από τον πολύτιμο χρόνο του.

Εδώ θέλω να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και ιδιαίτερα τους γονείς μου, Γιώργο και Γεωργία. Η υλική και η συναισθηματική τους στήριξη, όλα αυτά που με έκαναν άνθρωπο οφείλονται σε αυτούς. Η εργασία είναι αφιερωμένη σε εκείνους.

Τέλος, θέλω να αναφέρω τον άνθρωπο που μου χάρισε αμέτρητες όμορφες στιγμές, ήταν δίπλα μου σε κάθε μου δυσκολία, και ακόμα και τώρα που είναι μακριά είναι σαν να είναι δίπλα μου. Έδωσε μαζί μου εξεταστικές, απογοητεύτηκε με τις αποτυχίες, χάρηκε με τις επιτυχίες. Όταν γνώρισα την Τζίνα είχα περάσει μόλις 10 μαθήματα και τώρα που αποφοιτώ είναι ακόμη εδώ. Δεν έχει νόημα να της αφιερώσω την διπλωματική. Όσο είναι δική μου άλλο τόσο είναι και δική της.

Περίληψη

Στη παρούσα εργασία αρχικά μελετήθηκε πειραματικά η επίδραση που έχει η μεταβολή συγκεκριμένων παραμέτρων στροβιλογεννητριών (VGs) στους παραγόμενους στροβίλους. Τα VG είναι τοποθετημένα πάνω σε επίπεδη πλάκα ενώ για τη μελέτη έγιναν πειράματα σε αεροδυναμική σήραγγα με χρήση της μεθόδου stereoscopic PIV.

Αρχικά επιλέχθηκε ένα VG αναφοράς με ύψος $h=0,92\delta$ (δ το ύψος του οριακού στρώματος), μήκος $l=2h=55\text{mm}$ και γωνία πρόσπτωσης $\beta=20^\circ$. Έχοντας ως βάση το συγκεκριμένο VG μεταβάλαμε τη γωνία πρόσπτωσης κατά 5° και προς τις δύο κατευθύνσεις κρατώντας το μήκος και το ύψος σταθερό και αντίστοιχα μεταβάλαμε το ύψος κατά $0,8\delta$ και προς τις δύο κατευθύνσεις κρατώντας το μήκος και τη γωνία σταθερή. Η ίδια μελέτη έγινε για ορθογώνια και τριγωνικά VGs ίδιων χαρακτηριστικών μεγεθών (μήκος, ύψος, γωνία πρόσπτωσης) για να ελεγχθεί και η επίδραση του σχήματος. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η μεταβολή της γωνίας επηρεάζει έντονα τους παραγόμενους στροβίλους κυρίως ως προς το μέγεθός και τα τροχιά τους οδηγώντας σε αύξηση της τάξεως 35% με 45% στη κυκλοφορία για μεταβολή της γωνίας κατά 5° . Η μεταβολή του ύψους επηρεάζει σε μικρό βαθμό κυρίως το μέγεθος των στροβίλων. Τα ορθογώνια παρήγαγαν κατά 50% ισχυρότερους στροβίλους σε σχέση με τα τριγωνικά, ενώ και για τα δύο σχήματα η επίδραση των μεταβολών σε ύψος και γωνία πρόσπτωσης ήταν ίδια.

Στη συνέχεια επιλέχθηκε ένα VG ($h=0,92\delta$, $\beta=25^\circ$ για ορθογώνια και τριγωνικά) για να μελετηθεί η αλληλεπίδραση των στροβίλων όταν υπάρχει ζεύγος VG. Μελετήθηκαν τρεις διατάξεις: συγκλίνουσα, αποκλίνουσα και παράλληλη όπου στη κάθε μία τα VGs μελετήθηκαν για τρεις διαφορετικές μεταξύ τους αποστάσεις ($1h$, $2h$, $3h$). Στη συγκλίνουσα διάταξη η αλληλεπίδραση είναι έντονη και εκφράζεται κυρίως με μεγαλύτερη απομάκρυνση των δύο στροβίλων από το δάπεδο, με αύξηση του μεγέθους των στροβίλων και μείωση της στροβιλότητας τους σε σχέση με το στρόβιλο που δημιουργείται από ένα VG μόνο του. Στην αποκλίνουσα διάταξη οι στρόβιλοι αλληλεπιδρούν ασθενώς και μόνο για απόσταση $1h$ μεταξύ των VG. Η αλληλεπίδραση αυτή έχει σαν αποτέλεσμα να απομακρύνονται λιγότερο οι στρόβιλοι από το δάπεδο (σε σύγκριση με τη περίπτωση του μόνου VG) και να έχουν μικρότερη κυκλοφορία λόγω της επίδρασης των δυνάμεων συνεκτικότητας που είναι έντονες κοντά στο δάπεδο. Στη παράλληλη διάταξη η αλληλεπίδραση είναι επίσης έντονη και εκφράζεται με συνένωση των δύο στροβίλων σε έναν μεγαλύτερο σε αρκετές περιπτώσεις. Τριγωνικά και ορθογώνια VGs είχαν την ίδια συμπεριφορά για τις διάφορες διατάξεις όπως στη περίπτωση των μόνων VG.

Abstract

The present diploma thesis investigates experimentally the flow downstream of Vortex Generators and the influence that have changes in certain parameters of the VGs to the generated Vortices. VGs are placed on a flat plate and the experiments were carried out in a wind tunnel with use of stereoscopic PIV method.

Initially a VG was built with height $h=0.92\delta$ (δ for the boundary layer thickness), length= $2h=55\text{mm}$ and angle of attack $\beta=20^\circ$. Having this VG as basis we altered the angle of attack by 5 degrees in both directions keeping length and height constant, as well as the height by 0.8δ keeping angle of attack and length constant respectively. Each case (with same values for height and angle of attack) was studied for both rectangular and triangular VGs in order to examine the influence of shape as well. Results showed that variation of angle of attack influences intensively the vortex formation mainly in terms of vortex size and vortex trajectory resulting a growth of 35% - 45% in circulation per 5 degrees growth. Variation of height has much less influence. Rectangular VGs produced vortices with 50% greater circulation compared to triangular VGs while for both shapes the changes of height and angle of attack had the same effect on generated vortices.

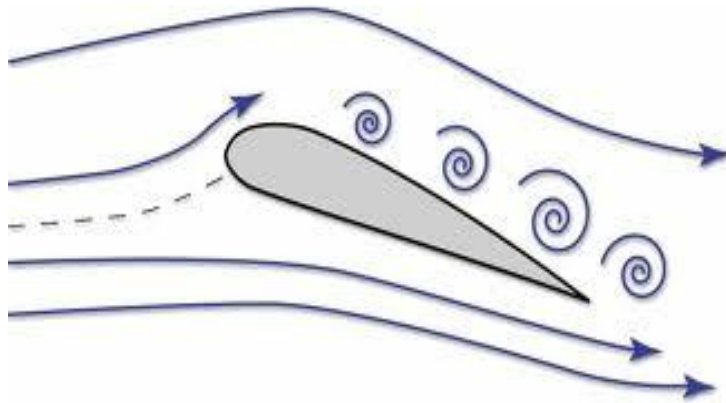
Then, the VG with $h=0.92\delta$ and $\beta=25^\circ$ (for both rectangular and triangular VGs) was chosen to investigate the interaction between two vortices when the case is a pair of VGs. VGs were studied in a counter rotating set up with common flow up and common flow down as well as in a co-rotating set up. For each set up VGs were placed with three different values of the distance between them ($1h$, $2h$ and $3h$). Results showed that for counter rotating VGs with common flow up the interaction between the vortices is strong. It is expressed with greater deflection from the flat plate of the vortices as well as growth in size and reduction in vorticity compared to the single VG case. For counter rotating VGs with common flow down the interaction was weak and was noticed for the case in which the distance between the VGs was $1h$. This interaction resulted vortices "pushing" each other downwards and a reduction to their circulation by 20% because of the strong viscosity forces close to the flat plate. For the co-rotating VGs the interaction was strong and resulted in some cases the coupling of the two vortices into one more diffused vortex. Triangular and rectangular VGs reacted in the same way to the different set ups just like the single VG case.

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	1
2	Θεωρητικό υπόβαθρο	6
2.1	Βιβλιογραφική ανασκόπηση	6
2.2	Συνοπτική παρουσίαση της μεθόδου PIV	13
3	Πειραματική διάταξη και διαδικασία	17
3.1	Διάταξη και Εξοπλισμός	17
3.2	Επιλογή VG	20
3.3	Θέσεις μέτρησης	23
3.4	Ρυθμίσεις εξοπλισμού	26
3.5	Ρυθμίσεις stereo PIV	28
4	Επεξεργασία δεδομένων	31
4.1	Προεπεξεργασία (Preprocessing)	31
4.2	Επεξεργασία εικόνων (Image processing)	33
4.3	Εγκυρότητα αποτελεσμάτων (Post processing)	39
5	Ανάλυση αποτελεσμάτων	41
5.1	Μονά VGs	41
5.2	Ζεύγη VGs	64
6	Συμπεράσματα	77
	Βιβλιογραφία	81

1 Εισαγωγή

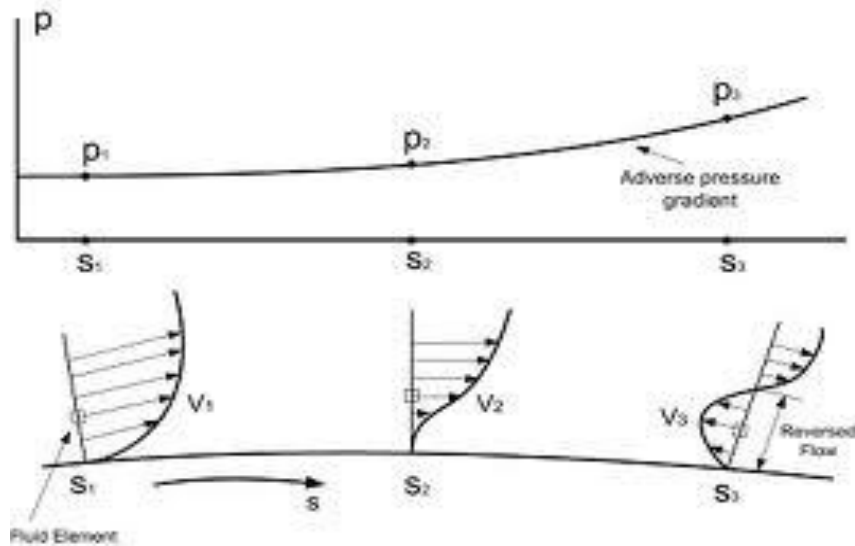
Ένα από τα πιο βασικά προβλήματα στον σχεδιασμό αεροδυναμικών κατασκευών είναι αυτό της αποκόλλησης της ροής. Η αποκόλληση συμβαίνει εξ αιτίας της μεγάλης απώλειας ορμής όταν η ροή κινείται υπό συνθήκες αντίστροφης κλίσης πίεσης, δηλαδή όταν η ροή επιβραδύνεται[1]. Κατά την αποκόλληση το ρευστό κοντά στο στερεό όριο αρχίζει να κινείται αντίθετα ως προς την κυρίως ροή και συνδέεται με μεγάλες απώλειες ενέργειας και σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως όταν μιλάμε για αεροσκάφη, μπορεί να προκαλέσει απώλεια ελέγχου.



Εικόνα 1.1. Σχηματική απεικόνιση της αποκολλημένης ροής σε αεροτομή.

Figure 1.1. Schematic representation of the streamlines on a stalled airfoil

Συνθήκες αντίστροφης κλίσης πίεσης έχουμε πάντα όταν μιλάμε για κατασκευές που σκοπός τους είναι η εκμετάλλευση της ροής του αέρα για την παραγωγή ωφέλιμων δυνάμεων και ροπών, δηλαδή πτέρυγες αεροσκαφών, ανεμογεννητριών, έλικες ελικοπτέρων κοκ, αλλά και σε διαχύτες. Άρα γίνεται κατανοητό ότι η αποκόλληση αφορά το σύνολο σχεδόν των αεροδυναμικών κατασκευών και ο περιορισμός της, αν είναι δυνατόν και η εξάλειψή της, μπορεί να επιφέρει τεράστια οικονομοτεχνικά οφέλη σε μια σειρά κλάδους όπως αεροπορική βιομηχανία, αιολική ενέργεια κοκ.

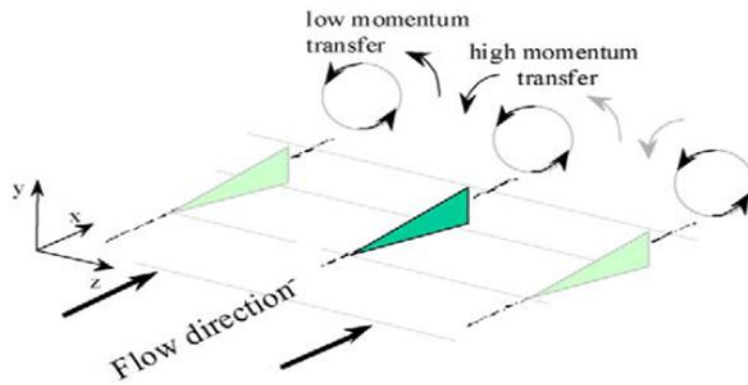


Εικόνα 1.2. Προφίλ οριακού στρώματος σε περιβάλλον αρνητικής κλίσης πίεσης πριν και μετά την αποκόλληση.

Figure 1.2. Boundary layer profile under adverse pressure gradient conditions.

Για το λόγο αυτό εδώ και πολλές δεκαετίες έχουν γίνει προσπάθειες ανάπτυξης μεθόδων ελέγχου της ροής, είτε μιλάμε για παθητικό έλεγχο της ροής είτε για ενεργητικό. Μία από τις μεθόδους παθητικού ελέγχου της ροής είναι η εγκατάσταση πάνω στα τοιχώματα των οποίων το οριακό στρώμα υφίσταται αποκόλληση στροβιλογεννητριών η όπως διεθνώς είναι γνωστά vortex generators (VGs).

Τα VGs είναι μικρές κατασκευές στο ύψος περίπου του οριακού στρώματος, η και λιγότερο όπως θα δούμε παρακάτω, τα οποία τοποθετούνται κάθετα στο στερεό όριο και με μια γωνία β ως προς την επερχόμενη ροή. Η γεωμετρία τους έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργούν στροβίλους στο διαμήκη άξονα (παράλληλο στη ροή) (Εικόνα 1.2). Οι στροβίλοι αυτοί μεταφέρουν ρευστό υψηλής ορμής από τη ροή εκτός οριακού στρώματος κοντά στο στερεό όριο ενισχύοντας έτσι το οριακό στρώμα και δίνοντας ενέργεια στο ρευστό να 'αντισταθεί' στη αντίστροφη κλίση πίεσης καθυστερώντας η και ακυρώνοντας την αποκόλληση.



Εικόνα 1.2. Σχηματική απεικόνιση των VG και των στροβίλων που παράγουν καθώς και της διαδικασίας μεταφοράς ορμής.

Figure 1.3. Schematic representation of generated vortices and momentum transfer procedure.

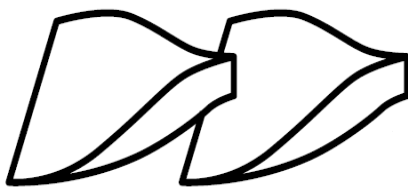
Έχουν προταθεί διάφοροι τύποι VG με τους βασικότερους να είναι τα vane, τα doublets, τα wishbones, τα ramps και τα wedge(Εικόνα 1.3).



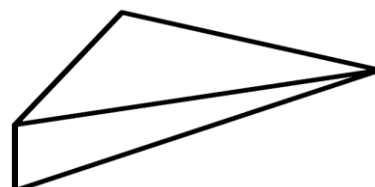
α)



β)



γ)



δ)

Εικόνα 1.3. Τύποι VGs : α) τριγωνικό vane, β) wishbones, γ)doublets, δ)forward wedge, από [2]

Figure 1.4. Types of VGs: α) vane triangular, β) wishbones, γ) doublets, δ) forward wedge

Μέχρι σήμερα τα vg έχουν χρησιμοποιηθεί για την καθυστέρηση αποκόλλησης σε υποηχητικούς διαχύτες, για την ενίσχυση της παραγωγής άνωσης σε πτέρυγες αεροσκαφών[3] (Εικόνα 1.3), για το περιορισμό της ακουστικής εκπομπής αεροσκαφών [4] , σε ανεμογεννήτριες[5] (Εικόνα 1.5) κ.α.



Εικόνα 1.4. VGs πάνω σε πτέρυγα μαχητικού αεροσκάφους.

Figure 1.5. VGs on a fighter's wing



Εικόνα 1.5. VGs σε πτέρυγα ανεμογεννήτριας.

Figure 1.6. VGs on a wind turbine wing.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η πειραματική παραμετρική μελέτη της προκύπτουσας ροής κατάντη διαφόρων γεωμετριών και διατάξεων vg σε επίπεδη πλάκα. Στόχος είναι να γίνει ένα ακόμη βήμα στη πορεία κατανόησης του φυσικού μηχανισμού παραγωγής στροβίλων, στο πως επιδρούν γεωμετρικά χαρακτηριστικά σε αυτό το μηχανισμό και στο πως αλληλεπιδρούν μεταξύ τους οι στρόβιλοι όταν έχουμε , όχι ένα μόνο του, αλλά δύο vg τοποθετημένα το ένα δίπλα στο άλλο. Για να το πετύχουμε αυτό πραγματοποιήθηκαν πειράματα σε αεροδυναμική σήραγγα με τη χρήση της μεθόδου stereo Particle Image Velocimetry (PIV), μιας μεθόδου υπολογισμού του πεδίου ταχυτήτων της ροής ρευστού που χρησιμοποιείται εκτενέστατα τα τελευταία 30 χρόνια.

Η εργασία δομείται ως εξής: Στο 2^ο κεφάλαιο γίνεται μια ανασκόπηση των σημαντικότερων πειραματικών ερευνών που αφορούν vg σε επίπεδη πλάκα καθώς και μια συνοπτική παρουσίαση της μεθόδου PIV. Στο 3^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται ο πειραματικός εξοπλισμός και η διάταξη καθώς και η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στην εκτέλεση των πειραμάτων. Στο 4^ο κεφάλαιο εξηγούνται οι επιλογές που έγιναν κατά την επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων, στο 5^ο κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων ενώ στο 6^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα τελικά συμπεράσματα.

2 Θεωρητικό υπόβαθρο

2.1 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Η ιδέα της χρησιμοποίησης συσκευών με τη μορφή είτε επίπεδης πλάκας είτε αεροτομής, οι οποίες θα τοποθετούνται κάθετα στο επίπεδο και με μία γωνία πρόσπτωσης β σε σχέση με την επερχόμενη ροή, και θα παράγουν διαμήκεις στροβίλους οι οποίοι θα μεταφέρουν ορμή από τη ροή μακριά από την επιφάνεια, στο οριακό στρώμα κοντά στην επιφάνεια ενισχύοντάς το, ανήκει στον Taylor[6] ο οποίος τις χρησιμοποίησε για να καθυστερήσει την αποκόλληση σε διαχύτη.

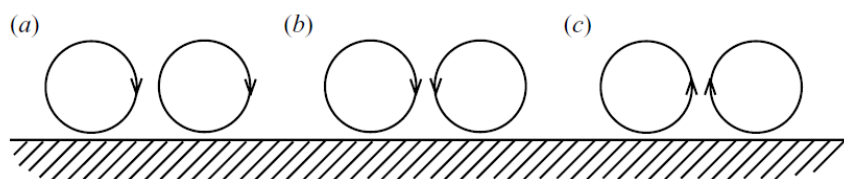
Έκτοτε, έχουν γίνει δεκάδες έρευνες στη προσπάθεια να κατανοηθεί σε βάθος η φύση της επίδρασης που έχουν στην ροή τα vortex generator έτσι ώστε να μπορέσουν να χρησιμοποιηθούν με τα μέγιστα δυνατά οφέλη. Στην παρούσα ανασκόπηση θα παρουσιαστούν οι πιο βασικές έρευνες που αφορούν μελέτη των vg πάνω σε τυρβώδες οριακό στρώμα μηδενικής κλίσης πίεσης (επίπεδη πλάκα).

Όσο πηγαίνουμε προς τα πίσω χρονικά, διαπιστώνουμε ότι μοναδικός σχεδόν τρόπος να μελετηθεί η φυσική της ροής όταν χρησιμοποιούνται vg ήταν το πείραμα. Με την αύξηση της υπολογιστικής ισχύς στο πέρασμα των χρόνων αυτό άλλαξε και πλέον οι μέθοδοι υπολογιστικής ρευστομηχανικής (CFD) είναι εξ ίσου σημαντικές με τις πειραματικές μεθόδους.

Από τις πρώτες προσπάθειες πειραματικής μελέτης της επίδρασης των vg στη ροή πάνω σε επίπεδη πλάκα υπό μηδενική κλίση πίεσης ήταν αυτή του Pearcy[7] το 1961, οποίος μελέτησε πολλές διαφορετικές διατάξεις με συστοιχίες vg. Χρησιμοποιώντας μετρήσεις της αξονικής ταχύτητας κατάφερε να εντοπίσει τους παραγόμενους στροβίλους και να κάνει κάποιους πρώτους υπολογισμούς για την επίδραση που είχαν αυτοί οι στροβίλοι στο οριακό στρώμα. Ο Pearcy σε αυτή την εργασία παρουσίασε και έναν οδηγό σχεδίασης vg. Παρ' όλα αυτά δεν εξήγησε πως αλληλεπιδρούν μεταξύ τους οι στροβίλοι όταν είναι περισσότεροι από ένας.

Η εξέλιξη ενός στροβίλου μέσα σε τυρβώδες οριακό στρώμα μελετήθηκε διεξοδικά από τους Shabaka, Metha και Bradshaw[8] το 1985. Τα πειραματικά τους δεδομένα έδειξαν ότι κοντά στο δάπεδο ο στροβίλος επάγει στροβιλότητα αντίθετης φοράς, λόγω των ισχυρών δυνάμεων συνεκτικότητας που επιδρούν σε αυτή τη περιοχή. Η περιοχή αυτή αντίθετης στροβιλότητας παρουσιάζεται κοντά στο τμήμα εκείνο του στροβίλου που η ροή απομακρύνεται από το κάτω στερεό όριο.

Σε επόμενες δημοσιεύσεις των Metha και Brandshaw [9][10], παρουσιάζονται εκτενή αποτελέσματα από μετρήσεις που έγιναν σε μία θέση κατάντη από δύο διαφορετικά ζεύγη VGs. Στο ένα, τα vg ήταν τοποθετημένα έτσι ώστε ανάμεσα τους να σχηματίζεται αποκλίνον ακροφύσιο, η αλλιώς, η ροή ανάμεσα τους να κατευθύνεται προς το δάπεδο. Στο άλλο ζεύγος αντίστροφα, τα δύο vg σχηματίζουν συγκλίνον ακροφύσιο, η αλλιώς η ροή ανάμεσά τους απομακρύνεται από το δάπεδο. Ο Metha εισήγαγε τους όρους ‘common flow down’ και ‘common flow up’ αντίστοιχα για τις δύο περιπτώσεις (Εικόνα 2.1). Και σε αυτή τη μελέτη, όπως και στις προηγούμενες, παρουσιάστηκαν συμπεράσματα για το πώς μεταβάλλεται το οριακό στρώμα σε μία μόνο θέση.



Εικόνα 2.1. Τα τρία διαφορετικά είδη ζευγών στροβίλων που είναι δυνατό να παραχθούν: a) co-rotating, b) counter rotating (common flow down), c) counter rotating (common flow up), από [11]

Figure 2.1. Three possible VG pair configurations: a) co-rotating, b) counter rotating (common flow down), c) counter rotating (common flow up) [11].

Το 1987 ο Westrahl [12] μελέτησε πειραματικά τη εξέλιξη ενός στροβίλου σε περιβάλλον αρνητικής και μηδενικής κλίσης πίεσης παίρνοντας μετρήσεις και των τριών συνιστωσών της ταχύτητας σε πολλά επίπεδα κατάντη χρησιμοποιώντας τη μέθοδο του καυτού νήματος (hotwire). Ο Westrahl έδειξε ότι ο υπολογισμός της κυκλοφορίας και της θέσης της μέγιστης στροβιλότητας ενός στροβίλου, είναι ικανοποιητικοί δείκτες της ισχύς και της θέσης του αντίστοιχα.

Μελέτη σταθμός ήταν αυτή των Pauley και Eaton[13] το 1988. Οι Pauley –Eaton μελέτησαν πειραματικά, με μετρήσεις πίεσης, διάφορες διατάξεις ζευγών vg , υπολογίζοντας τις τρεις συνιστώσες της ταχύτητας σε διάφορες θέσεις κατάντη των vg βγάζοντας τα πρώτα συμπεράσματα για το πώς αλληλεπιδρούν οι στροβίλοι μεταξύ τους σε κάθε περίπτωση.

Πιο συγκεκριμένα, μελέτησαν διατάξεις όπου τα vg ήταν αποκλίνοντα (common flow down), συγκλίνοντα (common flow up) και παράλληλα. Οι πρώτες δύο περιπτώσεις ανήκουν στη κατηγορία αντίστροφων vg (counter rotating), δεδομένου ότι οι στροβίλοι που παράγονται από τα δύο vg έχουν αντίθετες γωνιακές

ταχύτητες, και η τρίτη περίπτωση ανήκει στη κατηγορία ομόστροφων vg (co – rotating).

Όσον αφορά τα αποκλίνοντα vg , που μελετήθηκαν και εκτενέστερα, οι παράμετροι που εξετάστηκαν, ξεχωριστά, ήταν η απόσταση μεταξύ των vg και η γωνία πρόσπτωσης. Οι δύο στρόβιλοι απομακρύνονται μεταξύ τους όσο κινούνται κατάντη ως αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης του στρόβιλου με τον mirror vortex. Ο mirror vortex είναι ο κατοπτρικός στρόβιλος που θεωρούμε ότι υπάρχει λόγω της παρουσίας του δαπέδου. Η συμπεριφορά της μέγιστης στροβιλότητας και της κυκλοφορίας είναι παρόμοια με αυτή ενός μοναδικού στρόβιλου αφού καθώς οι στρόβιλοι απομακρύνονται μεταξύ τους η αλληλεπίδραση τους είναι αμελητέα. Επίσης, για απόσταση μεταξύ των vg μεγαλύτερη από δύο φορές το ύψος τους, η κυκλοφορία δεν επηρεάζεται. Για απόσταση μικρότερη όμως φαίνεται ότι επηρεάζεται μειώνοντας τη ισχύ των παραγόμενων στρόβιλων.

Ένα σημαντικό μέγεθος που μετρήθηκε ήταν το κατά πόσο λεπταίνει το οριακό στρώμα μεταξύ των δύο στρόβιλων, γιατί αυτό είναι εν τέλει και το ζητούμενο. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση ανάμεσα στα VGs τόσο λιγότερο λεπταίνει το οριακό στρώμα στη περιοχή μεταξύ τους, με την επίδρασή τους όμως να είναι φανερή ακόμα και για απόσταση μεταξύ τους ίση με 7 φορές το ύψος τους.

Η μελέτη των συγκλίνοντων vg (common flow up) έδειξε ότι, αντίθετα με τα αποκλίνοντα, λόγω των 'στρόβιλων ειδώλων', οι κυρίως στρόβιλοι κινούνται ο ένας προς τον άλλον. Όσο πλησιάζουν η αλληλεπίδραση μεταξύ τους γίνεται πολύ ισχυρή ενώ ταυτόχρονα ο ένας σπρώχνει τον άλλο μακριά από το δάπεδο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να ακυρώνεται ουσιαστικά η αλληλεπίδραση του κάθε στρόβιλου με τον εικονικό του στρόβιλο.

Το 'σπρώξιμο' του ενός στρόβιλου στον άλλο προς τα πάνω έχει ως αποτέλεσμα για τη μικρότερη μεταξύ τους απόσταση να βγουν έξω από το οριακό στρώμα και να μην το επηρεάσουν ιδιαίτερα. Όσο η αρχική απόσταση μεγαλώνει όμως, οι στρόβιλοι παραμένουν μέσα στο οριακό στρώμα επηρεάζοντάς το.

Τα περιγράμματα στροβιλότητας έδειξαν ότι οι στρόβιλοι χάνουν το κυκλικό τους σχήμα, αποκτώντας ένα πιο ελλειπτικό, όπως ακριβώς συμβαίνει και για τους μόνους στρόβιλους όπως έδειξε ο Westphal [12], με τη διαφορά ότι εδώ οφείλεται στην αλληλεπίδραση των δύο στρόβιλων, ενώ στη περίπτωση του ενός στρόβιλου, οφείλεται στην αλληλεπίδρασή του με τον 'στρόβιλο είδωλο' που δημιουργείται. Επίσης, η μείωση της μέγιστης στροβιλότητας ήταν πιο απότομη σε σχέση με τα αποκλίνοντα. Αυτό εξηγήθηκε με βάση τη κατακόρυφη διάδοση στροβιλότητας από το παρακείμενο στρόβιλο.

Από την μελέτη των παράλληλων vg προέκυψε ότι όταν είναι τοποθετημένα αρκετά κοντά (λιγότερο από δύο φορές το ύψος τους) οι δύο στρόβιλοι ενώνονται. Στα παράλληλα μελετήθηκε και η συμπεριφορά στροβίλων που δημιουργούνται από συστοιχία πολλών vg , και όχι μόνο δύο, με απόσταση μεταξύ τους ίση με $3h$. Εδώ φάνηκε ότι οι στρόβιλοι κινούνται πλευρικά σε μεγαλύτερο βαθμό από ένα στρόβιλο μόνο του, πιθανότατα γιατί επηρεάζονται από περισσότερους από έναν 'στρόβιλους είδωλα' στη περίπτωση της συστοιχίας.

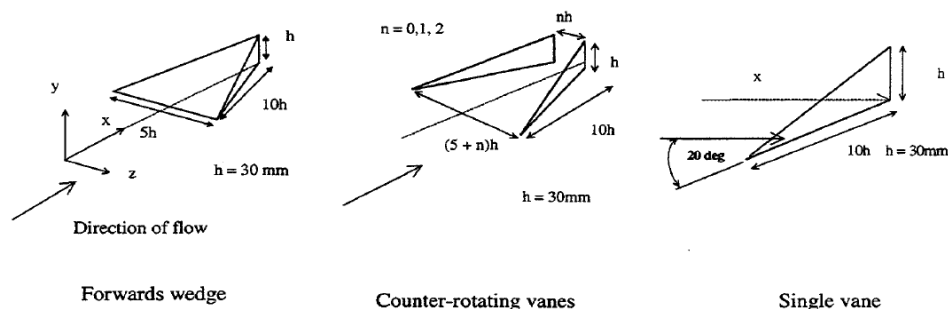
Ανακεφαλαιώνοντας συνοπτικά τα συμπεράσματα των Pauley και Eaton, μπορούμε να πούμε ότι η διάχυση της στροβιλότητας μακριά από το κέντρο του στροβίλου ενισχύεται σημαντικά από την ύπαρξη παρακείμενου στροβίλου, άρα είναι και αναμενόμενη μια ταχύτερη πτώση της μέγιστης στροβιλότητας για ζεύγη στροβίλων. Αντίθετα, η κυκλοφορία επηρεάζεται μόνο από τη αλληλεπίδραση του στροβίλου με το δάπεδο και τις δυνάμεις συνεκτικότητας που αναπτύσσονται από την αλληλεπίδραση αυτή. Σαν αποτέλεσμα η ισχύς στροβίλων με μεγαλύτερη απόσταση από το στερεό όριο αναμένεται να μειώνεται πιο αργά σε σχέση με στροβίλους που βρίσκονται πιο κοντά στη στερεή επιφάνεια.

Στις περισσότερες προηγούμενες μελέτες η πρώτη μέτρηση γινόταν σε απόσταση $10h$, η και παραπάνω, από την ακμή φυγής των vg . Σε μια μελέτη του Wedt [14] το 2001 έγινε προσπάθεια να μετρηθεί η μέγιστη στροβιλότητα και η κυκλοφορία σε απόσταση μίας χορδής (μήκος του VG) από την ακμή φυγής μιας συστοιχίας vg . Διάφορες διατάξεις εξετάστηκαν αλλάζοντας τον λόγο επιμήκους, το μήκος και τη γωνία πρόσπτωσης των vg . Βρέθηκε ότι η κυκλοφορία ήταν ανάλογη της ταχύτητας της ροής, της γωνίας πρόσπτωσης και το λόγου του ύψους του vg ως προς το πάχος του οριακού στρώματος. Με αυτές τις τρεις παραμέτρους σταθερές, αύξηση του λόγου επιμήκους προκαλεί μείωση της κυκλοφορίας. Επίσης, παρατηρήθηκε ότι οι τα ζευγάρια στροβίλων με αντίθετη φορά (counter rotating) έχουν μεγαλύτερη κυκλοφορία απ ότι οι μόνοι στρόβιλοι, ενώ τα ζευγάρια στροβίλων με ίδια φορά (co rotating) είχαν ,αντίθετα, μικρότερη κυκλοφορία.

Εν τω μεταξύ, ήδη από τις αρχές του 1990 άρχισαν να γίνονται προσπάθειες να μελετηθεί η αποτελεσματικότητα vg τα οποία έχουν ύψος αρκετά μικρότερο από το ύψος του οριακού στρώματος, της τάξεως $0,1 \leq h/\delta \leq 0,5$ και λόγω αυτής τους της ιδιότητας συναντούνται στη διεθνή βιβλιογραφία ως Sub Boundary layer Vortex Generators (SBVGs).Κίνητρο για αυτή τη προσπάθεια ήταν η ανάγκη να μειωθεί τη οπισθέλκουσα η οποία παράγουν τα vg χωρίς να μειωθεί όμως η αποτελεσματικότητά τους.

Μία από τις βασικές πειραματικές μελέτες SBVG σε επίπεδη πλάκα είναι αυτή του Ashill[15] το 2002. Ο Ashill διεξήγαγε πειράματα με τη μέθοδο LDA (Laser Dopler

Ανεμometry) χρησιμοποιώντας ζεύγη τριγωνικών vg σε συγκλίνουσα διάταξη για διάφορες αποστάσεις μεταξύ τους (συμπεριλαμβανομένης της περίπτωσης να είναι ενωμένα στην ακμή φυγής τους) και vg σε μορφή σφήνας καθώς και τριγωνικά vg μόνα του (Εικόνα 2.2).



Εικόνα 2.2. Οι διατάξεις VG που χρησιμοποίησε ο Ashill, από [15]

Figure 2.2. VG configurations examined by Ashill [15].

Στα αποτελέσματα του ο Ashill αναφέρει ότι η μείωση της ισχύος είναι πολύ πιο έντονη για τους στροβίλους που παράγονται από το σφηνοειδές vg και τα ενωμένα τριγωνικά, απ' ό,τι από αυτούς που παράγονται από τα τριγωνικά με μεταξύ τους απόσταση μια και δύο φορές το ύψος τους.

Η εξήγηση έγκειται στο γεγονός ότι οι δύο κύριοι παράγοντες αποδυνάμωσης των στροβίλων είναι η αλληλεπίδραση με γειτονικό στρόβιλο αντίθετης στροβιλότητας και η δυνάμεις συνεκτικότητας που υπάρχουν κοντά στο στερεό όριο. Όταν λοιπόν δύο στρόβιλοι είναι πολύ κοντά σε βαθμό που να ενώνονται κιόλας (όπως συμβαίνει με τα σφηνοειδή και τα ενωμένα τριγωνικά VGs), ο πρώτος παράγοντας γίνεται πολύ ισχυρός και η ισχύς των στροβίλων μειώνεται ταχύτερα.

Παρατηρώντας την επίδραση που έχουν οι στρόβιλοι των τριών προαναφερθέντων περιπτώσεων (σφηνοειδές vg, τριγωνικά ενωμένα και με απόσταση $1h$) στο προφίλ του οριακού στρώματος, σε συνθήκες μηδενικής κλίσης πίεσης, ο Ashill παρατήρησε ότι τη μεγαλύτερη μείωση στο πάχος του οριακού στρώματος προκαλούν τα τριγωνικά ενωμένα vg, άρα είναι και πιο αποτελεσματικά στον έλεγχο της ροής για αποκόλληση. Ο ίδιος ο Ashill όμως σε άλλο πείραμα του έδειξε ότι σε οριακό στρώμα αρνητικής κλίσης πίεσης τα τριγωνικά με απόσταση $1h$ ήταν πιο αποτελεσματικά από τα ενωμένα τριγωνικά. Αυτή είναι μία απόδειξη ότι το είδος της ροής παίζει σημαντικό ρόλο στη δημιουργία και εξέλιξη των στροβίλων, άρα και συμπεράσματα που βγαίνουν από πειράματα σε συνθήκες μηδενικής κλίσης πίεσης δε μπορούν να μεταφέρονται αυτούσια για συνθήκες αρνητικής κλίσης πίεσης.

Σε μετρήσεις που έγιναν για τον συντελεστή οπισθέλκουσας των τριών περιπτώσεων vg σε δύο θέσεις (όπου αυτό ήταν δυνατό) έδειξαν ότι τα vg με σφηνοειδή μορφή είχαν 40% μικρότερο συντελεστή οπισθέλκουσας. Αυτό δείχνει ότι vg με σφηνοειδή μορφή είναι καταλληλότερα σε εφαρμογές όπου η ελάχιστη επιβάρυνση με επιπρόσθετη οπισθέλκουσα είναι κύριο ζητούμενο, παράλληλα βέβαια με τη καθυστέρηση αποκόλλησης. Στην εικόνα παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα μαζί με αποτελέσματα που έδωσε μέθοδος CFD και τα οποία βρίσκονται σε καλή συμφωνία μεταξύ τους.

Πολύ σημαντική έρευνα στη κατανόηση των ιδιοτήτων των SBVG σε σχέση με τα vg είναι αυτή των Yao και Lin [16] το 2002. Οι ερευνητές με μέθοδο stereo PIV μελέτησαν πειραματικά δύο vg ξεχωριστά, ένα vg με ύψος $h \approx \delta$ και ένα SBVG με ύψος $h \approx 0,2\delta$ μέσα σε τυρβώδες οριακό στρώμα επίπεδης πλάκας (μηδενική κλίση πίεσης) ενώ μετέβαλαν και για τα δύο vg τη γωνία πρόσπτωσης. Από τα στοιχεία που προέκυψαν για το πεδίο ροής σε 12 διαφορετικά επίπεδα κατάντη (εικόνα 2.1.6), μπόρεσαν να βγάλουν συμπεράσματα για το μέγεθος, τη τροχιά, τη ισχύ και τη συγκέντρωση των δύο στροβίλων.

Όσον αφορά τη εξέλιξη της μέγιστης στροβιλότητας, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι μειώνεται πιο ραγδαία στη περίπτωση του SBVG. Αυτό πιθανότατα οφείλεται στο γεγονός ότι στη περίπτωση του SBVG ο στρόβιλος βρίσκεται πιο κοντά στο δάπεδο άρα δέχεται πιο έντονα της δυνάμεις λόγω συνεκτικότητας (τριβές). Αυτό που έχει ενδιαφέρον είναι ότι η μέγιστη στροβιλότητα αυξάνεται όσο αυξάνεται η γωνία πρόσπτωσης για το SBVG, όπως ήταν αναμενόμενο, στη περίπτωση όμως του VG η στροβιλότητα έχει αντίθετη συμπεριφορά. Οι ερευνητές υποθέτουν ότι αυτό οφείλεται στο ότι η ροή γύρω από το vg για μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης αποκολλάται. Αυτό φαίνεται από το γεγονός ότι στη περίπτωση του VG για μεγάλες τιμές της γωνίας α , ο στρόβιλος καλύπτει ένα μέρος μόνο της ακμής φυγής στη κάθετη διεύθυνση, ενώ για το SBVG τη καλύπτει εξ ολοκλήρου.

Η κυκλοφορία αυξάνεται, όπως αναμενόταν, με την αύξηση στη τιμή της γωνίας πρόσπτωσης, και για το conventional vg και για το SBVG με το vg να έχει περίπου 4 φορές στρόβιλο μεγαλύτερης κυκλοφορίας απ ό τι το SBVG για ίδια γωνία πρόσπτωσης. Σε σύγκριση με τη πτώση της μέγιστης στροβιλότητας όσο κινούμαστε κατάντη, η πτώση της κυκλοφορίας είναι πιο γραμμική. Τα VG έχουν 2 φορές μικρότερη κυκλοφορία σε απόσταση $100h$ κατάντη ενώ τα SBVG έχουν 3 φορές μικρότερη κυκλοφορία στην ίδια απόσταση, σε σχέση με τη αρχική κυκλοφορία.

Μελετώντας τη τροχιά των στροβίλων οι ερευνητές διαπίστωσαν ότι στη πλευρική διεύθυνση οι στρόβιλοι κινούνται προς τη κατεύθυνση που 'δείχνει' η ακμή φυγής. Αυτή η τάση ισχύει και για τα δύο είδη vg ενώ η πλευρική μετατόπιση αυξάνεται

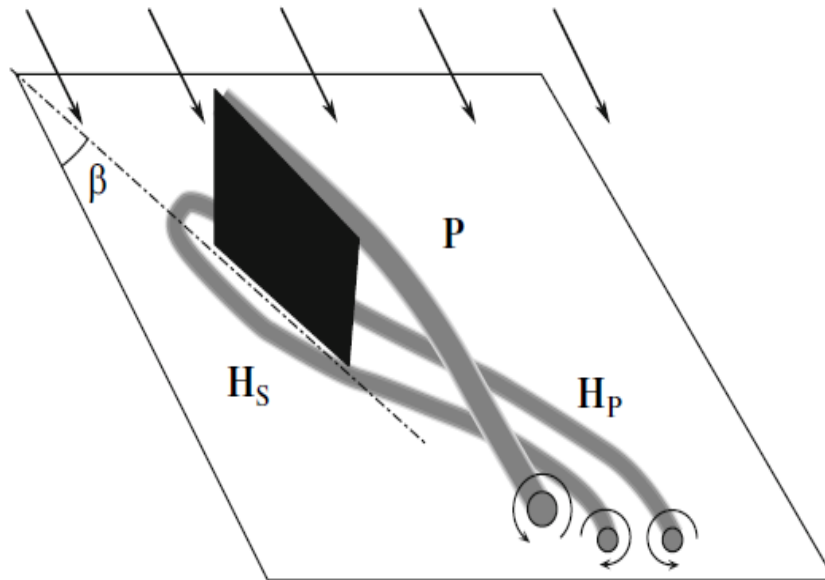
αναλογικά με τη αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης. Όσον αφορά το κατακόρυφο άξονα, οι στρόβιλοι παραμένουν σε όλες τις περιπτώσεις στα επίπεδα του ύψους του εκάστοτε vg εκτός από τη περίπτωση του SBVG στις 23° όπου ο στρόβιλος ανεβαίνει ψηλότερα.

Η ημιακτίνα του στροβίλου ορίζεται ως η περιοχή γύρω από το κέντρο του, όπου η τιμή της στροβιλότητας είναι τουλάχιστον η μισή της μέγιστης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι για τα SBVG το μέγεθος του στροβίλου δεν επηρεάζεται από τη γωνία πρόσπτωσης, λόγω της εγγύτητας του με το δάπεδο το ύψος η παίζει το κυρίαρχο ρόλο. Αντίθετα στα conventional VG φάνηκε ότι η γωνία παίζει ρόλο. Μάλιστα, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι για $\alpha=23^\circ$ η ημιακτίνα είναι σχεδόν διπλάσια απ ότι για $\alpha=10^\circ$ και $\alpha=16^\circ$, ακριβώς στη δημιουργία του στροβίλου, ενώ σε απόσταση 15h η διαφορά αυτή εξομαλύνεται. Η συμπεριφορά αυτή είναι η αντίθετη απ ότι συμβαίνει για τη μέγιστη στροβιλότητα στην οποία αναφερθήκαμε παραπάνω.

Αξίζει επίσης να αναφερθεί η συνεισφορά του Lin [2] ο οποίος το 2002 παρουσίασε μια ανασκόπηση όλων των μελετών , πειραματικών και υπολογιστικών, που είχαν γίνει τη προηγούμενη δεκαετία πάνω στα sub boundary layer vortex generators. Τα ευρήματα όλων αυτών των ερευνών επεκτείνονται σε όλο το φάσμα εφαρμογής των vg (όπως αυτό αναφέρθηκε στην εισαγωγή). Ένα από τα πιο βασικά συμπεράσματα στο οποίο κατέληξε ο ερευνητής είναι ότι η χρήση των sbvg υπερέχει αρκετά των conventional vg σε εφαρμογές όπου η γραμμή αποκόλλησης (το σημείο δηλαδή που ξεκινά η αποκόλληση) είναι γνωστό και σταθερό. Αυτό συμβαίνει γιατί σε αυτές τους περιπτώσεις τα vg μπορούν να τοποθετηθούν στο βέλτιστο σημείο (μεταξύ 5h και 30h ανάντη από το σημείο αποκόλλησης) δημιουργώντας στροβίλους οι οποίοι διαρκούν ίσα ίσα για να καθυστερήσουν την αποκόλληση, χωρίς να παραμένουν για αχρείαστα μεγάλη απόσταση. Η ιδιότητα αυτή, το να διαρκούν οι στρόβιλοι δηλαδή ακριβώς όσο χρειάζεται, είναι απόλυτα αναγκαία σε εφαρμογές τους αγωγοί εισόδου αεροπορικών κινητήρων. Ένα άλλο ενδιαφέρον στοιχείο είναι ότι για τα SBVG δεν ισχύουν οι σχεδιαστικές αρχές που ισχύουν για τα conventional vg λόγω του πολύ χαμηλού ύψους. Για παράδειγμα ενώ ο λόγος επιμήκους (το μήκος τους το ύψος) κυμαίνεται στο 2 για τα συμβατικά vg, για τα SBVG κυμαίνεται γύρω στο 7.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, ήδη από το 1985 είχε παρατηρηθεί μια περιοχή αντίθετης στροβιλότητας που εξελίσσεται μαζί με τον κυρίως στρόβιλο. Παρ όλα αυτά, οι ακριβής δομές στροβιλότητας που παράγονται, εκτός από τον κυρίως στρόβιλο, δεν είχαν μελετηθεί διεξοδικώς αφήνοντας ένα κενό στη προσπάθεια να αξιολογηθούν πλήρως τα vg ως μέθοδος παθητικού ελέγχου της ροής. Αυτό το κενό ήρθε να καλύψει οι Velte, Naumov, Okulov[17] το 2011. Στη πειραματική μελέτη τους, εξέτασαν ένα ορθογώνιο vg στο οποίο μετέβαλαν το ύψος το μήκος και την γωνία πρόσπτωσης χρησιμοποιώντας τη μέθοδο stereo PIV σε αεροσήραγγα, και

χρωματισμό του νερού σε υδροσήραγγα. Στα συμπεράσματα τους κατέληξαν ότι οι δομές που δημιουργούνται είναι πιο περίπλοκες από αυτές που γνωρίζαμε μέχρι τώρα, και κάνοντας μια παραμετρική μελέτη μεταβάλλοντας γωνία πρόσπτωσης και ύψος έφτιαξαν ένα χάρτη δομών στροβιλότητας. Στην Εικόνα 2.3 φαίνεται ένα επεξηγηματικό σχήμα για το πώς δημιουργείται η δομή με τρεις στροβίλους που συναντάται στο μεγαλύτερο εύρος τιμών γωνιών.



Εικόνα 2.3.Επεξηγηματικό σχήμα:εδώ φαίνεται πως δημιουργείται ο κύριος στρόβιλος (P) αλλά και τα δύο άκρα του πεταλοειδούς στροβίλου (horseshoe vortex) Hs και Hp από [17]

Figure 2.3. Schematic representation of the main vortex generated (P) along with two arms of the horseshoe vortex, Hs and Hp [17].

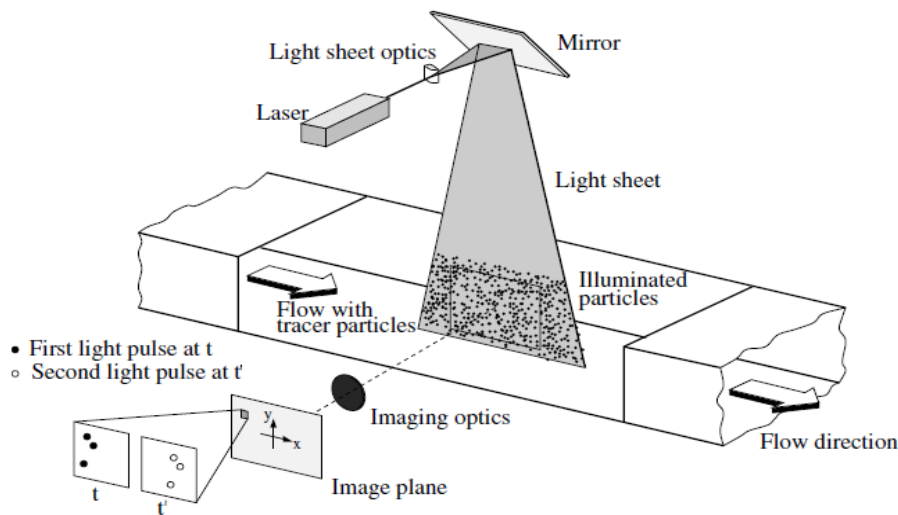
2.2 Συνοπτική παρουσίαση της μεθόδου PIV

Η μέθοδος PIV, είναι μία μέθοδος μέτρησης της ταχύτητας της ροής με την βοήθεια της οποίας μπορούμε να μετρήσουμε το πεδίο ταχύτητας του ρευστού σε ένα συγκριμένο επίπεδο μέτρησης. Όταν μιλάμε για απλό PIV είμαστε σε θέση να υπολογίσουμε τις συνιστώσες της ταχύτητας μόνο σε δύο διευθύνσεις παράλληλα στο επίπεδο μέτρησης ενώ όταν μιλάμε για Stereo PIV μπορούμε να υπολογίσουμε και την ταχύτητα κάθετα στο επίπεδο μέτρησης.

Η ακολουθούμενη διαδικασία είναι η εξής: Εμπλουτίζουμε το ρευστό με σωματίδια συγκεκριμένης διαμέτρου. Στη συνέχεια, με μία συσκευή laser, φωτίζουμε το

ρευστό στο επίπεδο (λεπτό φύλλο) που θέλουμε να κάνουμε τη μέτρηση δύο διαδοχικές στιγμές (με προκαθορισμένο χρονικό διάστημα ανάμεσα τους), υποθέτοντας ότι στο χρονικό αυτό διάστημα ανάμεσα στους δύο παλμούς τα σωματίδια κινούνται μαζί με το ρευστό. Το φως του laser αντανακλάται στα σωματίδια και καταγράφεται από ειδικές φωτογραφικές μηχανές. Έχουμε δηλαδή δύο φωτογραφίες ανά κάμερα, μία για κάθε παλμό (Εικόνα 2.4).

Στη συνέχεια, για την επεξεργασία των φωτογραφιών, το πλάνο το οποίο 'βλέπει' η κάθε κάμερα χωρίζεται σε περιοχές ελέγχου (interrogation area) ή παράθυρα ελέγχου (interrogation window) με συγκεκριμένο μέγεθος η κάθε μία. Το λογισμικό υπολογίζει το τοπικό διάνυσμα της ταχύτητας για κάθε περιοχή εξέτασης, χρησιμοποιώντας μεθόδους στατιστικής, υποθέτοντας ότι τα σωματίδια κινήθηκαν ομοιόμορφα ανάμεσα στους δύο παλμούς και έχοντας ως δεδομένα το χρονικό διάστημα μεταξύ των παλμών και την 'εικονική' μετατόπιση των σωματιδίων μέσα σε κάθε περιοχή ελέγχου.



Εικόνα 2.4. Τυπική διάταξη PIV από [18].

Figure 2.4. Typical PIV set-up [18].

Η μέθοδος PIV στην αεροδυναμική

Η μέθοδος PIV είναι ιδιαίτερα δημοφιλής στο κλάδο της αεροδυναμικής καθώς συμβάλει στο να κατανοηθούν μη μόνιμα φαινόμενα όπως, για παράδειγμα, η αποκολλημένη ροή γύρω από μοντέλα σε μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης. Η

συγκεκριμένη μέθοδος επιτρέπει στιγμιαίες μετρήσεις του πεδίου ταχυτήτων ανά πολύ τακτά χρονικά διαστήματα και με πολύ καλή χωρική ανάλυση, φανερώνοντας μικρές η μεγάλες δομές που μπορεί να δημιουργούνται στο πεδίο ταχυτήτων. Ένα άλλο πολύ σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι είναι μη παρεμβατική μέθοδος, δηλαδή δε χρειάζεται εξοπλισμός μέτρησης μέσα στη ροή που μπορεί να την επηρεάσει.

Μία άλλη ανάγκη που υπάρχει στη σύγχρονη αεροδυναμική, είναι ότι οι ταχέως αναπτυσσόμενες υπολογιστικές μέθοδοι ανάλυσης της ροής χρειάζεται να εξακριβώνεται ότι δουλεύουν σωστά και ότι έχει μοντελοποιηθεί επαρκώς η φυσική υπόσταση του προβλήματος που καλούνται να επιλύσουν. Για να γίνει αυτό απαιτείται να διενεργούνται πολύ προσεκτικά σχεδιασμένα πειράματα, τα οποία θα προσφέρουν αξιόπιστα δεδομένα με την απαιτούμενη χωρική ανάλυση ούτως ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πιστοποίηση των υπολογιστικών μεθόδων. Το PIV προσφέρει τέτοια δυνατότητα.[18]

Σταθμοί τεχνολογικής εξέλιξης της μεθόδου

Στη συνέχεια παρουσιάζουμε κάποιους σημαντικούς σταθμούς στη πορεία εξέλιξης της μεθόδου.

Εισαγωγή της μεθόδου: Η μέθοδος του PIV για τη μέτρηση πεδίου ταχυτήτων ρευστού, υγρού η αέριου, εισήχθηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1980 από το ινστιτούτο VON KARMAN στις Βρυξέλες και κυρίως από τον R. Meynart [19].

Αξιόπιστες πηγές laser υψηλής ισχύος για εφαρμογές σε αέρα: Λόγω του ότι τα σωματίδια πρέπει να ακολουθούν πλήρως τη ροή, χωρίς η βαρύτητα να επηρεάζει τη τροχιά τους, υπάρχουν περιορισμοί στο μέγεθος ανάλογα και τη πυκνότητα του ρευστού. Για εφαρμογές στον αέρα χρειάζονται μικρότερα σωματίδια άρα και ισχυρότερη πηγή φωτός. Η χρησιμοποίηση των Nd:Yag laser έδωσε τη δυνατότητα για φωτισμό του επιπέδου μέτρησης με δύο διαδοχικούς παλμούς οι οποίοι έχουν ίση ισχύ.

Παραγωγή σωματιδίων και εμπλουτισμός με αυτά του ρευστού: Η εξέλιξη ισχυρών γεννητριών σωματιδίων με αεροζόλ, και η ανάπτυξη της τεχνολογίας για το απαιτούμενο μέγεθος και το βέλτιστο τρόπο εισαγωγής των σωματιδίων στο ρευστό έδωσε ώθηση στη ποιότητα των αποτελεσμάτων των μετρήσεων.

Βελτίωση μεθόδου προσδιορισμού της μετατόπισης: Η εισαγωγή ψηφιακών φωτογραφικών μηχανών είχε και κάποιους περιορισμούς, όπως το περιορισμένο μέγεθος και ανάλυση των ψηφιακών αισθητήρων σε σχέση με τις φωτογραφικές μηχανές που χρησιμοποιούσαν φιλμ. Η χρησιμοποίηση όμως της συνάρτησης Gauss για το προσδιορισμό μετατόπισης με ακρίβεια μεγαλύτερη του ενός pixel είχε ως

αποτέλεσμα τη χρησιμοποίηση μικρότερων παραθύρων ελέγχου και άρα μεγαλύτερη χωρική ανάλυση.

Φωτογραφικές μηχανές ετεροσυσχέτισης: Οι σημερινές ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές επιτρέπουν την αποθήκευση των δύο διαδοχικών φωτογραφιών από τους δύο παλμούς laser σε διαφορετικά αρχεία. Έτσι λύνεται αμέσως το πρόβλημα που υπήρχε παλαιότερα, το να μην γνωρίζει το λογισμικό ποια φωτογραφία είναι πρώτη και ποια δεύτερη, υπολογίζοντας το μέτρο της ταχύτητας χωρίς να ξέρουμε τη κατεύθυνση του διανύσματος. Όσο υπήρχε αυτό το πρόβλημα είχαν αναπτυχθεί πολλές διαφορετικές μέθοδοι για την επίλυσή του [18].

3 Πειραματική διάταξη και διαδικασία

3.1 Διάταξη και Εξοπλισμός

Αεροδυναμική σήραγγα

Τα πειράματα διεξήχθησαν σε μία από τις αεροδυναμικές σήραγγες του εργαστηρίου Αεροδυναμικής. Πρόκειται για μία ανοιχτού τύπου σήραγγα εξοπλισμένη με ηλεκτρικό κινητήρα ισχύος 7,5 Hp και μέγιστων στροφών 2910 rpm. Το test section της σήραγγας έχει ορθογώνια διατομή και οι διαστάσεις του είναι 150cm×42cm×22.5cm (μήκος, πλάτος και ύψος αντίστοιχα). Σε αυτό το σημείο η ταχύτητα της ροής μπορεί να φτάσει μέχρι και τα 20 m/s.



Εικόνα 3.1. Τμήμα της αεροδυναμικής σήραγγας που διεξήχθησαν τα πειράματα.

Figure 3.1. Part of the wind tunnel in which experiments were conducted.

Κάμερες

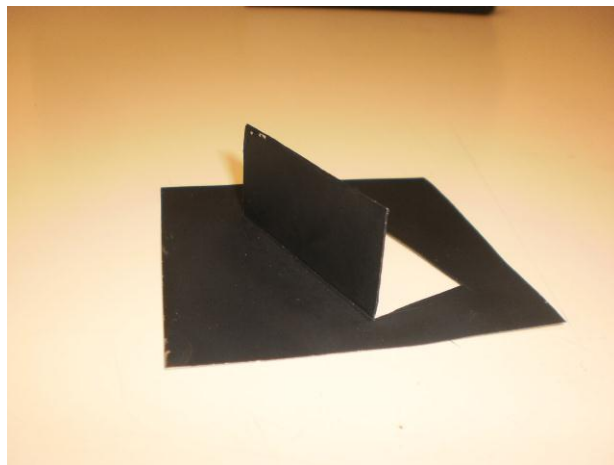
Οι κάμερες που χρησιμοποιήθηκαν είναι δύο ψηφιακές CCD της εταιρείας TSI και πιο συγκεκριμένα το μοντέλο Powerview™ Plus 4MP. Το συγκεκριμένο μοντέλο παρέχει ανάλυση 2048x2048 pixel με διαστάσεις pixel τα 7,4μm × 7,4μm[20].

Γεννήτρια σωματιδίων

Για τα σωματίδια που είναι απαραίτητο να εμπλουτιστεί η ροή, χρησιμοποιήθηκε γεννήτρια σωματιδίων λαδιού του εμπορίου (TSI 9307). Για τη συγκεκριμένη εφαρμογή χρησιμοποιήθηκε κοινό ελαιόλαδο. Η γεννήτρια σωματιδίων μας παρείχε σωματίδια διαμέτρου 1 μm σε πίεση περίπου 1,5 bar.

Vortex Generators

Για την κατασκευή των VGs χρησιμοποιήθηκαν φύλλα αλουμινίου πάχους 0,3mm. Στόχος, εκτός της όσο το δυνατό ακριβέστερης κατασκευής, ήταν να είναι έτσι κατασκευασμένα ώστε να διευκολύνεται η γρήγορη και ακριβής τοποθέτησή τους, χωρίς να παραμορφώνονται δεδομένου ότι το φύλλο αλουμινίου ήταν λεπτό σε πάχος (Εικόνα 3.2).



Εικόνα 3.2. Ένα από τα Vortex Generators που χρησιμοποιήθηκαν. Είναι βαμμένο με μαύρο ματ σπρέϊ για τη μείωση των αντανακλάσεων από το λέιζερ.

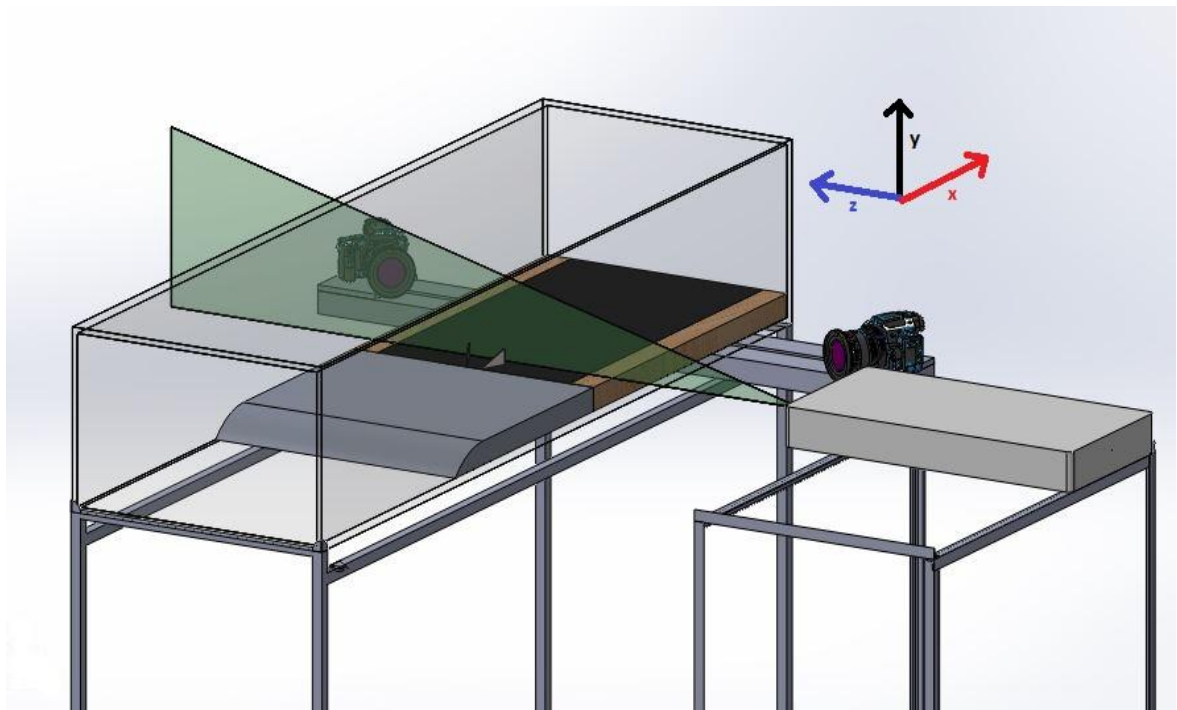
Figure 3.2. One of the VGs used for the experiment. It is painted with mat black spray in order to reduce reflections from the laser light.

Λοιπός εξοπλισμός και λειτουργικό σύστημα

Άλλες συσκευές που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ψηφιακό μανόμετρο, σωλήνας Pitot, synchronizer και ένας υπολογιστής του εργαστηρίου. Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε το λειτουργικό σύστημα *Insight 3G™* της TSI.

Διάταξη

Η διάταξη της πειραματικής διαδικασίας φαίνεται στο παρακάτω γραφικό. Μέσα στο test section υπήρχε ένα back-facing step το οποίο δε μπορούσε να αφαιρεθεί καθώς χρησιμοποιούνταν ταυτόχρονα η σήραγγα από άλλη ερευνητική ομάδα. Για αυτό το λόγο προσθέσαμε στο τέλος του step μία πλάκα πλεξιγκλάς η οποία στηριζόταν σε δύο ξύλινες βάσεις έτσι ώστε να δημιουργήσουμε την επίπεδη πλάκα που χρειαζόμασταν ενώ ήταν δυνατό και να αφαιρείται εύκολα.



Εικόνα 3.3. Γραφικό αναπαράσταση της πειραματικής διάταξης. Διακρίνεται με γκρι χρώμα το step που προυπήρχε καθώς και το πλεξιγκλάς που τοποθετήθηκε μαζί με τις ξύλινες βάσεις του. Με πράσινο χρώμα αναπαριστάται το φύλλο λέιζερ.

Figure 3.3. Representation of the used experimental set-up.



Εικόνα 3.4. Φωτογραφία του test section.

Figure 3.4. Photo of the test section.

3.2 Επιλογή VG

Όπως προαναφέρθηκε σκοπός της εργασίας είναι η παραμετρική μελέτη της ροής κατάντη VGs όταν αυτά βρίσκονται πάνω σε επίπεδη πλάκα. Αρχικά, έγινε παραμετρική μελέτη μονών VG, και στη συνέχεια ζευγών VG.

Όσον αφορά τα μονά VG οι παράμετροι που εξετάστηκαν είναι σχήμα, ύψος, και γωνία του VG ως προς την επερχόμενη ροή. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε ήταν η εξής:

Επιλέχθηκε ένα VG αναφοράς, του οποίου τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά (ύψος, γωνία) θεωρήθηκαν ως βάση. Έπειτα μεταβάλαμε κάθε φορά ένα χαρακτηριστικό προς δύο κατευθύνσεις. Αυτή η διαδικασία έγινε για vg ορθογώνια και τριγωνικά VGs. Τα χαρακτηριστικά του VG αναφοράς είναι:

- Ύψος $h=27,5\text{mm}=0,92\delta$, όπου δ το ύψος του οριακού στρώματος στη θέση του VG
- Μήκος $l=55\text{mm}=2h$
- Γωνία $\beta=20^\circ$

Το ύψος επιλέχθηκε στο 92% του ύψους του οριακού στρώματος στη θέση όπου τοποθετήθηκαν τα VG ώστε να μπορούμε να το μεταβάλουμε προς τα πάνω και προς τα κάτω έχοντας πάντα VG με ύψος κοντά στα επίπεδα του ύψους του οριακού στρώματος.

Το μήκος προέκυψε από τη διεθνή βιβλιογραφία για πειραματική μελέτη VG κατά την οποία για vg με ύψος στα επίπεδα του οριακού στρώματος το βέλτιστο Aspect Ratio είναι 2[16]. Εδώ πρέπει να επισημάνουμε ότι κατά την αλλαγή του ύψους, το μήκος παρέμεινε σταθερό και αυτό γιατί θέλαμε να εξετάσουμε αποκλειστικά την επίδραση του ύψους.

Η γωνία του VG ως προς την επερχόμενη ροή και αυτή επιλέχθηκε με βάση πειραματικά στοιχεία που έχουν συλλεχθεί από προηγούμενες μελέτες VG[16].

Με βάση τα παραπάνω, καταλήξαμε να έχουμε τα εξής πέντε vortex generator των οποίων τα χαρακτηριστικά παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1 και ισχύουν για ορθογώνια και τριγωνικά VG:

	Ύψος (mm)	Γωνία(deg)	Μήκος (mm)
Vg 1	27,5=0,92δ	15°	55
Vg 2	27,5=0,92δ	20°	55
Vg 3	27,5=0,92δ	25°	55
Vg 4	30,0=δ	20°	55
Vg 5	25,0=0,83δ	20°	55

Πίνακας 3.1. Τα VGs που εξετάστηκαν στη μεταβολή της γωνίας πρόσπτωσης και του ύψους.

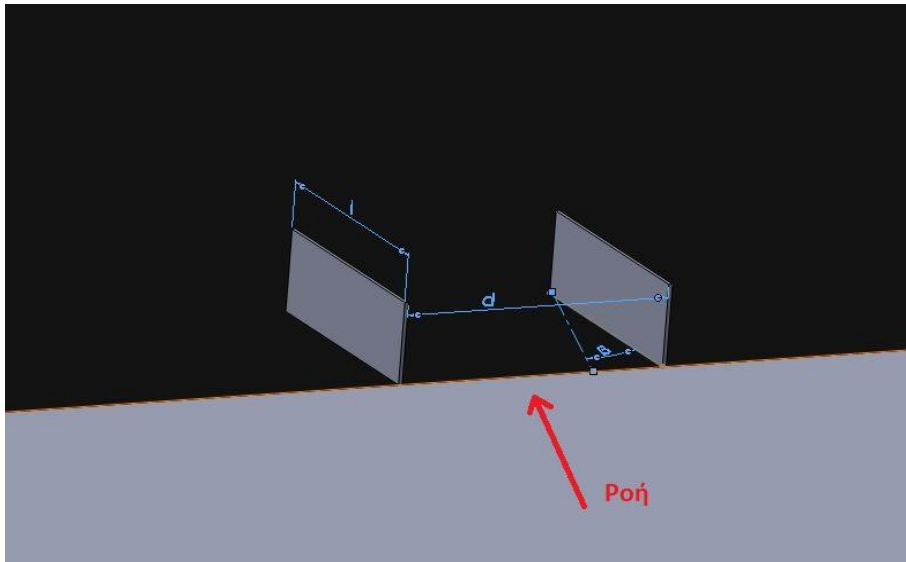
Table 3.1. VGs examined for height and angle of attack variation.

Μετά την ανάλυση των αποτελεσμάτων για τα μονά , επιλέχθηκε εκείνο το VG από τα πέντε, και για τριγωνικά και για τετράγωνα, που δημιουργεί τον ισχυρότερο στρόβιλο στη τελευταία θέση μέτρησης για να μελετηθεί παραμετρικά η επίδραση ενός ζεύγους VG στη ροή. Οι παράμετροι που εξετάστηκαν είναι η διάταξη των VGs και η απόσταση μεταξύ τους.

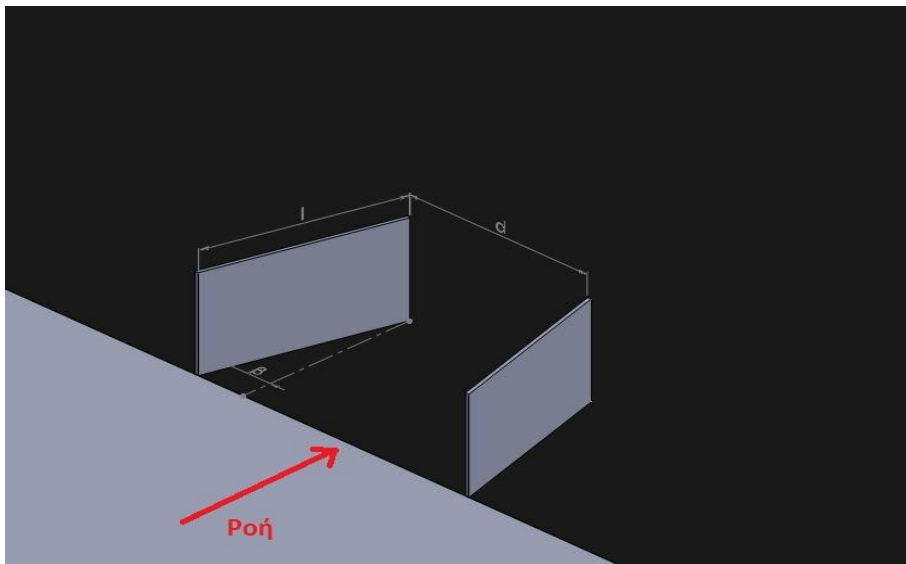
Όσον αφορά τη διάταξη, μελετήθηκαν και οι τρεις τρόποι με τους οποίους μπορούν να τοποθετηθούν δυο VGs. Αυτοί είναι:

- 1) τα VGs να είναι τοποθετημένα παράλληλα, δηλαδή και τα δύο τοποθετημένα με γωνία β ως προς την ροή (co-rotating).
- 2) Τα VGs να είναι τοποθετημένα έτσι ώστε ανάμεσά τους να δημιουργείται συγκλίνον ακροφύσιο (counter rotating, common flow up).
- 3) Τα VGs να είναι τοποθετημένα έτσι ώστε ανάμεσα τους να δημιουργείται αποκλίνον ακροφύσιο (counter-rotating, common flow down).

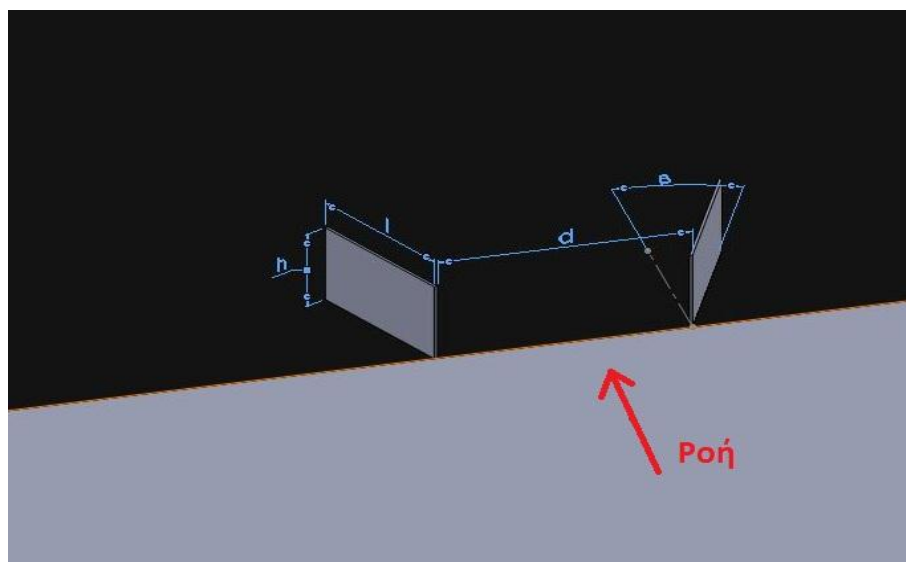
Για κάθε μία διάταξη μελετήθηκαν τρία διαφορετικά ζευγάρια, σε κάθε ένα από τα οποία τα VGs είχαν διαφορετική απόσταση (d) μεταξύ τους. Οι αποστάσεις που επιλέχθηκαν είναι 1h, 2h, και 3h. Για τα συγκλίνοντα η απόσταση μετρήθηκε ανάμεσα στις δύο ακμές φυγής, για τα αποκλίνοντα ανάμεσα στις δύο ακμές πρόσπτωσης ενώ για τα παράλληλα αυτές οι δύο αποστάσεις ταυτίζονται. Όλα τα παραπάνω φαίνονται στην εικόνα που ακολουθεί:



α)



β)



γ)

Εικόνα 3.5. Στην εικόνα αυτή παρουσιάζονται οι τρεις διατάξεις ζευγών VG που μελετήθηκαν για τριγωνικά και ορθογώνια μαζί με τις βασικές διαστάσεις: α) Παράλληλα , β) Συγκλίνοντα, γ) Αποκλίνοντα.

Figure 3.5. Three VG pair configurations which were examined. α) co-rotating, β) counter rotating (common flow up), γ) counter rotating (common flow down).

3.3 Θέσεις μέτρησης

Η επιλογή των θέσεων μέτρησης έγινε με γνώμονα αφ ενός τη σύγκριση των διαφορετικών vg ως προς την επίδραση που έχουν στο οριακό στρώμα αφ ετέρου την παρακολούθηση της εξέλιξης των στροβίλων όσο αυτοί μετακινούνται μαζί με τη ροή.

Δεδομένου και του μήκους κατάντη των vg που είχαμε διαθέσιμο, θεωρήθηκε επαρκές για τη παρακολούθηση του φαινομένου να πάρουμε μετρήσεις σε τρεις θέσεις. Η πρώτη σε απόσταση 3cm (1δ) από την ακμή φυγής των VG, η δεύτερη 21,8cm (7,3δ) κατάντη και η τρίτη 39,5cm(13,2δ) κατάντη. Αρχικά έγινε προσπάθεια η πρώτη θέση να είναι ακριβώς μετά την ακμή φυγής αλλά υπήρχαν πολλές δυσκολίες με τις αντανάκλασεις από το φως του laser πάνω στα vg και οι οποίες δημιουργούσαν θόρυβο στα αποτελέσματα.

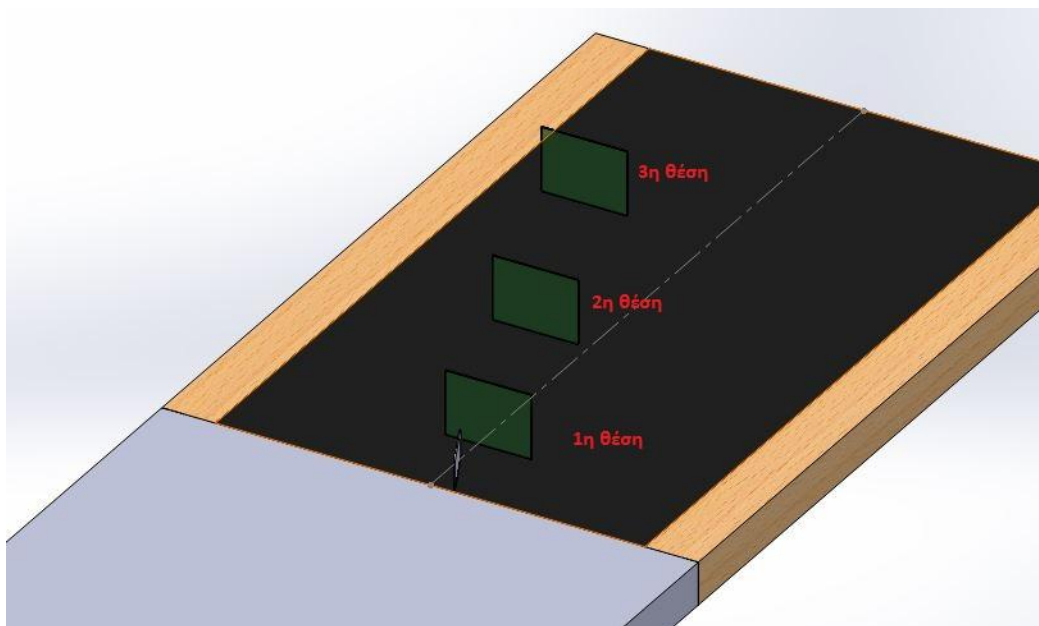
Επιπλέον έπρεπε να ληφθούν υπ' όψιν τα εξής ζητήματα: Αφ' ενός ο στρόβιλος κινείται και κατά την z κατεύθυνση όσο κινούμαστε κατάντη, αφ' ετέρου ορισμένα από τα ζεύγη vg παράγουν δύο στροβίλους με απόσταση μεταξύ τους μεγαλύτερη από το μέγεθος του επιπέδου που μπορούσαμε να μετρήσουμε.

Το πρώτο ζήτημα το συναντήσαμε στα μόνα vg όπου το επίπεδο μέτρησης είχε διαστάσεις περίπου 7cm(μήκος) × 5cm(ύψος) συνεπώς αν όλες τις θέσεις μέτρησης

τα επίπεδα είχαν το κέντρο τους στο ίδιο σημείο κατά την z διεύθυνση, στη τελευταία θέση ο στρόβιλος θα βρισκόταν εκτός επιπέδου μέτρησης. Εδώ κρίθηκε αναγκαίο όσο κινούμαστε προς τα πίσω τα επίπεδα να κινούνται και κατά την z διεύθυνση ακολουθώντας το στρόβιλο.

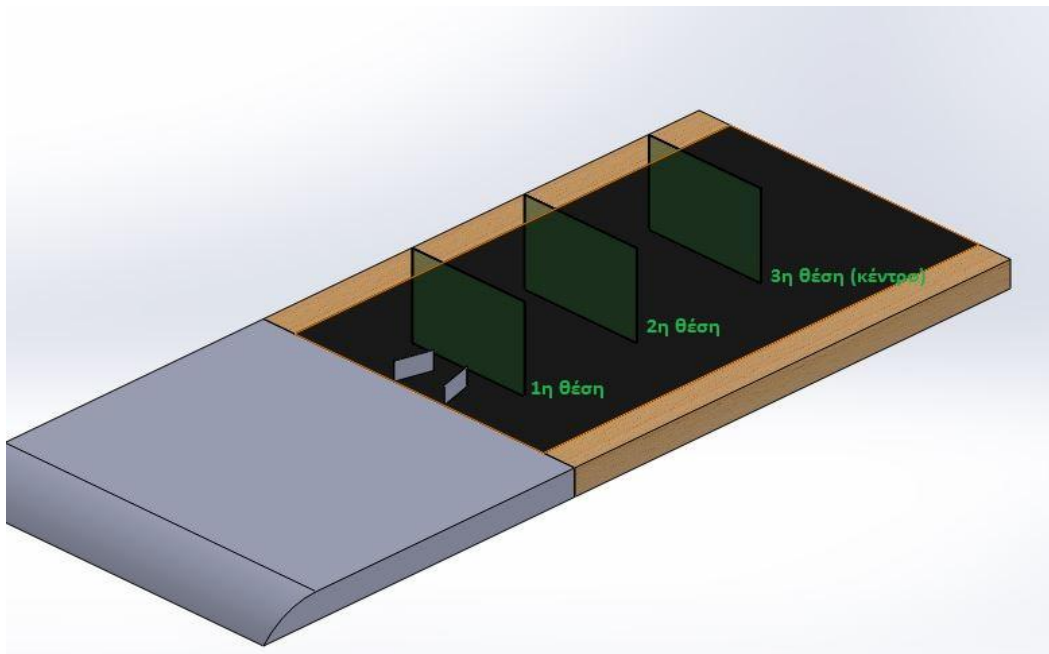
Το δεύτερο ζήτημα το συναντήσαμε στα ζεύγη όπου επειδή οι στρόβιλοι ήταν δύο σε ορισμένες περιπτώσεις και μετακινούνταν κατά τη z διεύθυνση, προς αντίθετες κατευθύνσεις, με αποτέλεσμα να μην είναι ορατοί και οι δύο με ένα επίπεδο μέτρησης. Σε αυτή τη περίπτωση έπρεπε στις δύο τελευταίες θέσεις να πάρουμε μετρήσεις σε τρία διαφορετικά επίπεδα τα οποία όλα μαζί κάλυπταν σχεδόν όλο το πλάτος της σήραγγας.

Όλα τα παραπάνω γίνονται φανερά στις εικόνες που ακολουθούν (Εικόνα 3.6, Εικόνα 3.7):

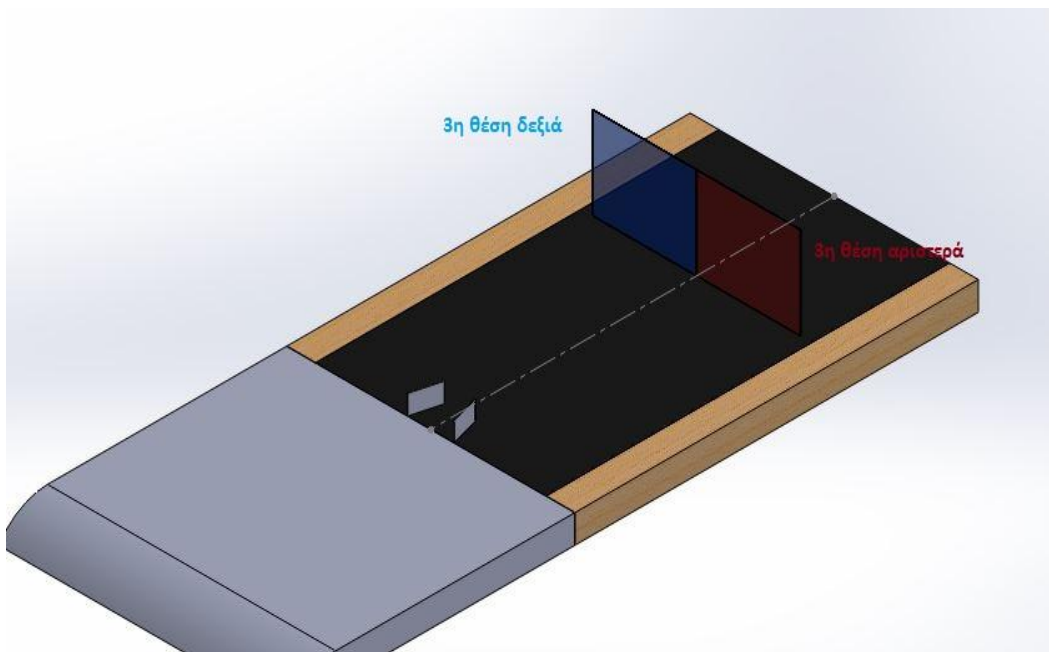


Εικόνα 3.6. Τα τρία επίπεδα μέτρησης για τα μόνα VGs, τριγωνικά και ορθογώνια.

Figure 3.6. Three measurement planes downstream of the VGs trailing edge.



α)



β)

Εικόνα 3.7. Τα πέντε επίπεδα μέτρησης για τα ζεύγη VG, τριγωνικά και ορθογώνια. Στην εικόνα α φαίνονται τα κεντρικά επίπεδα στις τρεις θέσεις ενώ στην β τα πλευρικά.

Figure 3.7. Five measurement planes for VG pairs. Figure a are displayed three central planes and in figure b are displayed the two side planes.

Ακολουθούν πίνακες (Πίνακας 3.2, Πίνακας 3.3) με τις θέσεις των επιπέδων που πάρθηκαν μετρήσεις αναλυτικά για κάθε περίπτωση. Οι συντεταγμένες που παρουσιάζονται αφορούν τη θέση του κέντρου του επιπέδου, σε σχέση με την ακμή φυγής των VG για τον άξονα x, σε σχέση με τον άξονα συμμετρίας του test section της σήραγγας για τον άξονα z:

	1 ^η Θέση		2 ^η Θέση		3 ^η Θέση	
	Άξονας z (cm)	Άξονας x (cm)	Άξονας z (cm)	Άξονας x (cm)	Άξονας z (cm)	Άξονας x (cm)
Ορθογώνια	-1	3	2	21,8	3	39,5
Τριγωνικά	-1	3	2	21,8	3	39,5

Πίνακας 3.2. Τα επίπεδα μέτρησης για τα μονά VGs.

Table 3.2. Measurement planes for single VGs

	Κέντρο		Δεξιά		Αριστερά	
	Άξονας z (cm)	Άξονας x (cm)	Άξονας z (cm)	Άξονας x (cm)	Άξονας z (cm)	Άξονας x (cm)
1^η Θέση	0	3				
2^η Θέση	0	21,8	5	21,8	-5	21,8
3^η Θέση	0	39,5	5	21,8	-5	39,5

Πίνακας 3.3. Τα επίπεδα μέτρησης για τα ζεύγη VGs.

Table 3.3. Measurement planes for pair VGs.

3.4 Ρυθμίσεις εξοπλισμού

Φακοί εστίασης

Το εργαστήριο διαθέτει τρεις φακούς εστίασης των 150mm, 100mm και 50mm. Όσο μεγαλύτερο μήκος έχει ο φακός τόσο σε μικρότερο παράθυρο εστιάζει άρα, έχοντας δεδομένο αριθμό pixel (2046×2046), με τους μεγαλύτερους φακούς έχουμε καλύτερη ανάλυση μικρότερου παραθύρου. Το μειονέκτημα των μεγάλων φακών είναι ότι θα χρειαζόντουσαν πάρα πολλά επίπεδα μέτρησης προκειμένου να καλυφθεί ο απαιτούμενος χώρος ειδικά στη περίπτωση των ζευγών vg. Τελικά επιλέχθηκαν οι φακοί των 150mm για τις μετρήσεις στα μονά vg και των 50mm για τις μετρήσεις στα ζεύγη vg.

Laser

Το Laser που χρησιμοποιήθηκε δίνει επιλογή στο χρήστη να ρυθμίσει το ποσοστό της μέγιστης ισχύος ανά παλμό που θα δουλεύει η συσκευή. Όσο πιο μεγάλη είναι η ισχύς της συσκευής τόσο καλύτερα φωτίζονται τα σωματίδια άρα παίρνουμε καλύτερα και πιο αξιόπιστα αποτελέσματα.

Στη περίπτωση μας, λόγω της φύσεως του εξοπλισμού και της διάταξης, είχαμε το περιορισμό των αντανάκλασεων, οι οποίες επηρεάζουν αρνητικά τα αποτελέσματα και πλήθαιναν όσο μεγάλωνε η ισχύς της συσκευής. Τελικά, για όλες μας τις μετρήσεις επιλέξαμε ένα ποσοστό 75% της μέγιστης ισχύος, το οποίο μας έδινε πολύ καλά αποτελέσματα ενώ ταυτοχρόνως οι αντανάκλασεις που δημιουργούσε ήταν σε ανεκτό επίπεδο.

Σωματίδια

Για να πετύχουμε όσο το δυνατό πιο ομοιόμορφη κατανομή σωματιδίων, δεδομένου ότι πρόκειται για ανοιχτού τύπου σήραγγα οπότε τα σωματίδια δεν ανακυκλώνονται, τα σωματίδια έπρεπε να εγχύονται στη μεγαλύτερη δυνατή απόσταση ανάντη του σημείου μετρήσεως έχοντας το περιορισμό αυτό το σημείο να είναι μετά το φίλτρο, το οποίο θα κατακρατούσε τα σωματίδια.

Για να έχουμε το βέλτιστο δυνατό αποτέλεσμα, με δεδομένο τον εξοπλισμό, δημιουργήσαμε μία οπή στη δεξιά πλευρά της σήραγγας και μία στο φίλτρο αέρος εσωτερικά της σήραγγας. Ο σωλήνας της συσκευής εισερχόταν στη σήραγγα μέσω της πλευρικής οπής και η ακμή του 'κούμπωνε' στην οπή του φίλτρου. Με τον τρόπο αυτό τα σωματίδια εγχύονταν ακριβώς στο σημείο που είναι το φίλτρο.

Πριν καταλήξουμε σε αυτή τη διάταξη δοκιμάστηκαν και άλλες λύσεις. Αρχικά τα σωματίδια να εισέρχονται από το άνοιγμα που υπάρχει στην αρχή του test section για να εξέρχεται το οριακό στρώμα και να δημιουργείται καινούργιο. Αυτή η θέση απείχε 80cm από το πρώτο επίπεδο μέτρησης. Στη συνέχεια δοκιμάστηκε τα σωματίδια να εισέρχονται από πλαϊνή οπή στη σήραγγα περίπου 2m ανάντη του πρώτου επιπέδου μέτρησης. Κανένας από τους δύο αυτούς τρόπους δεν είχε ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Κάμερες

Στις εφαρμογές με stereo PIV η αποδεκτή περιεχόμενη γωνία μεταξύ των δύο φωτογραφικών μηχανών για να είναι αξιόπιστα τα αποτελέσματα είναι μεταξύ 60°

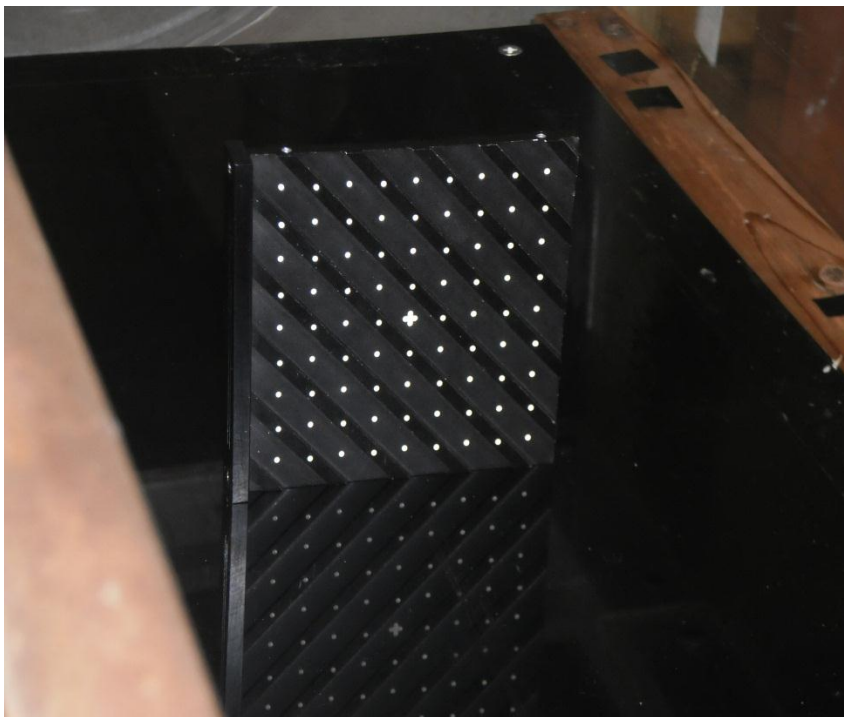
και 90° με βέλτιστη τιμή τις 90° . Λόγω χώρου, και καθώς για κάθε μέτρηση σε διαφορετικό επίπεδο μετακινούνταν οι κάμερες, δεν ήταν δυνατό να διατηρείται πάντα η ίδια τιμή περιεχόμενης γωνίας καθώς η επιλογή εμπεριείχε και κάποιο συμβιβασμό με την απόσταση των φωτογραφικών μηχανών από το εκάστοτε επίπεδο μέτρησης η οποία θέλαμε να είναι η μικρότερη δυνατή, αρκεί να βλέπουν οι κάμερες πλάνο με τις επιθυμητές διαστάσεις. Όμως οι διαφορές ήταν μικρές, με μέγιστη τιμή περιεχόμενης γωνίας τις 85° και η ελάχιστη τις 81° .

3.5 Ρυθμίσεις stereo PIV

Βαθμονόμηση φωτογραφικών μηχανών (Camera Calibration)

Για να μπορέσει να υπολογιστεί το τρισδιάστατο διανυσματικό πεδίο ταχύτητας του επιπέδου στο οποίο θέλουμε, είναι απαραίτητο να συσχετιστούν οι διδιάστατες μετατοπίσεις των σωματιδίων στις φωτογραφίες που βλέπουν οι δύο κάμερες, με τις τρισδιάστατες μετατοπίσεις στο πραγματικό χώρο. Προκειμένου να γίνει αυτή η συσχέτιση από το λογισμικό, πρέπει να είναι γνωστή η ακριβής θέση των δύο φωτογραφικών μηχανών σε σχέση με το επίπεδο μέτρησης. Στη συνέχεια, εφ' όσον είναι γνωστές οι σχετικές θέσεις των μηχανών, το λογισμικό υπολογίζει την ταχύτητα των σωματιδίων.

Ένας τρόπος για να βρούμε με ακρίβεια τη θέση των δύο καμερών είναι η χρησιμοποίηση ενός στόχου βαθμονόμησης (calibration target). Ο στόχος βαθμονόμησης (Εικόνα 3.8) είναι μια κατασκευή υψηλής ακρίβειας τεσσάρων επιπέδων (δύο σε κάθε όψη) η οποία τοποθετείται έτσι ώστε να συμπίπτει με το φύλλο laser με το οποίο φωτίζουμε τα σωματίδια. Πάνω στη κατασκευή είναι διαμορφωμένο ένα πλέγμα από σημεία (σταυρό και τελείες) τα οποία βρίσκονται εναλλάξ σε διαφορετικό επίπεδο το καθένα. Οι μεταξύ τους απόσταση και η απόσταση των επιπέδων είναι αυστηρά καθορισμένες. Το λογισμικό αναγνωρίζει αυτά τα σημεία από φωτογραφίες που παίρνουμε και γνωρίζοντας τις διαστάσεις του πλέγματος (τις εισάγουμε εμείς) φτιάχνει τα πολυώνυμα που προαναφέρθηκαν και που στη περίπτωση μας είναι 2^{ου} βαθμού.



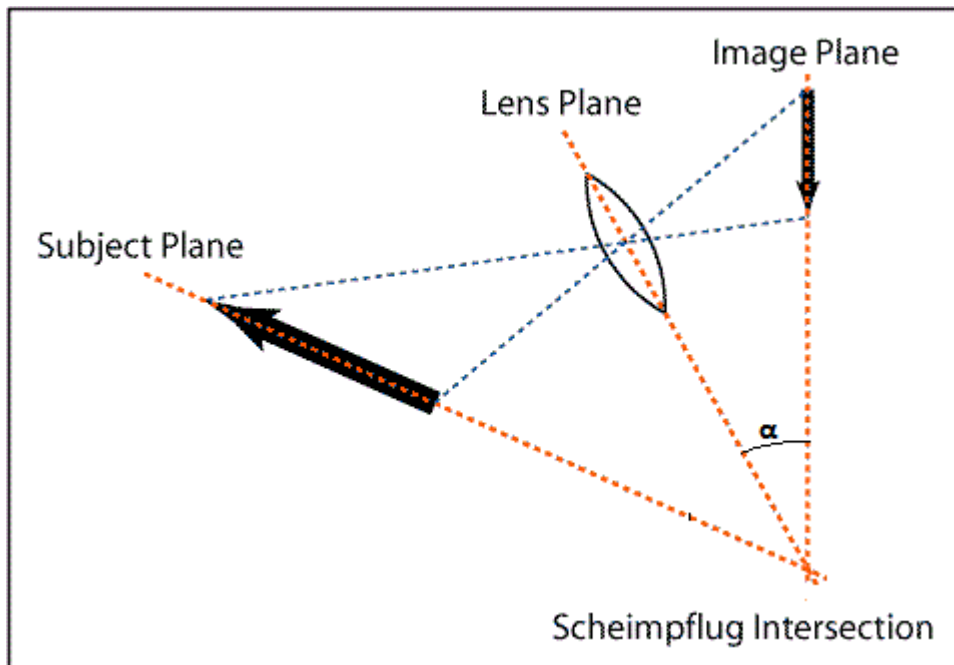
Εικόνα 3.8. Ένα από τα δύο target που χρησιμοποιήθηκε μέσα στο test section. Φαίνονται τα σημάδια (σταυρός και τελείες) καθώς και ότι το κάθε ένα είναι σε διαφορετικό επίπεδο από το διπλανό του.

Figure 3.8. The calibration target which was used.

Ρύθμιση εστίασης και γωνίας Scheimpflug στις φωτογραφικές μηχανές

Για να έχουν οι κάμερες καθαρή εικόνα πρέπει να γίνει σωστή εστίαση στο επίπεδο μέτρησης αλλά και να ικανοποιηθεί η αρχή του Scheimpflug. Η τελευταία ισχύει όταν το επίπεδο φωτογράφισης δεν είναι παράλληλο με το επίπεδο των φακών και το επίπεδο του σένσορα (ή του φιλμ) της φωτογραφικής μηχανής πάνω στο οποίο αντικατοπτρίζεται το είδωλο της εικόνας[21].

Όταν συμβαίνει αυτό, το αποτέλεσμα είναι η κάμερα να μην είναι εστιασμένη σε ολόκληρη την εικόνα αλλά μόνο σε ένα μέρος της. Για να διορθωθεί αυτό πρέπει να στραφεί το επίπεδο του σένσορα έτσι ώστε αν προεκταθούν νοητά τα τρία προαναφερθέντα επίπεδα να συναντηθούν όλα σε ένα κοινό σημείο. Αυτή η αρχή γίνεται καλύτερα κατανοητή αν δούμε την παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 3.9. Στο παρόν σχήμα ικανοποιείται η αρχή του Scheimpflug καθώς οι προεκτάσεις των τριών επιπέδων συναντιούνται σε ένα σημείο. Για να συμβεί αυτό έπρεπε να στραφεί το επίπεδο του σένσορα (Image Plane) κατά μια γωνία α .

Figure 3.9. Schematic representation of Scheimpflug principle.

Χρόνος μεταξύ των δύο παλμών laser

Σημαντική παράμετρος για την ακρίβεια των μετρήσεων σε εφαρμογές PIV είναι ο χρόνος που μεσολαβεί ανάμεσα στους δύο παλμούς που εκπέμπει η συσκευή του laser (Δt). Ο χρόνος αυτός δε μπορεί να είναι πολύ μεγάλος γιατί τότε τα σωματίδια που φωτογραφήθηκαν στο πρώτο παλμό θα έχουν φύγει εκτός πλάνου στο δεύτερο παλμό. Πιο συγκεκριμένα το ποσοστό των σωματιδίων που είναι παρόντα και στις δύο εικόνες ονομάζεται 'volume retention' και δίνεται από τη σχέση: $v_R = 1 - 2 \frac{U_\infty \Delta t}{h}$, όπου U_∞ η ταχύτητα της ελεύθερης ροής και h το πάχος του φύλλου λέιζερ. Το ιδανικό είναι ο λόγος αυτός να προσεγγίζει τη μονάδα αλλά πρακτικά τιμές γύρω στο 0,75 είναι αποδεκτές [22]. Εμείς είχαμε $v_R = 0,77$.

Από την άλλη μεριά, δε μπορεί να είναι και πολύ μικρός γιατί αυξάνεται το σχετικό σφάλμα των μετρήσεων και επιπλέον πρέπει να ικανοποιείται ο κανόνας του $\frac{1}{4}$ [23] σύμφωνα με τον οποίο η εικονική μετατόπιση των σωματιδίων ανάμεσα στους δύο παλμούς δε πρέπει να υπερβαίνει το $\frac{1}{4}$ του μεγέθους του παραθύρου ελέγχου που στη περίπτωση μας είναι 32×32 pixel. Άρα γίνεται κατανοητό ότι πρέπει να γίνει ένας συμβιβασμός. Σε όλες τις μετρήσεις επιλέχθηκε $\Delta t = 45 \mu s$.

4 Επεξεργασία δεδομένων

Σε μια διαδικασία πειραματικής μελέτης ενός φαινομένου, για να έχουμε όσο το δυνατό πιο αξιόπιστα αποτελέσματα, δεν αρκεί μόνο ο προσεκτικός σχεδιασμός και η ακριβής εκτέλεση του πειράματος αλλά και η σωστή επεξεργασία των δεδομένων. Στη μέθοδο του stereo PIV που χρησιμοποιήθηκε στη περίπτωση μας, η μέθοδος της επεξεργασίας δεν είναι προκαθορισμένη. Εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το τι ροή μελετάμε (για παράδειγμα αν είναι ροή με μεγάλη κλίση ταχύτητας), τις συνθήκες που έγινε το πείραμα, ακόμα και από το διαθέσιμο υπολογιστικό χρόνο.

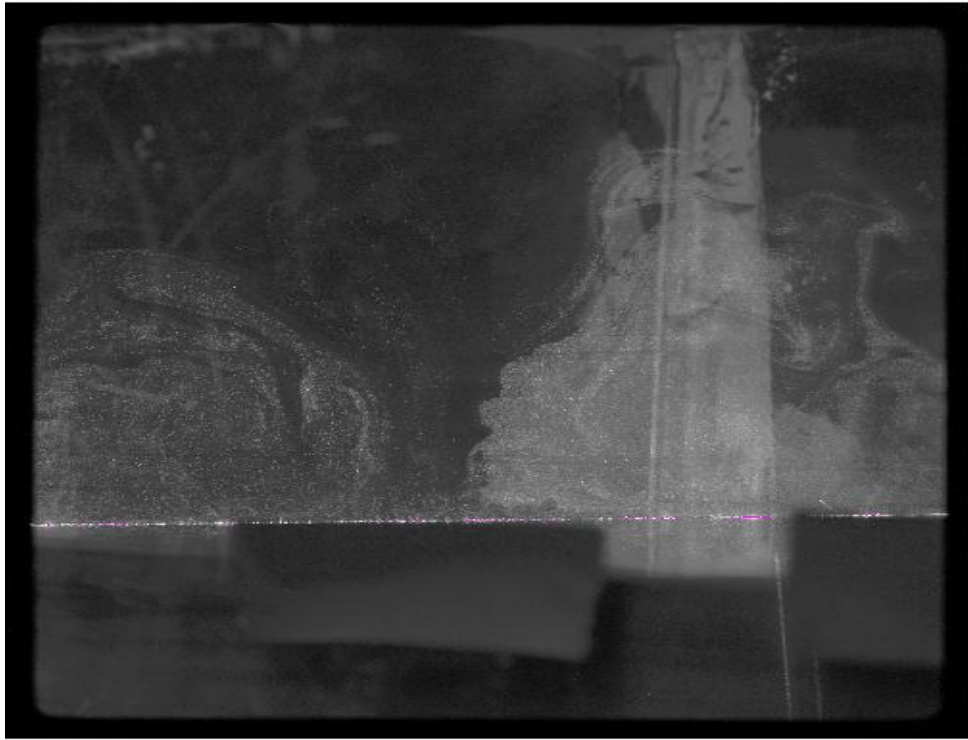
Δε θα γίνει παρουσίαση όλων των διαθέσιμων επιλογών που έχει ο μελετητής για την επεξεργασία των δεδομένων γιατί κάτι τέτοιο θα ήταν κουραστικό για τον αναγνώστη και έξω από τα πλαίσια της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας. Θα γίνει όμως προσπάθεια να γίνουν κατανοητές οι πιο βασικές από τις επιλογές στις οποίες καταλήξαμε.

4.1 Προεπεξεργασία (Preprocessing)

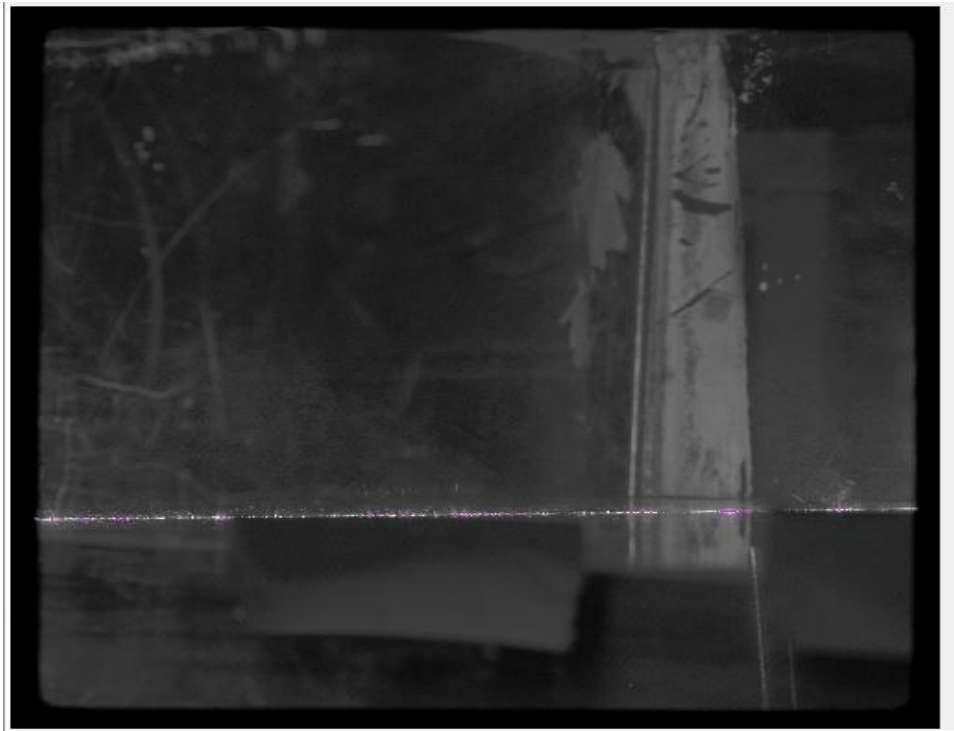
Στη προ-επεξεργασία συνήθως θέλουμε να βελτιώσουμε τα δεδομένα που έχουμε πριν την βασική επεξεργασία. Βεβαίως υπάρχουν περιπτώσεις όπως η μελέτη διφασικής ροής που η προ επεξεργασία είναι απολύτως απαραίτητη για την επεξεργασία. Το λειτουργικό σύστημα που χρησιμοποιήθηκε (*Insight 4G™*) παρέχει πολλές επιλογές οι περισσότερες από τις οποίες δε χρειάστηκαν στη συγκεκριμένη εφαρμογή.

Στη περίπτωση μας υπήρχαν αρκετές αντανάκλασεις που οφείλονταν στο περιβάλλον φως και στις φθορές των τοιχωμάτων της σήραγγας. Η επιλογή 'δημιουργία εικόνας' ή 'image generator' της προεπεξεργασίας μας δίνει τη δυνατότητα να υπολογίσουμε την ελάχιστη φωτεινότητα από ένα πλήθος εικόνων. Επειδή τα σωματίδια δε είχαν ομοιόμορφη η σταθερή κατανομή στις εικόνες, ο υπολογισμός της ελάχιστης φωτεινότητας από ένα σχετικά μεγάλο πλήθος εικόνων (40-50) δημιουργεί μια εικόνα όπου εμφανίζονται μόνο οι αντανάκλασεις. Φυσικά αυτό το κάνουμε και για τις δύο κάμερες, και για τους δύο παλμούς, άρα στην ουσία έχουμε τέσσερις εικόνες που δημιουργούνται.

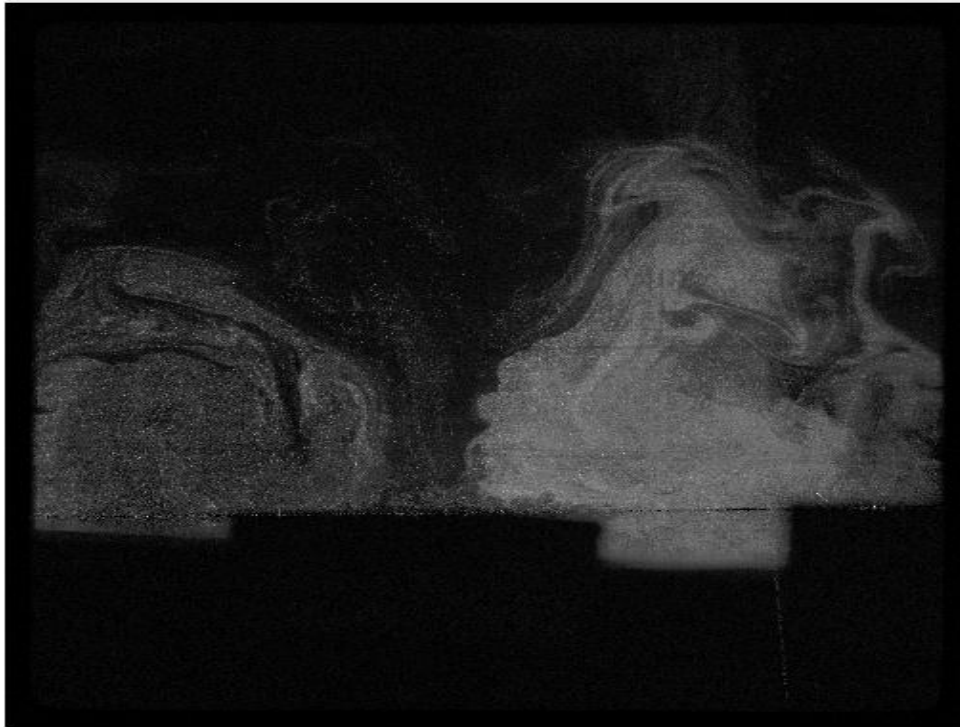
Στη συνέχεια με την επιλογή 'υπολογισμός εικόνας' ή 'image calculator' αφαιρέσαμε την εικόνα που δημιουργήσαμε και αντιστοιχεί στην ελάχιστη φωτεινότητα από ένα πλήθος αρχικών φωτογραφιών έχοντας πλέον εικόνες σαφώς βελτιωμένες σε σχέση με πριν (Εικόνα 4.1).



α)



β)



γ)

Εικόνα 4.1. Εδώ βλέπουμε την ίδια φωτογραφία: α) όπως λήφθηκε αρχικά από την φωτογραφική μηχανή, β) όπως υπολογίστηκε η ελάχιστη φωτεινότητα της φωτογραφίας γ) όπως τροποποιήθηκε μετά την αφαίρεση της εικόνας που δημιουργήθηκε υπολογίζοντας την ελάχιστη φωτεινότητα. Είναι εμφανές ότι έχουν αφαιρεθεί οι αντανακλάσεις και οι ατέλειες του τοιχώματος της σήραγγας.

Figure 4.1. Same PIV photo a) original photo, β) the calculated minimum intensity photo among the raw data, γ) the generated photo after subtracting photo β from photo a. It is obvious that the most intense reflections have been removed.

4.2 Επεξεργασία εικόνων (Image processing)

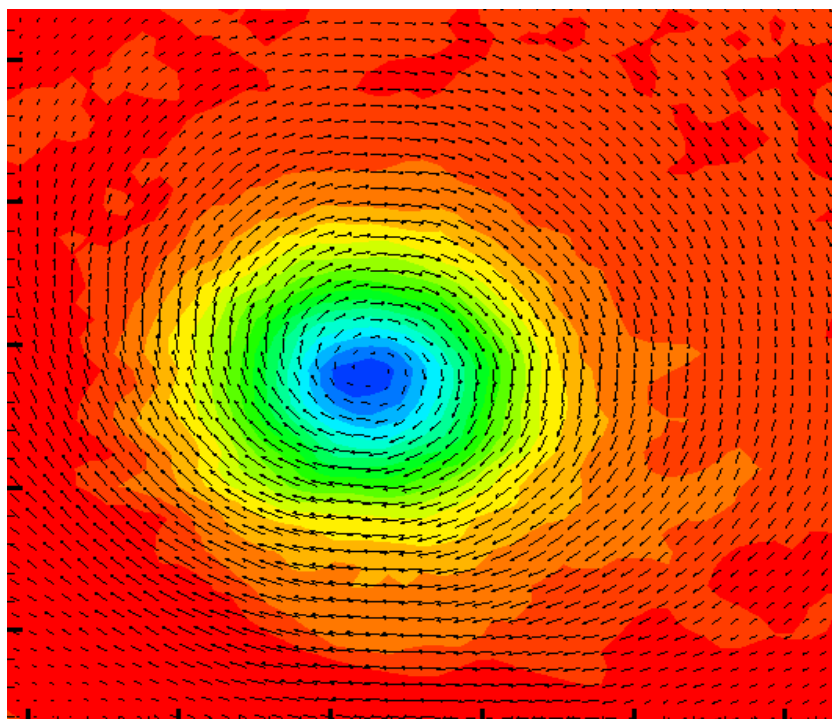
Ξεκινώντας τη διαδικασία της επεξεργασίας, η πρώτη απόφαση που πρέπει να παρθεί είναι ο αλγόριθμος που θα χρησιμοποιηθεί. Στο συγκεκριμένο λειτουργικό σύστημα υπάρχουν δύο επιλογές: *Classic PIV* και *Ensemble PIV*.

Στο *Classic PIV* όταν έχουμε όχι ένα αλλά έστω N διαδοχικά ζευγάρια φωτογραφιών από τα οποία θέλουμε να υπολογίσουμε το μέσο πεδίο ροής, ο αλγόριθμος υπολογίζει για κάθε ένα ζεύγος φωτογραφιών το πεδίο ταχύτητας (δηλαδή τα διανύσματα) ξεχωριστά οπότε στο τέλος έχουμε N ξεχωριστά αρχεία με τα πεδία ταχύτητας. Στη μπορούμε από τα N αρχεία να βγάλουμε το μέσο όρο τους και να δημιουργήσουμε ένα αρχείο που περιγράφει τη μέση ροή.

Η μέθοδος του *Ensemble PIV* αναπτύχθηκε στα πλαίσια του *micro-Piv* σε μια προσπάθεια να περιοριστεί ο θόρυβος στα δεδομένα που προέρχεται από την

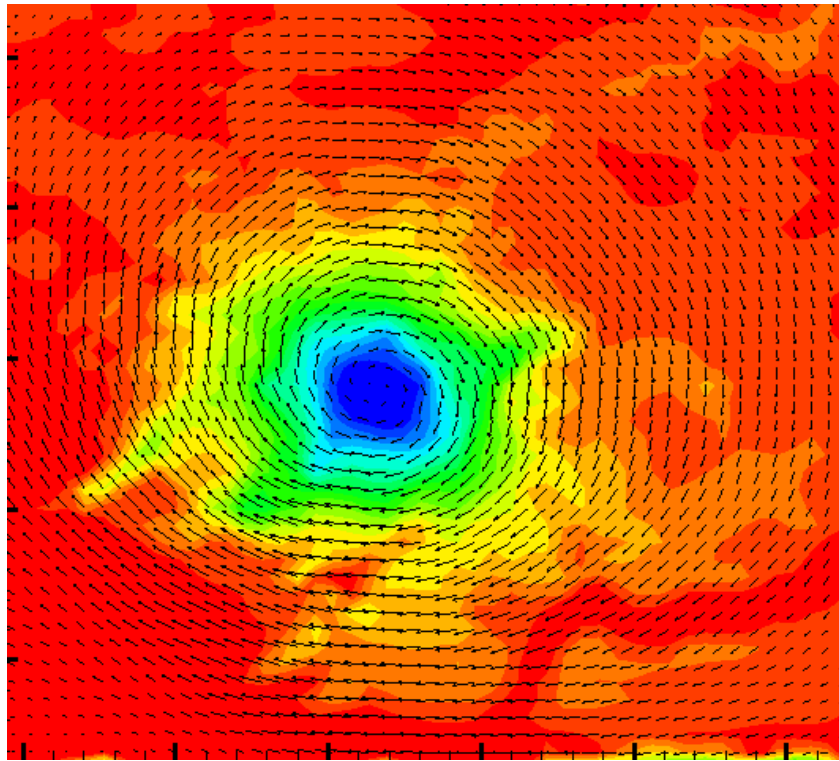
κίνηση Brown¹ . Με βάση αυτή τη μεθοδολογία, δεν υπολογίζονται τα διανύσματα της ταχύτητας για κάθε ένα ζευγάρι φωτογραφιών. Αντίθετα υπολογίζεται μέση τιμή ετεροσυσχέτισης για κάθε παράθυρο ελέγχου λαμβάνοντας υπ όψιν όλες τις τιμές ετεροσυσχέτισης που υπολογίστηκαν για όλα τα ζευγάρια φωτογραφιών. Έτσι, στο τέλος δημιουργείται ένα μόλις αρχείο το οποίο περιγράφει τη μέση ροή του πεδίου. Η μέθοδος αυτή, εκτός του πλεονεκτήματος της μείωσης του θορύβου που προέρχεται από τη κίνηση Brown, είναι και εξαιρετικά γρήγορη. Βασικό της μειονέκτημα είναι ότι χάνεται όλη η πληροφορία που έχει να κάνει με ασταθή φαινόμενα στη ροή.

Στη παρούσα ανάλυση χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος *Classic PIV* γιατί τα δεδομένα που προέκυπταν από τη χρησιμοποίηση του ήταν περισσότερο θορυβώδη .Παρακάτω στην Εικόνα 4.2 παρουσιάζεται το πεδίο στροβιλότητας μαζί με τα διανύσματα ταχύτητας του ορθογώνιου v_g με ύψος 27,5 mm και γωνία 25° όπως υπολογίστηκε με α) *Classic PIV* και β) *Ensemble PIV*.



α) *Classic PIV*

¹Κίνηση Brown είναι ο όρος που περιγράφει τις τυχαίες κινήσεις που κάνουν μικροσκοπικά σωματίδια που βρίσκονται μέσα σε ρευστό και οφείλονται στις συγκρούσεις τους με τα μόρια του ρευστού.



β) Ensemble PIV

Εικόνα 4.2. Η ίδια σειρά φωτογραφιών όπως αναλύθηκε με α) classic PIV ,β) Ensemble PIV.

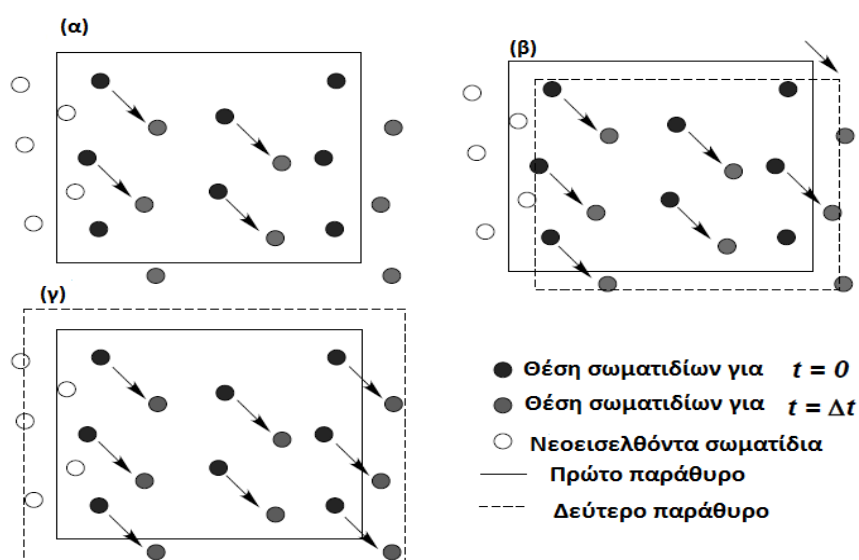
Figure 4.2. Same raw data processed with: a) classic PIV method, β) Ensemble PIV method.

Στη συνέχεια το λογισμικό μας δίνει τη δυνατότητα αν θα επιλέξουμε η όχι την επιλογή 'image deformation'. Η επιλογή αυτή βοηθάει στο να προσδιοριστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια η μετατόπιση των σωματιδίων σε κάθε περιοχή ελέγχου.

Ένα από τα προβλήματα που εντοπίζεται στη διαδικασία της ετεροσυσχέτισης ή cross correlation (βλέπε κεφάλαιο 2) είναι το εξής: στην απλή διαδικασία ετεροσυσχέτισης όπου τα παράθυρα ελέγχου (interrogation window) ταυτίζονται για την πρώτη και τη δεύτερη φωτογραφία είναι επόμενο ότι κάποια από σωματίδια που εντοπίστηκαν στο παράθυρο ελέγχου της πρώτης φωτογραφίας θα έχουν 'φύγει' από το παράθυρο της δεύτερης ενώ θα έχουν εισέλθει νέα τα οποία δεν ήταν στο παράθυρο της πρώτης (Εικόνα 4.3). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μειώνεται η αξιοπιστία του αποτελέσματος που παίρνουμε καθώς λιγότερα σωματίδια συμβάλουν στο καθορισμό της μέσης μετατόπισης του παραθύρου ελέγχου. Φυσικά αυτό το σφάλμα είναι ευθύνη και του ερευνητή να ελαχιστοποιηθεί με την ορθή επιλογή χρόνου μεταξύ των δύο παλμών και μεγέθους του παραθύρου ελέγχου αλλά πάντα θα υφίσταται, υπάρχουν δε και είδη ροών

όπου όσο καλή επιλογή Δt και μεγέθους παραθύρου ελέγχου και αν γίνει το σφάλμα είναι μη αποδεκτό.

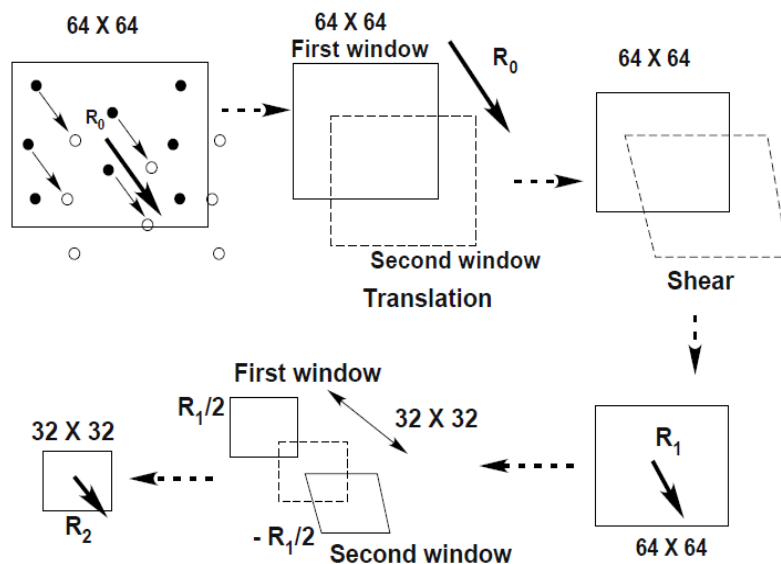
Για αυτό το λόγο υπάρχουν διάφοροι τρόποι να διορθωθεί αυτό το σφάλμα. Δύο βασικότεροι είναι: να γίνει μια φορά ετεροσυσχέτιση και με βάση τη μετατόπιση που θα υπολογιστεί να μετακινηθεί αναλόγως το δεύτερο παράθυρο ελέγχου (εικόνα 4.3β) , να είναι το δεύτερο παράθυρο ελέγχου μεγαλύτερο (εικόνα 4.3γ).



Εικόνα 4.3. Διάφοροι μέθοδοι βελτιώσεις της ετεροσυσχέτισης : α) απλή μέθοδος ετεροσυσχέτισης, β) μετατόπιση του δεύτερου παραθύρου ελέγχου, γ) μεγαλύτερο δεύτερο παράθυρο ελέγχου.

Figure 4.3. Methods of improving cross-correlation: a) simple cross-correlation, b) translation of the second interrogation window, γ) larger second interrogation window

Όπως για ροές με πολύ μεγάλες κλίσεις ταχύτητας , όπως για παράδειγμα ο ομόρους από πτέρυγα ελικοπτέρου χρειάζεται μία πιο αποτελεσματική μέθοδος και αυτή είναι η *image deformation*. Η διαδικασία ξεκινάει με ετεροσυσχέτιση παραθύρων συγκεκριμένων διαστάσεων (πχ 64x64 pixel). Αφού υπολογιστεί η μέση μετατόπιση ξαναγίνεται ετεροσυσχέτιση αλληπάλληλες φορές κατά τις οποίες το παράθυρο ελέγχου μετατοπίζεται και παραμορφώνεται διαδοχικά ενώ η ίδια διαδικασία μπορεί να συνεχιστεί για μικρότερου μεγέθους παράθυρα ελέγχου εφ' όσον το επιθυμούμε.



Εικόνα 4.4. Η μέθοδος του 'Image Deformation'.

Figure 4.4. 'Image deformation' method.

Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι σαφώς ανώτερη και από τη απλή διαδικασία ετεροσυσχέτισης και από τις βελτιωμένες, αλλά απλές, μεθόδους που παρουσιάστηκαν, εκμηδενίζοντας ουσιαστικά το σφάλμα ετεροσυσχέτισης. Το τίμημα όμως που πρέπει να πληρώσει κάποιος για την ακρίβεια είναι ο πολύ μεγάλος υπολογιστικός χρόνος. Πιο συγκεκριμένα, στη περίπτωση των πειραμάτων που εξετάζονται στη συγκεκριμένη εργασία, ο χρόνος επεξεργασίας με *image deformation* ήταν δεκαπλάσιος από την απλή μέθοδο (για ίδιο μέγεθος παραθύρου 32x32 pixel).

Σε επόμενο στάδιο έπρεπε να γίνει επιλογή των: Grid Engine, Spot Mask Engine, Correlation Engine, Peak Engine.

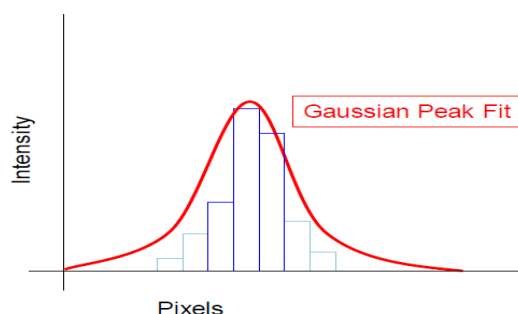
Grid Engine: Είναι ο μηχανισμός παραγωγής του πλέγματος, δηλαδή πως θα χωριστεί η εικόνα σε παράθυρα ελέγχου (interrogation windows). Αφήσαμε την προεπιλογή του λογισμικού η οποία είναι το 'Nyquist Grid' και η οποία δημιουργεί τετράγωνα παράθυρα ελέγχου διαστάσεων 32x32 pixel (δική μας επιλογή) με επικάλυψη 50% ενώ η ετεροσυσχέτιση γίνεται μία φορά.

Spot Mask Engine: Η επιλογή αυτή μας δίνει τη δυνατότητα να 'φιλτράρουμε' τα σωματίδια μέσα σε κάθε παράθυρο ελέγχου. Επιλέχθηκε η 'Gaussian Mask' η οποία με μία συνάρτηση βαρύτητας τονίζει τα σωματίδια που βρίσκονται στο κέντρο του παραθύρου ελέγχου ενώ μειώνει την φωτεινότητα αυτών που βρίσκονται στις

άκρες. Έτσι στη διαδικασία ετεροσυσχέτισης έχουν πιο σημαντική επίδραση τα σωματίδια που βρίσκονται κοντά στο κέντρο και είναι λιγότερο πιθανό να έχουν αποχωρήσει από το παράθυρο στη δεύτερη εικόνα.

Correlation Engine: Εδώ καθορίζεται ο μηχανισμός συσχέτισης των εικόνων. Επιλέχθηκε το 'FFT (Fast Fourier Transform) Correlator' γιατί είναι πιο γρήγορος [riv book].

Peak Engine: Είναι ο μηχανισμός με τον οποίο αφού γίνει η ετεροσυσχέτιση καθορίζεται η κορυφή του χάρτη που έχει παραχθεί. Εδώ παρέμεινε η προεπιλογή του λογισμικού η οποία είναι η 'Gaussian Peak' . Με αυτό το μηχανισμό έχουμε ακρίβεια δεκαδικού ρixel, καθώς παρεμβάλεται καμπύλη Gauss στο ρixel όπου με βάση την ετεροσυσχέτιση αντιστοιχεί στη μετατόπιση, και στα τέσσερα κοντινότερα του (εικόνα 4.5).



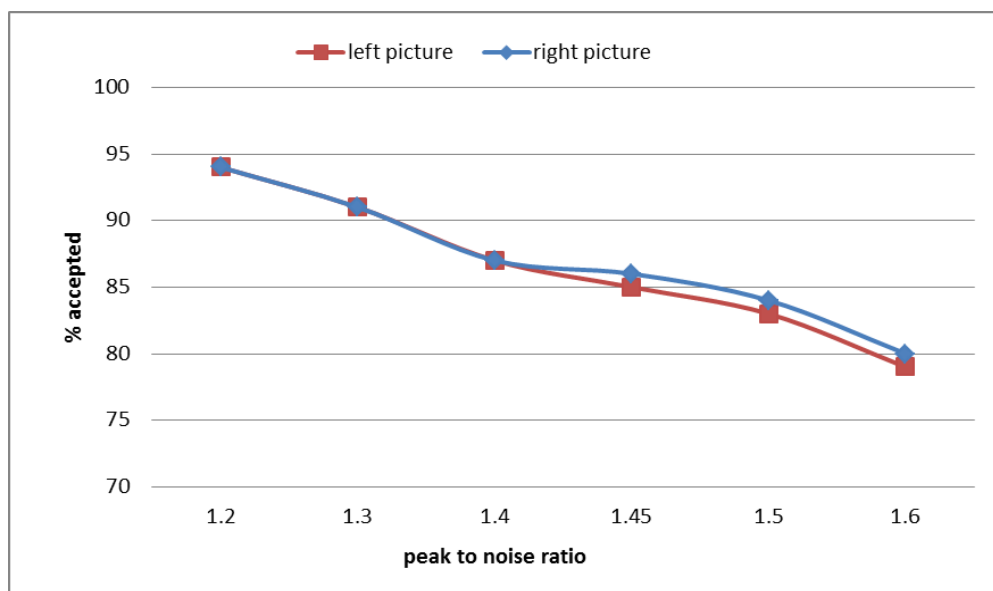
Εικόνα 4.5. Παρεμβολή καμπύλης Gauss στα αποτελέσματα της ετεροσυσχέτισης.

Figure 4.5. Interpolation to the cross correlation data with Gauss curve.

Τελευταία σημαντική επιλογή που έπρεπε να γίνει στο στάδιο του 'image processing' ήταν η τιμή του 'signal-to-noise ratio'. Περιγραφικά αυτός ο λόγος καθορίζει το εξής:

Όπως έχει περιγραφεί προηγουμένως για να βρεθεί η τοπική μετατόπιση, γίνεται συσχέτιση με στατιστικές μεθόδους μεταξύ δύο παραθύρων ελέγχου των δύο διαδοχικών φωτογραφιών που έχουμε. Από τη συσχέτιση αυτή προκύπτει η τιμή της μετατόπισης η οποία θα βρίσκεται εκεί που μεγιστοποιείται η τιμή της συνάρτησης συσχέτισης. Όμως λόγω θορύβου ή φύσης της ροής η συνάρτηση έχει πολλά τοπικά μέγιστα. Η τιμή αυτή, λοιπόν, καθορίζει το λόγο του ολικού μέγιστου προς το δεύτερο μεγαλύτερο τοπικό μέγιστο. Δε μπορεί να είναι πολύ μεγάλος αυτός ο λόγος γιατί στην ουσία δε θα βρίσκει ποτέ έγκυρο μέγιστο, ούτε πολύ μικρός γιατί θα παίρνουμε μη έγκυρα αποτελέσματα. Η τιμή που επιλέχθηκε κρινόταν κατά περίπτωση χωρίς ωστόσο να διαφέρει σημαντικά. Ζητούμενο ήταν να παίρνουμε όσο το δυνατό περισσότερα σωστά διανύσματα (πράσινο χρώμα) με όσο το δυνατό

μεγαλύτερη τιμή του λόγου χωρίς να πέσει αυτή η τιμή κάτω από το 1,2. Τελικά, όλες οι αναλύσεις έγιναν με τιμή 1,25 ή 1,3. Παρακάτω, στην Εικόνα 4.6 παρουσιάζεται η μεταβολή του ποσοστού των αποδεκτών διανυσμάτων ως προς το σύνολο τους, για διάφορες τιμές του λόγου.



Εικόνα 4.6. Η μεταβολή των αποδεκτών διανυσμάτων (ως ποσοστό από τον συνολικό αριθμό) συναρτήσει του peak to noise ratio.

Figure 4.6. Variation of the accepted vectors (percentage of total) subjected to change of “peak to noise” ratio.

4.3 Εγκυρότητα αποτελεσμάτων (Post processing)

Αφού έχει γίνει η επεξεργασία της εικόνας και έχουν υπολογιστεί τα διανύσματα που περιγράφουν το πεδίο ταχύτητας πρέπει να εισάγουμε στο λογισμικό κάποια κριτήρια προκειμένου να αξιολογηθεί το κατά πόσο το πεδίο διανυσμάτων που υπολογίστηκε ανταποκρίνεται στη πραγματικότητα. Φυσικά ακόμη και κατά τη διάρκεια του Processing υπάρχουν κάποια βασικά κριτήρια για το εάν ένα διάνυσμα είναι αποδεκτό ή όχι, αλλά η βασική εκτίμηση γίνεται στο στάδιο του Post processing.

Εδώ υπάρχουν δύο ‘δρόμοι’, απ τους οποίους μπορούμε να επιλέξουμε είτε έναν είτε και τους δύο, και είναι το ‘Global Validation’ και το ‘Local Validation’. Το πρώτο χρησιμοποιεί κάποια καθολικά φίλτρα που παίρνουν υπ όψιν το συνολικό πεδίο ροής της εικόνας και ισχύει προφανώς για όλη την εικόνα. Το δεύτερο εκτιμά το κάθε διάνυσμα που έχει δημιουργηθεί με βάση τοπικά κριτήρια που, όπως είναι λογικό, για κάθε διάνυσμα (για κάθε παράθυρο ελέγχου δηλαδή) είναι διαφορετικά.

Αφού έχει γίνει η εκτίμηση της εγκυρότητας των αποτελεσμάτων (data validation) έχουμε τη δυνατότητα με το *'vector conditioning'* είτε να αντικαταστήσουμε τα μη αποδεκτά διανύσματα είτε ακόμη και να φτιάξουμε διανύσματα σε περιοχές της εικόνας που δε κατάφερε το λογισμικό να υπολογίσει. Αυτό το κάνουμε για να έχουμε ένα πλήρες διανυσματικό πεδίο χωρίς 'τρύπες'.

Η εκτίμηση εγκυρότητας καθώς και η αντικατάσταση ή δημιουργία διανυσμάτων γίνεται με επιλογή ανάμεσα από κριτήρια τα οποία είναι διαθέσιμα από το λογισμικό:

Global Validation: Χρησιμοποιήθηκε η επιλογή *'standard deviation range'* με παράγοντα 3. Αυτό το κριτήριο δέχεται όσα διανύσματα ταχύτητας έχουν τιμή όσο η μέση ταχύτητα του πεδίου συν ή μείον 3 φορές την μέση τυπική απόκλιση των ταχυτήτων του πεδίου.

Local Validation: Επιλέχθηκε το *'median test'* με *'neighbourhood size'* να είναι 5x5 και το *'velocity tolerance'* 2. Αυτό το κριτήριο λειτουργεί ως εξής: Για να είναι έγκυρο το διάνυσμα η κάθε συνιστώσα του συγκρίνεται με την αντίστοιχη συνιστώσα της διαμέσου των 5 γειτονικών διανυσμάτων. Αν η διαφορά είναι μικρότερη (σε pixel) από αυτή που έχουμε ορίσει, 2 στη συγκεκριμένη περίπτωση, για όλες τις συνιστώσες, τότε το διάνυσμα είναι έγκυρο.

Vector Conditioning: Για να καλυφθούν τα κενά του πεδίου ταχυτήτων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος *'Local Mean'* με *'Neighbourhood size'* 5x5 και επιλογή *'Recursive Filling'*. Η μέθοδος αυτή γεμίζει το κενό με τη μέση τιμή των 5 γειτονικών διανυσμάτων. Το *'Recursive Filling'* σημαίνει ότι το πεδίο *'σαρώνεται'* πολλές φορές ξεκινώντας από τα κενά που έχουν γύρω τους τα περισσότερα έγκυρα διανύσματα. Όσο προχωρά η δημιουργία διανυσμάτων όλο και περισσότερα κενά σημεία έχουν επαρκή αριθμό γειτονικών διανυσμάτων προκειμένου να καλυφθούν. Η άλλη επιλογή, *'measured vectors only'*, χρησιμοποιεί για την κάλυψη των κενών μόνο όσα διανύσματα έχουν υπολογιστεί αρχικά χωρίς να λαμβάνει υπ όψιν όσα δημιουργήθηκαν εκ των υστέρων. Αυτό συνεπάγεται ένα πεδίο πιο πραγματικό, αλλά με περισσότερα κενά.

5 Ανάλυση αποτελεσμάτων

Για την ανάλυση των στροβίλων που παράγουν τα VGs θα παρουσιάσουμε τη μεταβολή της μέγιστης τιμής στροβιλότητας, της ημιακτίνας και της κυκλοφορίας στα τρία επίπεδα μέτρησης. Επίσης θα παρουσιάσουμε τη τροχιά των στροβίλων.

Η μέγιστη τιμή στροβιλότητας καθορίζει το κέντρο του στροβίλου, με βάση το οποίο εξετάζουμε την τροχιά του στροβίλου.

Η ημιακτίνα καθορίζει το μέγεθος του στροβίλου και ορίζεται ως η περίμετρος της περιοχής αυτής όπου η τιμή της στροβιλότητας είναι τουλάχιστον η μισή της μέγιστης.

Η κυκλοφορία μας δίνει την ισχύ του στροβίλου. Υπολογίζεται αθροίζοντας τα γινόμενα της στροβιλότητας και του στοιχειώδους εμβαδού μέσα στη περιοχή που ορίζεται από την ημιακτίνα. Στοιχειώδες εμβαδό στη περίπτωση μας είναι το παράθυρο ελέγχου (32×32 pixel) για κάθε ένα από τα οποία υπολογίζει το λογισμικό το διάνυσμα της ταχύτητας και παράγωγα μεγέθη (όπως η στροβιλότητα).

Τέλος θα γίνει μια συνοπτική παρουσίαση των τάσεων Reynolds για μια περίπτωση μόνου VG.

Η στροβιλότητα και η κυκλοφορία έχουν αδιαστατοποιηθεί με το το ύψος του οριακού στρώματος ($\delta = 3 \text{ cm}$) και τη ταχύτητα της ελεύθερης ροής ($U = 5 \text{ m/s}$) ενώ όλες οι αποστάσεις έχουν αδιαστατοποιηθεί με το ύψος του οριακού στρώματος.

Υπενθυμίζεται ότι ως σημείο 0 για τον άξονα y θεωρείται το δάπεδο, για τον άξονα z το μέσον της απόστασης μεταξύ των πλαϊνών τοιχωμάτων του και για τον άξονα x η ακμή φυγής των. Στα μονά VGs η ακμή φυγής είναι για $z=0$ ενώ στα ζεύγη τα VGs έχουν τοποθετηθεί συμμετρικά ως προς τον άξονα z (βλέπε Εικόνα 3.3).

5.1 Μονά VGs

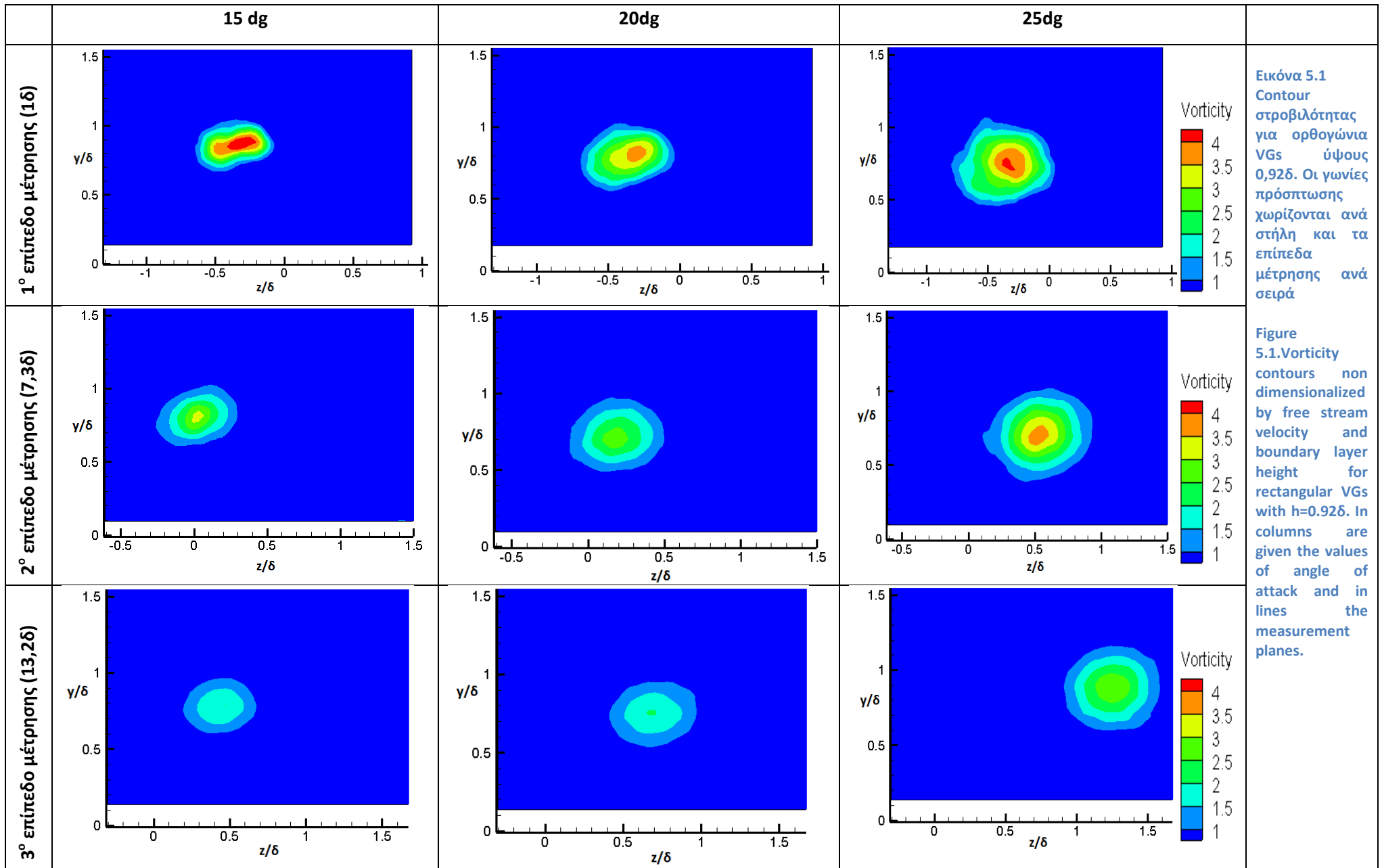
Για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων στα μονά VGs οι περιπτώσεις χωρίστηκαν κατά παράμετρο εξέτασης (ύψος και γωνία). Παρουσιάζονται αποτελέσματα μόνο για τα ορθογώνια VGs γιατί κατά την ανάλυση των αποτελεσμάτων βρέθηκε ότι τα τριγωνικά είχαν την ίδια συμπεριφορά με τα ορθογώνια στις αλλαγές ύψους και γωνίας. Αφού παρουσιαστούν τα αποτελέσματα για τα ορθογώνια VGs στη μεταβολή κάθε παραμέτρου, παραθέτουμε διαγράμματα σύγκρισης ορθογωνίου-

τριγωνικού για ένα από τα τρία VGs που χρησιμοποιήθηκαν για να γίνει σαφές ότι έχουν ίδια συμπεριφορά.

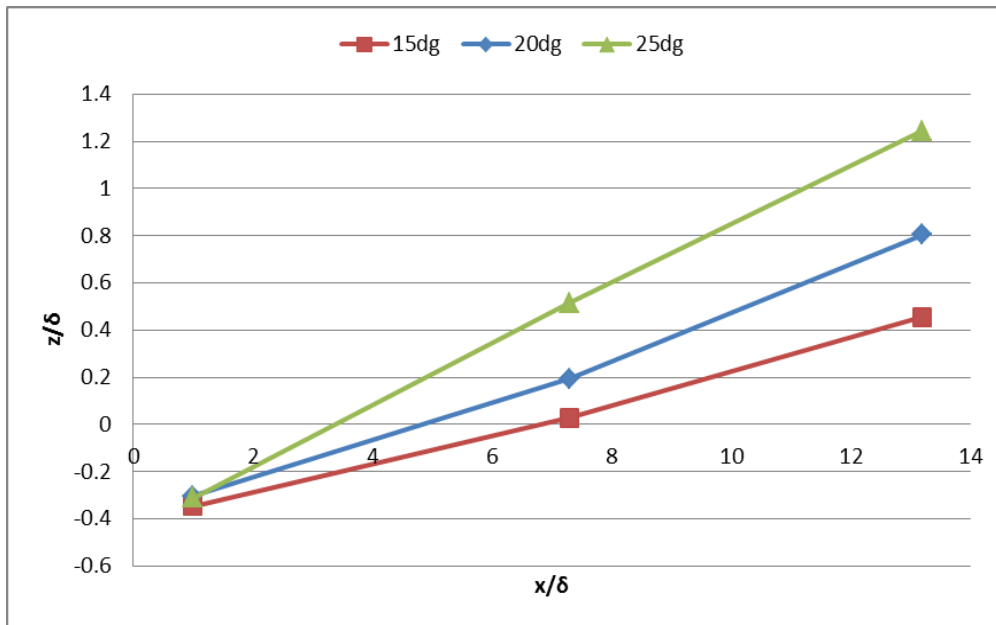
Επίδραση της γωνίας πρόσπτωσης του VG

Στην Εικόνα 5.1 παρουσιάζουμε τα περιγράμματα στροβιλότητας για τις τρεις διαφορετικές γωνίες που μελετήθηκαν, στα τρία επίπεδα μέτρησης. Παρατηρούμε ότι αυξανόμενη της γωνίας πρόσπτωσης αυξάνεται το μέγεθος του στροβίλου. Επίσης είναι φανερό ότι για μεγαλύτερη γωνία πρόσπτωσης το κέντρο του στροβίλου εκτρέπεται περισσότερο κατά τον άξονα z. Τέλος μπορούμε να διακρίνουμε ότι η μέγιστη τιμή στροβιλότητας αυξάνεται μαζί με τη γωνία πρόσπτωσης στο 2° και στο 3° επίπεδο.

Αυτές οι μεταβολές θα παρουσιαστούν πιο αναλυτικά στα διαγράμματα που ακολουθούν και παρουσιάζονται χαρακτηριστικά μεγέθη των στροβίλων για κάθε μία από τις τρεις γωνίες που μελετήθηκαν συναρτήσει της κατάντη απόστασης.

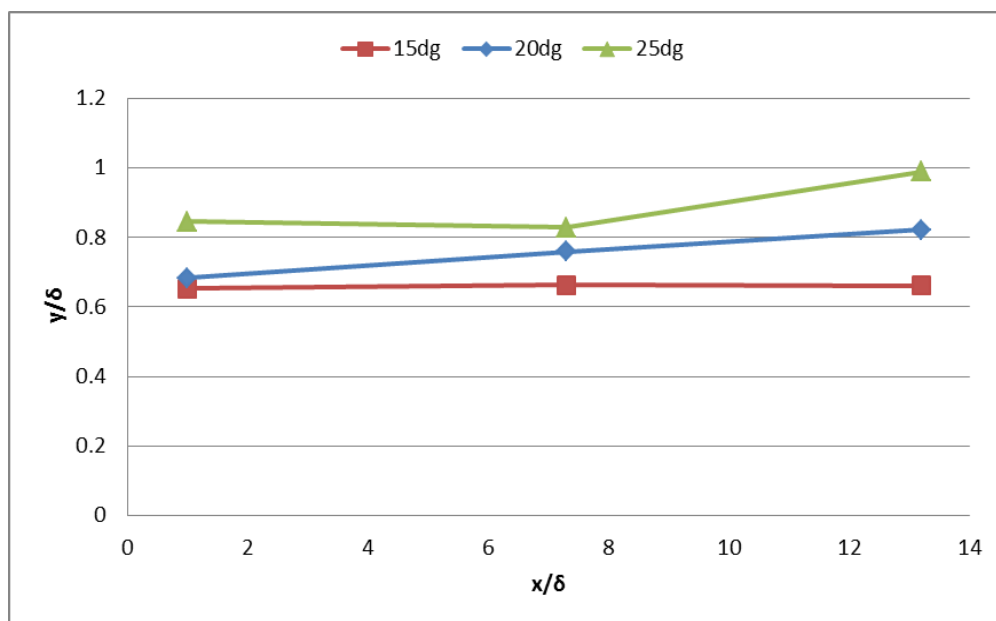


Στα επόμενα δύο διαγράμματα(Εικόνα 5.2,Εικόνα 5.3) βλέπουμε τη τροχιά του κέντρου των στροβίλων κατά τον z και κατά τον γ άξονα.



Εικόνα 5.2. Μετατόπιση κέντρου στροβίλων κατά τον άξονα z συναρτήσει κατάντη απόστασης στη περίπτωση ορθογωνίων VGs.

Figure 5.2. Path of the vortex center in the z direction nondimensionalized by boundary layer height (δ) for rectangular single VGs with $h=0.92\delta$.

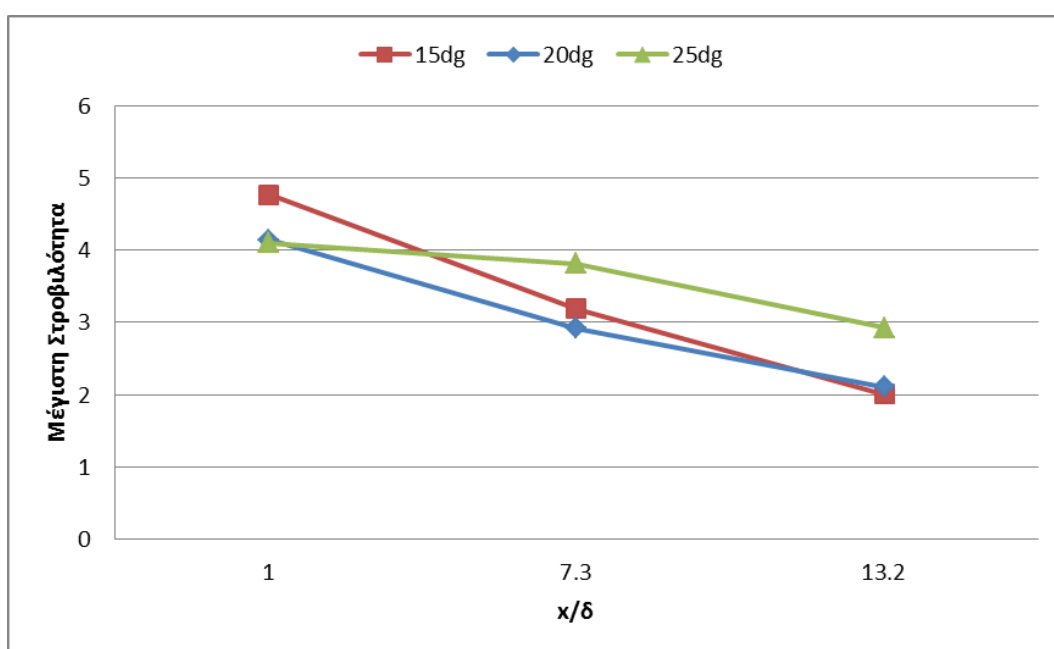


Εικόνα 5.3. Μετατόπιση κέντρου στροβίλων κατά τον άξονα γ συναρτήσει κατάντη απόστασης στη περίπτωση ορθογωνίων VGs.

Figure 5.3. Path of vortex center in the y direction nondimensionalized by boundary layer height (δ) for rectangular single VGs with $h=0.92\delta$.

Τα παραπάνω διαγράμματα δείχνουν ότι η μεταβολή της γωνίας πρόσπτωσης επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη τροχιά του κέντρου του στροβίλου κατά τη διεύθυνση z καθώς όσο μεγαλώνει η γωνία πρόσπτωσης ο στρόβιλος εκτρέπεται περισσότερο, όπως αναμενόταν. Όσον αφορά το ύψος του κέντρου του στροβίλου, αυτό επηρεάζεται σε μικρό βαθμό. .

Στη συνέχεια, παραθέτουμε τα διαγράμματα στροβιλότητας, ημιακτίνας και κυκλοφορίας (Εικόνα 5.4, Εικόνα 5.5, Εικόνα 5.6).

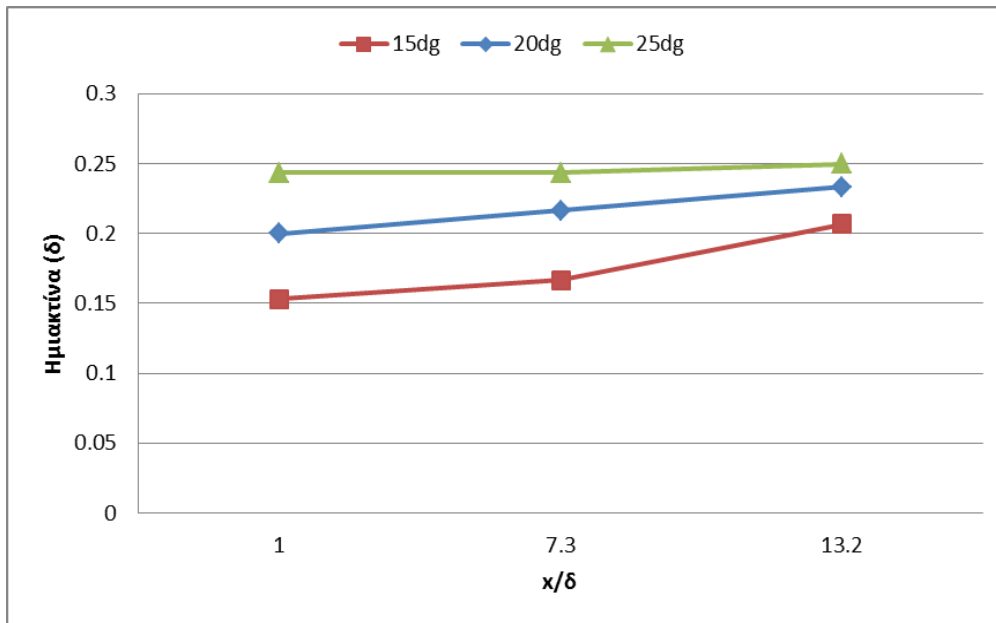


Εικόνα 5.4. Μεταβολή της μέγιστης τιμής στροβιλότητας συναρτήσει κατάντη απόστασης στη περίπτωση ορθογωνίων VGs.

Figure 5.4. Peak Vorticity decay nondimensionalized by free stream velocity U and boundary layer height (δ) for rectangular single VGs with $h=0.92\delta$

Το διάγραμμα της στροβιλότητας συναρτήσει της κατάντη απόστασης μας δείχνει ότι το VG με γωνία 25dg παράγει στρόβιλο με μέγιστη στροβιλότητα μικρότερη από αυτό των 15dg και παραπλήσια με το VG των 20dg το οποίο ενδεχομένως να οφείλεται και σε αποκόλληση της ροής γύρω από το VG [16]. Στη συνέχεια όμως η στροβιλότητα μειώνεται με μικρότερο ρυθμό για τις 25dg από ότι για τις άλλες δύο γωνίες, γεγονός που πιθανά οφείλεται στη μεγαλύτερη απόσταση του στροβίλου από το στερεό έδαφος άρα και τις μικρότερες τιμές διάτμησης του οριακού

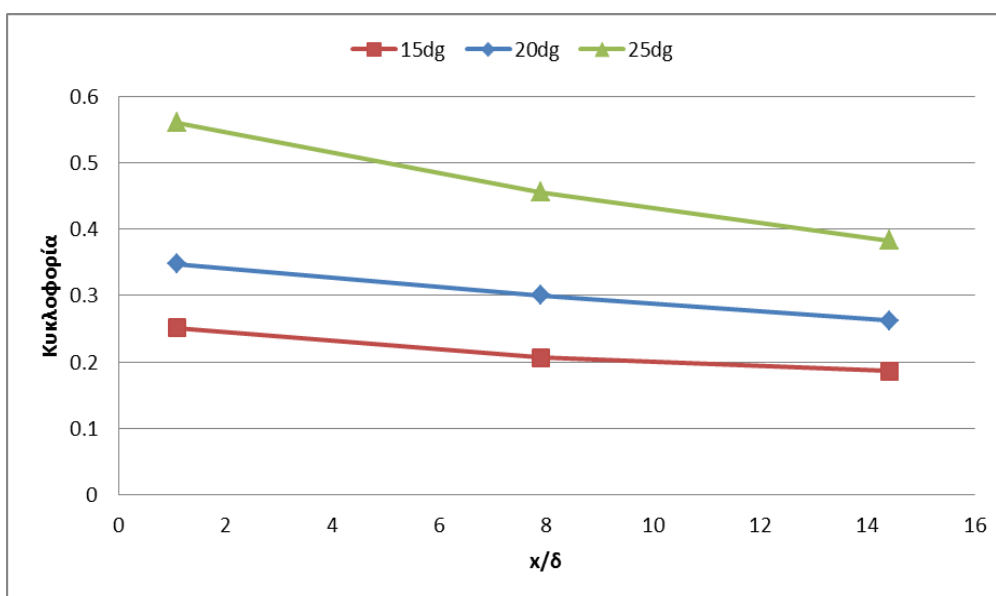
στρώματος της πλάκας, πράγμα που οδηγεί στο τελευταίο επίπεδο το VG 25dg να δημιουργεί το στρόβιλο με τη μεγαλύτερη (μέγιστη) στροβιλότητα.



Εικόνα 5.5. Μεταβολή της ημισκιάνας συναρτήσει κατάντη απόστασης για τις διάφορες γωνίες πρόσπτωσης ορθογώνιων VGs.

Figure 5.5. Half Radius variation nondimensionalized by boundary layer height (δ) for rectangular VGs with $h=0.92\delta$

Το διάγραμμα της ημισκιάνας δείχνει ότι για μεγαλύτερη γωνία πρόσπτωσης ο στρόβιλος που παράγεται έχει μεγαλύτερη ημισκιάνα.



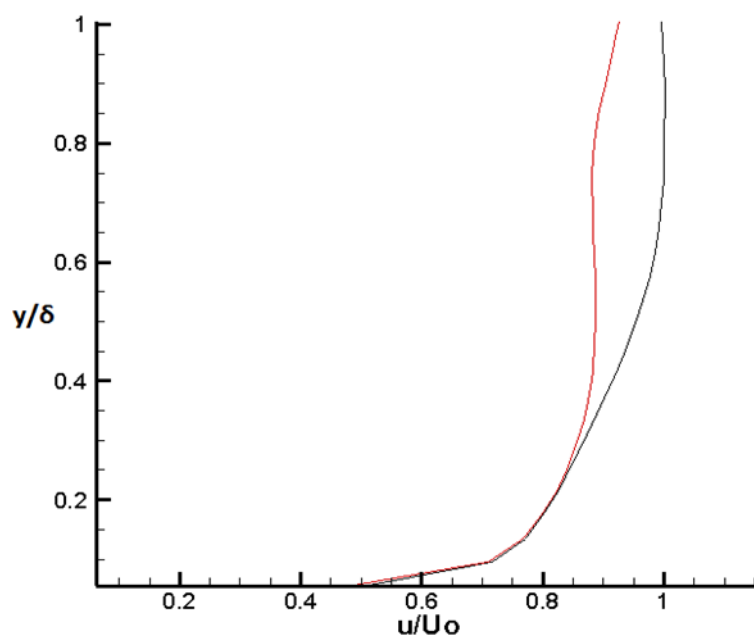
Εικόνα 5.6. Μεταβολή της κυκλοφορίας συναρτήσει κατάντη απόστασης για τις διάφορες γωνίες πρόσπτωσης ορθογώνιων VGs.

Figure 5.6. Circulation decay nondimensionalized by free stream velocity U and boundary layer height (δ) for rectangular single VGs with $h=0.92\delta$

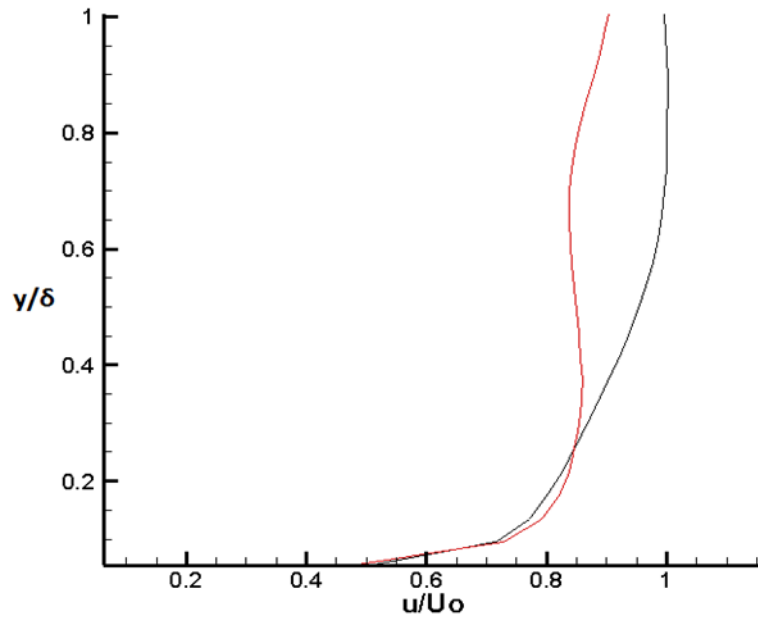
Το διάγραμμα της κυκλοφορίας η οποία μας δίνει και την ισχύ του στροβίλου, δείχνει ξεκάθαρα ότι μεγαλύτερη γωνία πρόσπτωσης οδηγεί σε ισχυρότερο στρόβιλο, με σημαντικότερη την επίδραση της ημιακτίνας στην αύξηση αυτή της ισχύος.

Προφίλ οριακού στρώματος

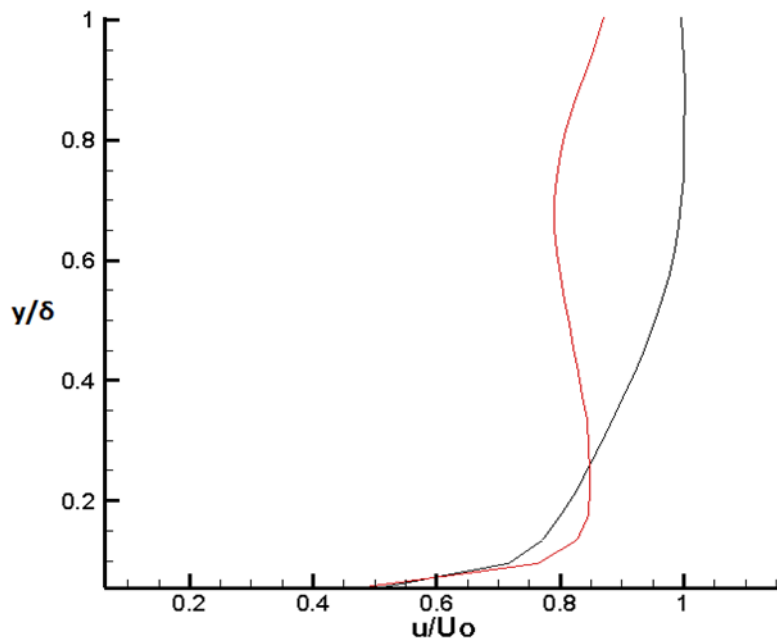
Πιο πάνω αναφέρθηκε ότι η ισχύς του στροβίλου εκφράζεται με τη κυκλοφορία του η οποία εξαρτάται από τη μέγιστη τιμή στροβιλότητας και την ημιακτίνα. Το κατά πόσο είναι αποτελεσματικός, όμως, ένας στρόβιλος εξαρτάται από το πόσο επιδρά στο οριακό στρώμα ενισχύοντας το. Η επίδραση αυτή μπορεί να γίνει αντιληπτή αν δείξουμε στο ίδιο διάγραμμα το προφίλ του οριακού στρώματος με και χωρίς τη παρουσία VG. Στην Εικόνα 5.7 παρουσιάζονται τα προφίλ οριακού στρώματος για κάθε ένα από τα τρία ορθογώνια VG που χρησιμοποιήθηκαν μαζί με το προφίλ του οριακού στρώματος χωρίς τη παρουσία VG, στο 2ο επίπεδο μέτρησης. Για τη δημιουργία της καμπύλης έχουμε πάρει τη μέση τιμή της ταχύτητας u κατά τον άξονα z του επιπέδου μέτρησης.



α) $h=0.92\delta$, $\beta=15^\circ$



β) $h = 0.92\delta$, $\beta = 20^\circ$



γ) $h = 0.92\delta$, $\beta = 25^\circ$

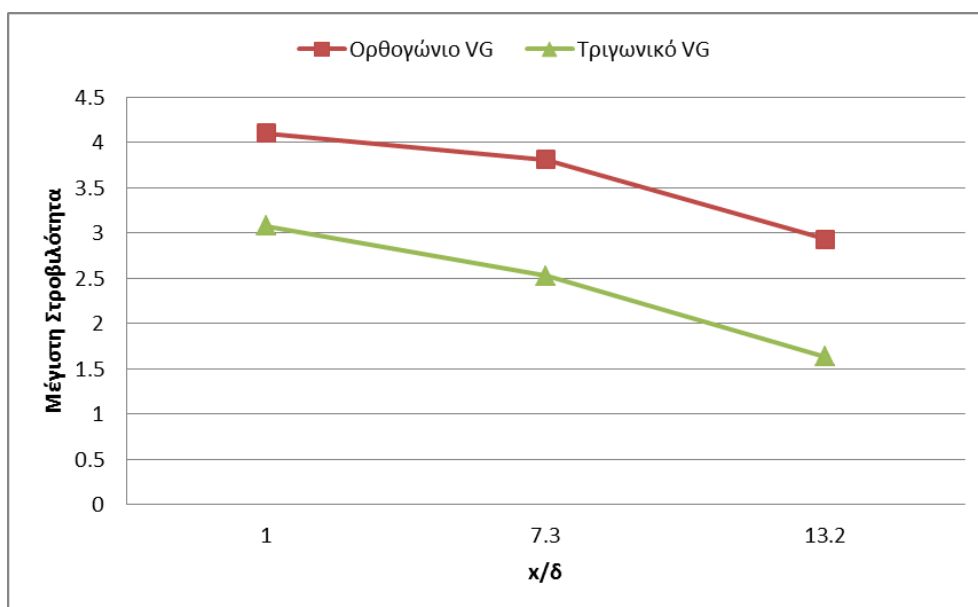
Εικόνα 5.7. Προφίλ οριακού στρώματος στο 2ο επίπεδο μέτρησης. Με μαύρο το προφίλ του οριακού στρώματος για ροή χωρίς έλεγχο και με κόκκινο το προφίλ του οριακού στρώματος με τη παρουσία VG.

Figure 5.7. Boundary layer profiles at the second measurement plane (7.2δ downstream). Black curve is for the boundary layer profile without VG and red curve for the boundary layer profile with VG.

Λόγω της μεταφοράς ορμής από τη περιοχή εκτός του οριακού στρώματος σε περιοχές κοντά στην επιφάνεια της πλάκας αναμένεται η κλίση της ταχύτητας να είναι εντονότερη στα προφίλ με παρουσία VG. Όσο πιο έντονη είναι η κλίση τόσο μεγαλύτερη η ικανότητα της ροής να αντισταθεί στην αποκόλληση. Βλέποντας τη παραπάνω εικόνα είναι φανερό ότι για μεγαλύτερη γωνία πρόσπτωσης η κλίση γίνεται εντονότερη, άρα και το VG πιο αποτελεσματικό. Για γωνία πρόσπτωσης 15° η αύξηση της ικανότητας για αντίσταση στην αποκόλληση είναι σχεδόν μηδαμινή. Επίσης πρέπει να αναφερθεί ότι μεγαλύτερη ικανότητα για αντίσταση στην αποκόλληση συνδέεται και με μεγαλύτερη οπισθέλκουσα.

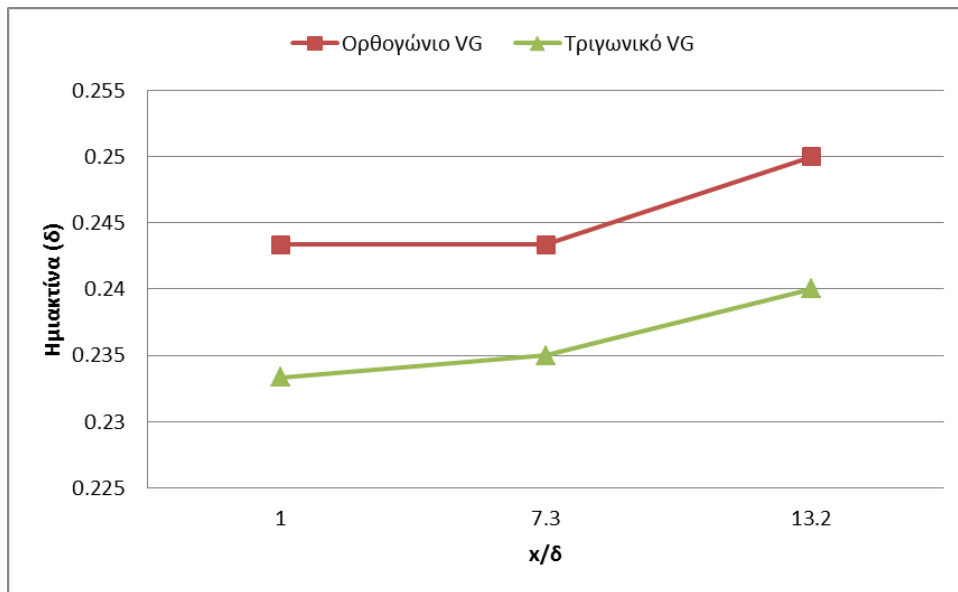
Σύγκριση Τριγωνικού-Ορθογωνίου VG.

Παρακάτω παρουσιάζουμε τα διαγράμματα στροβιλότητας, ημιακτίνας και κυκλοφορίας (Εικόνα 5.8, Εικόνα 5.9, Εικόνα 5.10) για τριγωνικό και ορθογώνιο VG με ύψος $0,92\delta$ και γωνία πρόσπτωσης $\beta=25^\circ$.



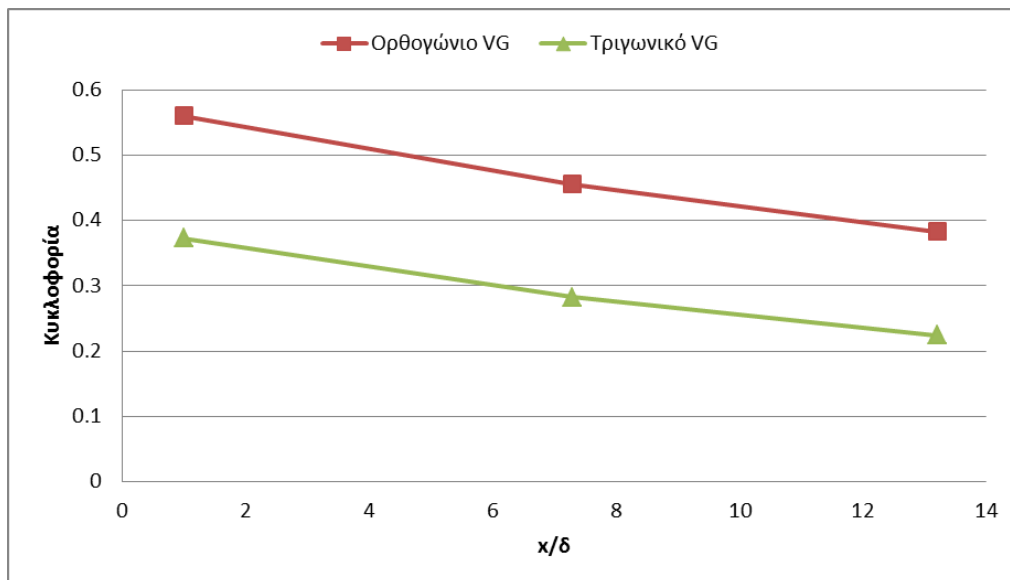
Εικόνα 5.8. Μεταβολή της μέγιστης τιμής στροβιλότητας συναρτήσει κατάντη απόστασης για τριγωνικό και ορθογώνιο VG ύψους $0,92\delta$ και γωνίας πρόσπτωσης 25° .

Figure 5.8. Peak Vorticity decay nondimensionalized by free stream velocity U and boundary layer height (δ) for rectangular (red line) and triangular (green line) VGs with $h=0.92\delta$ and $\beta=25^\circ$.



Εικόνα 5.9. Μεταβολή της ημισκτίνας συναρτήσει κατάντη απόστασης για τριγωνικό και ορθογώνιο VG υψους 0,92δ και γωνίας πρόσπτωσης 25°.

Figure 5.9 Half radius growth nondimensionalized by boundary layer height (δ) for rectangular (red line) and triangular (green line) VGs with $h=0.92\delta$ and $\beta=25^\circ$.



Εικόνα 5.10. Μεταβολή της κυκλοφορίας συναρτήσει κατάντη απόστασης για τριγωνικό και ορθογώνιο VG υψους 0,92δ και γωνίας πρόσπτωσης 25°.

Figure 5.10. Circulation decay nondimensionalized by free stream velocity U and boundary layer height (δ) for rectangular (red line) and triangular (green line) VGs with $h=0.92\delta$ and $\beta=25^\circ$.

Από τα παραπάνω διαγράμματα σύγκρισης τριγώνου-ορθογωνίου με ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά (ενδεικτικά παρουσιάζεται το συγκεκριμένο VG) φαίνεται ότι τριγωνικά και ορθογώνια έχουν εντελώς ανάλογη συμπεριφορά στην εξέλιξη του στροβίλου όσο κινούμαστε κατάντη με τα ορθογώνια να παράγουν

σαφώς μεγαλύτερο, ισχυρότερο και με μεγαλύτερη τιμή μέγιστης στροβιλότητας στρόβιλο.

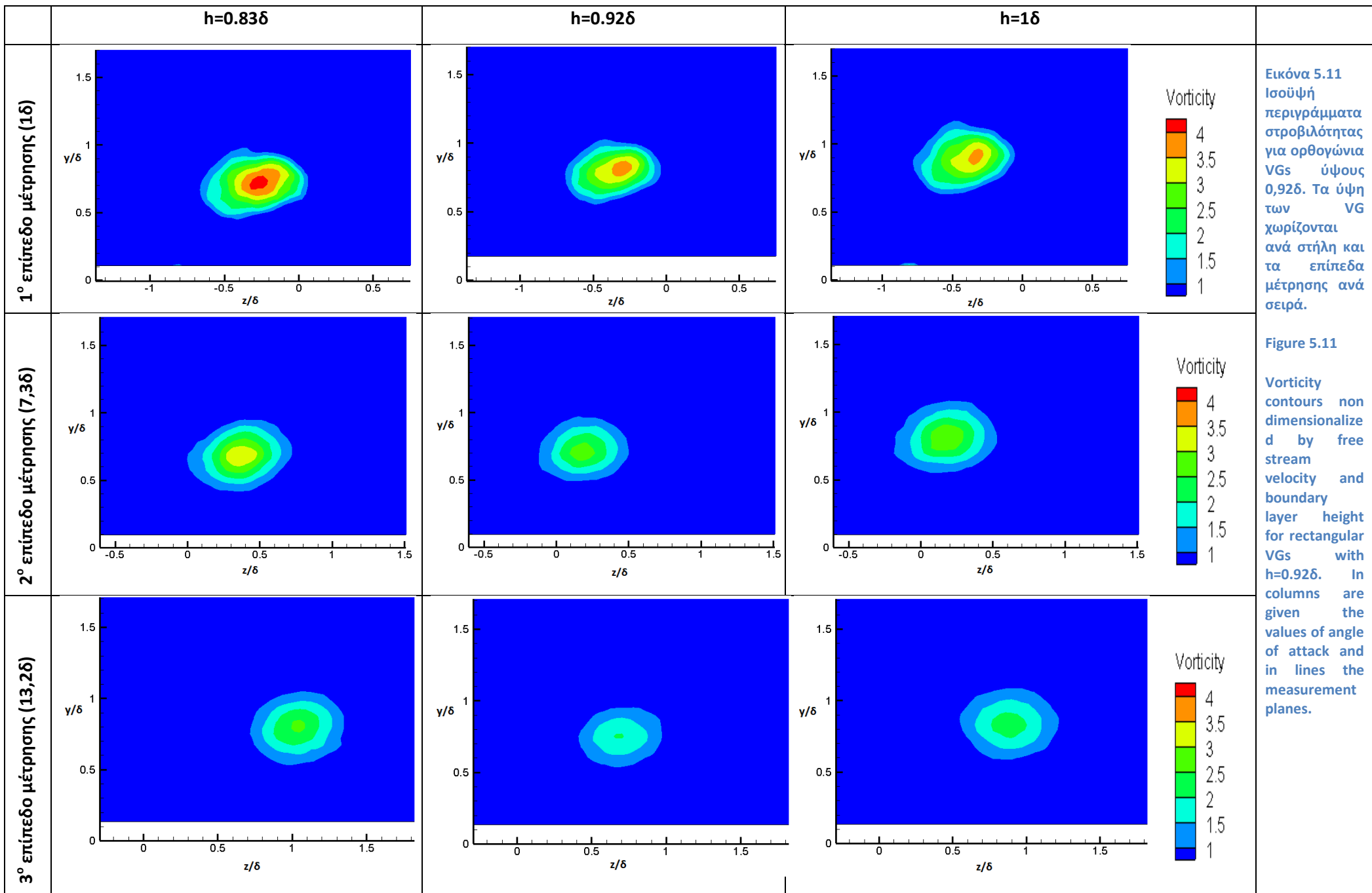
Επίδραση του ύψους του VG

Στην Εικόνα 5.11 παρουσιάζονται τα περιγράμματα ισοϋψούς στροβιλότητας για τα τρία ορθογώνια VGs ,που εξετάστηκαν στη μεταβολή της παραμέτρου του ύψους, στα τρία επίπεδα μέτρησης. Είναι φανερό, συγκρίνοντας την εικόνα 5.11 με την αντίστοιχη για τη μεταβολή της γωνίας (Εικόνα 5.1), ότι εδώ οι διαφορές είναι μικρότερες όσον αφορά τη μέγιστη τιμή στροβιλότητας και το μέγεθος των στρόβιλων και σχεδόν μηδαμινές όσον αφορά τη τροχιά του κέντρου του στρόβιλου.

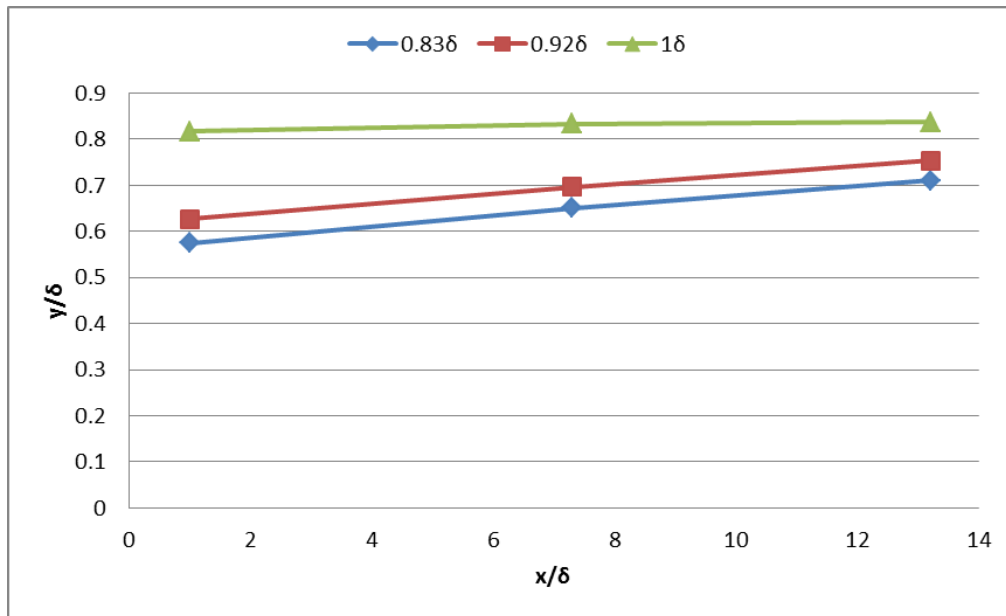
Παρατηρώντας τις ισοψείς βλέπουμε ότι η μέγιστη τιμή στροβιλότητας μειώνεται αυξάνοντας το ύψος του VG.

Επίσης, όσον αφορά το μέγεθος του στρόβιλου, το VG με ύψος 1δ δείχνει να παράγει μεγαλύτερο στρόβιλο ενώ τα άλλα δύο παρόμοιου μεγέθους.

Οι μεταβολές αυτές θα παρουσιαστούν και ποσοτικά με τα διαγράμματα που ακολουθούν.

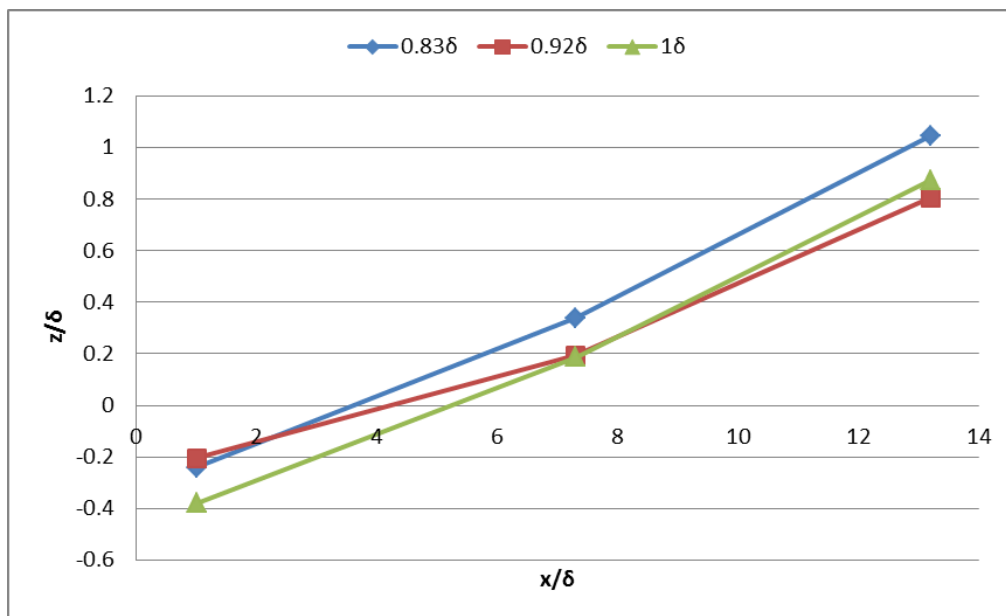


Ακολουθούν τα διαγράμματα μετατόπισης του κέντρου των στροβίλων κατά τον άξονα y (Εικόνα 5.12) και κατά τον άξονα z (Εικόνα 5.13).



Εικόνα 5.12. Μετατόπιση κέντρου στροβίλων κατά τον άξονα y συναρτήσει κατάντη απόστασης για τα διάφορα ύψη ορθογώνιων VGs.

Figure 5.12. Path of the vortex center in the y direction nondimensionalized by boundary layer height (δ) for rectangular single VGs with $\beta=25^\circ$.

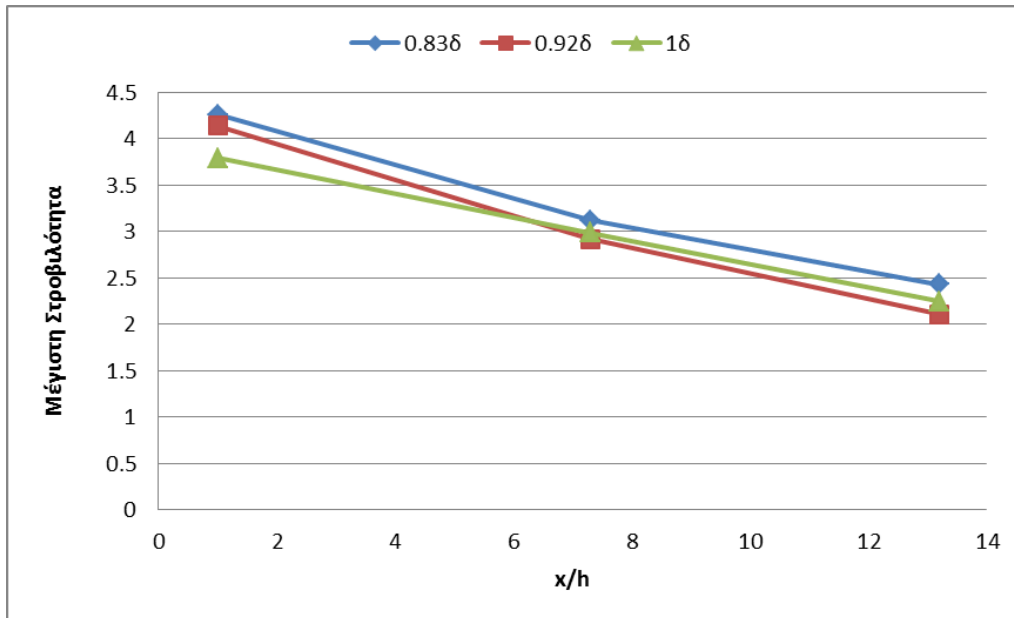


Εικόνα 5.13. Μετατόπιση κέντρου στροβίλων κατά τον άξονα z συναρτήσει κατάντη απόστασης για τα διάφορα ύψη ορθογώνιων VGs.

Figure 5.13. Path of the vortex center in the z direction nondimensionalized by boundary layer height (δ) for rectangular single VGs with $\beta=25^\circ$

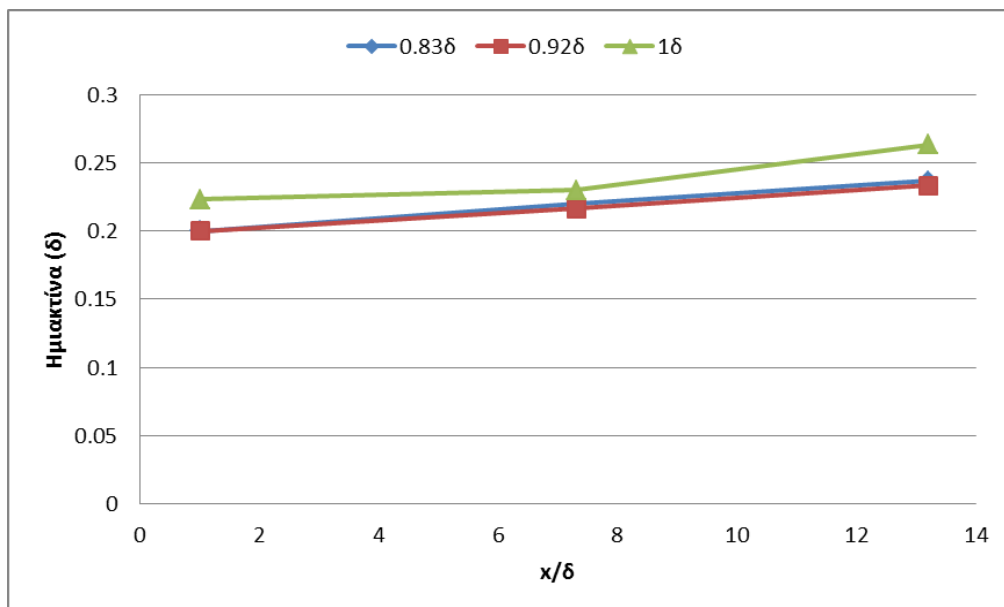
Από τα δύο αυτά διαγράμματα συμπεραίνουμε ότι για την ίδια γωνία πρόσπτωσης η μεταβολή του ύψους ελάχιστα επηρεάζει τη τροχιά του κέντρου του στροβίλου, κυρίως για ψηλότερο VG έχουμε επίσης στρόβιλο ψηλότερα.

Στα επόμενα διαγράμματα βλέπουμε τη μεταβολή της στροβιλότητας, της ημιακτίνας και της κυκλοφορίας συναρτήσει της απόστασης για τα διάφορα ύψη (Εικόνα 5.14, Εικόνα 5.15, Εικόνα 5.16).



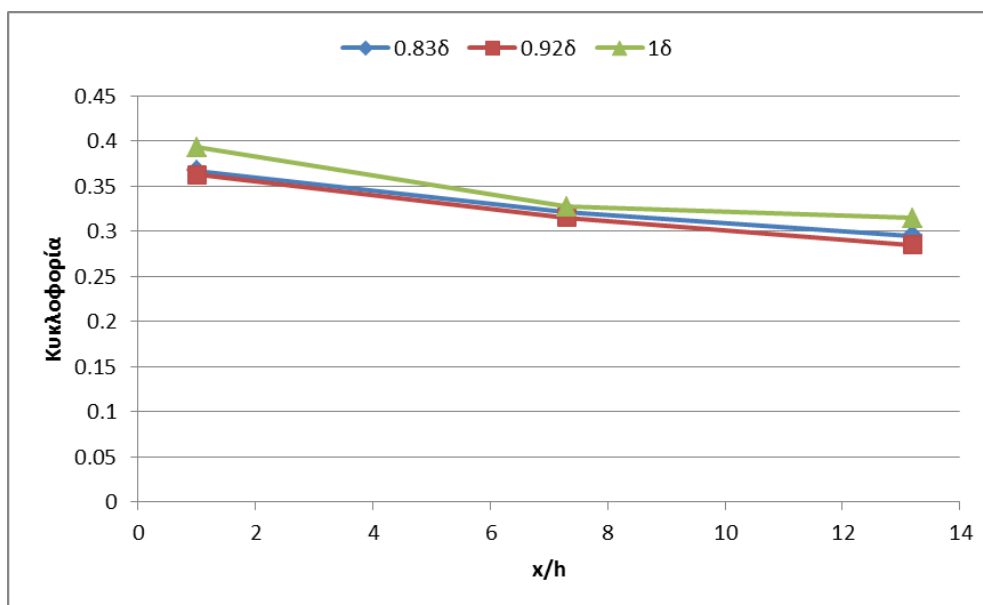
Εικόνα 5.14. Μεταβολή της μέγιστης τιμής στροβιλότητας συναρτήσει κατάντη απόστασης για τα διάφορα ύψη ορθογώνιων VGs.

Figure 5.14. Peak Vorticity decay nondimensionalized by free stream velocity U and boundary layer height (δ) for rectangular single VGs with $\beta=25^\circ$.



Εικόνα 5.15. Μεταβολή της ημιακτίνας συναρτήσει κατάντη απόστασης για τα διάφορα ύψη ορθογώνιων VGs.

Figure 5.15. Half Radius variation nondimensionalized by boundary layer height (δ) for rectangular single VGs with $\beta=25^\circ$.



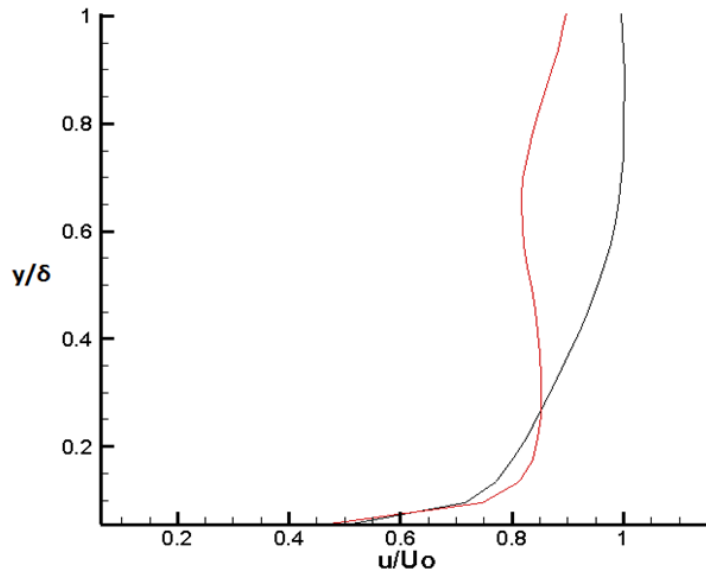
Εικόνα 5.16. Μεταβολή της κυκλοφορίας συναρτήσει κατάντη απόστασης για τα διάφορα ύψη ορθογώνιων VGs.

Figure 5.16. Circulation decay nondimensionalized by free stream velocity U and boundary layer height (δ) for rectangular single VGs with $\beta=25^\circ$.

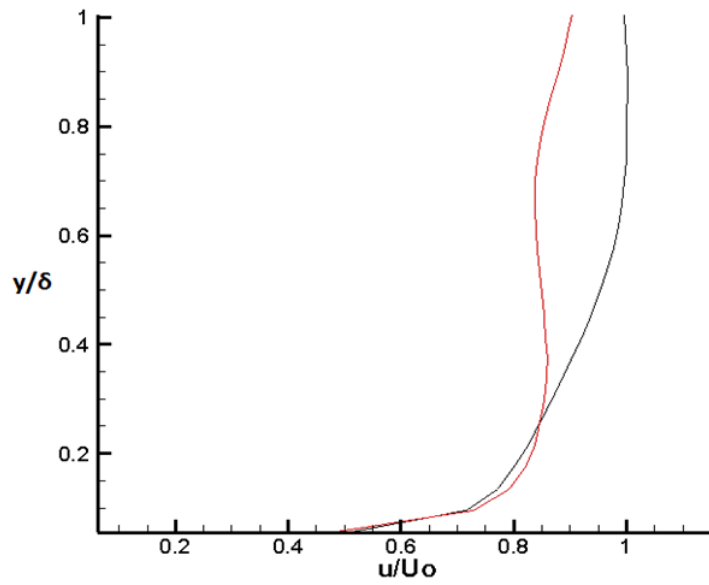
Οι διαφορές είναι μικρές όσον αφορά τις αδιάστατες στροβιλότητα, ημιακτίνα και κυκλοφορία. Το διάγραμμα μέγιστης τιμής στροβιλότητας επιβεβαιώνει αυτό που είδαμε και στα ισοϋψή περιγράμματα στροβιλότητας, ότι δηλαδή επηρεάζεται αρνητικά από την αύξηση του ύψους. Όσον αφορά το μέγεθος του στρόβιλου, το VG με ύψος 1δ παράγει το μεγαλύτερο στρόβιλο ενώ για τα ύψους $0,83\delta$ και $0,92\delta$ η διαφορά είναι μηδαμινή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το VG ύψους 1δ να παράγει τον ισχυρότερο στρόβιλο με το VG ύψους $0,83\delta$ να ακολουθεί ενώ το VG ύψους $0,92\delta$ να παράγει το λιγότερο ισχυρό στρόβιλο.

Διανομή οριακού στρώματος

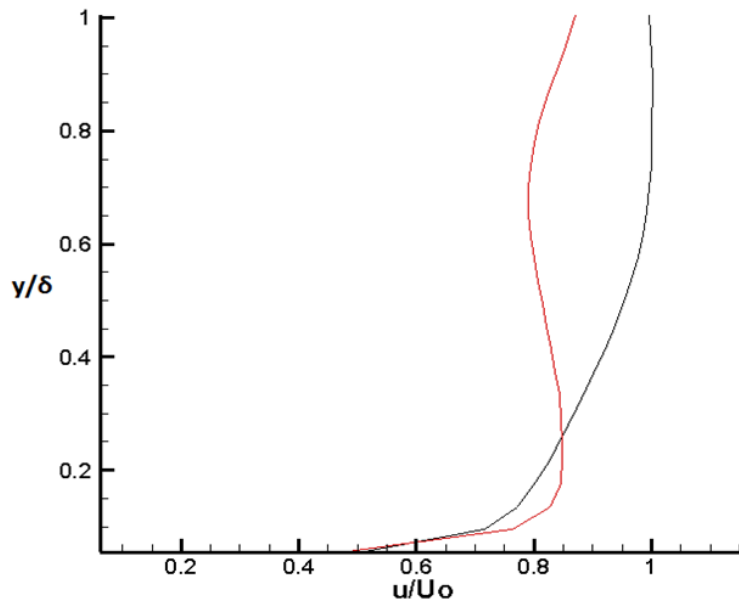
Ακολουθούν τα προφίλ του οριακού στρώματος για το δεύτερο επίπεδο μέτρησης ($7,3\delta$ κατάντη) με και χωρίς τη παρουσία VG, για τα τρία VG που εξετάζονται στη μεταβολή του ύψους.



$\alpha) h=0.836, \beta=20^\circ$



$\beta) h=0.926, \beta=20^\circ$



γ) $h=1\delta$, $\beta=20^\circ$

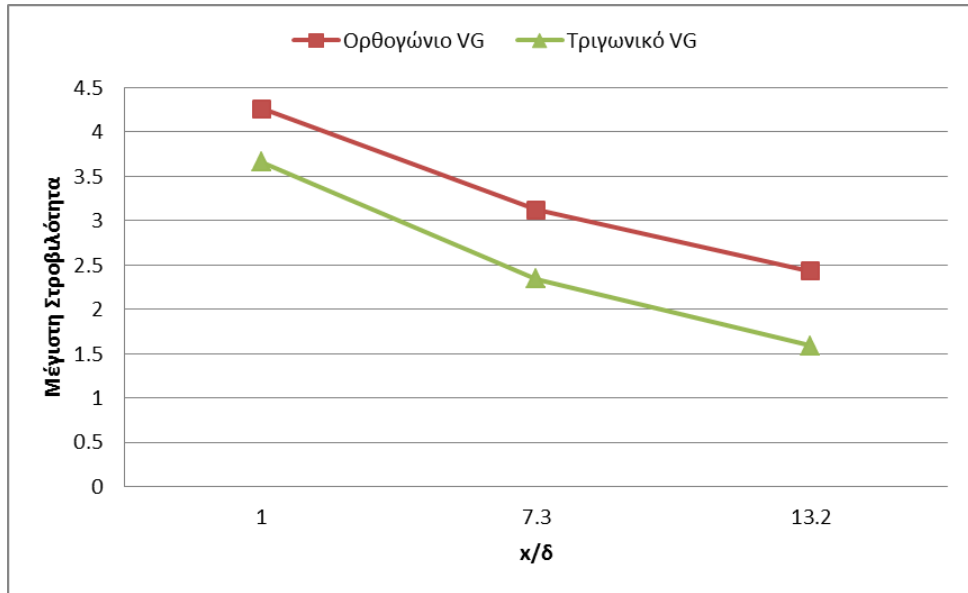
Εικόνα 5.17. Προφίλ οριακού στρώματος στο 2ο επίπεδο μέτρησης. Με μαύρο το προφίλ του οριακού στρώματος για ροή χωρίς έλεγχο και με κόκκινο το προφίλ του οριακού στρώματος με τη παρουσία VG.

Figure 5.17. Boundary layer profiles at the second measurement plane (7.2δ downstream). Black curve is for the boundary layer profile without VG and red curve for the boundary layer profile with VG.

Βλέποντας τα προφίλ παρατηρούμε ότι την πιο έντονη επίδραση έχει το VG ύψους 1δ ενώ ακολουθεί το VG με ύψος $0,83\delta$ και τη μικρότερη επίδραση έχει το VG ύψους $0,92\delta$. Το γεγονός αυτό έρχεται σε συμφωνία με την ισχύ (κυκλοφορία) των στροβίλων στη θέση αυτή όπως παρουσιάστηκε παραπάνω.

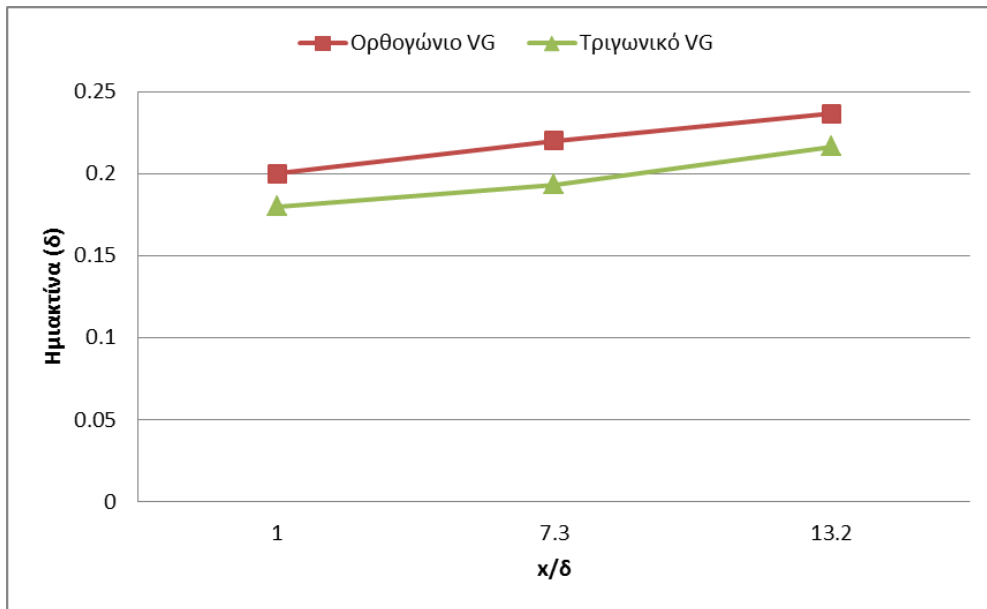
Σύγκριση Τριγωνικού-Ορθογώνιου VG

Παρακάτω ακολουθούν τα διαγράμματα στροβιλότητας ημισκίνας και κυκλοφορίας για τρίγωνο και ορθογώνιο VG ύψους 0.83δ και γωνίας πρόσπτωσης 20° (Εικόνα 5.18,Εικόνα 5.19,Εικόνα 5.20).



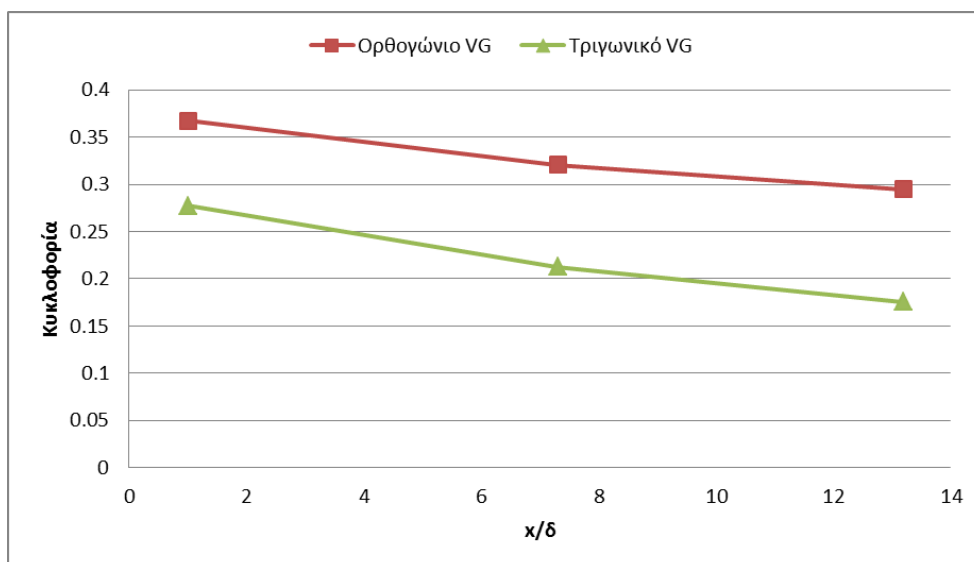
Εικόνα 5.18. Μεταβολή της μέγιστης τιμής στροβιλότητας για ορθογώνιο και τριγωνικό VG ύψους $h=0,83\delta$ και γωνίας πρόσπτωσης $\beta=20^\circ$.

Figure 5.18. Peak Vorticity decay nondimensionalized by free stream velocity U and boundary layer height (δ) for rectangular (red line) and triangular (green line) VGs with $h=0.83\delta$ and $\beta=20^\circ$.



Εικόνα 5.19. Μεταβολή της ημιακτίνας συναρτήσει κατάντη απόστασης για τριγωνικό και ορθογώνιο VG ύψους $0,83\delta$ και γωνίας πρόσπτωσης 20° .

Figure 5.19. Half Radius variation nondimensionalized by boundary layer height (δ) for rectangular (red line) and triangular (green line) VGs with $h=0.83\delta$ and $\beta=20^\circ$.



Εικόνα 5.20. Μεταβολή της Κυκλοφορίας συναρτήσει κατάντη απόστασης για τριγωνικό και ορθογώνιο VG υψους 0,92δ και γωνίας πρόσπτωσης 25°.

Figure 5.20. Circulation decay nondimensionalized by free stream velocity U and boundary layer height (δ) for rectangular (red line) and triangular (green line) VGs with h=0.83δ and β=20°.

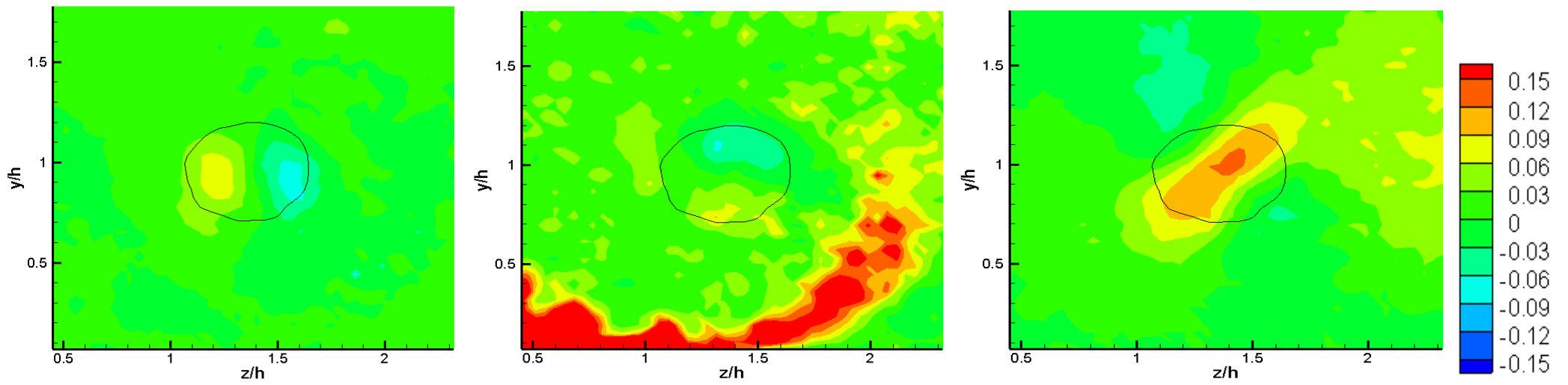
Τα παραπάνω διαγράμματα επιβεβαιώνουν ότι τα συμπεράσματα για τα ορθογώνια ισχύουν και για τα τριγωνικά VGs ότι δηλαδή Οι διαφορές είναι μικρές όσον αφορά τις αδιάστατες στροβιλότητα, ημιακτίνα και κυκλοφορία ενώ το VG ύψους 1δ παράγει τον ισχυρότερο στρόβιλο με το VG ύψους 0,83δ να ακολουθεί ενώ το VG ύψους 0,92δ να παράγει το λιγότερο ισχυρό στρόβιλο.

Τάσεις Reynolds

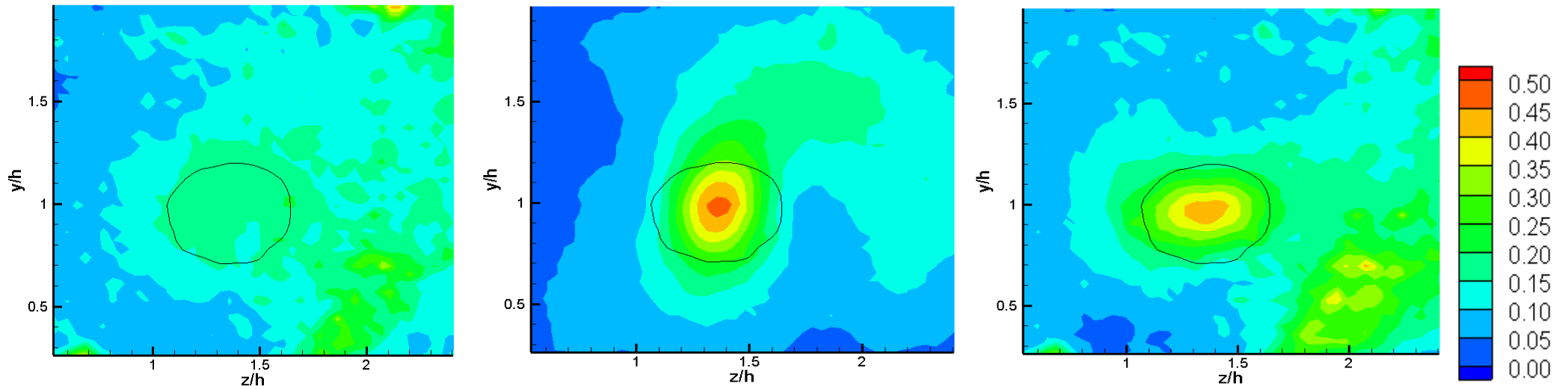
Με βάση τη περιγραφή των τυρβωδών ροών κατά Reynolds η ταχύτητα και τα υπόλοιπα βασικά μεγέθη διασπώνται στη μέση χρονικά τιμή \bar{A} και τη διακύμανση A' : $A = \bar{A} + A'$. Εφαρμόζοντας τη διάσπαση κατά Reynolds στις εξισώσεις διατήρησης της μηχανικής των ρευστών λαμβάνουμε τις μέσες εξισώσεις διατήρησης, οι οποίες διαφέρουν από τις αρχικές ως προς τους όρους των λεγόμενων Τάσεων Reynolds και οι οποίοι είναι οι : $u'^2, v'^2, w'^2, u'v', u'w', v'w'$. [24]

Η ύπαρξη αυτών των επιπλέον όρων χωρίς την ύπαρξη ισάριθμων εξισώσεων είναι που κάνει τη μελέτη των τυρβωδών ροών τόσο δύσκολη. Τα διάφορα μοντέλα τύρβης που προτείνονται είναι διαφορετικές προσεγγίσεις στην εκτίμηση των τιμών των τάσεων Reynolds. Αναλύοντας τα πειραματικά δεδομένα μπορούμε να τις υπολογίσουμε όπως και να αξιολογήσουμε τη αποδοτικότητα των μοντέλων τύρβης

που προτείνονται. Παρακάτω παρουσιάζονται οι τάσεις Reynolds για ορθογώνιο VG ύψους 0,92δ και γωνίας πρόσπτωσης 25° στο τρίτο επίπεδο μέτρησης (Εικόνα 5.21,Εικόνα 5.22).



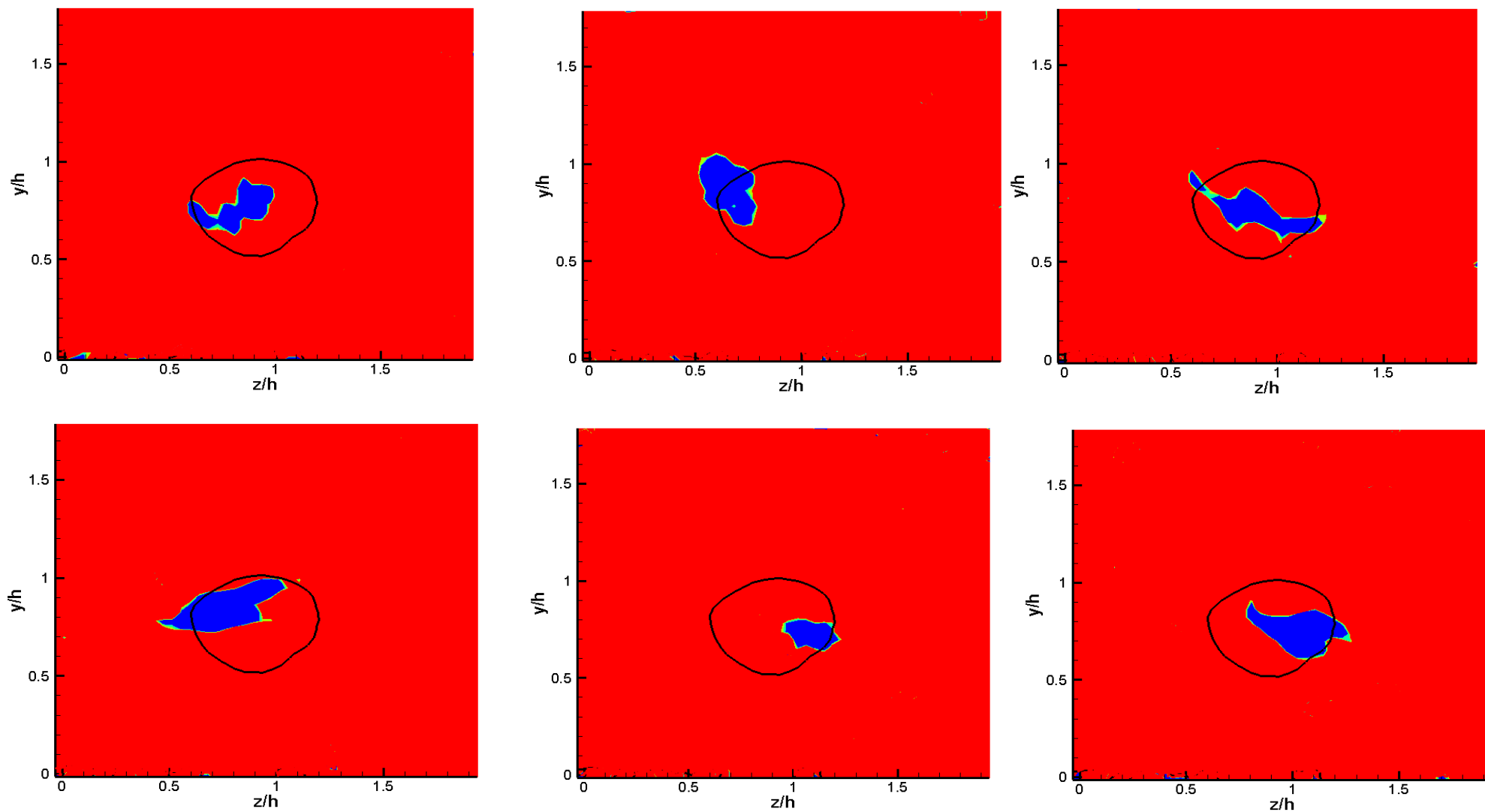
Εικόνα 5.21. Contours των διαμηθικών τάσεων Reynolds. Αριστερά: $-u'v'$, κέντρο: $-u'w'$, δεξιά: $-v'w'$. Η μαύρη γραμμή προσδιορίζει την ημιακτίνα του στροβίλου.
 Figure 5.21. Shear Reynolds stresses contours. Left: $-u'v'$, center: $-u'w'$, right: $-v'w'$. Black curve is for the Vortex area.



Εικόνα 5.22. Contours των κάθετων τάσεων Reynolds. Αριστερά: u'^2 , κέντρο: v'^2 , δεξιά: w'^2 . Η μαύρη γραμμή προσδιορίζει την ημιακτίνα του στροβίλου.
 Figure 5.22. Normal Reynolds stresses contours. Left: u'^2 , center: v'^2 , right: w'^2 . Black curve is for the Vortex area.

Παρατηρώντας την εικόνα 5.21, αριστερά βλέπουμε ότι στο αριστερά και δεξιά κομμάτι της περιοχής που οριοθετεί το στρόβιλο υπάρχουν περιοχές με αντίθετες τιμές των διατμητικών τάσεων $-u'v'$ ενώ αντίστοιχα στη κεντρική εικόνα, παρατηρούμε ότι υπάρχουν στο πάνω και στο κάτω μέρος περιοχές με έντονες και αντίθετες τιμές των διατμητικών τάσεων $-u'w'$.

Όσον αφορά τη εικόνα 5.22, βλέπουμε ότι προς το κέντρο του στροβίλου συναντάμε περιοχές με έντονες τις κάθετες τάσεις Reynolds v'^2 και w'^2 (κεντρική και δεξιά εικόνα αντίστοιχα). Αυτό οφείλεται στο ότι η θέση του στροβίλου μεταβάλλεται στιγμιαία συνεχώς. Αυτό γίνεται αντιληπτό αν δούμε τα contours στροβιλότητας στην ίδια θέση για έξι τυχαία ζεύγη φωτογραφιών από τα 500 που παίρναμε σε κάθε περίπτωση (Εικόνα 5.23). Με σκούρο μπλε είναι οι περιοχές μέγιστης στροβιλότητας στο κέντρο των οποίων θεωρούμε ότι είναι το κέντρο του στροβίλου ενώ η κυκλική γραμμή συμβολίζει την ημιακτίνα του στροβίλου όπως προκύπτει από την ανάλυση και των 500 ζευγών φωτογραφιών.



Εικόνα 5.23. Contours στροβιλότητας για έξι τυχαία ζεύγη φωτογραφιών στο ίδιο επίπεδο μέτρησης και για το ίδιο VG για το οποίο παρουσιάζονται οι τάσεις Reynolds. Με μπλε χρώμα είναι η περιοχή έντονης στροβιλότητας μέσα στην οποία βρίσκεται το κέντρο του στροβίλου. Η κυκλικής μορφής γραμμή συμβολίζει την ημιακτίνα του στροβίλου που προκύπτει από την ανάλυση όλων των φωτογραφιών.

Figure 5.23. Vorticity contours for six random pair of PIV photos for the same VG and measurement plane as the Reynolds Stresses analysis has been made. With blue color is pictured the area of high vorticity whose center is the vortex center. The black line is for the vortex area. It is obvious that the vortex center is not stable. It moves within a specific area.

5.2 Ζεύγη VGs

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο τα VGs που εξετάστηκαν κατά ζεύγη έχουν όλα τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά: μήκος $l=52\text{mm}$, ύψος $h=27,5\text{mm}=0,928$, γωνία πρόσπτωσης $\beta=25^\circ$. Εδώ εξετάστηκε το πώς επηρεάζει τους δύο στροβίλους η αλληλεπίδραση μεταξύ τους για τις τρεις διατάξεις (συγκλίνοντα, αποκλίνοντα, παράλληλα) και για τρεις διαφορετικές αποστάσεις μεταξύ των VGs (1h, 2h και 3h).

Η βιβλιογραφία αναφέρει ότι για να είναι αξιόπιστα τα αποτελέσματα του stereo PIV σε περιπτώσεις στροβίλων πρέπει η χωρική ανάλυση να είναι τέτοια που να έχουμε τουλάχιστον δέκα διανύσματα στην ημιακτίνα του στροβίλου. Στη περίπτωση των μονών VG αυτό ήταν δυνατό. Στα ζεύγη όμως επειδή θέλαμε να έχουμε όσο το δυνατόν στο ίδιο επίπεδο μέτρησης και τους δύο στροβίλους έχουμε δύο με τρία διανύσματα στην ημιακτίνα. Αυτό οδήγησε σε αρκετά μεγάλο σφάλμα. Μπορούμε όμως να βγάλουμε ποιοτικά συμπεράσματα για τον πως αλληλεπιδρούν σε κάθε περίπτωση οι δύο στροβίλοι σε σύγκριση και με το όταν έχουμε έναν στροβίλο μόνο του.

Στα συγκλίνοντα θα παρουσιαστούν αναλυτικά όλες οι περιπτώσεις τόσο στα ορθογώνια όσο και στα τριγωνικά VGs καθώς αφού οι στροβίλοι προσεγγίζουν ο ένας τον άλλο η αλληλεπίδραση είναι έντονη και παρουσιάζει ενδιαφέρον.

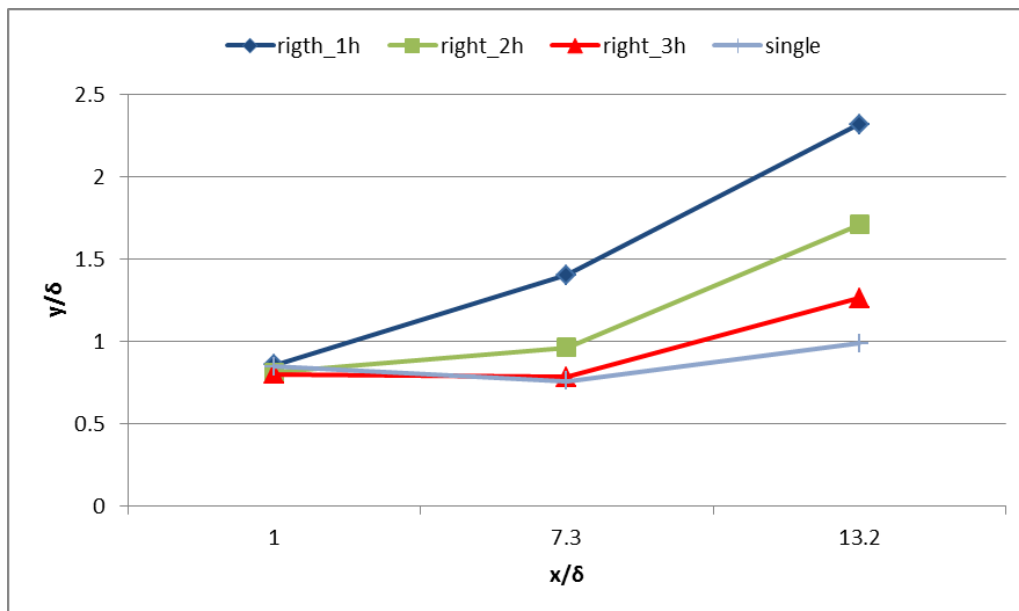
Παράλληλα θα παρουσιαστούν μόνο τα περιγράμματα στροβιλότητας για τα ορθογώνια VGs με μεταξύ τους απόσταση 1h. Για μεγαλύτερες αποστάσεις τα περιγράμματα είναι παρόμοια ενώ για τα τριγωνικά VGs τα περιγράμματα είχαν έντονο θόρυβο.

Στα αποκλίνοντα, καθώς οι στροβίλοι απομακρύνονται μεταξύ τους η αλληλεπίδραση είναι αμελητέα. Για αυτό θα παρουσιαστεί μόνο η περίπτωση απόστασης μεταξύ των VG ίση με 1h για τριγωνικά και ορθογώνια.

Συγκλίνοντα VGs

Ορθογώνια

Το πρώτο που παρατηρούμε στα συγκλίνοντα ζεύγη, έχει να κάνει με την τροχιά των κέντρων των στροβίλων κατά τον άξονα γ (Εικόνα.5.24):

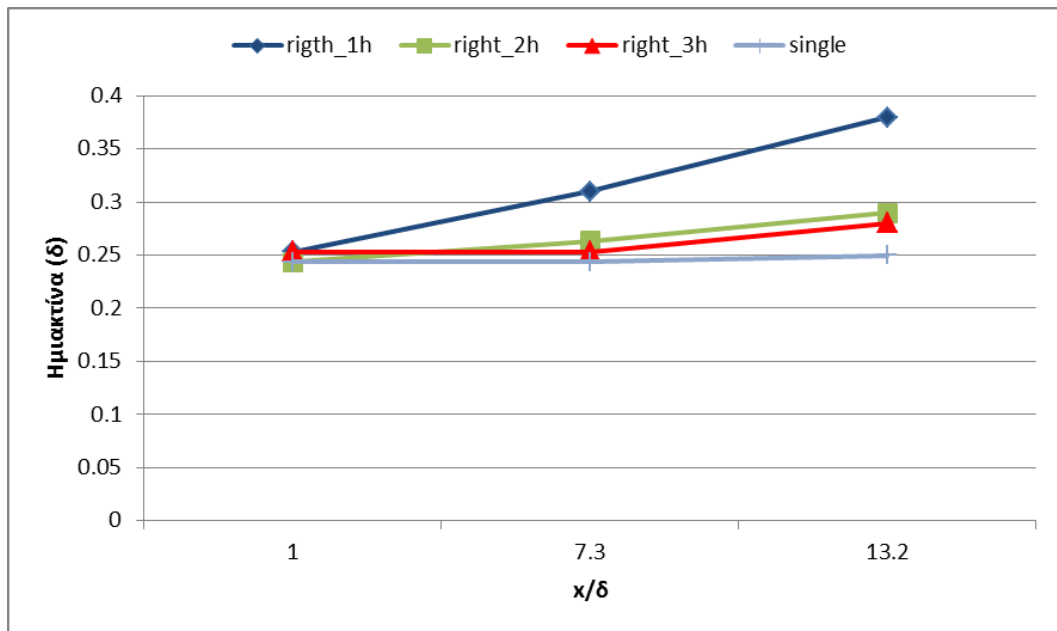


Εικόνα.5.24. Μετατόπιση κέντρου στροβίλων κατά τον άξονα y συναρτήσει κατάντη απόστασης για τις διάφορες τιμές της απόστασης μεταξύ των ορθογώνιων συγκλίνοντων VG.

Figure 5.24.Path of right vortex center nondimensionalized by boundary layer height (δ) for the three distances (d) between rectangular VGs pairs with common flow up .

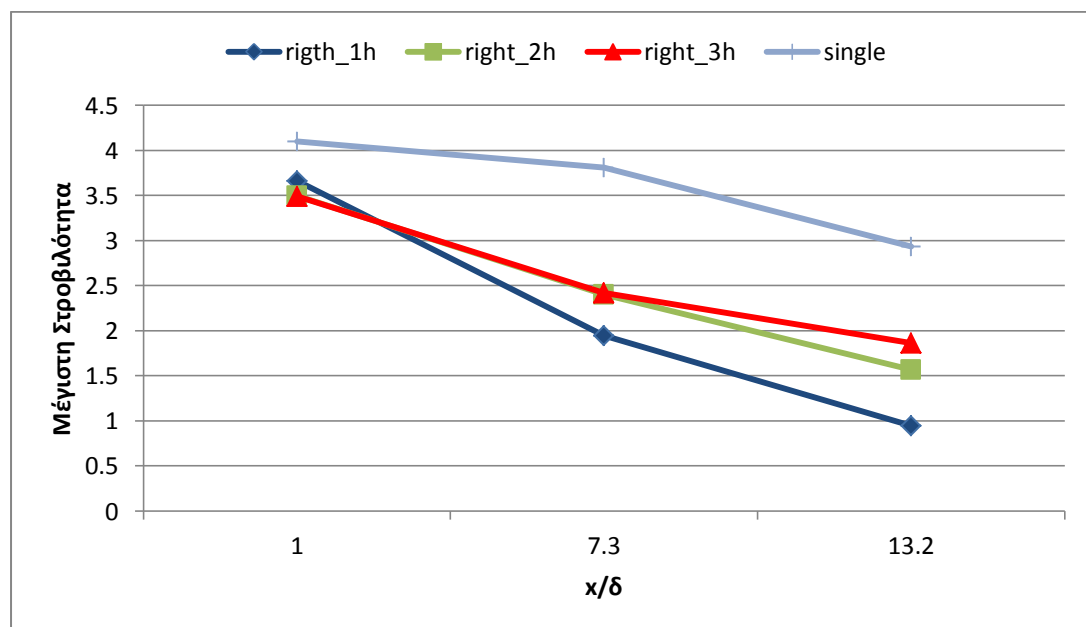
Όπως φαίνεται στο διάγραμμα οι δύο στρόβιλοι σπρώχνουν ο ένας τον άλλο προς τα πάνω. Η αλληλεπίδραση αυτή γίνεται πιο έντονη όσο κινούμαστε κατάντη γιατί οι στρόβιλοι ακολουθούν μια συγκλίνουσα τροχιά οπότε προσεγγίζουν ο ένας τον άλλο και η αλληλεπίδραση μεταξύ τους γίνεται ισχυρότερη. Φυσικά όσο μικρότερη είναι η αρχική τους απόσταση τόσο μεγαλύτερη η αλληλεπίδραση με αποτέλεσμα οι στρόβιλοι για απόσταση μεταξύ των VGs 1h να φτάνουν ψηλότερα και για 3h χαμηλότερα , πάντα όμως πιο ψηλά απ όσο φτάνει ο στρόβιλος που είναι μόνος του.

Επόμενα διάγραμματα είναι αυτά της ημιακτίνας (για τον έναν από τους δύο στροβίλους) και της στροβιλότητας (Εικόνα 5.25,Εικόνα 5.26).



Εικόνα 5.25. Μεταβολή της ημιακτίνας συναρτήσει κατάντη απόστασης για τις διάφορες τιμές της απόστασης μεταξύ των ορθογώνιων συγκλίνοντων VG.

Figure 5.25. Half Radius variation of right vortex nondimensionalized by boundary layer height (δ) for the three distances (d) between rectangular VGs pairs with common flow up.



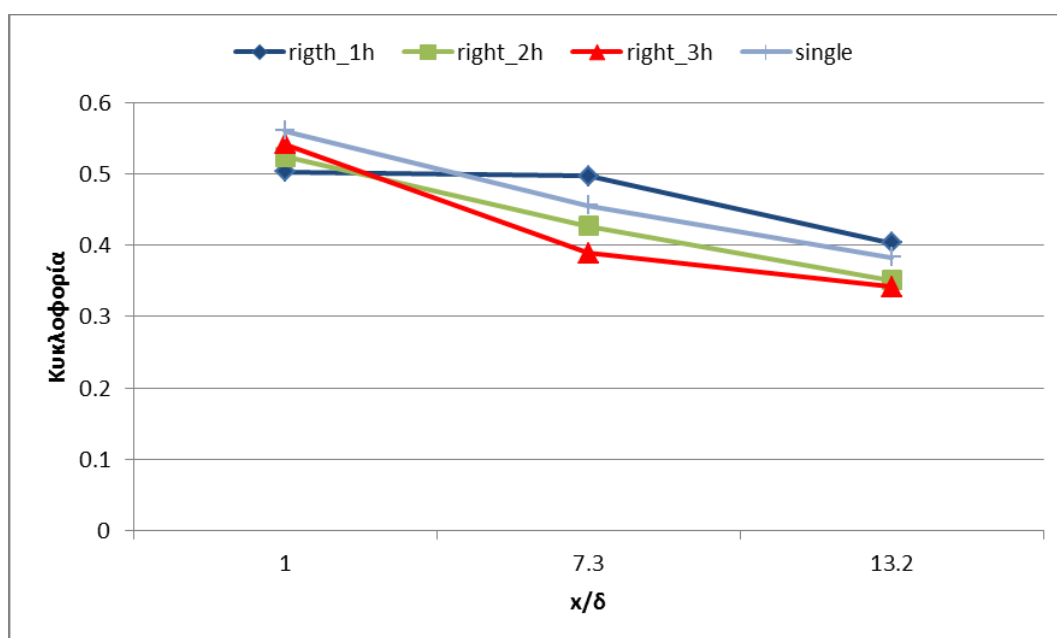
Εικόνα 5.26. Μεταβολή της μέγιστης τιμής στροβιλότητας συναρτήσει κατάντη απόστασης για τις διάφορες τιμές της απόστασης μεταξύ των ορθογώνιων συγκλίνοντων VG.

Figure 5.26. Vorticity of both vortices nondimensionalized by boundary layer height (δ) and free stream velocity (U) for the three distances (d) between rectangular VGs pairs with common flow up.

Παρατηρώντας το διάγραμμα ημιακτίνας βλέπουμε ότι όσο μεγαλώνει η μεταξύ τους απόσταση τόσο μεγαλώνει η ημιακτίνα των στροβίλων, με τους στροβίλους με απόσταση 1h να έχουν στο τρίτο επίπεδο μεγάλη διαφορά, περίπου 35%, από τους στροβίλους που δημιουργήθηκαν από τα VGs με απόσταση 2h και 3h. Αυτό οφείλεται στη μεγαλύτερη μετατόπιση που έχουν στον άξονα y , με αποτέλεσμα να απομακρύνονται από το κάτω στερεό όριο κοντά στο οποίο οι συνεκτικές τάσεις κυριαρχούν και παίζουν το βασικότερο ρόλο στην ανάπτυξη (διάχυση) του στροβίλου. Για αυτό το λόγο και ο στρόβιλος που είναι μόνος του και το κέντρο του είναι πιο χαμηλά έχει μικρότερη ημιακτίνα όπως φαίνεται και στο διάγραμμα.

Αντίστροφα, η κοντινή απόσταση των στροβίλων επιδρά αρνητικά στη μέγιστη στροβιλότητα τους [13] για αυτό και στους στροβίλους με απόσταση 1h μειώνεται πιο απότομα η μέγιστη στροβιλότητα από ότι για 2h και 3h αντίστοιχα. Επίσης, οι στρόβιλοι που είναι σε ζεύγη έχουν εμφανώς χαμηλότερη τιμή μέγιστης στροβιλότητας από το στρόβιλο που είναι μόνος του.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το διάγραμμα της κυκλοφορίας για έναν από τους δύο στροβίλους (Εικόνα 5.27):



Εικόνα 5.27. Μεταβολή της κυκλοφορίας συναρτήσει κατάντη απόστασης για τις διάφορες τιμές της απόστασης μεταξύ των ορθογώνιων συγκλίνοντων VG.

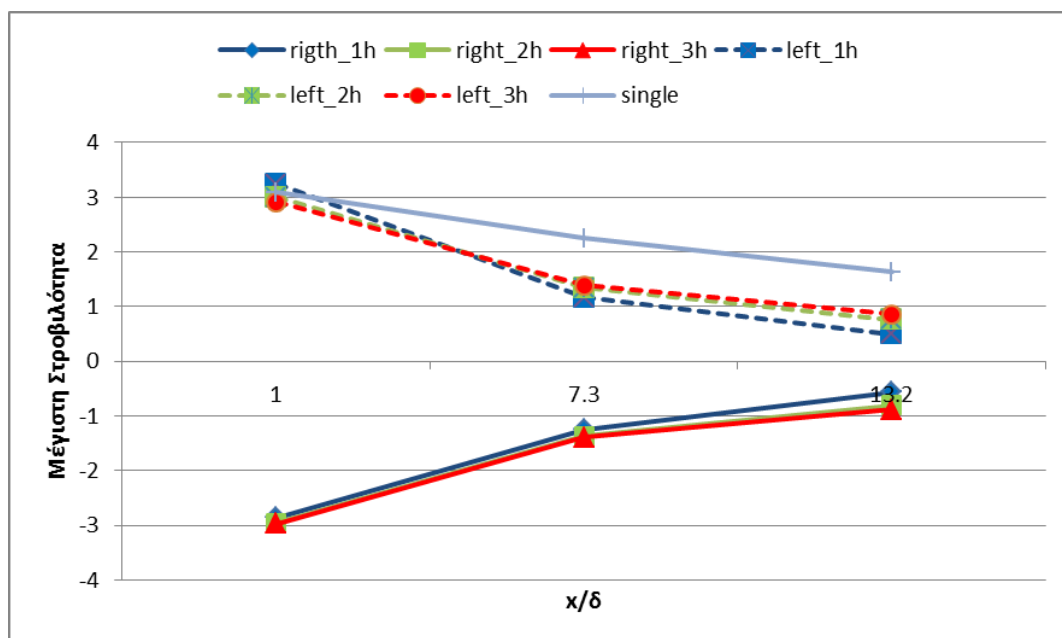
Figure 5.27. Circulation of right vortex nondimensionalized by boundary layer height (δ) and free stream velocity (U) for the three distances (d) between rectangular VG pairs with common flow up.

Όσον αφορά την κυκλοφορία, η οποία καθορίζεται από τη στροβιλότητα και από την ημιακτίνα, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι για απόσταση μεταξύ των VGs 2h και 3h η μείωση της στροβιλότητας αποδεικνύεται πιο καθοριστική από την αύξηση της ημιακτίνας με αποτέλεσμα οι στρόβιλοι να έχουν μικρότερη ισχύ από τον μόνο

στρόβιλο (περίπου 12%) σε όλες τις θέσεις μέτρησης. Αντίθετα για απόσταση μεταξύ των VGs 1h η μειωμένη στροβιλότητα στο πρώτο επίπεδο έχει σαν αποτέλεσμα επίσης μικρότερη ισχύ στροβίλου, στην συνέχεια όμως η έντονη αύξηση της ημιακτίνας λόγω μεγαλύτερης απόστασης από έδαφος οδηγεί σε ισχυρότερο στρόβιλο σε σχέση με το μόνο VG με μία αύξηση περίπου στη κυκλοφορία.

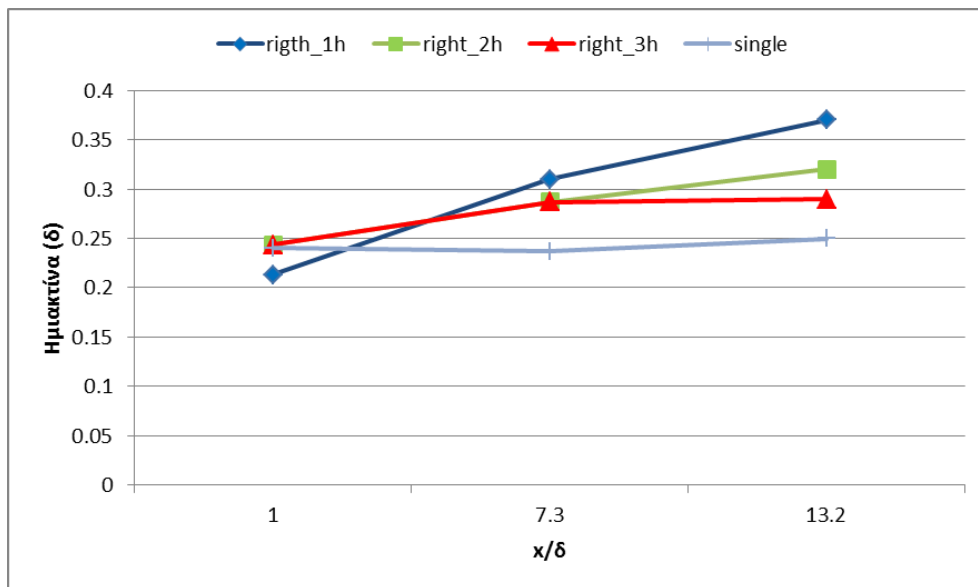
Τριγωνικά VGs

Παραθέτουμε στη συνέχεια διαγράμματα στροβιλότητας ημιακτίνας και κυκλοφορίας για τα ζεύγη τριγωνικών VG (Εικόνα 5.28,Εικόνα 5.29,Εικόνα 5.30).



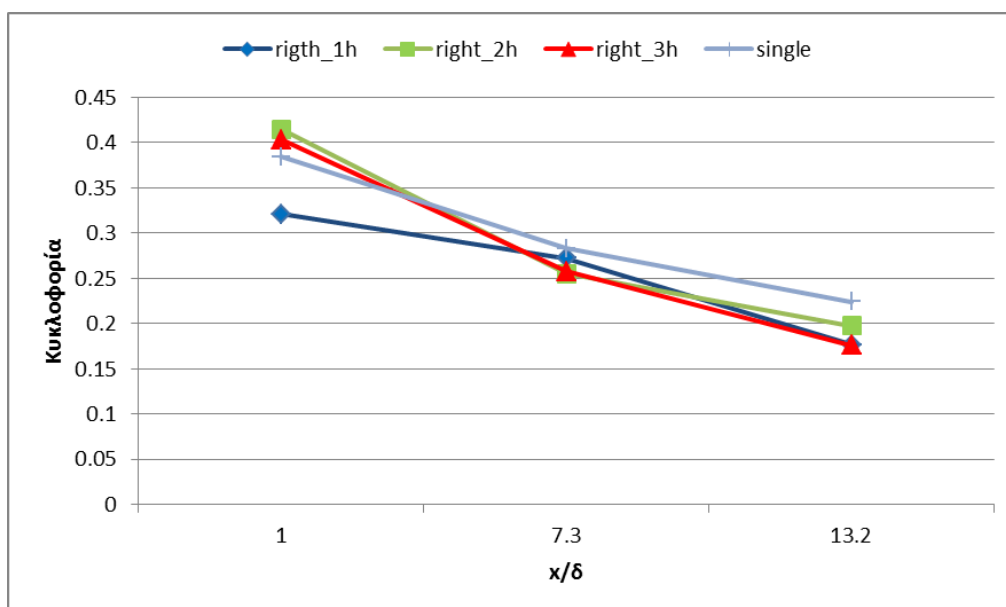
Εικόνα 5.28. Μεταβολή της μέγιστης τιμής στροβιλότητας συναρτήσει κατάντη απόστασης για τις διάφορες τιμές της απόστασης μεταξύ των ορθογώνιων συγκλίνοντων VG.

Figure 5.28. Vorticity of both vortices nondimensionalized by boundary layer height (δ) and free stream velocity (U) for the three distances (d) between triangular VGs pairs with common flow up.



Εικόνα 5.29. Μεταβολή της ημιακτίνας συναρτήσει κατάντη απόστασης για τις διάφορες τιμές της απόστασης μεταξύ των τριγωνικών συγκλίνοντων VG.

Figure 5.29. Half Radius variation of right vortex nondimensionalized by boundary layer height (δ) for the three distances (d) between triangular VGs pairs with common flow up.



Εικόνα 5.30. Μεταβολή της κυκλοφορίας συναρτήσει κατάντη απόστασης για τις διάφορες τιμές της απόστασης μεταξύ των τριγωνικών συγκλίνοντων VG.

Figure 5.30. Circulation of right vortex nondimensionalized by boundary layer height (δ) and free stream velocity (U) for the three distances (d) between triangular VGs pairs with common flow up.

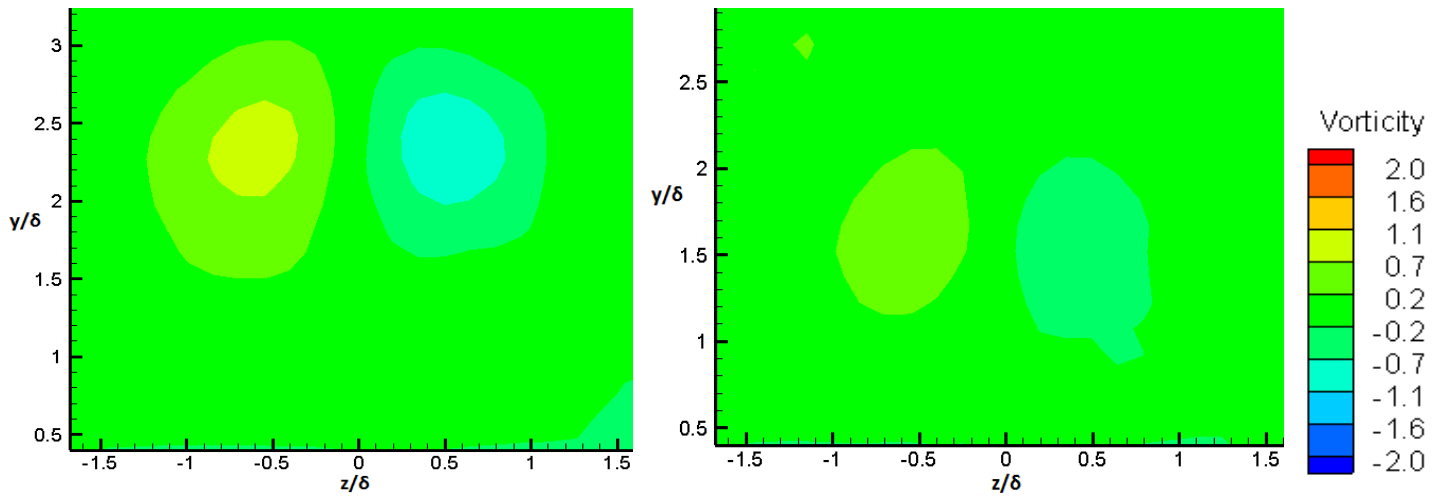
Από τα παραπάνω διαγράμματα γίνεται φανερό ότι καταλήγουμε στα ίδια συμπεράσματα με αυτά για τα ορθογώνια VGs, ότι δηλαδή η εγγύτητα των στροβίλων έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του μεγέθους και της ισχύς τους, άρα

όσο μικρότερη είναι η απόσταση μεταξύ των VGs, τόσο πιο ισχυροί οι στρόβιλοι που παράγονται.

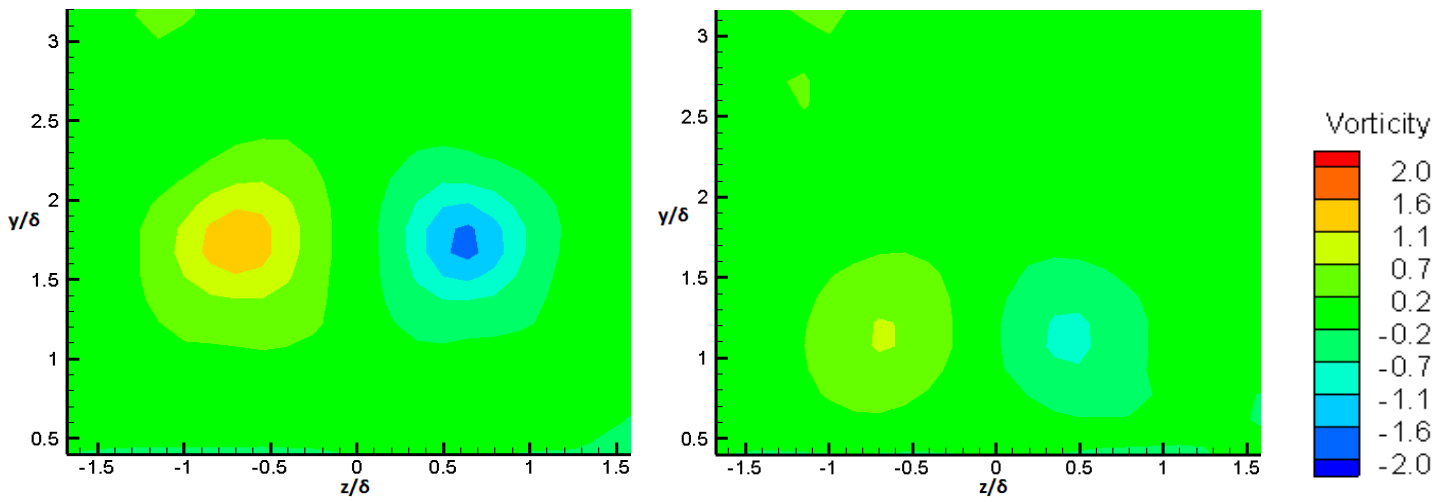
Η συμπεριφορά των στροβίλων που περιγράφηκε παραπάνω, όσον αφορά τη μετατόπιση κατά τον γ άξονα και τη τιμή της μέγιστης στροβιλότητας, είναι φανερή και στα περιγράμματα στροβιλότητας στο τρίτο επίπεδο (απόσταση 14,4h από ακμή φυγής) που παρουσιάζονται παρακάτω για τα ορθογώνια (αριστερή στήλη) και τριγωνικά (δεξιά στήλη) VGs (Εικόνα 5.31).

Διακρίνουμε ότι οι στρόβιλοι που είναι πιο κοντά (1h μεταξύ των VGs) χάνουν το κυκλικό τους σχήμα αποκτώντας ένα πιο ελλειπτικό πράγμα που οφείλεται στην έντονη αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο στροβίλων και έχει επισημανθεί και από προηγούμενες μελέτες [13]. Η επίδραση αυτή στο σχήμα των στροβίλων φαίνεται, πιο αδύναμα, και για απόσταση 2h και 3h μεταξύ των VG.

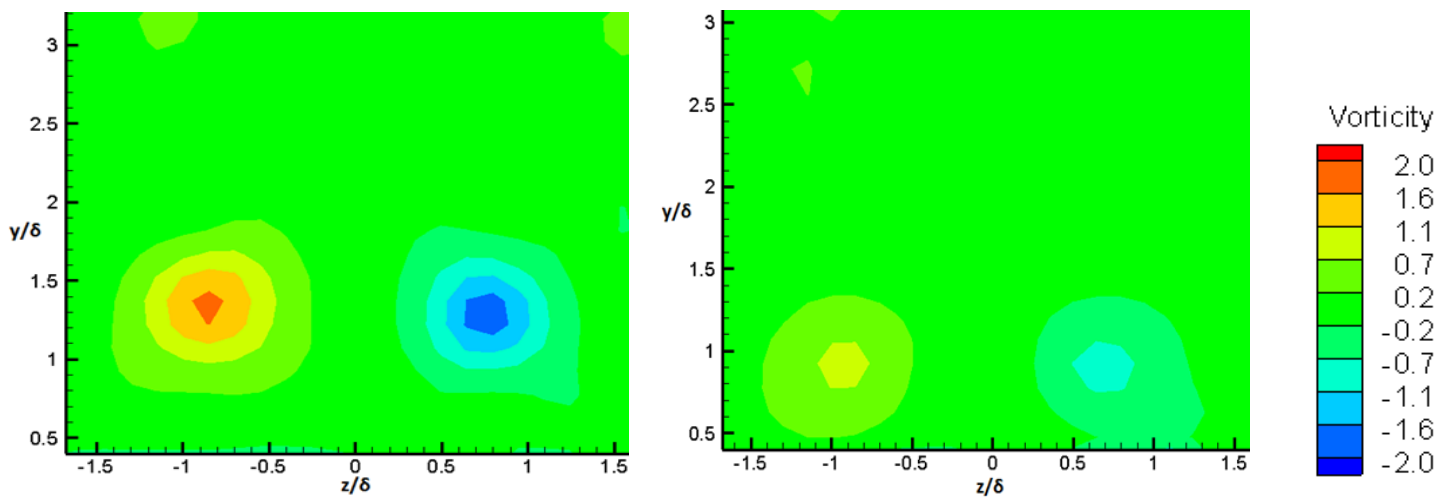
Επίσης φαίνεται ότι τα τριγωνικά VGs παράγουν στρόβιλους με μικρότερη τιμή μέγιστης στροβιλότητας ενώ και η αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο στροβίλων για τα τριγωνικά VGs είναι πιο αδύναμη γεγονός που αντικατοπτρίζεται στη τροχιά των δύο στροβίλων (μικρότερη κατακόρυφη μετατόπιση).



α)



β)



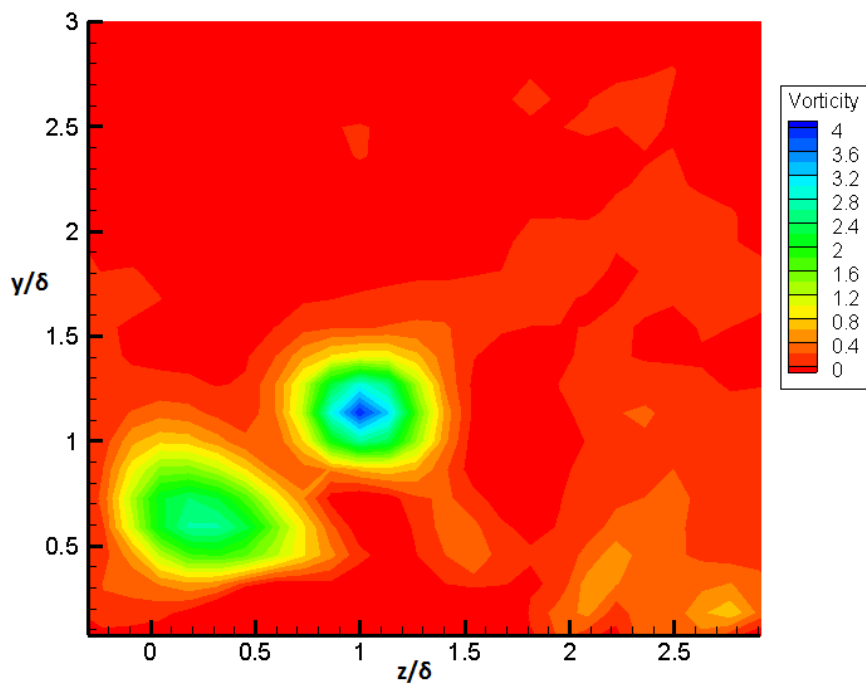
γ)

Εικόνα 5.31. Περιγράμματα στροβιλότητας για τις διάφορες αποστάσεις μεταξύ ορθογώνιων (αριστερή στήλη) και τριγωνικών (δεξιά στήλη) συγκλίνοντων VG στο τελευταίο επίπεδο μέτρησης. Η εικόνα α αντιστοιχεί σε απόσταση μεταξύ των VG 1h, η β για απόσταση 2h και η γ για απόσταση 3h.

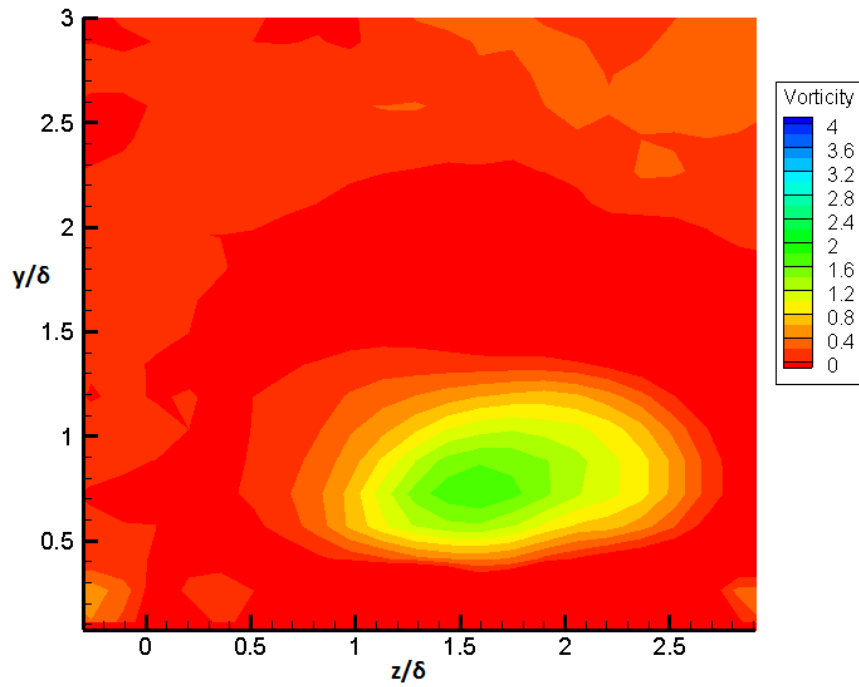
Figure 5.31. Nondimensionalized vorticity contours for rectangular (left column) and triangular (right column) VG pairs with common flow up: α) distance between VGs 1h, β) distance between VGs 2h, γ) distance between VGs 3h

Παράλληλα VGs

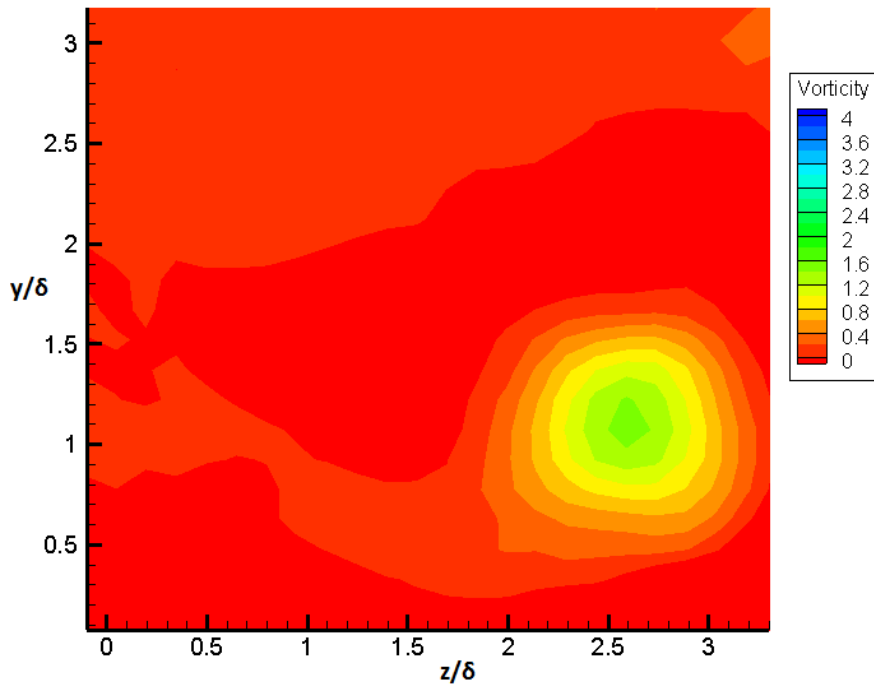
Για τα παράλληλα τοποθετημένα VGs θα αναφερθούμε στη περίπτωση των ορθογωνίων VGs έχουν απόσταση μεταξύ τους 1h. Το περίγραμμα στροβιλότητας για το πρώτο επίπεδο μέτρησης (Εικόνα 5.32) δείχνει ότι στην αρχή υπάρχουν δύο στρόβιλοι οι οποίοι εκτελούν κυκλική τροχιά στο επίπεδο yz και ενώνονται στη συνέχεια εμφανίζοντας έναν στρόβιλο στο δεύτερο και τρίτο επίπεδο μέτρησης.



α)



β)



γ)

Εικόνα 5.32. Περιγράμματα στροβιλότητας για ορθογώνια παράλληλα VGs με μεταξύ τους απόσταση $1h$. Η εικόνα α αντιστοιχεί στο πρώτο επίπεδο μέτρησης (απόσταση 16 από ακμή φυγής), η β στο δεύτερο (απόσταση $7,36$) και η γ στο τρίτο (απόσταση $13,26$).

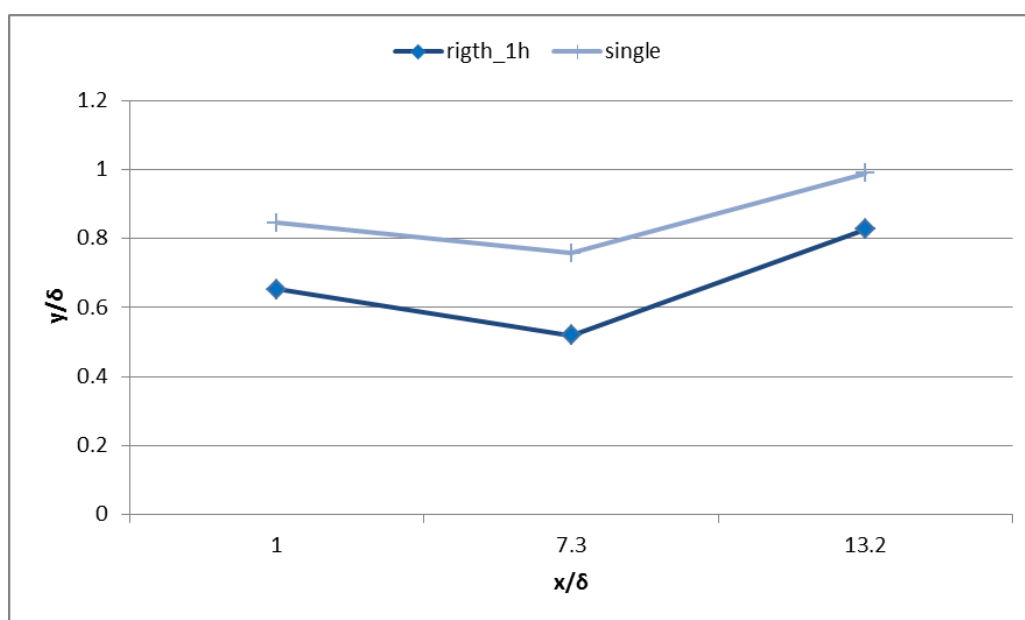
Figure 5.32. Nondimensionalized vorticity contours for rectangular co-rotating VGs pair: α) 1st measurement plane (16 downstream) β) 2nd measurement plane (7.36 downstream) γ) 3rd measurement plane (13.26 downstream).

Οι δύο στρόβιλοι ενώνονται σε απόσταση μεταξύ των VGs ίση με 2h ενώ για 3h δεν ενώνονται. Όσον αφορά τα τριγωνικά VGs που αλληλεπιδρούν λιγότερο έντονα, οι στρόβιλοι ενώνονται μόλις σε απόσταση 1h.

Αποκλίνοντα VGs

Οι στρόβιλοι που παράγονται από τα αποκλίνοντα VGs λόγω του ότι απομακρύνονται ο ένας από τον άλλο, η αλληλεπίδρασή τους είναι ασθενής και εμφανίζεται στα ζεύγη που η μεταξύ τους απόσταση είναι η μικρότερη από τις διατάξεις που μελετήθηκαν, δηλαδή 1h.

Στο επόμενο διάγραμμα απεικονίζεται η τροχιά του κέντρου του στρόβιλου κατά τον άξονα y (Εικόνα 5.33):

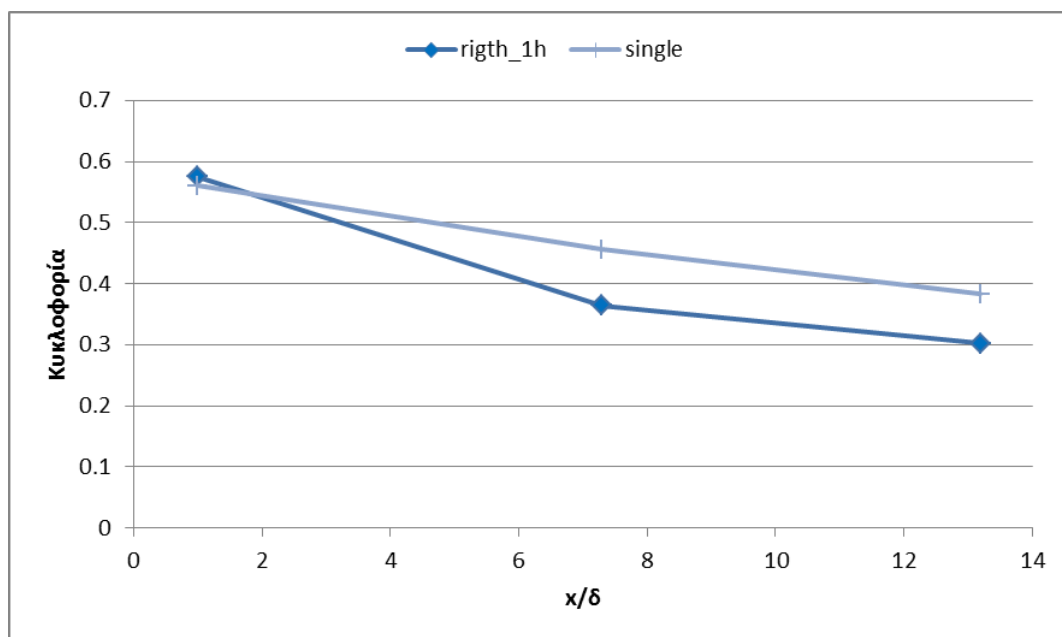


Εικόνα 5.33. Μετατόπιση κέντρου στρόβιλων κατά τον άξονα y συναρτήσει κατάντη απόστασης για απόσταση 1h μεταξύ των ορθογώνιων αποκλίνοντων VG σε σύγκριση με τον μόνο στρόβιλο.

Figure 5.33. Path of vortex center in y direction for single rectangular VG and right VG of a rectangular VG pair with common flow down and distance between VGs 1h.

Είναι φανερό ότι ο ένας στρόβιλος σπρώχνει τον άλλο προς το δάπεδο, το αντίστροφο δηλαδή από ότι συμβαίνει στα συγκλίνοντα, με αποτέλεσμα το κέντρο των στρόβιλων για το ζεύγος να είναι πιο χαμηλά.

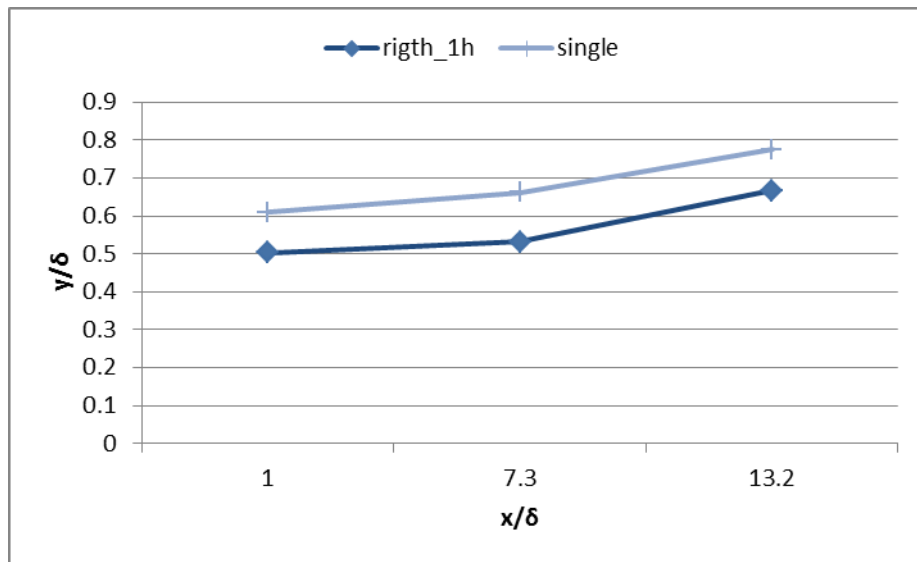
Η εγγύτητα του στροβίλου με το δάπεδο εξηγεί και την έντονη μείωση της κυκλοφορίας σε σχέση με τον μόνο στρόβιλο όπως φαίνεται στο διάγραμμα της κυκλοφορίας (Εικόνα 5.34):



Εικόνα 5.34. Μεταβολή της κυκλοφορίας συναρτήσει κατάντη απόστασης για απόσταση 1h μεταξύ των ορθογώνιων αποκλίνοντων VG σε σύγκριση με τον μόνο στρόβιλο.

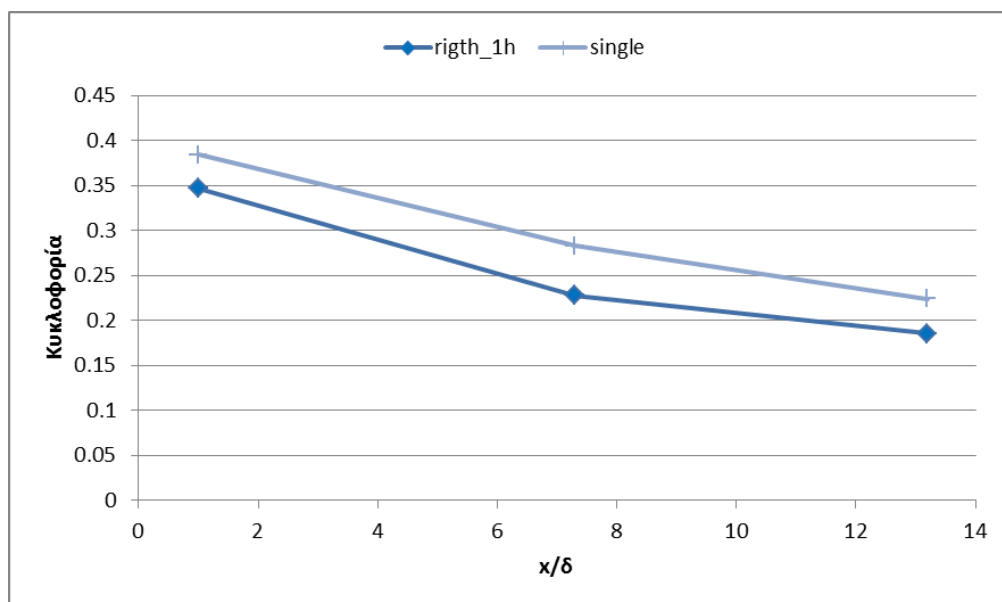
Figure 5.34. Nondimensionalized Circulation for single rectangular VG and right VG of a rectangular VG pair with common flow down and distance between VGs 1h.

Τα ίδια ισχύουν και για τα τριγωνικά VGs όπως φαίνεται και στα διαγράμματα μετατόπισης κατά τον y άξονα (Εικόνα 5.35) και κυκλοφορίας (Εικόνα 5.36) που ακολουθούν:



Εικόνα 5.35. Μετατόπιση κέντρου στροβίλων κατά τον άξονα y συναρτήσει κατάντη απόστασης για απόσταση $1h$ μεταξύ των τριγωνικών αποκλίνοντων VG σε σύγκριση με τον μόνο στρόβιλο.

Figure 5.35. Path of vortex center in y direction for single triangular VG and right VG of a triangular VG pair with common flow down and distance between VGs $1h$.



Εικόνα 5.36. Μεταβολή της κυκλοφορίας συναρτήσει κατάντη απόστασης για απόσταση $1h$ μεταξύ των τριγωνικών αποκλίνοντων VG σε σύγκριση με τον μόνο στρόβιλο.

Figure 5.36. Nondimensionalized Circulation for single triangular VG and right VG of a triangular VG pair with common flow down and distance between VGs $1h$.

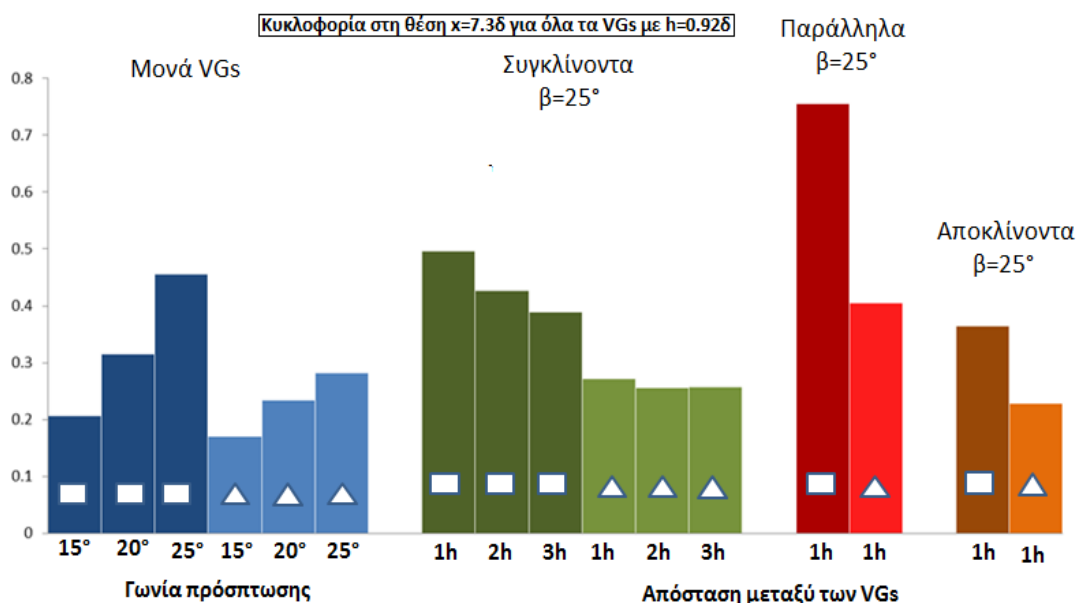
6 Συμπεράσματα

Ακολουθούν δύο συγκεντρωτικά διαγράμματα τα οποία βοηθούν να στο να παρουσιαστούν τα συνολικά συμπεράσματα από τη μελέτη που έγινε.

Στο πρώτο διάγραμμα παρουσιάζεται η Κυκλοφορία των στροβίλων για όλα τα VGs με ύψος $h=0,92\delta$ στο 2° επίπεδο μέτρησης. Στα μονά VG για ίδιο ύψος αλλάζει η γωνία πρόσπτωσης ενώ για τα ζεύγη VGs αλλάζει η μεταξύ τους απόσταση (στη περίπτωση των ζευγών VG παρουσιάζεται η Κυκλοφορία του ενός από τους δύο στροβίλους αφού είναι πανομοιότυποι).

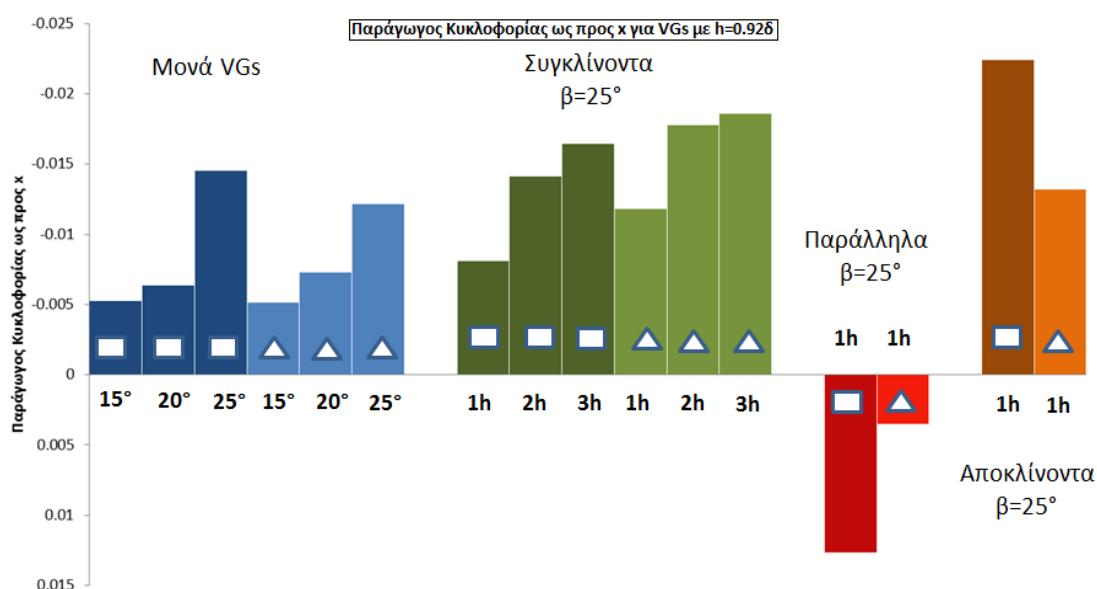
Στο δεύτερο διάγραμμα παρουσιάζεται ο ρυθμός μεταβολής της Κυκλοφορίας από το 1° στο 3° επίπεδο για τις ίδιες περιπτώσεις VG που παρουσιάζονται και στο προηγούμενο διάγραμμα.

Να σημειώσουμε ότι και στα δύο διαγράμματα στη περίπτωση της παράλληλης διάταξης το αποτέλεσμα που παρουσιάζεται είναι παραπλανητικό διότι οι δύο στρόβιλοι έχουν ενωθεί σε έναν από το 1° στο 3° επίπεδο. Οπότε στο πρώτο διάγραμμα παρουσιάζεται η Κυκλοφορία όχι ενός στροβίλου (όπως στη συγκλίνουσα και αποκλίνουσα διάταξη) αλλά των δύο στροβίλων που έχουν ενωθεί σε έναν για αυτό και εμφανίζεται αυξημένη. Για το δεύτερο διάγραμμα, αντίστοιχα, δε λήφθηκε υπ όψιν η Κυκλοφορία ενός στροβίλου στο 1° και στο 3° επίπεδο μέτρησης, αλλά η Κυκλοφορία ενός στροβίλου στο 1° επίπεδο και η Κυκλοφορία των δύο στροβίλων ενωμένων σε έναν στο 3° επίπεδο μέτρησης, για αυτό και παρουσιάζουν θετική παράγωγο Κυκλοφορίας.



Εικόνα 6.1. Κυκλοφορία στο 2^ο επίπεδο μέτρησης για όλα τα VGs με h=0,92δ. Στα μονά VG οι διαφορετικές περιπτώσεις είναι για διαφορετική γωνία πρόσπτωσης ενώ στα ζεύγη VGs για διαφορετική απόσταση μεταξύ των VG. Με μπλε χρώμα τα μονά VG, με πράσινο η συγκλίνουσα, με κόκκινο η παράλληλη και με πορτοκαλί η αποκλίνουσα διάταξη ζευγών. Με σκούρο χρώμα τα ορθογώνια και με ανοιχτό τα τριγωνικά VGs.

Figure 6.1. Circulation at 2nd measurement plane for all cases with height of VGs h=0,92δ. For single VG among the different cases varies the angle of attack whether for pair of VGs varies the distance between the VGs (all cases of VG pairs are with angle of attack $\beta=25^\circ$). Blue is for single VG, green for VG pairs with common flow up, red for co-rotating VG pairs, orange for counter rotating VG pairs with common flow down. Dark color is for rectangular VGs and light color for triangular VGs.



Εικόνα 6.2. Παράγωγος Κυκλοφορίας ως προς x από το 1^ο στο 3^ο επίπεδο μέτρησης για όλα τα VGs με h=0,92δ. Στα μονά VG οι διαφορετικές περιπτώσεις είναι για διαφορετική γωνία πρόσπτωσης ενώ στα ζεύγη VGs για διαφορετική απόσταση μεταξύ των VG. Με μπλε χρώμα τα μονά VG, με πράσινο η συγκλίνουσα, με κόκκινο η παράλληλη και με πορτοκαλί η αποκλίνουσα διάταξη ζευγών. Με σκούρο χρώμα τα ορθογώνια και με ανοιχτό τα τριγωνικά VGs.

Figure 6.2. Circulation's derivative between the 1st and 3rd measurement planes for all cases with height of VGs h=0,92δ. For single VG among the different cases varies the angle of attack whether for pair of VGs varies the distance between the VGs (all cases of VG pairs are with angle of attack $\beta=25^\circ$). Blue is for single VG, green for VG pairs with common flow up, red for co-rotating VG pairs, orange for counter rotating VG pairs with common flow down. Dark color is for rectangular VGs and light color for triangular VGs.

Λαμβάνοντας υπ όψιν τη ανάλυση των αποτελεσμάτων που έγινε στο προηγούμενο κεφάλαιο καθώς και τα δύο παραπάνω συγκεντρωτικά διαγράμματα καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα:

Το σχήμα του VG επηρεάζει καθοριστικά τους παραγόμενους στροβίλους. Τα τριγωνικά VGs δημιουργούν στροβίλους χαμηλότερης στροβιλότητας και μικρότερου μεγέθους από τα ορθογώνια VGs ίδιων γεωμετρικών χαρακτηριστικών (μήκος, ύψος, γωνία πρόσπτωσης). Οι στροβίλοι των ορθογώνιων VG έχουν σε όλες τις περιπτώσεις μεγαλύτερη κατά 50% κυκλοφορία σε σχέση με τους στροβίλους των τριγώνων.

Η μεταβολή της γωνίας πρόσπτωσης στα μονά VGs επηρεάζει έντονα τα χαρακτηριστικά του στρόβιλου που παράγεται. Αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης συνεπάγεται έντονη αύξηση της ημιακτίνας και, όχι τόσο έντονης, αύξησης της μέγιστης τιμής στροβιλότητας. Αυτό συνεπάγεται αύξηση της κυκλοφορίας κατά 35% με 45% για αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης κατά 5° τόσο σε ορθογώνια όσο και σε τριγωνικά VGs. Επίσης, αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης συνεπάγεται αύξηση στο ρυθμό μείωσης της Κυκλοφορίας κατά 15% έως 35%. Ο ρυθμός μείωσης της Κυκλοφορίας είναι παρόμοιος για ορθογώνια και τριγωνικά VGs.

Η μεταβολή του ύψους των VG δε έχει τόσο έντονη επίδραση όσο η γωνία επίδραση στους στρόβιλους που παράγονται. Η μέγιστη τιμή στροβιλότητας ελαττώνεται με την αύξηση του ύψους, το μέγεθος του στρόβιλου είναι σταθερό για ύψη 0,83δ και 0,92δ ενώ αυξάνεται για ύψος 1δ. Όσον αφορά στη κυκλοφορία, το ψηλότερο VG παράγει τον ισχυρότερο στρόβιλο με 10% μεγαλύτερη κυκλοφορία από το VG με ύψος 0,92δ.

Όσον αφορά τα συγκλίνοντα ζεύγη VG τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι δύο στρόβιλοι αλληλεπιδρούν έντονα. Η αλληλεπίδραση αυτή έχει σαν αποτέλεσμα την απομάκρυνση των δύο στρόβιλων από το δάπεδο και την ταχύτερη μείωση της μέγιστης στροβιλότητας τους. Η απομάκρυνση των στρόβιλων από το κάτω στερεό όριο επιδρά θετικά στην διάχυση τους και στην αύξηση της ημιακτίνας τους η οποία αυξάνεται από 15% (για τη μέγιστη απόσταση μεταξύ των VG) μέχρι 40% (για την ελάχιστη απόσταση μεταξύ των VG). Για απόσταση 1h μεταξύ των VG ο κάθε στρόβιλος έχει μεγαλύτερη κυκλοφορία κατά 5% σε σχέση με τον μόνο στρόβιλο ενώ για 2h και 3h έχει μικρότερη κατά 8% και 11% αντίστοιχα. Επίσης βρέθηκε ότι όσο πιο μικρή η απόσταση μεταξύ των VGs τόσο μικρότερος ο ρυθμός μείωσης της Κυκλοφορίας (αυξάνεται κατά περίπου 20% για αύξηση 1h στη μεταξύ των VGs απόσταση), ενώ για όλες τις αποστάσεις ο ρυθμός απώλειας Κυκλοφορίας για τα τριγωνικά VGs είναι κατά 10% μεγαλύτερος σε σχέση με τα ορθογώνια.

Στα παράλληλα ζεύγη ορθογωνίων VG οι δύο στρόβιλοι ενώνονται σε έναν για απόσταση μεταξύ των VG 1h και 2h, ενώ για τα τριγωνικά VG ενώθηκαν μόνο για απόσταση 1h. Στην περίπτωση που δεν ενώθηκαν, οι δύο στρόβιλοι είχαν κατά 12% μικρότερη κυκλοφορία σε σχέση με το στρόβιλο που παράγεται από ένα μόνο VG.

Στα αποκλίνοντα VGs η αλληλεπίδραση μεταξύ των στρόβιλων ήταν ασθενής καθ' ότι απομακρύνονται όσο κινούνται κατάντη. Για απόσταση μεταξύ των VG ίση με 1h που η αλληλεπίδραση είναι ορατή τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο ένας στρόβιλος σπρώχνει τον άλλο προς τα κάτω με αποτέλεσμα οι στρόβιλοι να πλησιάζουν περισσότερο στο κάτω στερεό όριο και λόγω των ισχυρών δυνάμεων συνεκτικότητας να έχουν μεγαλύτερο ρυθμό απώλειας κυκλοφορίας σε σχέση με το μόνο στρόβιλο με αποτέλεσμα στο τρίτο επίπεδο η κυκλοφορία να είναι κατά 20% μικρότερη. Εδώ, αντίθετα από τη συγκλίνουσα διάταξη, ο ρυθμός απώλειας

Κυκλοφορίας είναι κατά 20% μεγαλύτερος για τα ορθογώνια VGs σε σχέση με τα τριγωνικά.

Με βάση τα παραπάνω καταλήγουμε στο εξής συμπέρασμα για την πιο αποτελεσματική διάταξη VG:

Όσον αφορά το VG που είναι πιο αποτελεσματικό, αυτό είναι το ορθογώνιο με ύψος στο 92% του πάχους του οριακού στρώματος και με γωνία πρόσπτωσης τις 25°. Αυτό φαίνεται τόσο από τη τιμή της Κυκλοφορίας που είναι υψηλότερη σε σχέση με τα υπόλοιπα VG που εξετάστηκαν, όσο και από τα προφίλ του οριακού στρώματος στα οποία φαίνεται ότι το συγκεκριμένο VG επιτυγχάνει μεγαλύτερη επιτάχυνση της ροής κοντά στο δάπεδο.

Όσον αφορά τη διάταξη, επιλέγεται η διάταξη συγκλινόντων VG με απόσταση μεταξύ τους ίση με μία φορά το ύψος τους. Επιλέχθηκε η συγκεκριμένη διάταξη διότι η αλληλεπίδραση των δύο στροβίλων έχει σαν αποτέλεσμα την εντονότερη διάχυσή τους στο χώρο και επομένως τη μεγαλύτερη τιμή Κυκλοφορίας αλλά και το μικρότερο ρυθμό απώλειάς της όσο κινούμαστε κατάντη.

Η παραπάνω εκτίμηση μπορεί να δώσει κατευθυντήριες γραμμές για επόμενες μελέτες. Σίγουρα χρειάζεται να μελετηθούν οι διάφορες διατάξεις (συγκλίνουσα κτλ) ως προς την επίδραση που έχουν στο οριακό στρώμα και όχι μόνο ως προς την αλληλεπίδραση μεταξύ των στροβίλων. Επίσης, απαραίτητο είναι να ληφθούν υπ όψιν μελέτες, η να γίνουν νέες, σε συνθήκες αντίστροφης κλίσης πίεσης καθώς και υπολογισμός της οπισθέλκουσας που επάγουν τα VG, συναρτήσει της αποτελεσματικότητας, τους προκειμένου να είναι ασφαλής η όποια εκτίμηση για την χρησιμοποίηση VG σε συγκεκριμένες αεροδυναμικές εφαρμογές.

Βιβλιογραφία

- [1] J. D. Anderson, *Fundamentals of aerodynamics*, vol. 2. McGraw-Hill New York, 2001.
- [2] John C. Lin, "Review of research on low-profile vortexgenerators to control boundary-layer separation," 2002.
- [3] K.J. Langan, J.J. Samuels, "Experimental Investigations of Maneuver Performance Enhancements on an Advanced Fighter/Attack Aircraft," 1995.
- [4] A. Holmes, P. Hickey, W. Murphy, and D. Hilton, "The application of sub-boundary layer vortex generators to reduce canopy 'Mach rumble' interior noise on the Gulfstream III," *Rep./AIAA*, 1987.
- [5] T. Vronsky and D. New, *High performance cost-effective large wind turbine blades using air-jet vortex generators*. Atomic Energy Research Establishment, Energy Technology Support Unit, New and Renewable Energy Programme, 2000.
- [6] Taylor HD, "The elimination of diffuser separation by vortexgenerators.," 1947.
- [7] Percy, H. H., "Shock_Induced Separation and Its Prevention by Design and Boundary Layer Control," 1961.
- [8] Mehta, R. D.; Shabaka, I. M. M. A.,A. and Bradshaw, P, "'Longitudinal Vortices Imbedded in Turbulent Boundary Layers,' Part 1," 1985.
- [9] R. D. Mehta, "Longitudinal vortices imbedded in turbulent boundary layers Part 2. Vortex pair with 'common flow' upwards," 1988.
- [10] P. Bradshaw, "Longitudinal vortices imbedded in turbulent boundary layers Part 3. Vortex pair with 'common flow' downwards," 1988.
- [11] Ola Logdberg, "Streamwise evolution of longitudinal vortices in a turbulent boundary layer," 2008.
- [12] Westphal, R. V., "Interaction Between a Vortex and a Turbulent Boundary Layer Part I: Mean Flow Evolution and Turbulence Properties," 1987.
- [13] Wayne R' Pauley, "Experimental Study of the Development of Longitudinal Vortex Pairs Embedded in a Turbulent Boundary Layer," 1988.
- [14] Wendt, Bruce J., "Initial circulation and peak vorticity behavior of vortices shed from airfoil vortex generators.," 2001.
- [15] Ashill PR, "Studies of flows induced by sub boundary layer vortexgenerator s (SBVGs).," 2002.
- [16] Yao C-S, Lin JC, "Flowfield measurement of device-induced embedded streamwise vortexon a flat plate.," 2002.
- [17] C. M. Velte, Naumov, Okulov, "Regimes of Flow Past a Vortex Generator," 2011.
- [18] M. Raffel, C. E. Willert, and J. Kompenhans, *Particle Image Velocimetry: A Practical Guide; with 24 Tables*. Springer, 1998.
- [19] Meynard R., "Mesure de champs de vitesse d'écoulements fluides par analyse de suites d' images obtenues par diffusion d' un feuillet lumineux, Ph.D. thesis, Faculté des Sciences Appliquées, Université Libre de Bruxelles," 1983.
- [20] "www.tsi.com." .
- [21] Douglas A. Kerr, "The Scheimpflug Principles," 2006.
- [22] Rye M. Waldman, Kenneth S. Breuer, "Accurate measurement of streamwise vortices using dual-plane PIV," 2012.

- [23] M. Ramasamy and J. G. Leishman, "Benchmarking PIV with LDV for Rotor Wake Vortex Flows," *AIAA Paper*, vol. 3479, 2006.
- [24] Σωκράτης Τσαγγάρης, *Μηχανική των Ρευστών*. Εκδόσεις Συμείων, 1995.
- [25] Clara M. Velte, Martino. L. Hansen ,Valery L. Okulov, "Helical structure of longitudinal vortices embedded in turbulent wall-bounded flow," 2008.