ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ

Πειραματική διερεύνηση της αλληλεπίδρασης δύο κτιρίων εκτεθειμένων σε ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Λαγγίδης Απόστολος

Επιβλέπων: Δημήτριος Μπούρης, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2018

Ευχαριστίες

Με την υποστήριξη της διπλωματικής μου εργασίας κλείνει ο κύκλος των σπουδών μου στη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών. Αυτά τα χρόνια, παρά τις όποιες δυσκολίες συνάντησα, ήταν ένα δημιουργικό ταξίδι προς το στόχο μου να γίνω Μηχανολόγος Μηχανικός. Μακράν το πιο απαιτητικό και κοπιαστικό, αλλά και δημιουργικό και ευχάριστο κομμάτι των σπουδών μου, ήταν η ενασχόληση μου με αυτήν εδώ την εργασία.

Ο επιβλέπων μου, ο Αν. Καθηγητής Δημήτριος Μπούρης, μου εμπιστεύτηκε αυτό το θέμα και με καθοδήγησε επιστημονικά σε αυτή τη προσπάθεια . Θέλω να τον ευχαριστήσω για το ενδιαφέρον του, τις συμβουλές του και την εποικοδομητική κριτική του ώστε να προκύψει ένα όσο γίνεται καλύτερο αποτέλεσμα.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ακόμα τον Δρ. Μανωλέσο Μαρίνο, ο οποίος με εισήγαγε στον κόσμο της πειραματικής μηχανικής των ρευστών. Ο Μαρίνος μου δίδαξε στη πράξη το τρόπο δουλειάς για να πραγματοποιηθεί μια πειραματική επιστημονική μελέτη. Ακόμα, συνέχισε να βοηθάει με την εμπειρία του από απόσταση, όταν από ένα σημείο και μετά, συνέχισε να εργάζεται στην Αγγλία.

Θέλω να πω ένα ευχαριστώ επίσης σε ένα μεγάλο μέρος του προσωπικού του Τομέα Ρευστών που βοήθησε σε πολλά μικρά και φαινομενικά ασήμαντα ζητήματα, τα οποία όμως αθροιστικά παίξανε σίγουρα μεγάλο ρόλο στην ολοκλήρωση των πειραμάτων αυτής της εργασίας. Δε θα μπορούσα να μη ξεχωρίσω την Υποψήφια Διδάκτορα Βασιλική Παππά. Με την Βασιλική συνεργαστήκαμε σε ένα μεγάλο μέρος της δουλειάς που παρουσιάζεται παρακάτω, μαζί μοχθήσαμε και αγχωθήκαμε για την επιτυχή διεξαγωγή αυτών των πειραμάτων.

Τέλος, θέλω να αφιερώσω αυτή τη Διπλωματική στην οικογένεια μου και στους φίλους μου, σε όσους με στήριξαν όλα αυτά τα χρόνια και ξέρω ότι θα συνεχίσουν να με στηρίζουν και στα επόμενα μου βήματα.

Περίληψη

Για λόγους εξοικονόμησης ενέργειας στα κτίρια, μεγάλο ενδιαφέρον αποκτά η μελέτη της ροής γύρω από γεωμετρίες στερεών σωμάτων, όπως τετραγωνικά πρίσματα και κύβους, καθώς και του αερισμού διαμέσου αυτών. Στη βιβλιογραφία είναι όμως σχετικά μικρός ο αριθμός των εργασιών που εξετάζουν την επίδραση των χαρακτηριστικών των ανάντι εισερχόμενων οριακών στρωμάτων στη ροή γύρω από κυβικά σώματα, πόσο μάλλον σε συνδυασμό με την αλληλεπίδραση με ένα δεύτερο ίδιας μορφής σώμα. Επιπρόσθετα, η χρήση μιας μεθόδου, όπως το PIV (Particle Image Velocimetry), που επιτρέπει τη ταυτόχρονη ποιοτική και ποσοτική καταγραφή της ροής σε ένα ολόκληρο επίπεδο, μπορεί να μας βοηθήσει στην συνολικότερη αντίληψη των φαινομένων αυτών.

Στη παρούσα εργασία μετράμε με την μέθοδο του Stereo PIV τα πεδία ροής σε δυο επίπεδα σε απόσταση 5 mm από την υπήνεμη και τη προσήνεμη πλευρά του κυβικής γεωμετρίας μοντέλου μας, ύψους 11 cm. Οι ίδιες πλευρές έχουν από ένα ορθογωνικό άνοιγμα 6x90 mm. Σκοπός μας είναι να εξετάσουμε τον αερισμό μέσα από τα ανοίγματα των πλευρών αυτών καθώς και τα χαρακτηριστικά της ροής γύρω από το μοντέλο. Πρώτη παράμετρος του πειράματος ήταν η μορφή του προσπίπτοντος τυρβώδους οριακού στρώματος. Δεύτερη παράμετρος που εξετάστηκε ήταν η ύπαρξη ενός δεύτερου κυβικού σώματος σε θέση δυο υψών του κύβου ανάντι και κατάντι του μοντέλου.

Η εγγύτητα των επιπέδων μέτρησης στην επιφάνεια του μοντέλου δημιούργησε προβλήματα από ανακλάσεις φωτός με αποτέλεσμα σε ορισμένες περιοχές των μετρούμενων επιπέδων να μην λαμβάνεται πληροφορία. Ωστόσο, επιτεύχθηκε με μεγαλύτερη ακρίβεια, η μέτρηση του αερισμού δια μέσου των ανοιγμάτων, με μικρές αποκλίσεις μεταξύ της μετρούμενης εισερχόμενης και εξερχόμενης από το μοντέλο ροής. Από την επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων φάνηκε πως ο ρυθμός αερισμού παρουσιάζει μειούμενη τάση για οριακό στρώμα υψηλότερης διάτμησης, ενώ η ύπαρξη δεύτερου σώματος στις ανωτέρω θέσεις τον επηρέαζε επίσης αρνητικά. Η μεγαλύτερη διαφοροποίηση στη μορφή του πεδίου ροής γύρω από το μοντέλο εμφανίστηκε με την τοποθέτηση του δεύτερου κύβου ανάντι. Στη περίπτωση που ο κύβος είχε τοποθετηθεί κατάντι του μοντέλου υπήρξε μικρή διαφοροποίηση.

Abstract

Taking into consideration the energy saving in buildings, there is an augmented interest in the study of the flow around solid bodies, such as rectangular prisms and cubes, and the ventilation through them. However, in the relevant literature the is a small number of papers that study the effect of the incoming turbulent boundary layers characteristics on the flow around cubic bodies, let alone in combination with the interaction of a second body of the same shape. In addition, the use of an experimental method, such as Particle Image Velocimetry (PIV), that allows simultaneous quantitative and qualitative measurements of the flow field in a plane, can contribute to the better understanding of these phenomena.

In the present study, flow fields were measured, on two planes, using Stereo PIV method. Each plane is 5 mm far from the windward and leeward sides, respectively, of a generic cubic model building. These two sides of the model has a (6mmx90mm) aperture and the model's height is H=11 cm. Our objective is the investigation of the ventilation through the model's openings as well as the flow past it. The first parameter of the experiment was the incoming boundary layer. The second parameter was the placement of a second cube at the position of 2H upstream and downstream in respect to the model.

The closeness of the measurement planes to the model's surfaces caused the loss of information in some areas of those planes. The reason was the light reflection from the laser beam. However, because of this closeness, the ventilation rate was measured with better accuracy and there was relatively small difference between the measured incoming and the outcoming flow rate from the model. The processing of the raw data showed that the ventilation rate was decreased for higher shear inflow. Also the existence of a second body was shown to decrease the ventilation rate for every case. Greater change in the flow field was recorded when the second obstacle was placed at the upstream position. Less was the impact of the second obstacle when placed downstream to the model.

Περιεχόμενα

1 Εισαγωγή 7

2 Θεωρητικό υπόβαθρο 11
2.1 Το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα 11
2.2 Η ροή γύρω από σώματα κυβικού σχήματος.....15
2.3 Η μέθοδος PIV 20

3 Πειραματική διάταξη και διαδικασία 22
3.1 Η αεροδυναμική σήραγγα. 22
3.2 Το κυβικό μοντέλο κτιρίου 22
3.3 Εισερχόμενα οριακά στρώματα 23
3.4 Διάταξη και μετρήσεις 26

4 Παρουσίαση αποτελεσμάτων 31
4.1 Πεδία ροής..... 31
4.2 Ολική τύρβη ως προς την ελεύθερη ροή 44
4.3 Προσδιορισμός θέσεων των στροβίλων 47
4.4 Αερισμός δια μέσου των ανοιγμάτων του μοντέλου.....54

5 Αξιόλογηση αποτελεσμάτων και συμπεράσματα.....68

Βιβλιογραφία 71

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Η μελέτη της ροής γύρω από κτίρια έχει μακρά ιστορία και ξεκίνησε στις αρχές του αιώνα με σκοπό κατά κανόνα σχεδόν τη μελέτη των αεροδυναμικών δυνάμεων που ασκούνται σε μεγάλες κατασκευές, κυρίως ουρανοξύστες, καλωδιωτές γέφυρες. Στη συνέχεια άρχισε να επεκτείνεται και σε μελέτες που έχουν να κάνουν με τις ροές σε οικιστικά περιβάλλοντα και αστικό ιστό. Σημαντική ώθηση σε αυτήν την έρευνα έδωσε η ατμοσφαιρική μόλυνση και η ανάγκη μελέτης της διασποράς των ρυπαντών.

Επίσης ιδιαίτερο ενδιαφέρον και εφαρμογή έχει η κατανόηση της ροής γύρω από ένα ή περισσότερα κτίρια στον βιοκλιματικό σχεδιασμό και αρχιτεκτονική αυτών. Επίσης μια εφαρμογή που μοιάζει πολλά υποσχόμενη είναι ο φυσικός αερισμός των κτιρίων. Ως φυσικό αερισμό ορίζουμε την ανανέωση του αέρα εντός ενός κλειστού χώρου χωρίς τη βοήθεια μηχανικών μέσων όπως φυσητήρων.
Ο φυσικός αερισμός ενός κτιρίου πέρα από τις ανάγκες αλλαγής του αέρα, μπορεί να συμβάλει και στη ρύθμιση της θερμοκρασίας του υποκαθιστώντας έτσι ανάγκες για συμβατικό κλιματισμό.

Εμπειρικές κατασκευές κατοικιών που αξιοποιούν τον φυσικό αερισμό για να δημιουργούν θερμοκρασιακή άνεση στους κατοίκους τους υπάρχουν εδώ και πολλούς αιώνες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι τα ‘dogtrot houses’ ή ‘breezeway houses’ στις νοτιοανατολικές πολιτείες των Η.Π.Α. [1]

Αν λάβουμε υπόψη ότι η κατανάλωση ενέργειας η οποία σχετίζεται με τη λειτουργία της θέρμανσης, του αερισμού και του κλιματισμού (HVAC) αντιστοιχεί σχεδόν στο 68% της συνολικής ενέργειας η οποία χρησιμοποιείται σε κτίρια υπηρεσιών και κατοικιών [2], καθώς και τα προβλήματα υγείας που σε πολλές περιπτώσεις συνδέονται με τα συστήματα αυτά, τότε καταλαβαίνουμε τα πλεονεκτήματα του φυσικού αερισμού των κτιρίων

Για αυτούς τους λόγους υπάρχει ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια για την ενσωμάτωση του φυσικού αερισμού ως παράμετρο κατά το σχεδιασμό των κτιρίων. Βέβαια, τα φαινόμενα της ροής διαμέσου ενός κτιρίου είναι πολύ πολύπλοκα και η μέχρι στιγμής εμπειρικοί τύποι που υπάρχουν έχουν μεγάλες αποκλίσεις από την πραγματικότητα. Η ροή του αέρα διαμέσου ενός ανοίγματος είναι κοινή αποδοχή πως εξαρτάται από τη διαφορά πίεσης μεταξύ των πλευρών του. Ωστόσο χρειάζεται περαιτέρω μελέτη της αντίστασης συναρτήσει της εισερχόμενης ροής, καθώς και της ροής που διαμορφώνεται στις εκάστοτε συνθήκες ώστε να είναι δυνατή, η πρόβλεψη της ροής διαμέσου μιας νέας κατασκευής.

Σε προβλήματα όπως αυτό είναι συνήθεις για τη συλλογή δεδομένων οι μετρήσεις πλήρους κλίμακας,
Αυτού του τύπου τα δεδομένα έχουν το πλεονέκτημα ότι δεν χρειάζονται τις υποθέσεις των νόμων ομοιότητας, οπότε είναι και πιο αξιόπιστα. Ωστόσο στο ελεγχόμενο περιβάλλον μιας αεροδυναμικής σήραγγας έχουμε τη δυνατότητα να εξετάσουμε πολύ περισσότερες περιπτώσεις, καθώς είναι πολύ πιο εύκολο να μεταβάλλουμε τις συνθήκες. Επιπρόσθετα, έχουμε στη διάθεση μας περισσότερες τεχνικές μετρήσεων οι οποίες πολλές φορές είναι δύσκολο να εφαρμοστούν σε πραγματική κλίμακα και εκτός εργαστηρίου.

Ακόμα, αξίζει να αναφέρουμε πως υπάρχει βασική έρευνα σε γεωμετρίες που έχουν εφαρμογή στη ροή γύρω από κτίρια, οι οποίες γίνανε με άλλες εφαρμογές υπόψιν αρχικά. (πχ. Ψύξη τρανζίστορ σε τυπωμένα κυκλώματα, εναλλάκτες θερμότητας, κ.α.)

Εικόνα 1.1: *"Breezeway house" των μέσων του 19ου αιώνα στη Λουιζιάνα των Η.Π.Α.[*1]

Σκοπός, λοιπόν, της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη των χαρακτηριστικών της ροής γύρω από κυβικό μοντέλο κτιρίου σε συνθήκες τυρβωδών οριακών στρωμάτων, καθώς και η επίδραση στη ροή ενός δεύτερου σώματος κυβικού σώματος. Η μελέτη αυτή συνιστά συνέχεια προηγούμενων εργασιών και έρευνας που έχει γίνει στο Εργαστήριο Καινοτομικών Τεχνολογιών Προστασίας Περιβάλλοντος [3],[4],[5].

Στη παρούσα εργασία θα εξετάσουμε τη ροή αλλά και τον διαμήκη αερισμό διαμέσου ενός κυβικού μοντέλου κτιρίου έχοντας ως παράμετρο τα χαρακτηριστικά ως εισερχόμενου οριακού στρώματος αλλά και την επίδραση ενός δεύτερου σώματος ίδιας γεωμετρίας. Η ύπαρξη ενός δεύτερου σώματος σε αλληλεπίδραση με το μοντέλο μας συνιστά, επί της ουσίας, την πιο απλή περίπτωση συμπλέγματος κτιρίων. Δεύτερη παράμετρος στο πείραμα αυτό είναι, λοιπόν, η τοποθέτηση ενός δεύτερου κύβου, ίδιων διαστάσεων, σε σειρά κατά τη ροή με το πρώτο κυβικό σώμα, ανάντι και κατάντι αυτού.

Η διπλωματική εργασία απαρτίζεται από 5 κεφάλαια τα οποία διαρθρώνονται ως εξής:

- Κεφάλαιο 1-Εισαγωγή: Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται το κίνητρο καθώς και ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας

- Κεφάλαιο 2- Θεωρητικό υπόβαθρο:¨Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο γίνεται εισαγωγή στο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα. Στη συνέχεια περιγράφονται τα βασικά χαρακτηριστικά της ροής γύρω από ένα σώμα κυβικού σχήματος καθώς και της αλληλεπίδρασης δυο κύβων σε σειρά. Έπειτα, γίνεται επιχειρείται μια συνοπτική παρουσίαση της πειραματικής τεχνικής που χρησιμοποιήθηκε, του PIV

- Κεφάλαιο 3 – Εδώ περιγράφεται η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε. Δίνονται οι πειραματικές συνθήκες στις οποίες έγινε το πείραμα, οι περιπτώσεις που μελετήθηκαν καθώς και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε και οι ρυθμίσεις του.

- Κεφάλαιο 4 - Αποτελέσματα. Σε αυτό το μέρος της εργασίας γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων. Αυτό το κεφάλαιο χωρίζεται σε δύο μέρη. Στο πρώτο ασχολούμαστε με τη ροή σε ολόκληρο το επίπεδο μέτρησης που μας δίνει εικόνα για τη ροή γύρω από τον κύβο. Εδώ παρουσιάζονται διαγράμματα με το ποσοστό τύρβης και οι θέσεις στροβίλων όπως προέκυψαν με τη χρήση του Q-criterion από κάθε στιγμιότυπο. Στο δεύτερο μέρος επικεντρώνουμε τη προσοχή μας στη περιοχή του ανοίγματος και υπολογίζουμε το μέσο αερισμό διαμέσου αυτού, με μεταβολή του με το χρόνο και τέλος, το προφίλ καθ΄’ύψος του ανοίγματος.
- Κεφάλαιο 5 – Στο τελευταίο μέρος της εργασίας αξιολογείται αρχικά η ποιότητα των αποτελεσμάτων. Στη συνέχεια γίνεται μια προσπάθεια να εξαχθούν ορισμένα συμπεράσματα. Τέλος , επιδιώκουμε να κάνουμε προτάσεις για μελλοντική έρευνα πάνω στο αντικείμενο αυτό με βάση τις δυσκολίες και την εμπειρία που αποκτήθηκε από αυτή τη προσπάθεια.

Κεφάλαιο 2 : Θεωρητικό υπόβαθρο

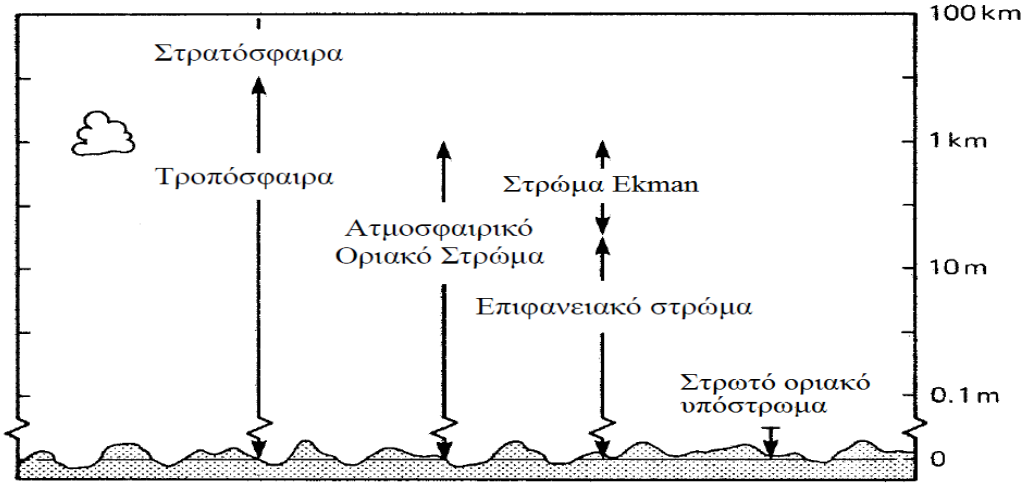
2.1 Το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα

Λόγω της περιστροφής της γης, υπάρχει σχετική κίνση της ατμόσφαιρας με την ατμόσφαιρα. Έτσι, λόγω των συνεκτικών δυνάμεων δημιουργείται ένα στρώμα στο κατώτερο τμήμα της ατμόσφαιρας που ονομάζεται ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα (Α.Ο.Σ.). Το ΑΟΣ δεν έχει σταθερό πάχος και προφίλ και εξαρτάται απο τις ατμοσφαιρικές συνθήκες καθώς και από την μορφολογία του στερεού ορίου, δηλαδή του εδάφους. [3],[6]

Στην ουδέτερη κατάσταση, με την απουσία θερμικών διεργασιών ο παράγοντας της ευστάθειας εξαλείφεται και μένει ο προσδιορισμός του ύψους του ΑΟΣ ως συνάρτηση της μορφολογίας της επιφάνειας του εδάφους και συγκεκριμένα της τραχύτητας του. Για ομαλό έδαφος και αδύναμο άνεμο το ύψος του ΑΟΣ μπορεί να είναι τάξης 200 m ενώ για ανώμαλη επιφάνεια, δηλ. μεγάλη τραχύτητα, και έντονο άνεμο είναι δυνατόν να φτάσει μέχρι 1200 m. Για πολύ ευσταθή κατάσταση το ύψος είναι της τάξης των 30 m ενώ σε συνθήκες που ευνοούν την έντονη ανάμειξη του αέρα, το ύψος φτάνει μέχρι 3000 km.

Όμως για επιφάνειες παρόμοιας τραχύτητας υπάρχουν διαφορές στο ύψος του ΑΟΣ. Αυτό συμβαίνει διότι η περιοχή ανάπτυξης του ΑΟΣ είναι περιορισμένη αρκετές φορές. Είναι περιορισμένες οι περιοχές που αναπτύσσεται πλήρως το ΑΟΣ όπως η έρημος, η θάλασσα, κάποιες πεδιάδες κλπ. Αντίθετα για περιοχές όπως αστικές, παραθαλάσσιες κλπ. λόγω μικρής συγκριτικά έκτασης, δεν προλαβαίνει να αναπτυχθεί πλήρως το ΑΟΣ αλλά και λόγω θερμικής ανομοιομορφίας (αστική θερμονησίδα) σπάνια βρίσκεται σε ουδέτερη κατάσταση. Έτσι δημιουργείται εσωτερικό οριακό στρώμα που τροποποιεί την αρχική μορφή του οριακού στρώματος

Το ΑΟΣ μπορεί να διαιρεθεί σε δύο κυρίως επιμέρους στρώματα, το στρώμα Ekman ή εξωτερικό στρώμα και το επιφανειακό στρώμα ή εσωτερικό στρώμα [6]. Όπου το εσωτερικό στρώμα υποδιαιρείται σε δυο επιμέρους υποστρώματα, το επιφανειακό τυρβώδες υπόστρωμα και το στρωτό οριακό υπόστρωμα



Σχήμα 2.1: *Διαστρωμάτωση της κατώτερης ατμόσφαιρας [6]*

Χαρακτηριστικά ΑΟΣ

Για τη μελέτη και τη προσομοίωση του ΑΟΣ χρησιμοποιούνται εμπειρικές εξισώσεις οι οποίες διευκολύνουν τη λεπτομερή περιγραφή του. Βασικό ζητούμενο είναι οι σχέσεις που χρησιμοποιούνται να δίνουν τη κατανομή ταχύτητας του ανέμου καθ' ύψος του οριακού στρώματος. Οι εξισώσεις που αναπτύχθηκαν δίνουν πληροφορία για τα εξής χαρακτηριστικά του ΑΟΣ:

- Την κατανομή της μέσης ταχύτητας του ανέμου με το ύψος για τις οριζόντιες και την κατακόρυφη διεύθυνση ανέμου (u,v,w).
- Την κατατομή της έντασης της τύρβης του ανέμου με το ύψος (I_u, I_v, I_w)
- Την κατατομή της ολοκληρωτικής κλίμακας μήκους της τύρβης του ανέμου με το ύψος (L_u, L_v, L_w)
- Το φάσμα τυρβώδους κινητικής ενέργειας της τύρβης του ανέμου

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά παρουσιάζονται και εξετάζονται στην συνέχεια.

Μέση ταχύτητα

Υπάρχουν αρκετές σχέσεις που περιγράφουν την κατατομή της μέσης ταχύτητας με το ύψος. Το κύριο ζητούμενο για αυτές τις σχέσεις είναι η επαρκής περιγραφή του προφίλ της ταχύτητας σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο μέρος του συνολικού ύψους του οριακού στρώματος.

Πολύ διαδεδομένη είναι η χρήση του εκθετικού νόμου της ταχύτητας που εισήχθη από τον Hellman(1916).

$$\frac{\acute{u}}{\acute{u}_{ref}} = \left(\frac{z-d}{z_{ref}-d}\right)^{\alpha} \quad (2.1)$$

Η οριζόντια ταχύτητα $\bar{u}(z)$ είναι η μέση ταχύτητα σε ύψος z από την επιφάνεια του εδάφους. όπου, u_{ref} το ύψος αναφοράς και η μέση ταχύτητα στο ύψος αυτό, ενώ στην μετεωρολογία λαμβάνεται z_{ref} = 10 m. Ο εκθέτης α εξαρτάται από την τραχύτητα του εδάφους. Ο εκθετικός νόμος εφαρμόζεται ευρέως δεδομένης της απλότητας του, ωστόσο δεν περιγράφει ικανοποιητικά τα πρώτα 10 m του ΑΟΣ (παίρνοντας ως αρχή το έδαφος).

Πιο ολοκληρωμένη περιγραφή μας δίνει ο λογαριθμικός νόμος ο οποίος εκφράζει τη μέση ταχύτητα ως:

$$U = \left(\frac{U_{¿}}{k}\right)\ln\left[\frac{(z-d)}{z_o}\right] \quad (2.2)$$

όπου $\bar{u}$ η μέση ταχύτητα του ανέμου στο ύψος z, u_* η ταχύτητα τριβής, k η σταθερά von Karman με τιμή 0.41, d το επίπεδο μηδενικής μετατόπισης και z_0 το ύψος τραχύτητας του εδάφους,

Η ταχύτητα τριβής u_* ορίζεται από την σχέση: $u_{¿} = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$ (2.3) όπου τ_o η διατμητική τάση στο έδαφος και ρ η πυκνότητα του αέρα.

Το επίπεδο μηδενικής μετατόπισης d ορίζεται ως το ύψος πάνω από την επιφάνεια του εδάφους, όπου η μέση ταχύτητα του ανέμου είναι μηδενική, εξ' αιτίας της ύπαρξης εμποδίων στη ροή του ανέμου. Γενικά εκτιμάται ότι φτάνει έως τα 2/3 του μέσου ύψους των εμποδίων. Σε περίπτωση όμως που η πυκνότητα των εμποδίων είναι μεγάλη, μπορεί να θεωρηθεί ότι d=h, όπου h το μέσο ύψος των εμποδίων. Η τιμή του d δεν επηρεάζει την κατακόρυφη κατανομή του ανέμου, απλώς την μετατοπίζει κατά d.

Το ύψος τραχύτητας z_o είναι ένας διορθωτικός όρος, ο οποίος μετρά την επίδραση της τραχύτητας της επιφάνειας στη ροή του ανέμου και κυμαίνεται μεταξύ του 1/10 και 1/30 του μέσου ύψους των στοιχείων τραχύτητας του εδάφους. Το ύψος τραχύτητας υπολογίζεται πάνω από το επίπεδο μηδενικής μετατόπισης. Το ύψος τραχύτητας συσχετίζεται, αλλά δεν είναι ισοδύναμο, με το ύψος των στοιχείων τραχύτητας της επιφάνειας. Συγκεκριμένα, εξαρτάται τόσο από το σχήμα, όσο και από την πυκνότητα κατανομής των στοιχείων τραχύτητας.

Τόσο ο λογαριθμικός όσο και ο εκθετικός νόμος ισχύουν και για τις τρεις ατμοσφαιρικές καταστάσεις (ευστάθειας, αστάθειας, ουδέτερη κατάσταση). Ωστόσο, για να ληφθεί υπόψιν η ευστάθεια ή τη αστάθεια της ατμόσφαιρας, θα πρέπει να συμπεριληφθεί στους προαναφερθέντες τύπους το μήκους Monin-Obukhov. Ομοίως για πιο μεγάλα ύψη, τροποποιούνται οι εξισώσεις ώστε να λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της δύναμης Coriolis, η οποία εξαρτάται από την ταχύτητα περιστροφής της γης και από το γεωγραφικό πλάτος.

Ένταση τύρβης

Η πιο απλή και η πιο συνήθης χρησιμοποιούμενη μέθοδος περιγραφής της τύρβης είναι η ένταση της τύρβης. Η ένταση της τύρβης ορίζεται από την σχέση

$$I_u = \frac{\sigma u}{\bar{u}} \quad (2.4)$$

όπου σu η τυπική απόκλιση της ταχύτητας για δεδομένο ύψος.

ομοίως ορίζονται και για τις ταχύτητες v,w τα αντίστοιχα v_{rms}, w_{rms} και I_v, I_w.
Για την ένταση της τύρβης υπάρχει πληθώρα από εμπειρικές σχέσεις που προέκυψαν πειραματικά Μετρήσεις στο επιφανειακό οριακό στρώμα έδειξαν ότι η ένταση της τύρβης έχει άμεση σχέση με την ταχύτητα τριβής. Συγκεκριμένα η σχέση είναι:

$$\sigma u = 2.5 u_{¿} \quad (2.5)$$

επομένως συνδυάζοντας την σχέση της u_{rms} με τον λογαριθμικό νόμο έχουμε την ένταση της τύρβης με το ύψος ως:

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι μετρήσεις αυτές έγιναν κάτω από ιδανικές συνθήκες, δηλαδή, μεγάλες αποστάσεις, επίπεδες επιφάνειες και ομοιόμορφη τραχύτητα εδάφους και ουδέτερη ατμόσφαιρα.

Κατά ESDU 75001 [3] προτείνεται μια λίγο πιο περίπλοκη εναλλακτική σχέση για την κατατομή της τύρβης με το ύψος:

$$I_u = \frac{1}{\ln(z/z_o)}\left[0.867 + 0.566\, lg\, z - 0.246\,(lg\, z)^2\right]\lambda \quad (2.7)$$

$$\lambda = \begin{cases} \frac{0.76}{z_o^{0.07}} z_o > 0.02m \\ 1.0\, z_o \leq 0.02m \end{cases} \quad (2.8)$$

Για τις εμπειρικές σχέσεις αυτές όπως φαίνεται πρέπει να υπολογιστεί το ύψος τραχύτητας εκ των προτέρων.
Φυσικά υπάρχουν και άλλες εμπειρικές σχέσεις που λαμβάνουν υπόψιν την ευστάθεια της ατμόσφαιρας.

Ολοκληρωτική κλίμακα μήκους τύρβης

Η ολοκληρωτική κλίμακα μήκους της τύρβης υπολογίζεται εφαρμόζοντας την θεωρία παγιωμένης τύρβης του Taylor, η οποία μέσω της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης παρέχει μια ένδειξη της κλίμακας της τύρβης του ανέμου [6].

Η αυτοσυσχέτιση μιας χρονοσειράς u(t) για δυο τυχαίες στιγμές t_1 και t_2 ορίζεται ως:

$$R(t_1, t_2) = \langle u(t_1)\, u(t_2) \rangle \quad (2.9)$$

Στην περίπτωση μιας στατιστικά παγιωμένης χρονοσειράς, η αυτοσυσχέτιση εξαρτάται μόνο από την διαφορά $\tau = t_1 - t_2$ (υστέρηση) και όχι από τις χρονικές στιγμές t_1 και t_2. Επομένως η παραπάνω σχέση για στατιστικά παγιωμένη χρονοσειρά, γίνεται:

$$R(\tau) = \langle u(t)\, u(t+\tau) \rangle \quad (2.10)$$

Έτσι ορίζεται η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης με αδιαστατοποίηση ως εξής:

$$r(\tau) = \frac{\langle u(t)\, u(t+\tau) \rangle}{\langle u^2 \rangle} \quad (2.11)$$

Για χρονική υστέρηση $\tau = 0$ η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης λαμβάνει την τιμή της μονάδας και φθίνει καθώς αυξάνει η υστέρηση τ. Καθώς η τ αυξάνεται πάρα πολύ η συνάρτηση τείνει στο μηδέν, δεδομένου ότι η τύρβη είναι στοχαστικό φαινόμενο. Βάσει αυτών, ορίζεται η ολοκληρωτική κλίμακα χρόνου της τύρβης ως:

$$Tu_x = \int_0^\infty r(\tau)\, d\tau \quad (2.12)$$

Βάσει της υπόθεσης του Taylor, η ολοκληρωτική κλίμακα μήκους προσδιορίζεται από την σχέση:

$$Lu_x = Tu_x \cdot \acute{u} \quad (2.13)$$

Ο Cook [7] έχει προτείνει τον υπολογισμό της κλίμακας προσομοίωσης S από τη σχέση:

$$S = \frac{91.3\, z_m^{0.491}}{Lu_{xm}^{1.403}\, z_{0m}^{0.088}} \quad (2.14)$$

2.2 Ροή γύρω από σώματα κυβικού σχήματος

Η μελέτη της ροής γύρω από κτίρια παρουσιάζει κάποιες ιδιαίτερες δυσκολίες. Οι δυσκολίες αυτές έπονται από το γεγονός ότι τα κτίρια είναι τρισδιάστατα σώματα με ανομοιόμορφο και περίπλοκο ανάγλυφο. Προφανώς, η ροή γύρω από τρισδιάστατα εμπόδια είναι τόσο πιο πολύπλοκη, όσο πιο σύνθετη είναι η γεωμετρία του εμποδίου. Οπότε, γίνεται αναγκαία η χρήση απλουστευμένων μοντέλων για τη μελέτη των φαινομένων που μας ενδιαφέρουν. Η συνήθης μοντελοποίηση των κτιρίων γίνεται με διαφόρων ειδών τετραγωνικά πρίσματα. Στην παρούσα εργασία μας ενδιαφέρει ιδιαίτερα η μοντελοποίηση με κύβους. Παρακάτω παραθέτουμε τρεις χαρακτηριστικές περιπτώσεις ροών γύρω από κυβικα εμπόδια οι οποίες θα μας ενδιαφέρουν στη συνέχεια.

Ροή κάθετη στην επιφάνεια του κύβου

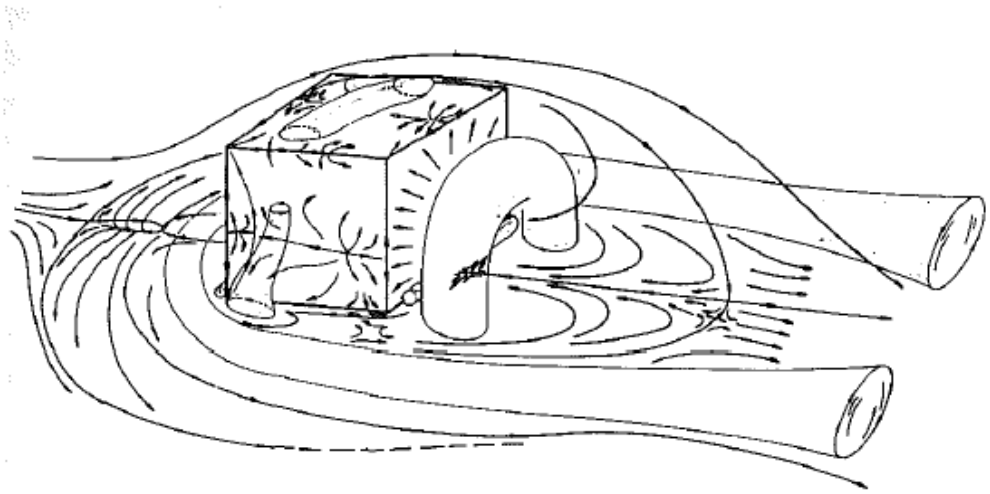
Στη περίπτωση αυτή θα επιχειρήσουμε να περιγράψουμε τη ροή γύρω σε κυβικό εμπόδιο τοποθετημένο σε επιφάνεια με πλευρά ανάντι στη ροή. Να σημειωθεί ότι αναφερόμαστε σε ροή με αριθμό Re πάνω από 15000-20000 όπου πειραματικά έχει αποδειχθεί ότι υπάρχει ανεξαρτησία της μορφής της ροής από την ταχύτητα.

Πειραματικές μελέτες πάνω στην ροή γύρω από κύβο τοποθετημένο στο έδαφος έχουν γίνει στο παρελθόν αρκετές. [9],[10],[11]. Σε αυτές τις εργασίες εξετάζεται με διαφορετικές πειραματικές τεχνικές, όπως οπτικοποίηση με λάδι και καπνό και μετρήσεις πιέσεων στις επιφάνειες, και με υπό διαφορετικές συνθήκες προσπτώμενων οριακών στρωμμάτων η ροή γύρω από κυβικά εμπόδια.

Στην ομοιόμορφη ροή κάθετη στην επιφάνεια του κύβου αρχικά παρατηρείται, ότι στην προσήνεμη πλευρά του κύβου σχηματίζεται μια ζώνη ανακοπής της ροής. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, τον ακτινωτό διαχωρισμό της ροής από την περιοχή ανακοπής της ροής, προς όλες τις κατευθύνσεις. Έτσι, δημιουργούνται ανοδικά και καθοδικά ρεύματα πάνω και κάτω από την περιοχής ανακοπής της ροής ενώ ταυτόχρονα δεξιά και αριστερά οδηγούνται τα πλευρικά ρεύματα.

Τα καθοδικά ρεύματα, καθώς πλησιάζουν την κάτω πλευρά της πρόσοψης του κύβου, κοντά στην ακμή της βάσης δημιουργούν μια περιοχή με χαμηλή μέση ταχύτητα και υψηλές αναταράξεις, προκαλώντας πυκνές δίνες ανακυκλοφορίας, οι οποίες εκτείνονται και περιμετρικά της βάσης του κύβου, σχηματίζοντας μια διαχωρισμένη διάταξη ροής. Αυτή η διάταξη ροής, σχήματος U, ονομάζεται, πεταλοειδής στρόβιλος (horseshoe vortex).

Η ροή των υπολοίπων ρευμάτων διαχωρίζεται προς στις αιχμηρές ακμές του κύβου. Παρατηρείται δηλαδή, αποκόλληση της ροής στις προσήνεμες ακμές, της οροφής και των πλαϊνών πλευρών του κύβου, όπου και εμφανίζονται ζώνες ανακυκλοφορίας. Οι ζώνες ανακυκλοφορίας, οι οποίες αποτρέπουν την επανακόλληση της ροής στις επιφάνειες του κύβου, έπειτα παρατηρείται επανακόλληση της ροής στις επιφάνειες του κύβου.
Πρέπει να σημειώσουμε ότι έχει παρατηρηθεί ότι για λεπτά οριακά στρώματα η ροή στην πάνω επιφάνεια του κύβου δεν επανακολλάται με αποτέλεσμα να δημιουργούνται ζώνες ανακυκλοφορίας.

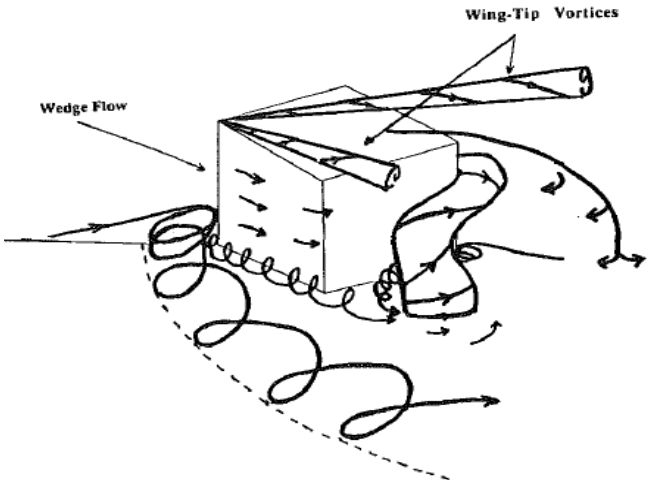


Σχήμα 2.2: *Σχηματική αναπαράσταση του πεδίου ροής γύρω από κύβο τοποθετημένο σε επιφάνεια [11]*

Ροή γύρω από κύβο με γωνία πρόσπτωσης α=45 μοίρες

Η ροή γύρω από κύβο υπό γωνία διαμορφώνεται πολύ διαφορετικά απ' ότι σε κάθετη ροή και έχει μελετηθεί από πλήθος εργασιών [8],[10],[12],[13] . Ιδιαίτερη διαφοροποίηση έχει παρατηρηθεί στην οροφή του κύβου, ενώ και πάλι διαμορφώνονται παρόμοια χαρακτηριστικά για ομοιόμορφη ροή και για ροή σε οριακό στρώμα. Ειδικό ενδιαφέρον παρουσιάζει η δημιουργία δομής ζεύγους στροβίλων στην πάνω επιφάνεια του κύβου.[13]

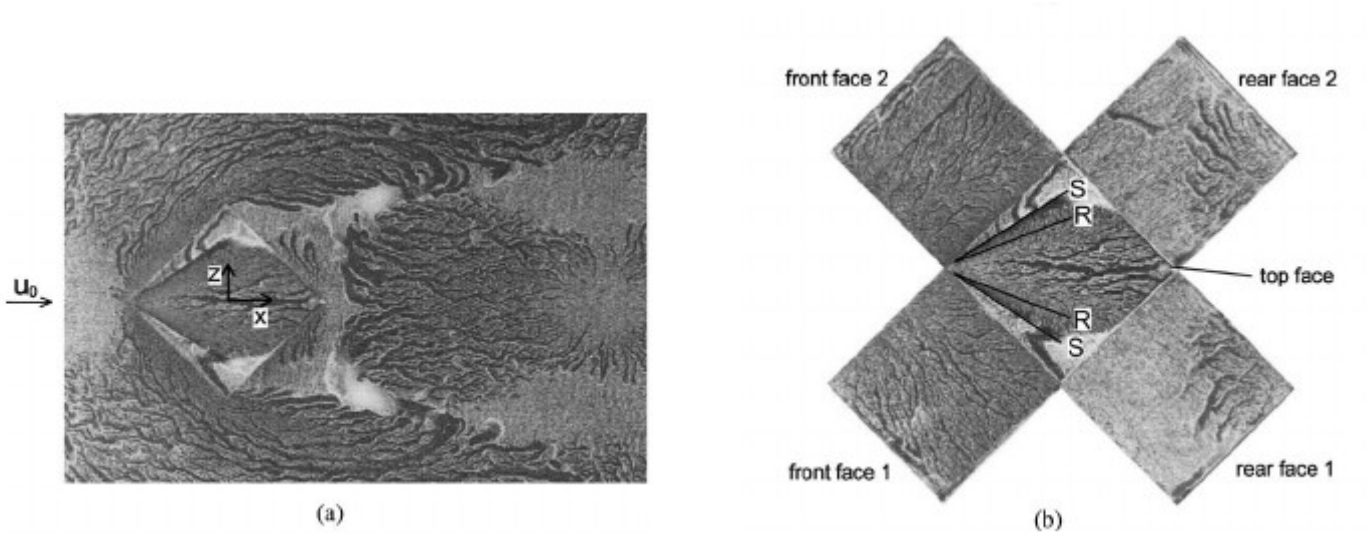
Στην βάση του κύβου διαμορφώνεται ο πεταλοειδής στρόβιλος όπως και στην περίπτωση της κάθετης ροής. Στην βάση, στις δύο πίσω πλευρές, η αποκολλημένη ροή επανακολλάται σε περίπου 2.7 ύψη κύβου από το κέντρο του κύβου. Μια ροή ανακυκλοφορίας διαμορφώνεται μεταξύ περιοχής επανακόλλησης και κύβου, που προκαλεί ανοδική ροή στο πίσω μέρος του κύβου . Η αλληλεπίδραση μεταξύ πεταλοειδούς στροβίλου και αποκολλημένης ροής δημιουργεί τοξωτό στρόβιλο πίσω από τον κύβο σε απόσταση περίπου ενός ύψους κύβου από το κέντρο του κύβου.



Σχήμα 2.3: *Η ροή γύρω από κύβο με γωνία πρόσπτωσης 45^0 [13]*

Στην οροφή διακρίνεται ένα ζεύγος από γραμμές αποκόλλησης της ροής που εκτείνονται από την γωνία προσβολής εώς τις δύο πίσω πλευρές, όπως επίσης και ένα ζεύγος γραμμών επανακόλλησης της ροής μεταξύ των γραμμών αποκόλλησης. Το κύριο χαρακτηριστικό της οροφής είναι το ζεύγος των κωνικών στροβίλων χαμηλής πίεσης (conical vortices) που δημιουργείται από την ακμή προσβολής, το οποίο είναι χαρακτηριστικό ροής μιας δέλτα πτέρυγας με μεγάλη γωνία πρόσπτωσης. Σε αντίθεση με

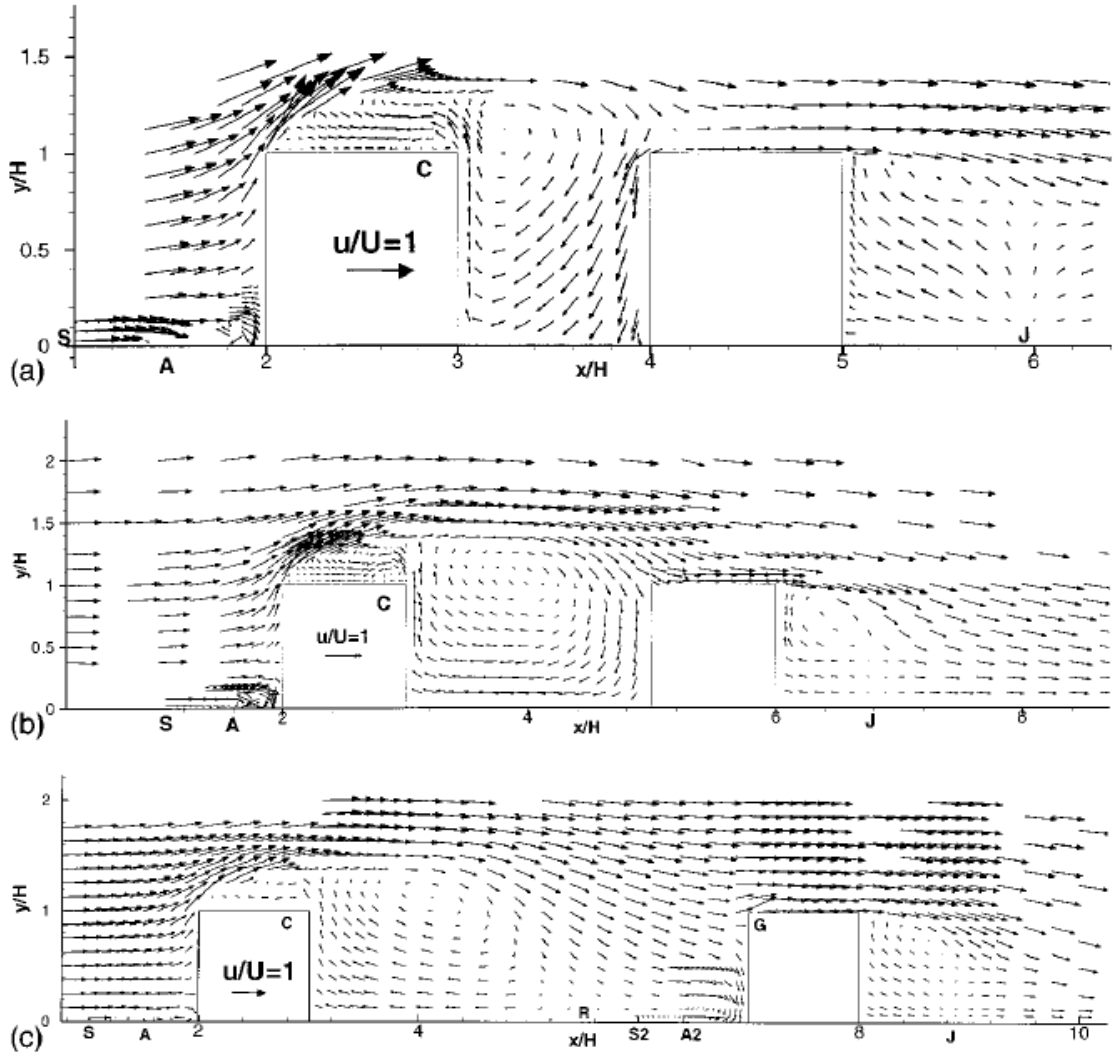
την δέλτα πτέρυγα, οι κωνικοί στρόβιλοι είναι ασταθείς ακόμη και στην περίπτωση ομοιόμορφης ομαλής ροής. Συγκεκριμένα, οι άξονες της σπείρας καθώς και η ένταση των κωνικών στροβίλων, μεταβάλλονται περιοδικά.



Σχήμα 2.4: *εικόνες από αποτύπωση σε φιλμ λαδιού του μοτίβου της ροής σε (α) κάτοψη και (b) στις πλευρές του κύβου* [10]

Ροή γύρω από ζεύγος κύβων σε σειρά ανάντι στη ροή

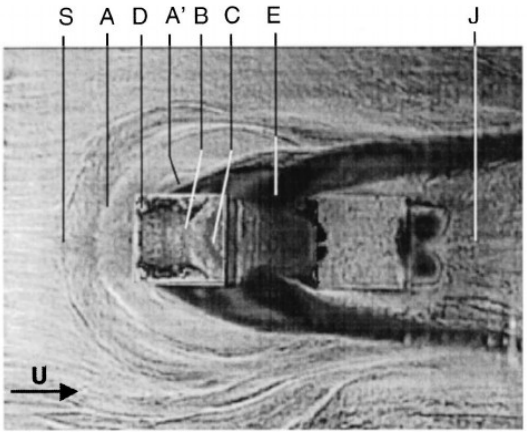
Στη περίπτωση αυτή, μας ενδιαφέρει το πως διαμορφώνεται η ροή γύρω από δύο επιφανειακά τοποθετημένους κύβους σε σειρά ανάντι της ταχύτητας της ροής. Εδώ ο δεύτερο κατά τη φορά της ροής κύβο δέχεται τον ομόρρου του πρώτου.
Χαρακτηριστικό της ροής σε αυτή την περίπτωση είναι ότι η μορφή της εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την απόσταση μεταξύ των δυο κύβων, υπάρχει δηλαδή αλληλεπίδραση μεταξύ των κύβων.[13]



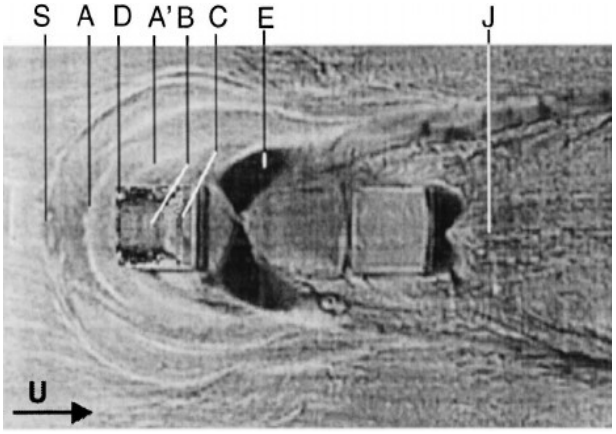
Σχήμα 2.5: *Διανυσματα ταχύτητας στο επίπεδο συμμετρίας z/H=0 για (α) S/H=1, (β) S/H=2, (γ) S/H=4 [14]*

Χαρακτηριστική είναι η, ανάντι του πρώτου κατά τη διεύθυνση της ροής κύβου, ύπαρξη πεταλοειδούς στροβίλου. Η περιοχή της ανακυκλοφορίας του στροβίλου αυτού, περιλαμβάνει μια περιοχή υψηλής διάτμησης η οποία είναι ακριβώς πριν τον στρόβιλο. Η περιοχή υψηλής διάτμησης επεκτείνεται ακολουθώντας τον πεταλοειδή στρόβιλο στις πλευρές του κυβικού εμποδίου.

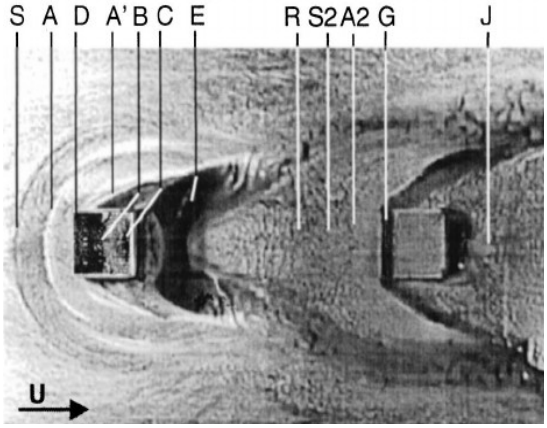
Η ροή αποκολλάται στην μπροστινή άνω ακμή δημιουργώντας μια τρισδιάστατη περιοχή ανακυκλοφορίας στην πάνω πλευρά του πρώτου κύβου. Ταυτόχρονα, υπάρχει και οπισθοροή από τον ομόρρου του πρώτου κύβου προς την άνω πλευρά που δημιουργεί έναν δευτερεύον στροβιλισμό στην πάνω πλευρά. Όπως αναφέραμε και πριν, η ροή αλλάζει σημαντικά με την απόσταση μεταξύ των δύο σωμάτων. Για μικρές αποστάσεις (S/H <1.4) το στρώμμα διάτμησης επανακολλάται στην πάνω πλευρά του δεύτερου κύβου. Για H/S=1, η ροή στον χώρο ενδιάμεσα χαρακτηρίζεται από ένα ισχυρό ρεύμα προς τα κάτω παράλληλα στην μπροστινή επιφάνεια του δεύτερου κύβου, που οδηγεί σε έναν διακριτό στρόβιλο ανακυκλοφορίας.



(a)



(b)



(c)

Σχήμα 2.6: *Γραμμές ροής που έχουν ληφθεί πάνω στη επιφάνεια με την μέθοδο λαδιού για (α) S/H=1, (β) S/H=2, (γ) S/H=4. Τα γράμματα αναφέρονται σε χαρακτηριστικά της ροής: S: κύρια γραμμή αποκόλησσης, A: γραμμή υψηλής διάτμησης από τον πεταλοειδή στρόβιλο, A': γραμμή διάτμησης που δημιουργείται εξαιτίας των στροβίλων των προσήνεμων κάτω γωνιών, B: επαναποκόλληση της οπισθοροής στην πάνω επιφάνεια, C: δευτερεύουσα αποκόλληση από την οπισθοροή του ομόρρου προς την υπήνεμη ακμή της άνω επιφάνειας, D: συγκέντρωση στροβιλότητας, E: στροβιλισμοί που δημιουργούνται από τις πίσω γωνίες στον ομόρρου, R,S2,A2:περιοχή επανακόλλησης, και γραμμές αποκόλησης και προσκόλησης μεταξύ των κύβων (για S/H=4 μόνο).* [14]

Για ενδιάμεση απόσταση μεταξύ των σωμάτων, το στρώμα διάτμησης αποκολλάται από την ακμή προσβολής της πάνω επιφάνειας του πρώτου κύβου και προσπίπτει στην μπροστινή αντίστοιχη ακμή του δεύτερου κύβου, έτσι ώστε η ροή να είναι τελείως στρωτή.
Για μεγάλο κενό ανάμεσα στους δυο κύβους, η ροή επανακολλάται στην επιφάνεια ενδιάμεσα. Στη συνέχεια, η ροή αποκολλάται ξανά πριν από το δεύτερο κυβικό εμπόδιο και δημιουργείται διακριτός πεταλοειδής στρόβιλος και γύρω από τον δεύτερο κύβο. [13]

2.3 Η μέθοδος PIV (Particle Imaging Velocimetry)

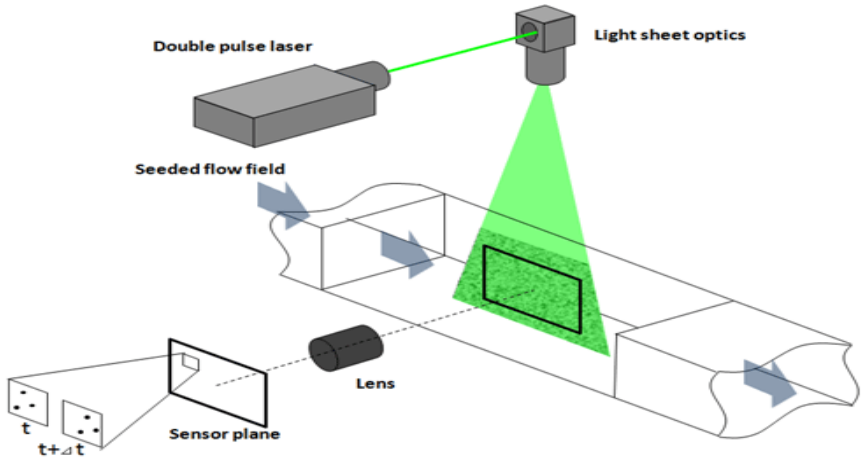
Η μέθοδος PIV, είναι μία μέθοδος μέτρησης της ταχύτητας της ροής με την οποία μπορούμε να καταγράψουμε τα διανύσματα της ταχύτητας ενός ρευστού σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο. Με την απλή μέθοδο PIV μπορούν να μετρηθούν μόνο συνιστώσες της ταχύτητας σε δυο διευθύνσεις παράλληλα στο επίπεδο μέτρησης. Με την πιο εξελιγμένη μέθοδο Stereo PIV μπορούμε να μετρήσουμε και τη τρίτη συνιστώσα της ταχύτητας του ρευστού, κάθετα στο επίπεδο μέτρησης. [15],[16]

Θα επιδιώξουμε να δώσουμε μια γενική περιγραφή αυτής της μεθόδου. Αρχικά,γίνεται εμπλουτισμός του ρευστού με σωματίδια κατάλληλων χαρακτηριστικών ώστε να ακολουθούν όσο γίνεται ποιο πιστά τη ροή. Το επίπεδο στο οποίο θέλουμε να καταγράψουμε τα διανύσματα των ταχυτήτων του ρευστού, φωτίζεται από κατάλληλη πηγή φωτισμού και οι φωτογραφικές μηχανές λαμβάνουν φωτογραφίες με χρονική διαφορά Δt.

Τα σωματίδια ελαίου που ψεκάζονται συνήθως στη ροή του αέρα πρέπει να έχουν πολύ μικρή διάμετρο , οπότε για να είναι δυνατή η καταγραφή τους από τις κάμερες είναι σημαντικό να φωτίζονται αρκετά. Για το λόγο αυτό προτιμάται καθολικά η χρήση laser, αφού αυτά δίνουν τη δυνατότητα συγκέντρωσης φωτεινής ισχύος ενώ η μονοχρωματική ακτινοβολία καθιστά τις εικόνες πιο εύκολα επεξεργάσιμες. Επιπρόσθετα προτιμώνται laser διπλού παλμού ώστε να μπορεί να ορισθεί η χρονική διαφορά Δt μεταξύ ενός ζεύγους εικόνων σε αρκετά μικρούς χρόνους. Έτσι, οι φωτογραφίες λαμβάνονται ανά ζεύγη έχοντας μικρή χρονική διαφορά μεταξύ τους.

Η βασική αρχή της μεθόδου αυτής είναι η εύρεση της μετατόπισης Δs των σωματιδίων από ένα ζεύγος εικόνων σε χρονική διαφορά Δt. Με το τρόπο αυτό υπολογίζονται τα διανύσματα των ταχυτήτων σε κάθε στιγμιότυπο. Για το Stereo PIV στη συνέχεια, έχοντας τα ταυτόχρονα στιγμιότυπα των ταχυτήτων από δυο κάμερες σε κατάλληλη μεταξύ τους γωνία ως προς το στόχο τους (60-90 μοίρες) μπορεί να υπολογιστεί και η τρίτη συνιστώσα της ταχύτητας.

Για να υπολογιστούν οι μετατοπίσεις των σωματιδίων, κάθε εικόνα χωρίζεται σε περιοχές ελέγχου (interrogation area) με συγκεκριμένο μέγεθος η κάθε μία. Στις αντίστοιχες περιοχές μεταξύ των διαδοχικών εικόνων υπολογίζεται η μετατόπιση των σωματιδίων η οποία προκύπτει χρησιμοποιώντας μεθόδους στατιστικής υποθέτοντας ότι τα σωματίδια κινήθηκαν ομοιόμορφα ανάμεσα στους δύο παλμούς.



Σχήμα 2.7. *Τυπική διάταξη PIV [17].*

Ιστορικά, η τεχνική αυτή άρχισε να αναπτύσσεται τα τέλη της δεκαετίας του '70. Στην αρχή η λήψη φωτογραφιών γινόταν από κάμερες με φιλμ ενώ η επεξεργασία των εικόνων ήταν αρκετά δύσκολη. Ζητήματα υπήρχαν ακόμα με τη πηγή φωτισμού καθώς και με το συγχρονισμό του φωτισμού και των φωτογραφικών μηχανών. Με τα χρόνια πολλά από αυτά τα προβλήματα λύθηκαν με την εξέλιξη των μικροϋπολογιστών, την εισαγωγή καμερών CCD

Η μέθοδος PIV έχει ιδιαίτερα πλεονεκτήματα, καθώς μας επιτρέπει να καταγράψουμε τα διανύσματα ροής του αέρα σε ένα ολόκληρο επίπεδο. Μας δίνει ταυτόχρονα και ποσοτικά και ποιοτικά στοιχεία για τη ροή πράγμα που τη καθιστά ιδανική για τη μελέτη μη μόνιμων φαινομένων. Ακόμα είναι μια μέθοδος μη παρεμβατική στη ροή, γεγονός που την καθιστά πιο αξιόπιστη.

Βασικό μειονέκτημα της είναι η δυσκολία να γίνουν μετρήσεις κοντά σε επιφάνειες στερεών σωμάτων λόγων ανακλάσεων του φωτός που καλύπτει την σκέδαση στα σωματίδια ενώ είναι και επικίνδυνο για τους αισθητήρες των ψηφιακών καμερών.

Κεφάλαιο 3: Πειραματική διαδικασία και εξοπλισμός

Το πείραμα αυτό αποτελεί όπως έχει προαναφερθεί, συνέχεια προηγούμενων εργασιών που έχουν πραγματοποιηθεί από το εργαστήριο Τεχνολογικών Καινοτομιών Προστασίας Περιβάλλοντος του Τομέα Ρευστών του ΕΜΠ. Συνεπώς, για να είναι δυνατή η σύγκριση αλλά και η εξαγωγή συμπερασμάτων λαμβάνοντας υπόψιν και τη προηγούμενη είναι απαραίτητη η χρήση ίδιων πειραματικών συνθηκών.

3.1. Η αεροδυναμική σήραγγα

Για το πείραμα αυτό χρησιμοποιήθηκε αεροδυναμική η Μεγάλη Αεροδυναμική Σήραγγα του Εργαστηρίου Αεροδυναμικής του ΕΜΠ. (Σχήμα). Πρόκειται για μια υποηχητική σήραγγα, κλειστού τύπου, με συνολικό μήκος 32 μέτρα.

Η κίνηση του αέρα γίνεται από ανεμιστήρα 7 πτερυγίων με διάμετρο 2.67m, ο οποίος κινείται από ηλεκτροκινητήρα συνεχούς ρεύματος ισχύος 350 hP[18]. Η σήραγγα έχει συνολικά τρεις χώρους δοκιμών με διαφορετικές διατομές – και άρα αναπτυσσόμενες ταχύτητες – καθώς και διαφορετικό μήκος. [18]

Για το παρόν πείραμα,χρησιμοποιήθηκε μεσαίος χώρος δοκιμών. Έχει διαστάσεις πλάτους 3.5m, ύψους 2.5m, και μήκους 12m ενώ εντός του μπορεί να αναπτυχθεί ταχύτητα ροής μέχρι 17m/s. Διαθέτει ηλεκτρικά ελεγχόμενη περιστρεφόμενη τράπεζα (turntable) διαμέτρου 2.5m. Αυτά τα χαρακτηριστικά, και κυρίως το μεγάλο μήκος του, καθιστούν αυτό το χώρο δοκιμών κατάλληλο για τη μελέτη σε συνθήκες περιβαλλοντικών ροών. Τέτοιες εφαρμογές είναι για παράδειγμα - μεταξύ άλλων- η μελέτη μοντέλων ανεμοκινητήρων, η συμπεριφορά κτηριακών κατασκευών, η διασπορά ρυπαντών.

3.2. Το κυβικό μοντέλο κτιρίου

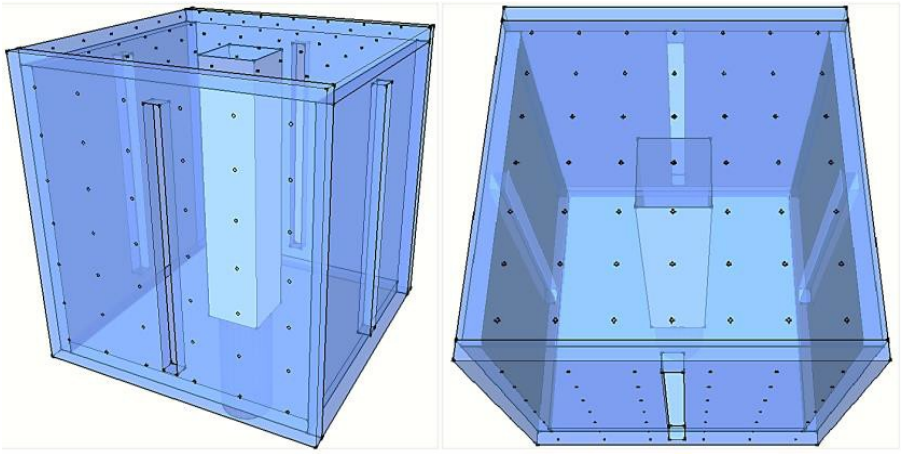
Το πρότυπο μοντέλο κτιρίου που χρησιμοποιήθηκε κατασκευάστηκε και χρησιμοποιήθηκε για τη διπλωματική εργασία από τον Π. Κουτσελάκη [19]. Το μοντέλο είναι κυβικής σχήματος και κατασκευασμένο από τετράγωνα φύλλα Plexiglass πάχους 5 mm H=0.11 m. Όλες οι κάθετες στο έδαφος πλευρές έχουν στο κέντρο τους ένα κατακόρυφο άνοιγμα 90mm x 6mm σε ύψος 1 cm από το έδαφος. Το άνοιγμα αυτό αντιστοιχεί σε περίπου 4.5% του εμβαδού της κάθε επιφάνειας.

Ακόμα, για να είναι δυνατή η μέτρηση κατανομών πίεσης στην επιφάνεια του κύβου,η μία από τις κάθετες πλευρές έχει 42 απολήψεις πίεσης και η οροφή άλλες 49. Οι απολήψεις είναι συνδεδεμένες με σωληνάκια εξωτερικής διαμέτρου 2mm και εσωτερικής 0.5mm.

Για να διατηρηθεί η εσωτερική γεωμετρία του κύβου όσο πιο απλή γίνεται, οι συνδέσεις στο εσωτερικό του κύβου καλύφθηκαν με δεύτερο φύλλο Plexiglass πίσω από κάθε εξωτερική επιφάνεια και οδηγήθηκαν εσωτερικά μιας κατακόρυφης στήλης τετραγωνικής διατομής με πλευρά 22mm στο κέντρο του κύβου. Μέσω της στήλης αυτής τα μανομετρικά σωληνάκια οδηγούνται έξω από τον κύβο

και στη συνέχεια διάμεσου ανοίγματος κάτω από το μοντέλο έξω από το χώρο δοκιμών χωρίς να επηρεάζουν τη ροή.

Ο σχεδιασμός αυτός του μοντέλου μας επιτρέπει τη σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων στα οποία χρησιμοποιείται με υπολογιστικά ανάλογα.



Σχήμα 3.1: *Ο πρότυπος κύβος [4]*

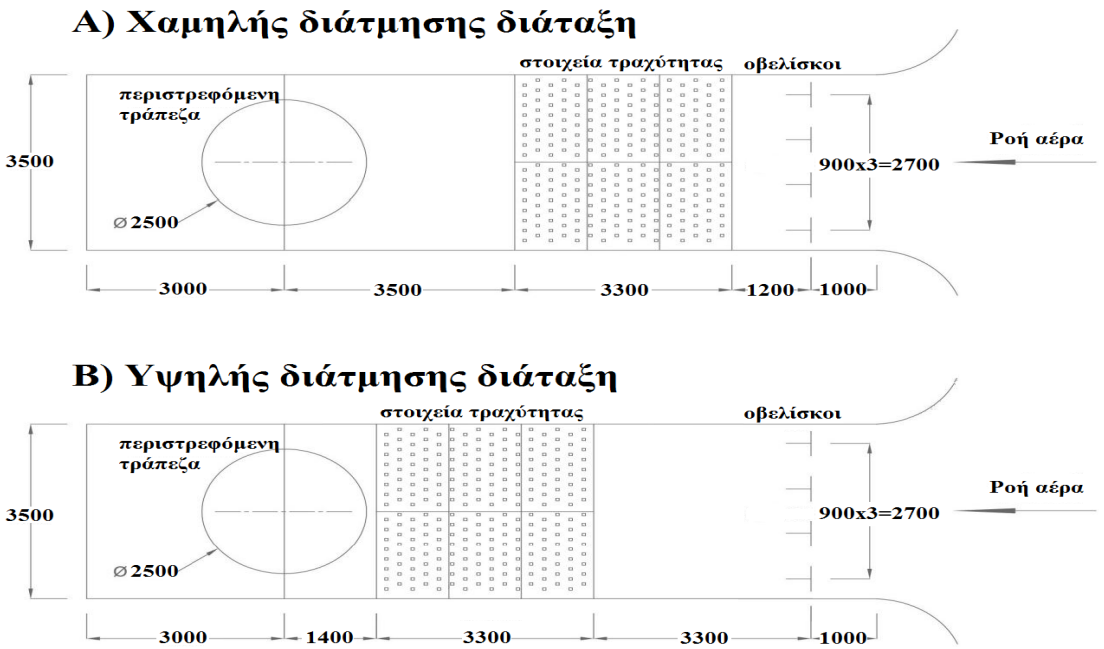
3.3. Εισερχόμενα οριακά στρώματα

Για το πείραμα αυτό χρησιμοποιήθηκε ο εξοπλισμός που σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε από τον J.Xing [20] και ποιο συγκεκριμένα οι διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν στην συνέχεια για μετρήσεις με το παρόν μοντέλο σε προηγούμενα πειράματα [3] ,[4], [5]

Ο εξοπλισμός αυτός αποτελείται από δυο μέρη παθητικών στοιχείων, και πιο συγκεκριμένα από συνδυασμό οβελίσκων (spires) και στοιχείων τραχύτητας (roughness elements) στο έδαφος του χώρου δοκιμών. Με τους οβελίσκους επιτυγχάνεται η αύξηση του οριακού στρώματος ενώ με τα στοιχεία τραχύτητας προσομοιώνεται το η τραχύτητα του εδάφους.

Οι οβελίσκοι έχουν τριγωνικό σχήμα και διαστάσεις: ύψος h=180cm και πλάτος βάσης b=20cm. με στόχο ύψος οριακού στρώματος δ=1-1.5m εντός σήραγγας σε τιμές α=0.12-0.3, και μια κλίμακα αναλογίας 1:300 που θα αντιστοιχεί σε ύψος πραγματικού οριακού στρώματος 400-450m. Τα στοιχεία τραχύτητας είναι κυβικού σχήματος με πλευρά k=5cm και απόσταση μεταξύ τους D=20cm.

Τα στοιχεία είναι κατασκευασμένα από φενιζόλ και είναι τοποθετημένα πάνω σε μπλοκ πιεσμένου χαρτιού, διαστάσεων 1,75mx1,10 m. Η διάταξη των στοιχείων αποτελείται από έξι τέτοια μπλοκ
και καταλαμβάνει 3.30 m από το μήκος του χώρου δοκιμών (Σχήμα 3.2). Η διάταξη αυτή μετακινείται εύκολα, οπότε μπορούμε με μια απλή μετακίνηση να παράγουμε οριακά στρώματα διαφορετικά χαρακτηριστικά. Οι διατάξεις απεικονίζονται στο σχήμα

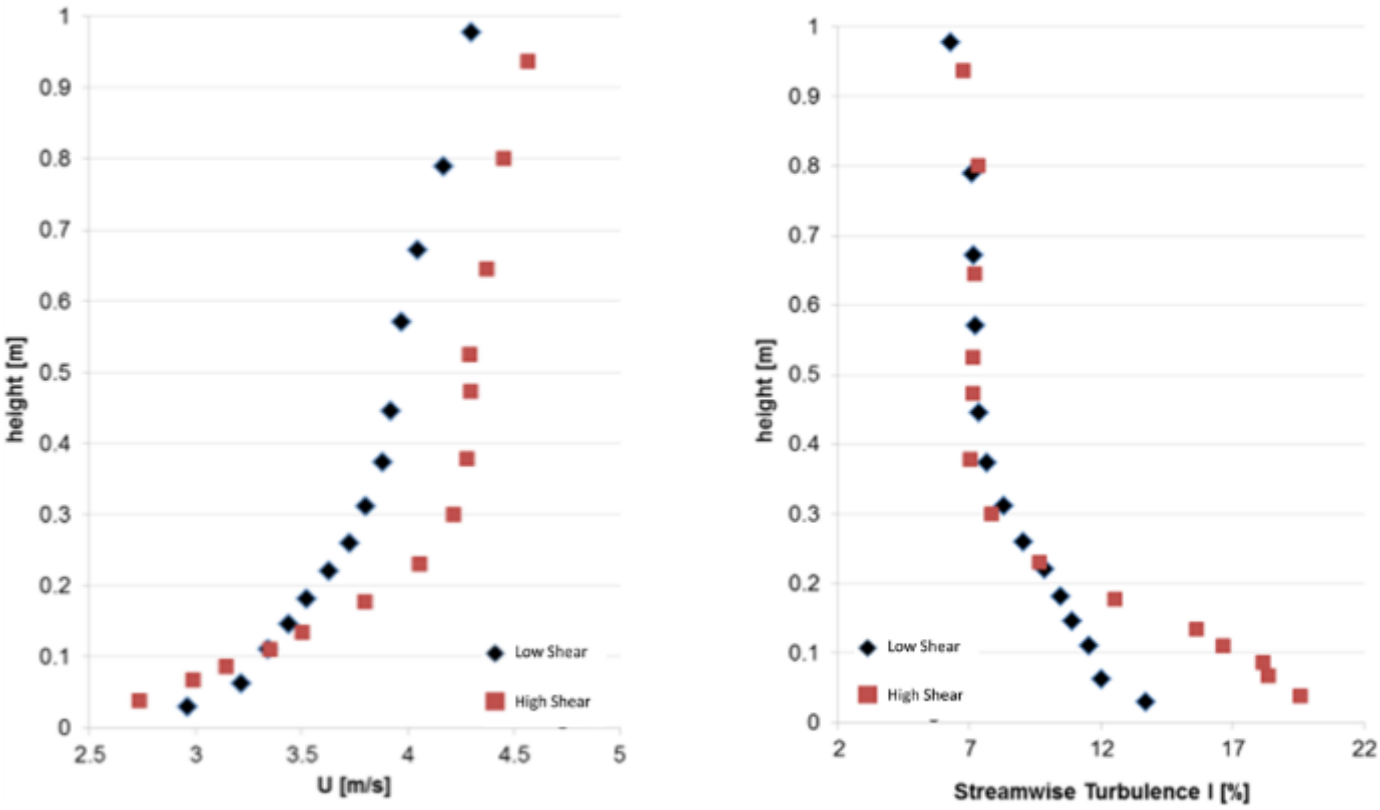


***Σχήμα 3.2**: Οι δυο διατάξεις παθητικών στοιχείων δημιουργίας τυρβώδους οριακού στρώματος που χρησιμοποιήσαμε [3]*

Τα χαρακτηριστικά των εισερχόμενων οριακών στρωμάτων στο κέντρο της τραπέζης όπου τοποθετείται και το μοντέλο μας είναι:

	Α οριακό στρώμα	**Β οριακό στρώμα**
Ύψος οριακού στρώματος **δ [mm]**	**1210**	**1320**
Ταχύτητα διάτμησης u_***[m/s]**	**0.19**	**0.27**
Ύψος τραχύτητας z_0 **[mm]**	**0.05**	**0.70**
Εκθέτης **α**	**0.12**	**0.18**

Ενώ το τα προφίλ ταχυτήτων και η κατανομή τύρβης καθ΄ύψος φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα:



(a) (b)

Σχήμα 3.3: *Διαγράμματα κατά το ύψος για (a) τη μέση ταχύτητα και (b) την ένταση τύρβης κατά την κατεύθυνση της ροής για τα δυο οριακά στρώματα. [5]*

Στο ύψος του κύβου έχουμε ταχύτητα U_{HA} =3.55 m/s και U_{HB} =3.21 m/s για το 'A' και το 'B' οριακό στρώμα αντίστοιχα. Τα επίπεδα τύρβης στο ύψος του κύβου είναι 12% για το 'A' οριακό στρώμα ενώ ενώ για το 'B' οριακό στρώμα 18.0%. Και για τις δυο περιπτώσεις η ταχύτητα της ελεύθερης ροής είναι U=5.1 m/s.

Ο αριθμός Reynolds δίνεται, ως γνωστόν, από το λόγο: $Re=\frac{uH}{v}$ όπου στο H θα έχουμε το ύψος του κύβου και στο u τη ταχύτητα σε αυτό το ύψος κατά τη συνήθη πρακτική για αυτής της γεωμετρίας σώματα. Προκύπτει Re_A=25000 και Re_B=22000 για το 'A' και 'B' οριακό στρώμα αντίστοιχα.

Ακόμα χρησιμοποιούμε τον συντελεστή κλίμακας προσομοίωσης [8] . Η ολοκληρωματική κλίμακα τύρβης καθ'υψος των οριακών στρωμάτων καθώς και και το ύψος τραχύτητας είναι γνωστά μεγέθη. Η τιμή του S μεταβάλλεται με το ύψος, όμως στα πρώτα 30 cm παρουσιάζει σχετική σταθερότητα, οπότε μπορεί να θεωρηθεί η μέση τιμή S=400 ως ο συντελεστής προσομοίωσης για τις περιπτώσεις που εξετάζονται.

3.4. Διάταξη και μετρήσεις

περιγραφή εξοπλισμού

Για το πείραμα αυτό αξιοποιήσαμε τον εξοπλισμό Stereo PIV του εργαστηρίου και πιο συγκεκριμένα:

- Ζευγάρι καμερών 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
- Nd: Yag Laser ισχύος δέσμης 200 mJ της Litron Lasers
- 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.
- Υπολογιστής με προσαρμοσμένες ειδικές κάρτες για επικοινωνία με τις κάμερες, εξωτερικά συνδεδεμένο synchronizer για τον συνγχρονισμό των παλμών του laser με τις κάμερες, καθώς και το ειδικό λογισμικό Insight3G για τον έλεγχο των ανωτέρω και τη λήψη των εικόνων.

Επιλογή πειραματικών σεναρίων

Όπως αναφέρθηκε και προηγούμενα το κυβικό μοντέλο τοποθετήθηκε το κέντρο του στρεφόμενης τραπέζης. Με την μπροστινή του πλευρά (ορίζουμε μπροστινή τη πλευρά με τις μανομετρικές οπές) κάθετη στην εισερχόμενη ροή. Από τα τέσσερα ανοίγματα κλείσαμε τα πλευρικά και αφέθηκαν ανοιχτά της προσήνεμης και υπήνεμης πλευράς.

Ακόμα, κατασκευάστηκε δεύτερος κύβος ο οποίος τοποθετήθηκε σε θέσεις 2H ανάντι και κατάντι του μοντέλου ώστε να εξεταστεί η επιρροή της ύπαρξης δεύτερου εμποδίου στη ροή γύρω από ένα μοντέλο κυβικού σχήματος, καθώς και η επίδραση στον διαμήκη αερισμό του. Το δεύτερο αυτό εμπόδιο κατασκευάστηκε από επενδυμένο ξύλο έτσι ώστε να είναι σχετικά λεία η επιφάνεια του. Οι διαστάσεις του ήταν αντίστοιχες του μοντέλου μας, δηλαδή με μήκος ακμής H=11 cm.

Η επιλογή των θέσεων τοποθέτησης του δεύτερου εμποδίου έγινε με βάση τη συνήθη πρακτική στη συναφή βιβλιογραφία [14]. Ακόμα να σημειώσουμε ότι πάρθηκαν μετρήσεις και για απόσταση 4H, ωστόσο για ποικίλους λόγους δε θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα από αυτές τις μετρήσεις στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

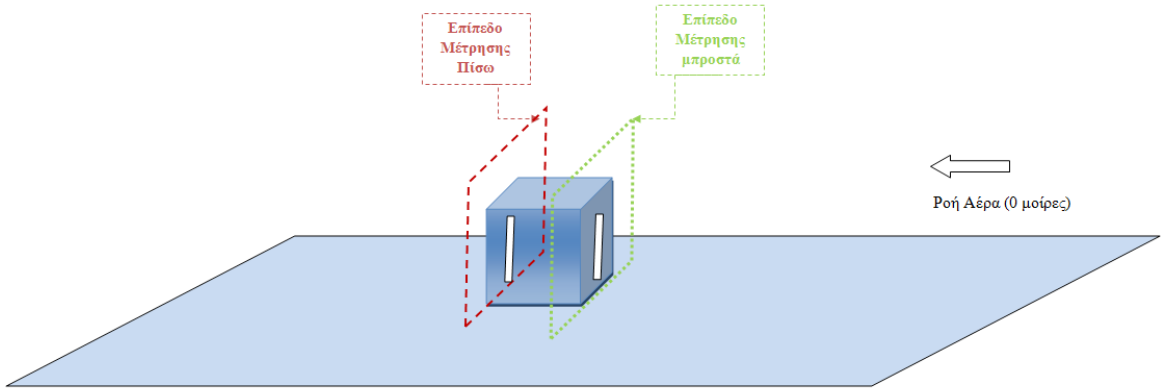
Αν πέρα από την ύπαρξη εμποδίου στις δύο θέσεις που αναφέραμε αθροίσουμε τη περίπτωση χωρίς εμπόδιο καθώς και ότι έχουμε σαν μεταβλητή και το εισερχόμενο οριακό στρώμα,έχουμε συνολικά 6 περιπτώσεις τις οποίες εξετάζουμε.

Επίπεδα μετρήσεων

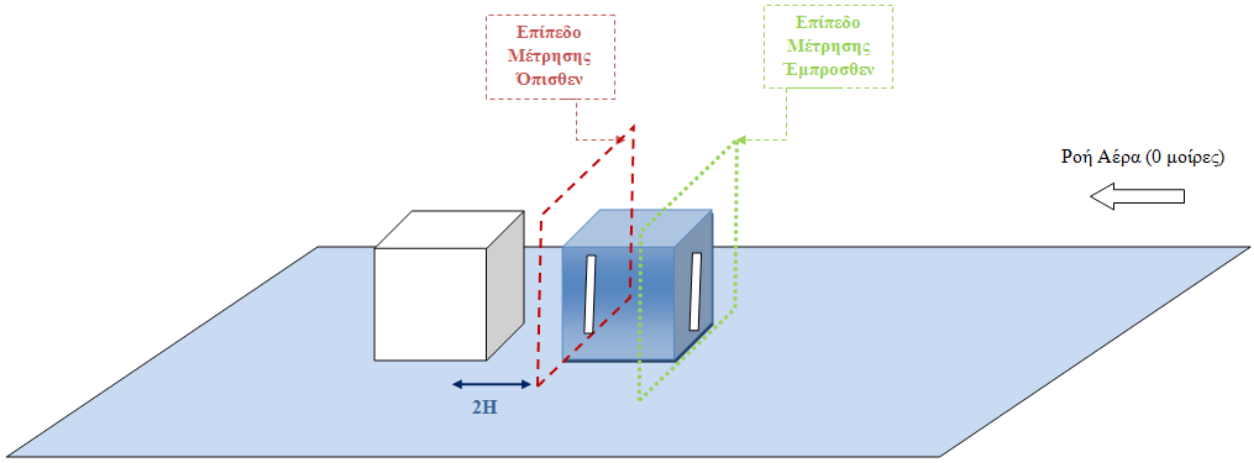
Η επιλογή των θέσεων μέτρησης έγινε με κριτήριο αρχικά, τη μέτρηση των χαρακτηριστικών της ροής στο άνοιγμα, οπότε και έπρεπε να είναι σε μια αρκετά κοντινή απόσταση στις επιφάνειες του μοντέλου. Επιλέχτηκαν δυο θέσεις μέτρησης μια ανάντι του κύβου και μια κατάντι παράλληλες με την προσήνεμη και υπήνεμη πλευρά του κύβου αντίστοιχα. Οι θέσεις αυτές είναι σε απόσταση 5 mm από κάθε πλευρά (σχήμα). Κάθε πλάνο έχει διαστάσεις 20cmx20cm.

Η επιλογή αυτών των θέσεων έγινε με κριτήριο να μετρήσουμε με όσο μεγαλύτερη ακρίβεια γίνεται τη ροή στα ανοίγματα. Για το λόγο αυτό επιλέξαμε επίπεδα μέτρησης παράλληλα στις πλευρές και κάθετα στη ροή σε αντίθεση με προηγούμενες εργασίες που μετρούσανε σε επίπεδα παράλληλα στη ροή. [5], [22] Επίσης, η επιλογή της απόστασης των 5 mm έγινε με κριτήριο ότι ήταν η πιο εγγύς στο άνοιγμα θέση που μπορούσαμε να πάρουμε μέτρηση. Αυτό βέβαια είχε σαν αποτέλεσμα κάποια προβλήματα που θα αναπτυχθούν στο επόμενο υποκεφάλαιο.

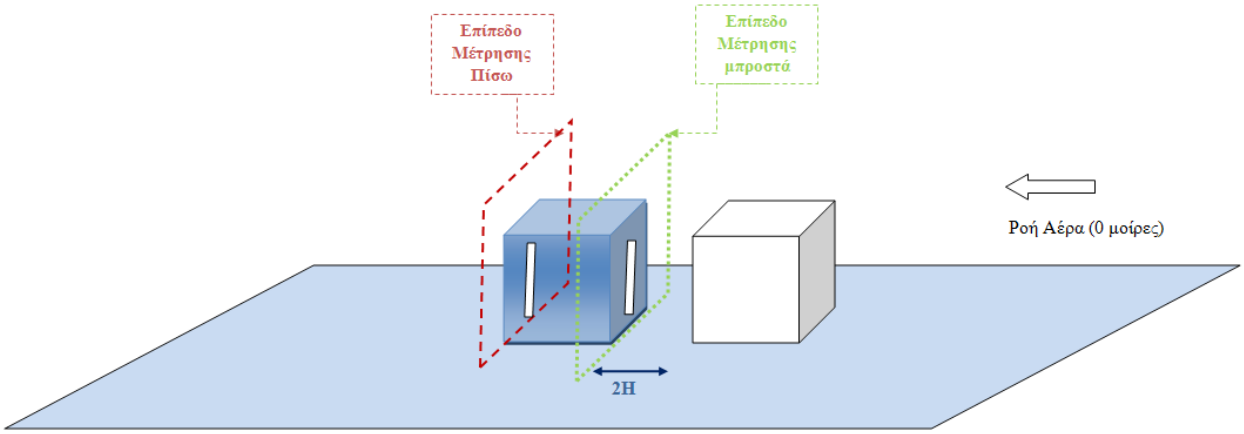
Οι κάμερες είχαν τοποθετηθεί σε ειδικές ράγες στα πλαϊνά άκρα του χώρου δοκιμών εκατέρωθεν του μοντέλου. Για το πίσω πλάνο είχαν τοποθετηθεί πίσω από το μοντέλο και για το μπροστινό αντίστοιχα.



Σχήμα 3.4: *Σχηματική απεικόνιση των επιπέδων μετρήσεων για τη περίπτωση που έχουμε το μοντέλο χωρίς δεύτερο σώμα στη ροή*



Σχήμα 3.5: *Σχηματική απεικόνιση των επιπέδων μετρήσεων και της διάταξης στην περίπτωση με δεύτερο σώμα 2H κατάντι*



Σχήμα 3.6: *Σχηματική απεικόνιση των επιπέδων μετρήσεων και της διάταξης στην περίπτωση με δεύτερο σώμα 2H ανάντι.*

Στο παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συνοπτικά τα πειραματικά σενάρια

Περίπτωση	Οριακό Στρώμα	Ανοίγματα	Επίπεδο Μέτρησης	Θέση 2ου Κύβου
1	Χαμηλής Διάτμησης (A)	Ανοιχτά	Έμπροσθεν Κύβου	Χωρίς 2ο κύβο
2	Χαμηλής Διάτμησης (A)	Ανοιχτά	Όπισθεν Κύβου	Χωρίς 2ο κύβο
3	Υψηλής Διάτμησης (B)	Ανοιχτά	Έμπροσθεν Κύβου	Χωρίς 2ο κύβο
4	Υψηλής Διάτμησης (B)	Ανοιχτά	Όπισθεν Κύβου	Χωρίς 2ο κύβο
5	Χαμηλής Διάτμησης (A)	Ανοιχτά	Έμπροσθεν Κύβου	2H ανάντη
6	Χαμηλής Διάτμησης (A)	Ανοιχτά	Όπισθεν Κύβου	2H ανάντη
7	Υψηλής Διάτμησης (B)	Ανοιχτά	Έμπροσθεν Κύβου	2H ανάντη
8	Υψηλής Διάτμησης (B)	Ανοιχτά	Όπισθεν Κύβου	2H ανάντη
9	Χαμηλής Διάτμησης (A)	Ανοιχτά	Έμπροσθεν Κύβου	2H κατάντη
10	Χαμηλής Διάτμησης (A)	Ανοιχτά	Όπισθεν Κύβου	2H κατάντη
11	Υψηλής Διάτμησης (B)	Ανοιχτά	Έμπροσθεν Κύβου	2H κατάντη
12	Υψηλής Διάτμησης (B)	Ανοιχτά	Όπισθεν Κύβου	2H κατάντη

Ρυθμίσεις εξοπλισμού Stereo PIV

Αρχικά, απαραίτητη διαδικασία είναι η βαθμονόμηση των καμερών. Σκοπός μας είναι ο υπολογισμός του τρισδιάστατου διανυσματικού πεδίο ταχύτητας του επιπέδου στο οποίο θέλουμε να μετρήσουμε.

Όμως από την κάθε κάμερα μπορεί να εξαχθεί μόνο δισδιάστατο πεδίο ταχυτήτων. Έτσι, είναι απαραίτητο να συσχετιστούν οι δισδιάστατες 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. Το λογισμικό που χρησιμοποιούμε για την διενέργεια των πειραμάτων αυτών έχει τη δυνατότητα με τη χρήση ενός ειδικού στόχου βαθμονόμησης να αναγνωρίσει τα κοινά σημεία μεταξύ των εικόνων που λαμβάνει κάθε κάμερα υπολογίζει πολυώνυμα μεταφοράς με τα οποία γίνεται η μεταφορά στο πραγματικό επίπεδο.

Ο στόχος βαθμονόμησης ακριβώς για να μπορεί το λογισμικό να ξεχωρίσει τα κοινά σημεία, έχει σημάδια (βούλες) με λευκό χρώμα σε μαύρο φόντο ενώ τα σημεία εναλλάσσονται σε δύο επίπεδα. Το σημείο που λαμβάνεται ως κέντρο κατά την σύνθεση των αποτελεσμάτων για να παραχθεί το τρισδιάστατο διανυσματικό πεδίο είναι στο κέντρο του στόχου και είναι ένας λευκός σταυρός.

Ακόμα ο στόχος βαθμονόμησης χρησιμοποιείται για να εξασφαλίσουμε ότι μετράμε το επίπεδο που επιθυμούμε. Αφού τοποθετούμε το στόχο στο επίπεδο που θα πάρουμε μέτρηση πρέπει να έχουμε καθαρή εικόνα και από τις δύο κάμερες. Αυτό σημαίνει ότι χρειάζεται να υπάρχει σωστή εστίαση των φακών στο επίπεδο μέτρησης αλλά και να ικανοποιείται η αρχή του Scheimpflug.

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) [24]. 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:

$$v_R = 1 - 2U_{OO}\frac{\Delta t}{h} \quad (3.2)$$

όπου η ταχύτητα της ελεύθερης ροής και h το πάχος του φύλλου λέιζερ. Το ιδανικό είναι ο λόγος αυτός να προσεγγίζει τη μονάδα.

Ταυτόχρονα, ο χρόνος αυτός δε πρέπει να είναι και πολύ μικρός γιατί αυξάνεται το σχετικό σφάλμα των μετρήσεων και επιπλέον πρέπει να ικανοποιείται ο κανόνας του ¼ σύμφωνα με τον οποίο η εικονική μετατόπιση των σωματιδίων ανάμεσα στους δύο παλμούς δε πρέπει να υπερβαίνει το ¼ του μεγέθους του παραθύρου ελέγχου που στη περίπτωσή μας είναι 32×32 pixel.

Ακόμα, η ελάχιστη καταγραφόμενη ταχύτητα είναι η ταχύτητα για την οποία αντιστοιχεί μετατόπιση 0.1 px. Υπολογίζεται δηλαδή από τη σχέση:

$$u_{res} = 0.1\frac{px}{\Delta t} \quad (3.3)$$

Επομένως, η ελάχιστη ταχύτητα που μπορούμε να καταγράψουμε είναι αντιστρόφως ανάλογη του χρόνου μεταξύ των παλμών.

Συμβιβάζοντας τα παραπάνω κριτήρια, επιλέξαμε χρόνο Δt= 85μs για όλες τιις περιπτώσεις.

Έτσι λαμβάνοντας υπόψιν ότι 1 px αντιστοιχούσε σε 114.877 μm για το μπροστινό πλάνο και σε 108.082 μm για το πίσω, προκύπτει $u_{resf}=0.1352\,m/s$ και $u_{resb}=0.12715\,m/s$. Το ποσοστό σωματιδίων είναι $v_R=0.72$, τιμή που θεωρείται αποδεκτή. [15]

Σχήμα 3.7: *Βαθμονομώντας τις κάμερες για το οπίσθιο επίπεδο*

3.5 Εκτέλεση πειράματος

Κάθε στιγμιότυπο που παίρνουμε με τις κάμερες είναι δύο ζεύγη φωτογραφιών (αφού έχουμε δυο κάμερες που παίρνουν εικόνα ταυτόχρονα) με διαφορά χρόνου μεταξύ τους Δt. Από κάθε ζεύγος μετά την επεξεργασία προκύπτει το διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων αυτού του στιγμιότυπου. Για κάθε περίπτωση λαμβάνουμε 1000 στιγμιότυπα.

Αρχικά πήραμε μετρήσεις για όλες τις περιπτώσεις για το πίσω πλάνο και στη συνέχεια οι κάμερες στήθηκαν από την ανάντι κατά την ροή μεριά για να μετρήσουμε και το μπροστινό επίπεδο.

Ακόμα, θα σημειώσουμε εδώ μια σημαντική δυσκολία που υπήρξε στις μετρήσεις μας, ήταν ότι λόγω της εγγύτητας των επίπεδων μέτρησης στο μοντέλο είχαμε ανακλάσεις φωτός από τη δέσμη του laser. Για το λόγο αυτό χρειάστηκε να γίνει επικάλυψη του μοντέλου με κατάλληλο χαρτί και βαφή του με μαύρη μπογιά ώστε να ελαχιστοποιηθεί το φως που κατέγραφαν οι κάμερες. Παρόλα αυτά, στις φωτογραφίες που τραβήχτηκαν υπήρχαν περιοχές με αυξημένη φωτεινότητα, οι οποίες εξαιρέθηκαν από την επεξεργασία, καθώς είτε δεν δίνανε πληροφορία είτε αυτή περιείχε εμφανώς μεγάλο σφάλμα.

Κεφάλαιο 4: Παρουσίαση Αποτελεσμάτων

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει παρουσίαση αποτελεσμάτων για κάθε περίπτωση ξεχωριστά, για τα δύο επίπεδα μέτρησης κάθε φορά.

Αξίζει να σημειωθεί σε αυτό το σημείο ότι η πειραματική τεχνική του S-PIV έχει το πλεονέκτημα ότι "δίνει" μεγάλο όγκο πληροφορίας για τη ροή σε κάθε σειρά μετρήσεων. Ιδιαίτερη πρόκληση συνιστά η επεξεργασία των δεδομένων και η απομόνωση των στοιχείων που μας ενδιαφέρουν με βάση το σκοπό της έρευνας μας.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας παρουσιάζονται αποτελέσματα που έχουν να κάνουν με γενικά στοιχεία της ροής γύρω από το μοντέλο μας όπως η τυπική απόκλιση των ταχυτήτων σε κάθε επιφάνεια ως προς την ελεύθερη ροή και ο εντοπισμός θέσεων στροβιλισμών με χρήση του Q-κριτηρίου.

Στη συνέχεια, επικεντρωνόμαστε ειδικά στη μελέτη της ροής στα ανοίγματα του κυβικού μοντέλου καθώς κίνητρο για το εν λόγω πείραμα ήταν η μελέτη του αερισμού του διαμέσου αυτού. Παρουσιάζονται πέρα από τον μέσο ρυθμό αερισμού για κάθε περίπτωση, η μεταβολή του στο χρόνο καθώς και η μέση κατανομή του κατά το ύψος του ανοίγματος.

Επεξεργασία εικόνων και εξαγωγή πεδίων ταχυτήτων

Για την επεξεργασία των εικόνων που πήραμε, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Insight4G της TSI, κατασκευάστριας εταιρείας του εξοπλισμού μας. Το λογισμικό αυτό χρησιμοποιώντας τα ζεύγη εικόνων παράγει μέσω της διαδικασίας της ετεροσυσχέτισης του μεταξύ των δυο φωτογραφιών.

Για κάθε ζεύγος εικόνων παράγεται ένα αρχείο με τις τιμές των διανυσμάτων στις δύο διαστάσεις (x,y). Έπειτα από κάθε ζεύγος τέτοιων διανυσματικών πεδίων για τις δύο κάμερες το λογισμικό χρησιμοποιώντας τα πολυώνυμα που γεννήθηκαν από τη βαθμονόμηση με το στόχο, παράγεται το τρισδιάστατο πεδίο ταχυτήτων.

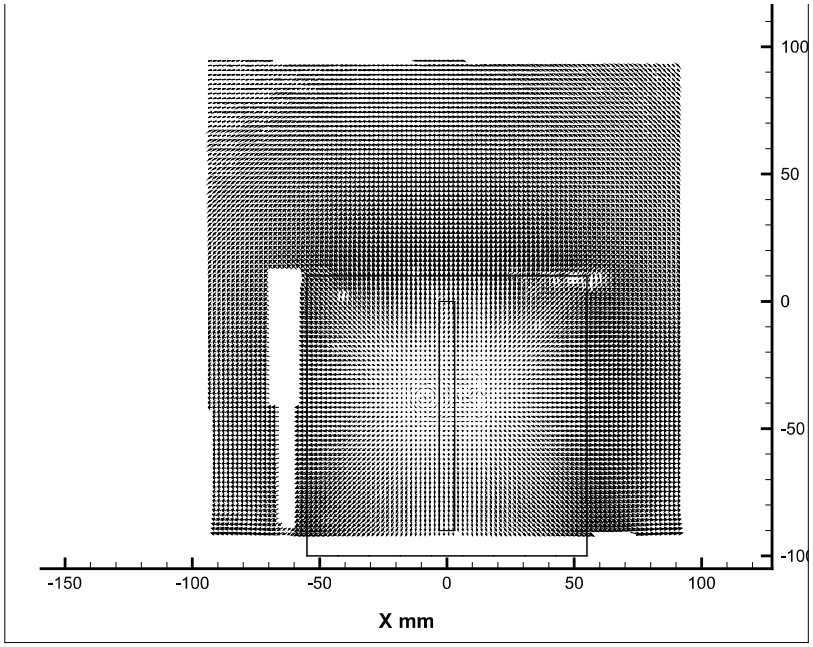
Αρχικά, επιλέξαμε να γίνει προεπεξεργασία στις εικόνες αφαιρώντας από το σύνολο των εικόνων κάθε μέτρησης την εικόνα με την ελάχιστη φωτεινότητα έτσι ώστε να είναι πιο διακριτά τα φωτισμένα σωματίδια.

Για την επεξεργασία επιβάλαμε μια "μάσκα" και επιλέξαμε να αποκλεισθούν από την επεξεργασία οι περιοχές των εικόνων που η φωτεινότητα ήταν μεγάλη με αποτέλεσμα τα παραγόμενα διανύσματα να έιναι εσφαλμένα και να επηρεάζονται και οι γειτονικές περιοχές. Οι διαστάσεις κάθε περιοχής διερεύνησης ορίστηκαν στα 32x32 pixel.

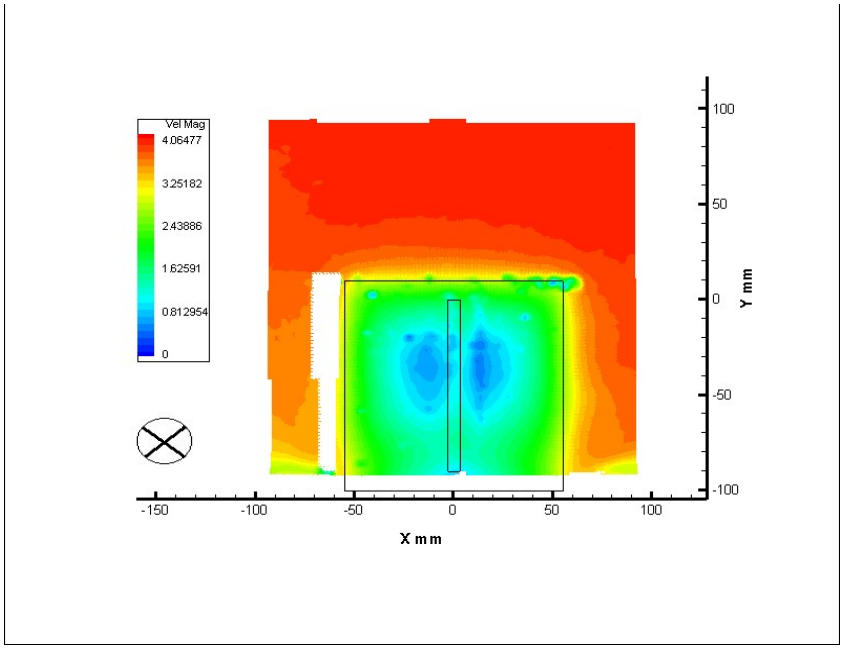
4.1 Το πεδίο ροής

Θα ξεκινήσουμε τη παρουσίαση των αποτελεσμάτων δείχνοντας πρώτα τα διανύσματα των ταχυτήτων που προέκυψαν από την επεξεργασία των εικόνων καθώς και διαγράμματα ισοϋψών καμπύλων. Για

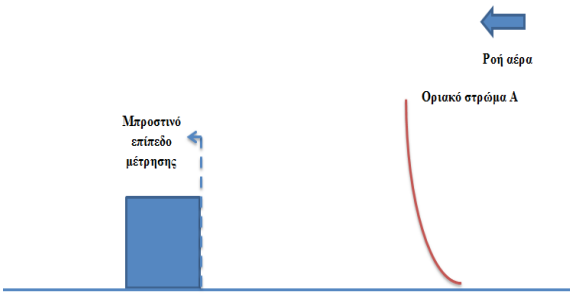
λόγους οικονομίας χώρου θα παραθέσουμε μόνο διαγράμματα ισοϋψών μόνο για το μέτρο της ταχύτητας. Κάθε πεδίο που παρουσιάζεται παρακάτω προέκυψε ως μέσος όρος από 500 συνεχόμενα στιγμιότυπα για κάθε περίπτωση.



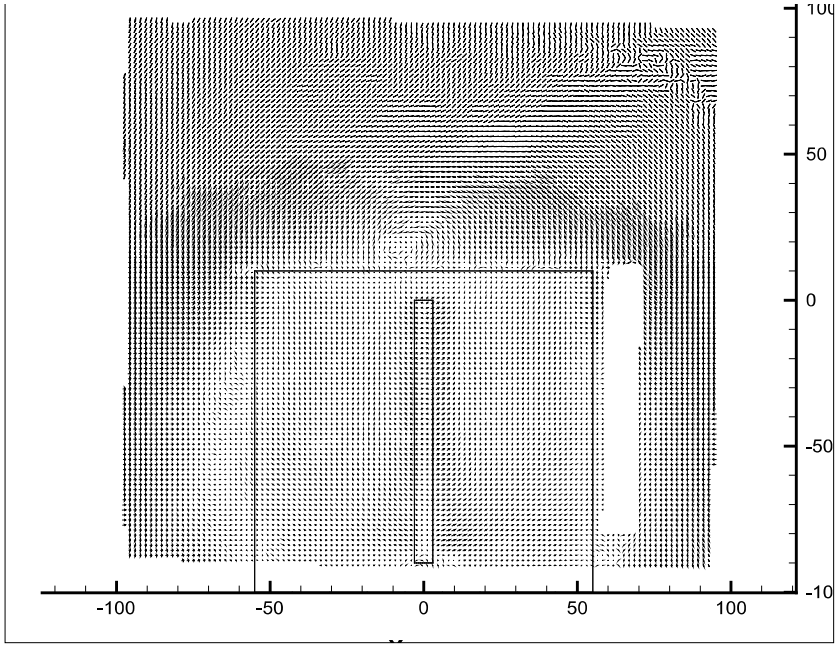
(a)



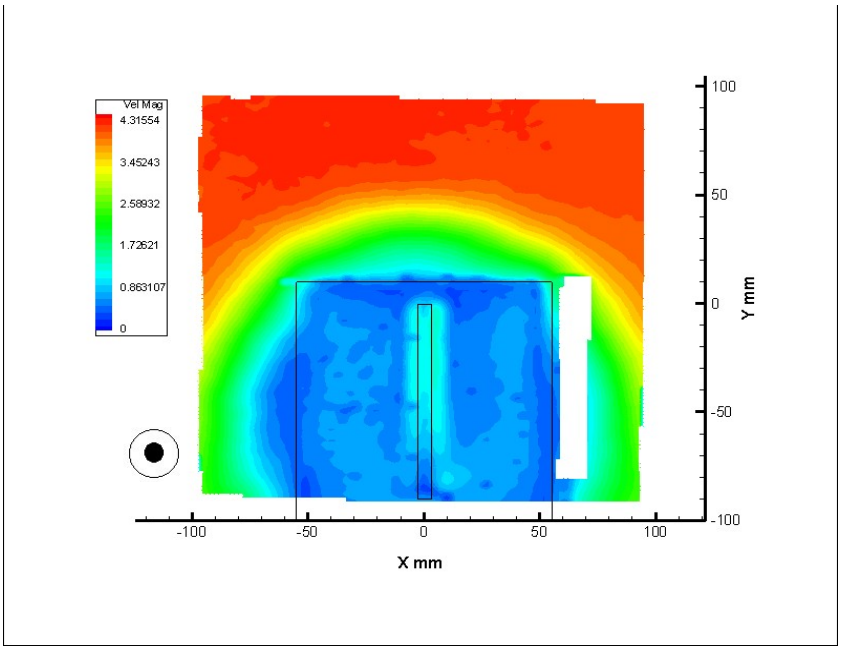
(b)



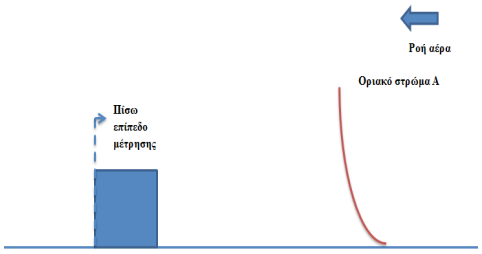
Σχήμα 4.1: ***(a)****Διανύσματα ταχυτήτων και* ***(b)*** *μέτρο ταχύτητας για τη περίπτωση χωρίς δεύτερο κύβο υπό οριακό στρώμα χαμηλής διάτμησης 'Α'. Επίπεδο έμπροσθεν μοντέλου.*



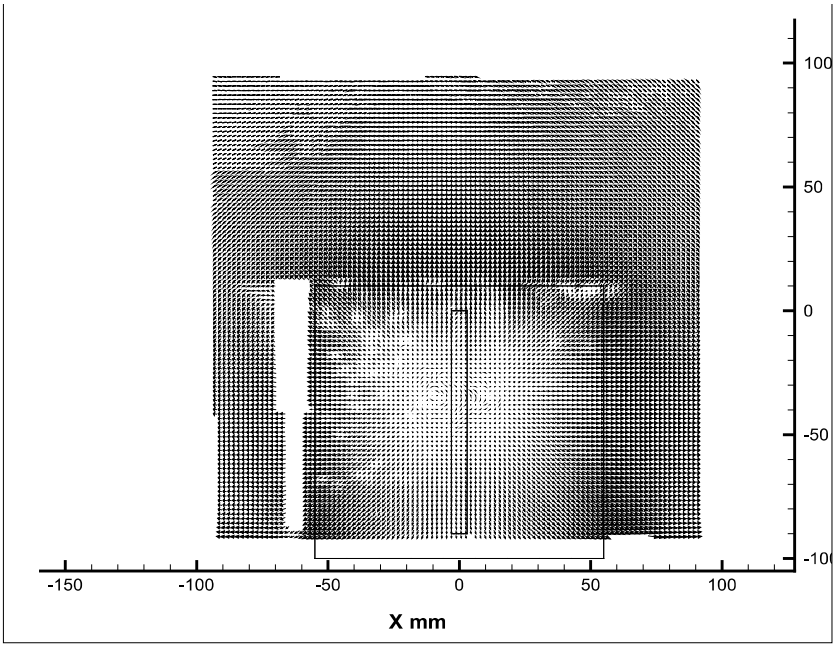
(a)



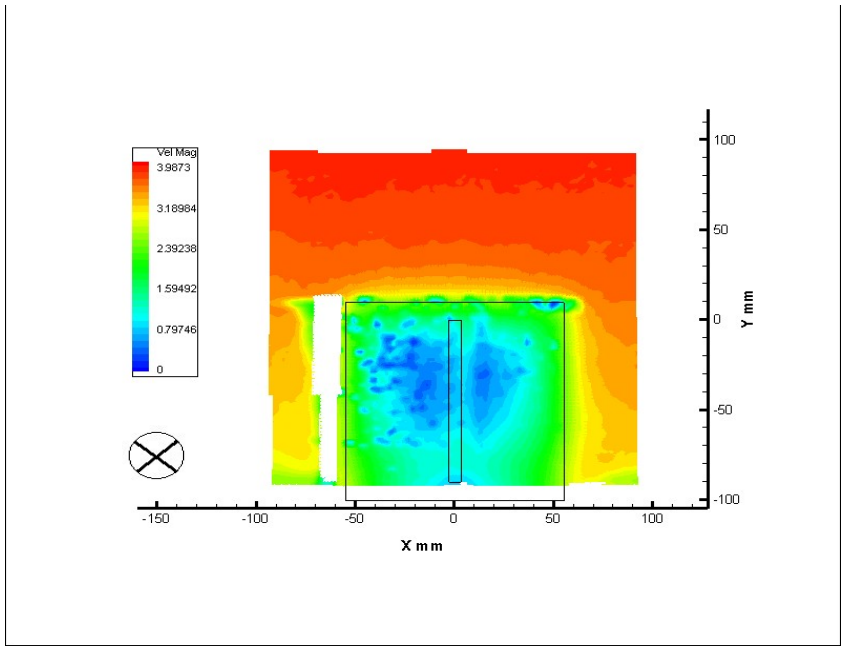
(b)



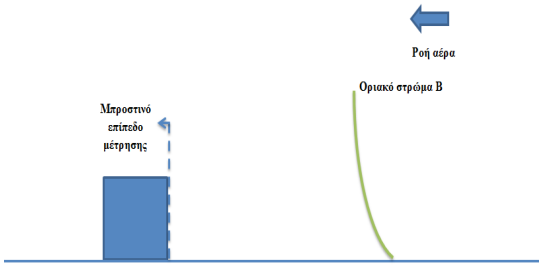
Σχήμα 4.2: (a) *Διανύσματα ταχυτήτων και* ***(b)*** *μέτρο ταχύτητας για τη περίπτωση χωρίς δεύτερο κύβο υπό οριακό στρώμα χαμηλής διάτμησης 'Α'. Επίπεδο όπισθεν μοντέλου.*



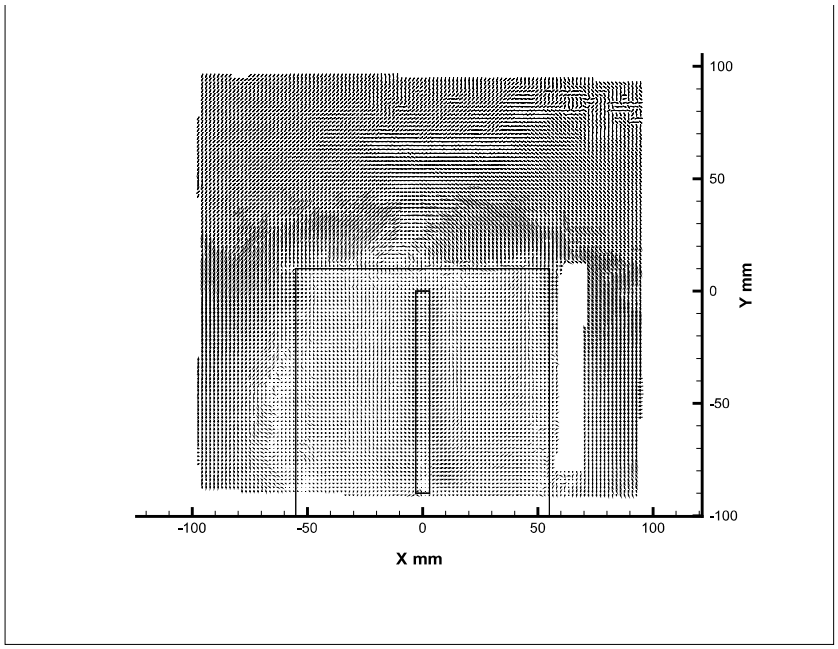
(a)



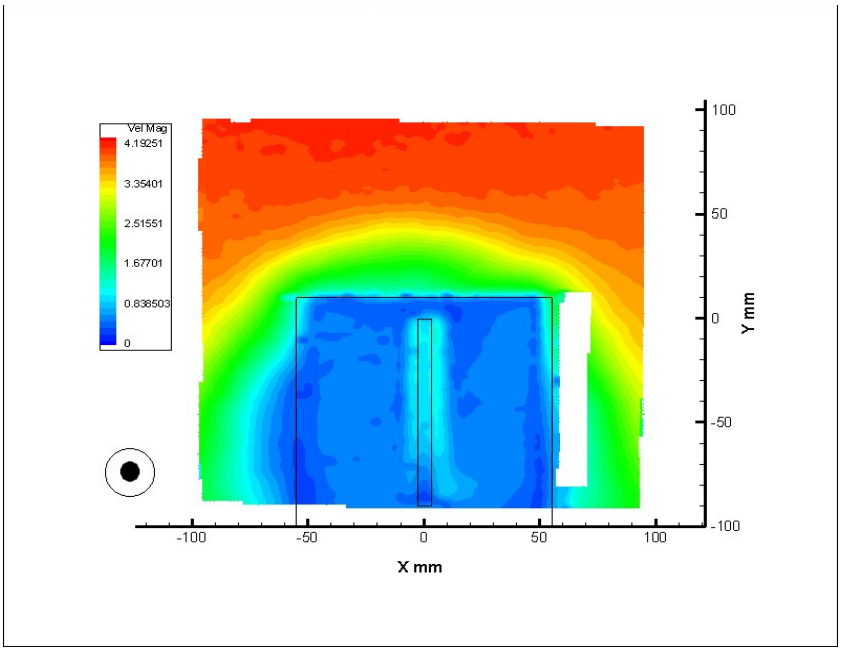
(b)

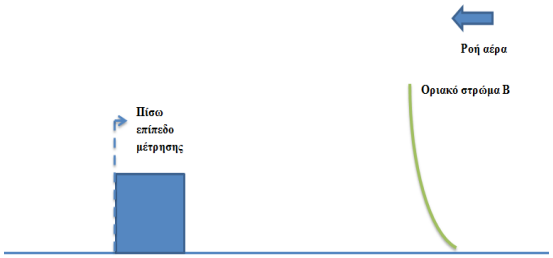


Σχήμα 4.3: *(a) Διανύσματα ταχυτήτων και (b) μέτρο ταχύτητας για τη περίπτωση χωρίς δεύτερο κύβο υπό οριακό στρώμα υψηλής διάτμησης 'B'. Επίπεδο έμπροσθεν μοντέλου.*



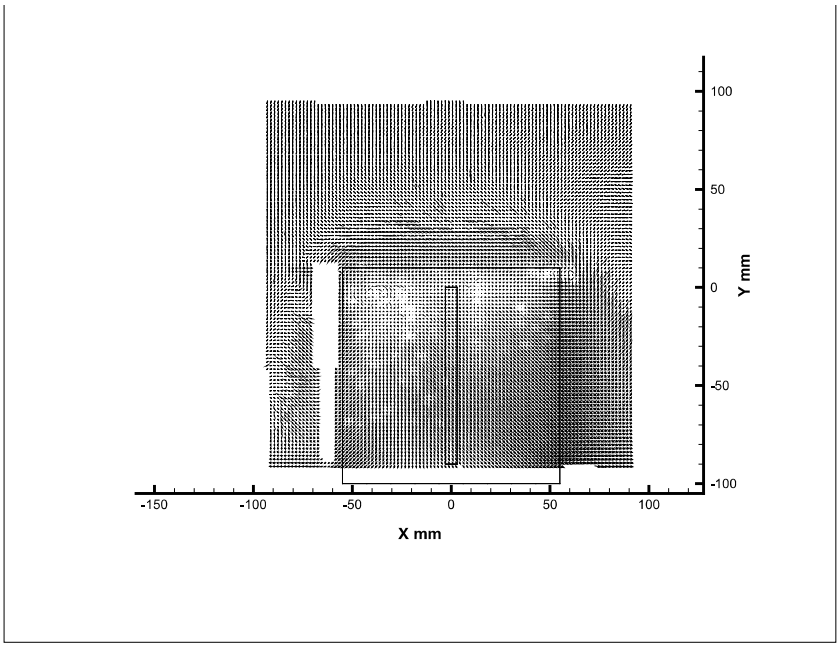
(a)



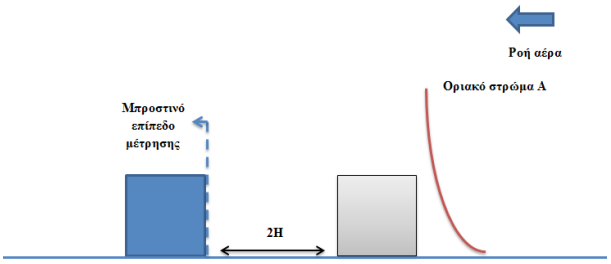


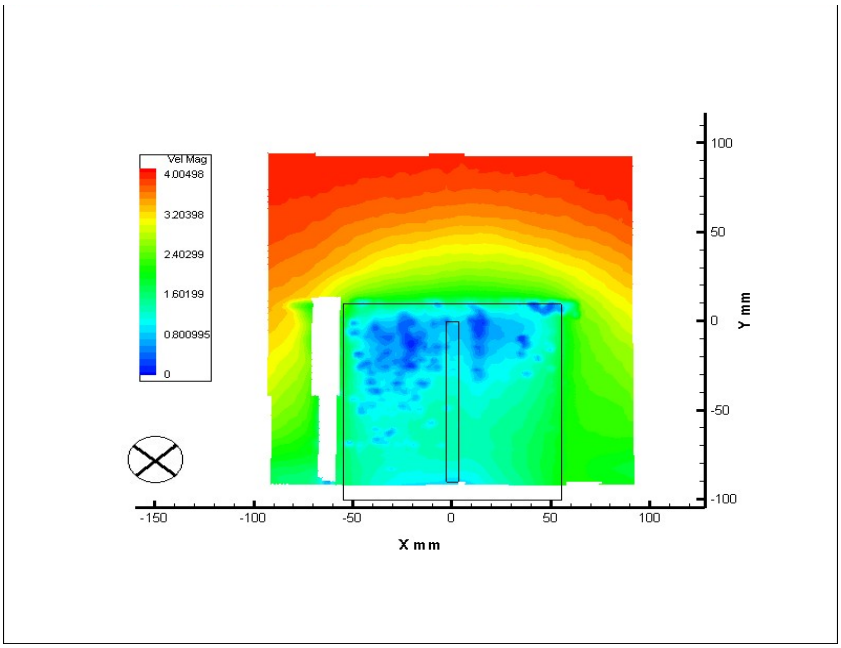
(b)

Σχήμα 4.4: (a) *Διανύσματα ταχυτήτων και* ***(b)*** *μέτρο ταχύτητας για τη περίπτωση χωρίς δεύτερο κύβο υπό οριακό στρώμα υψηλής διάτμησης 'Β'. Επίπεδο όπισθεν μοντέλου.*



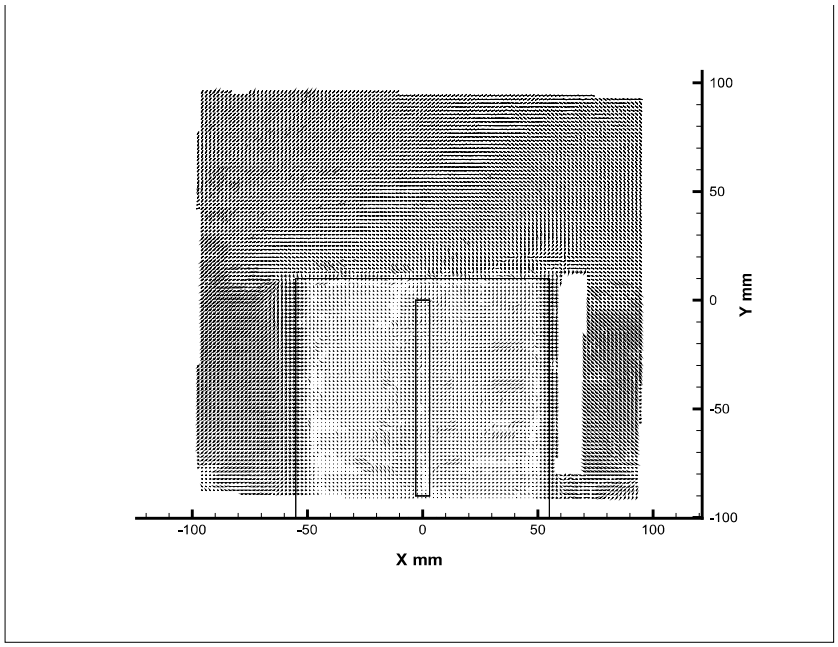
(a)



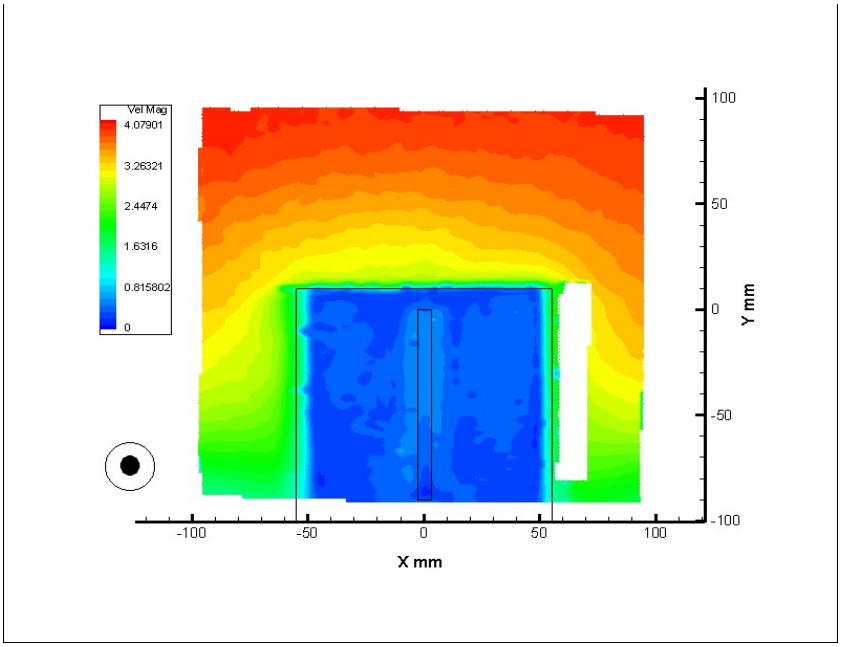


(b)

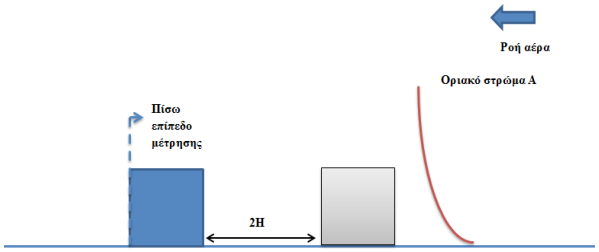
Σχήμα 4.5: (a) *Διανύσματα ταχυτήτων και* ***(b)*** *μέτρο ταχύτητας για τη περίπτωση με δεύτερο κύβο σε θέση x=2H ανάντι του μοντέλου, υπό οριακό στρώμα χαμηλής διάτμησης 'A'. Επίπεδο έμπροσθεν μοντέλου.*



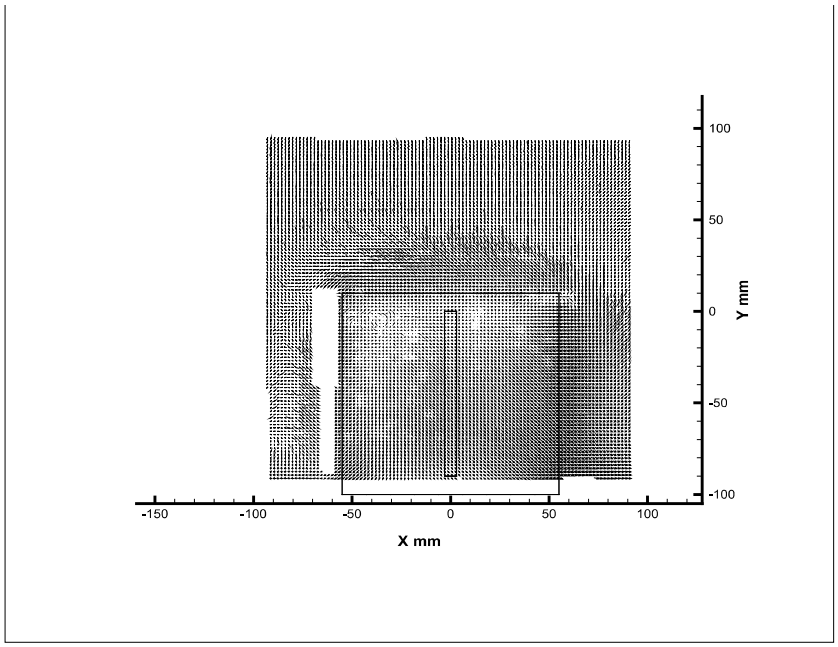
(a)



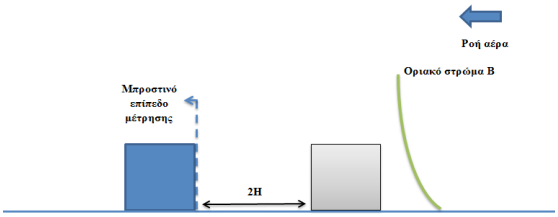
(b)

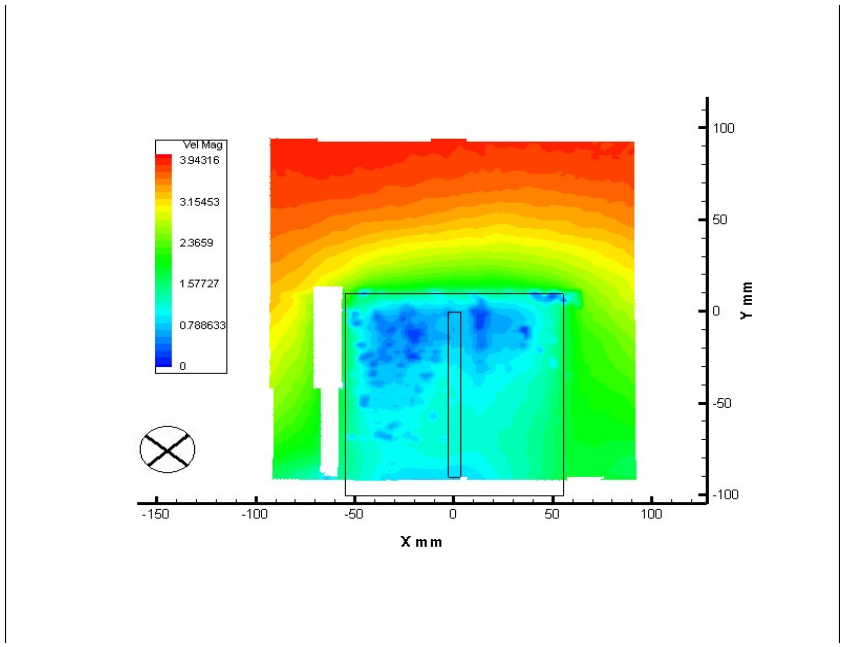


Σχήμα 4.6: (a) *Διανύσματα ταχυτήτων και* ***(b)*** *μέτρο ταχύτητας για τη περίπτωση με δεύτερο κύβο σε θέση x=2H ανάντι του μοντέλου, υπό οριακό στρώμα χαμηλής διάτμησης 'A'. Επίπεδο όπισθεν μοντέλου.*



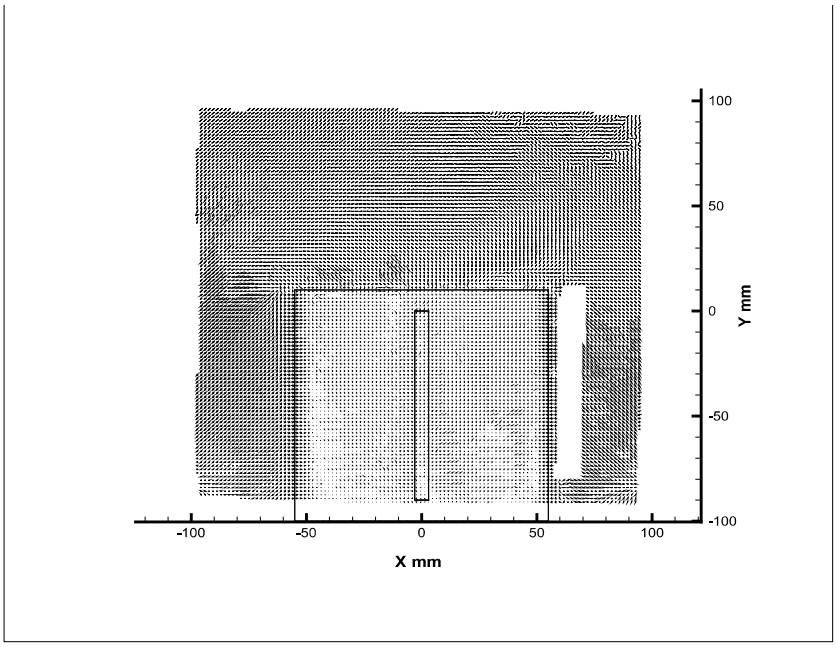
(a)



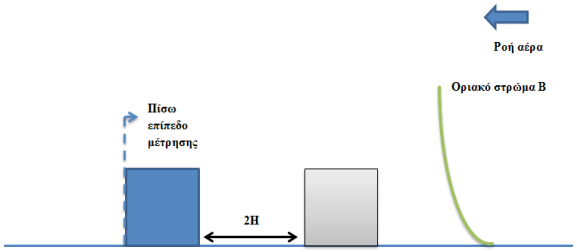


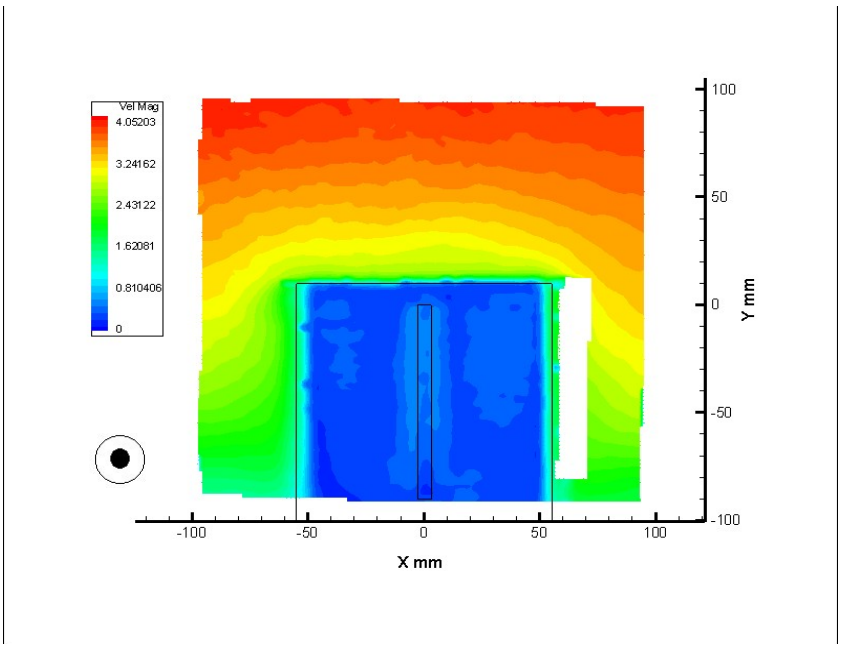
(b)

Σχήμα 4.7: (a) *Διανύσματα ταχυτήτων και* ***(b)*** *μέτρο ταχύτητας για τη περίπτωση με δεύτερο κύβο σε θέση x=2H ανάντι του μοντέλου, υπό οριακό στρώμα υψηλής διάτμησης 'B'. Επίπεδο έμπροσθεν μοντέλου.*



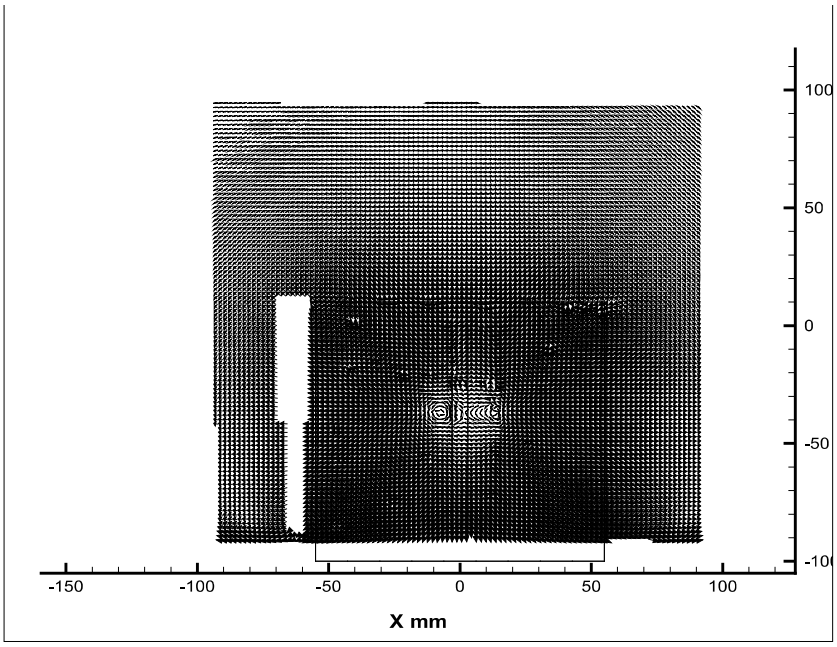
(a)



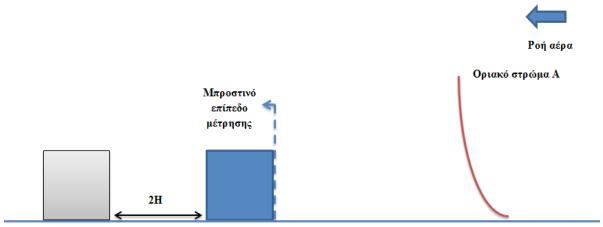


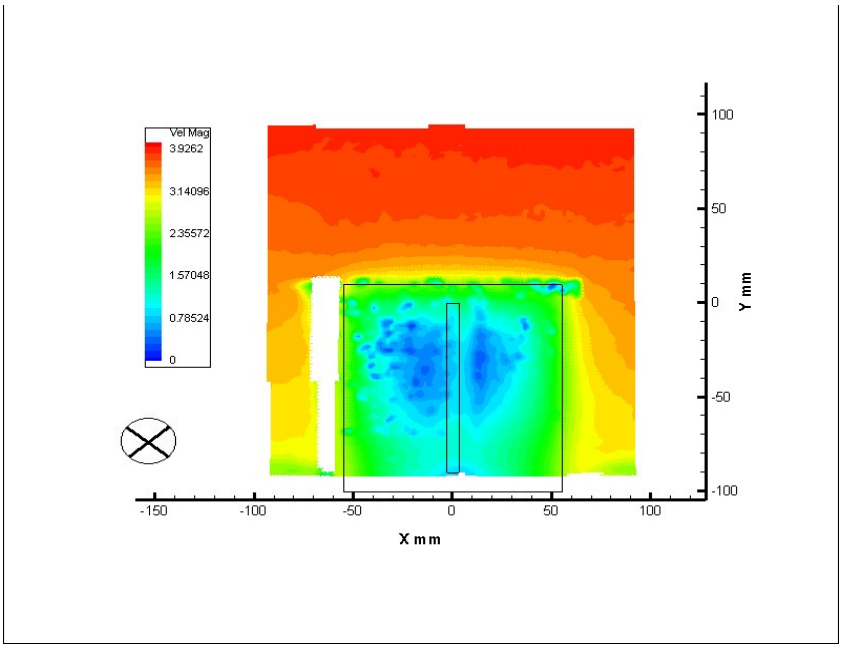
(b)

Σχήμα 4.8: (a) *Διανύσματα ταχυτήτων και* ***(b)*** *μέτρο ταχύτητας για τη περίπτωση με δεύτερο κύβο σε θέση x=2H ανάντι του μοντέλου, υπό οριακό στρώμα υψηλής διάτμησης 'B'. Επίπεδο όπισθεν μοντέλου.*



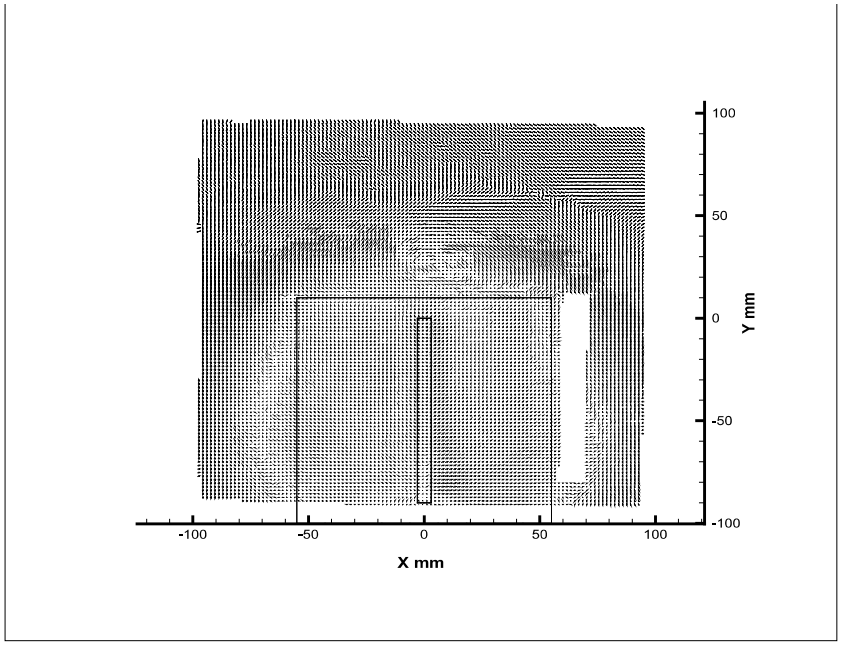
(a)



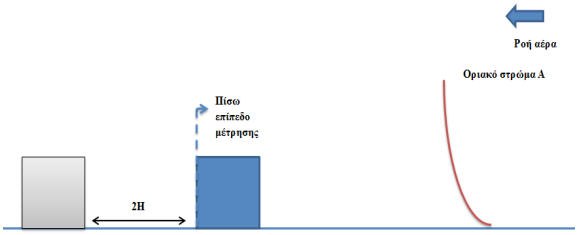


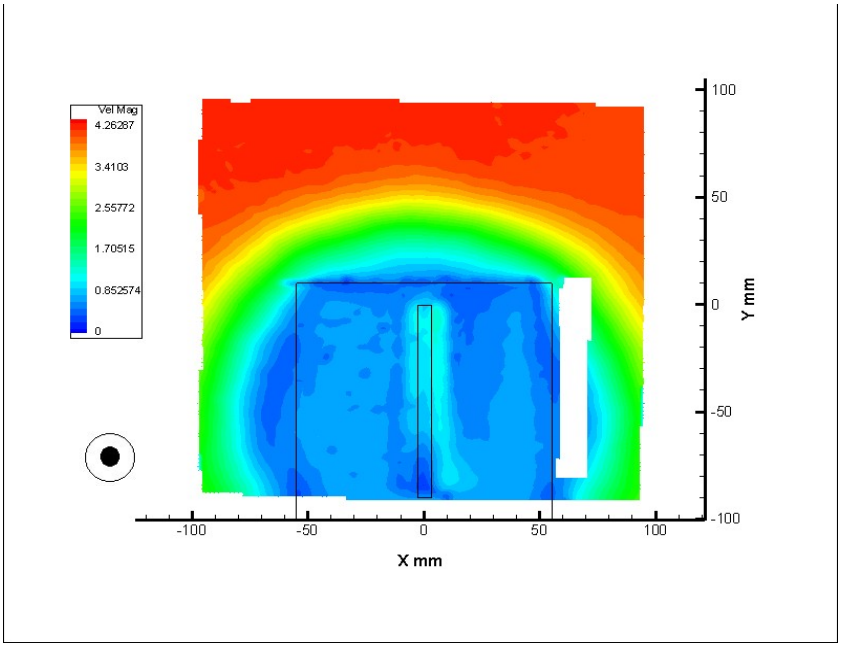
(b)

Σχήμα 4.9: (a) *Διανύσματα ταχυτήτων και* ***(b)*** *μέτρο ταχύτητας για τη περίπτωση με δεύτερο κύβο σε θέση x=2H κανάντι του μοντέλου, υπό οριακό στρώμα χαμηλής διάτμησης 'A'. Επίπεδο έμπροσθεν μοντέλου.*



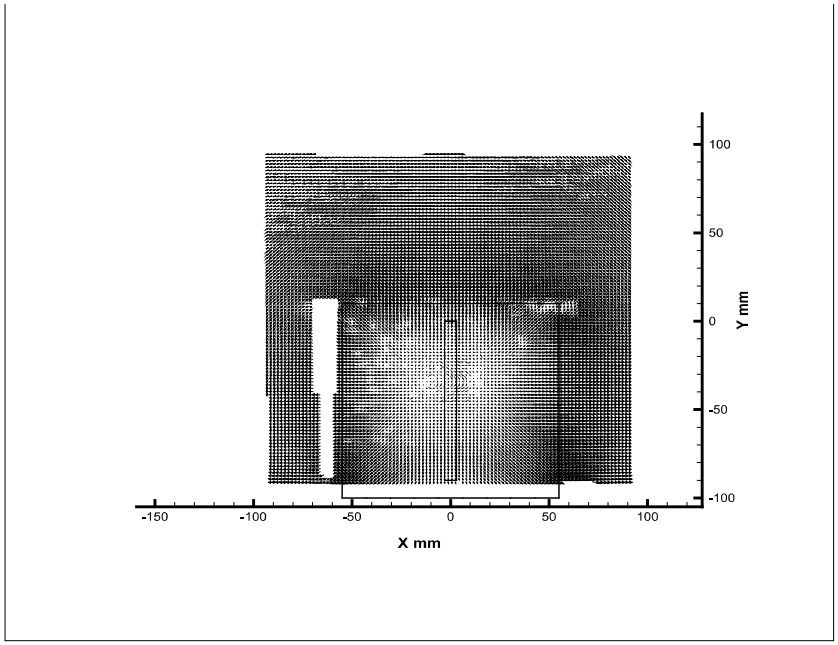
(a)



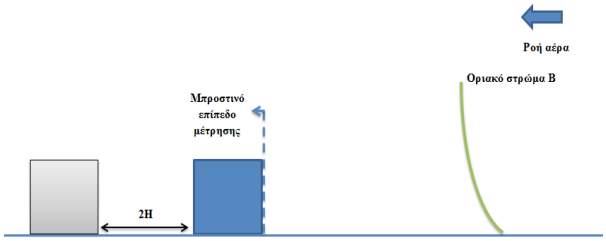


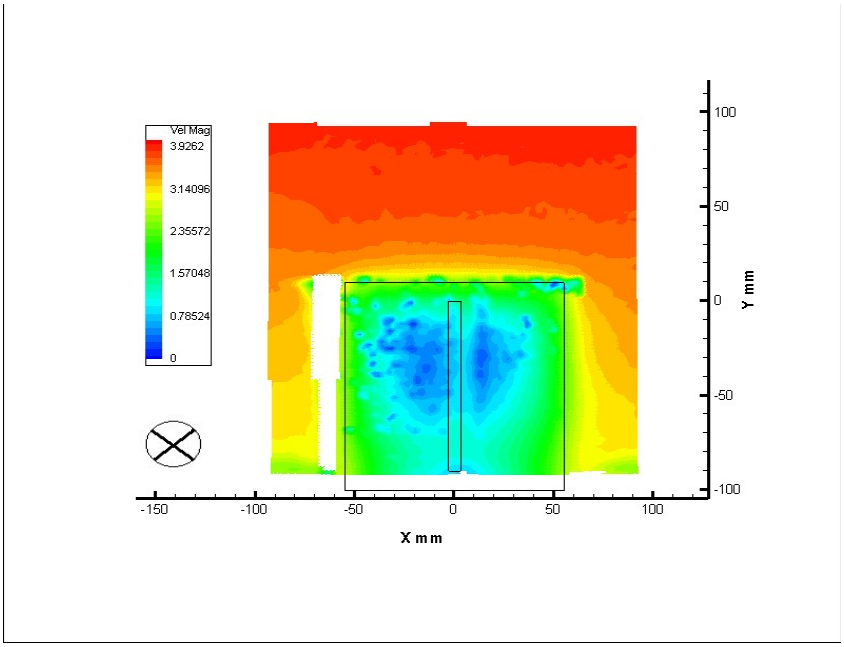
(b)

Σχήμα 4.10: (a) *Διανύσματα ταχυτήτων και* ***(b)*** *μέτρο ταχύτητας για τη περίπτωση με δεύτερο κύβο σε θέση x=2H κατάντι του μοντέλου, υπό οριακό στρώμα χαμηλής διάτμησης 'A'. Επίπεδο όπισθεν μοντέλου.*



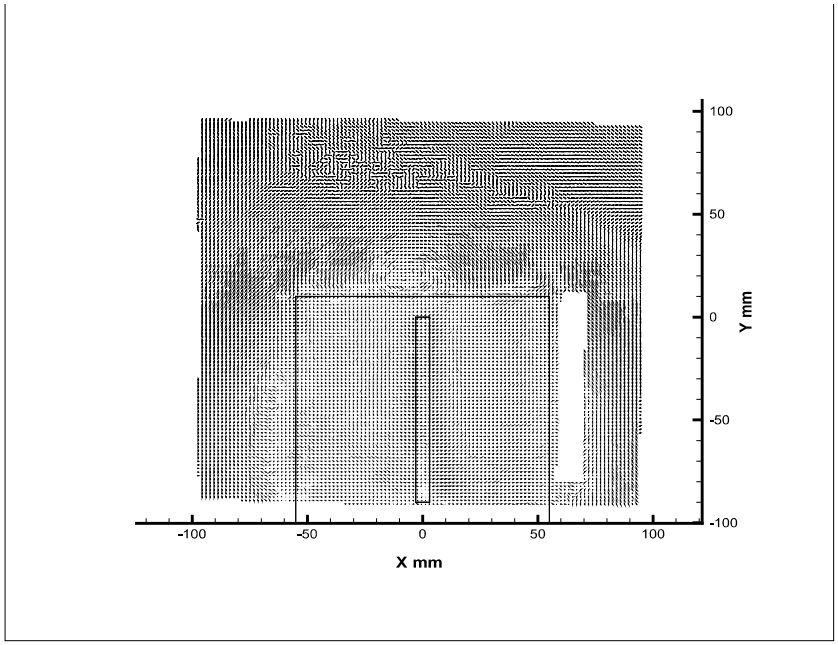
(a)



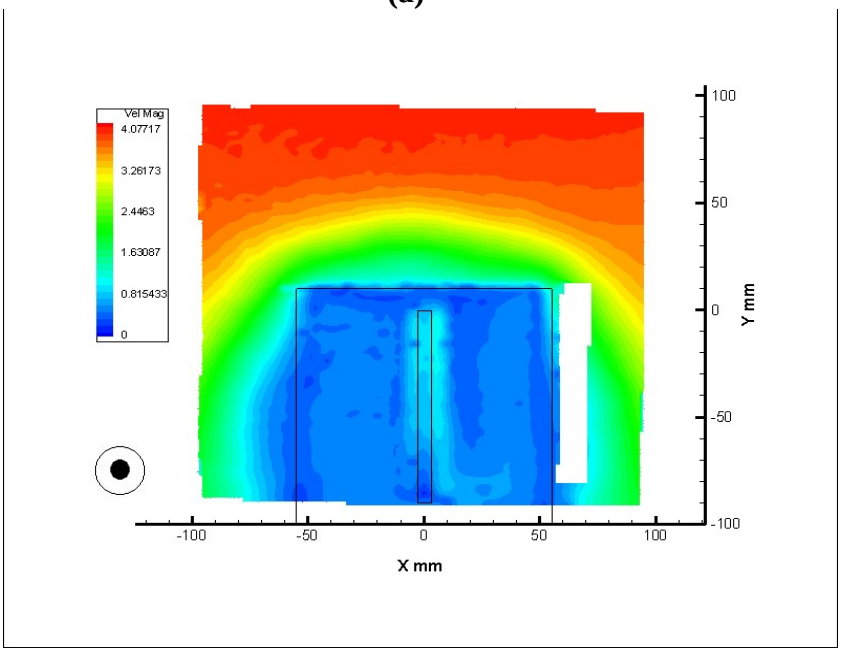


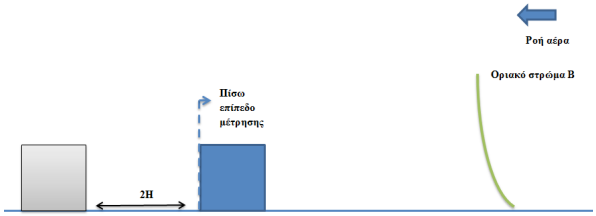
(b)

Σχήμα 4.11: *(a) Διανύσματα ταχυτήτων και* ***(b)*** *μέτρο ταχύτητας για τη περίπτωση με δεύτερο κύβο σε θέση x=2H κατάντι του μοντέλου, υπό οριακό στρώμα υψηλής διάτμησης 'B'. Επίπεδο έμπροσθεν μοντέλου.*



(a)





(b)

Σχήμα 4.12: (a) *Διανύσματα ταχυτήτων και* ***(b)*** *μέτρο ταχύτητας για τη περίπτωση με δεύτερο κύβο σε θέση x=2H κατάντι του μοντέλου, υπό οριακό στρώμα υψηλής διάτμησης 'B'. Επίπεδο όπισθεν μοντέλου.*

<u>Σημείωση:</u> Οι εικόνες έχουν εισαχθεί στο κείμενο με τρόπο ώστε να είναι δυνατό να δει να διακρίνει κάποιος τα διανύσματα εστιάζοντας πάνω στην εικόνα (επιλογή εργαλείου "zoom in" στα λογισμικά ανάγνωσης εγγράφων).

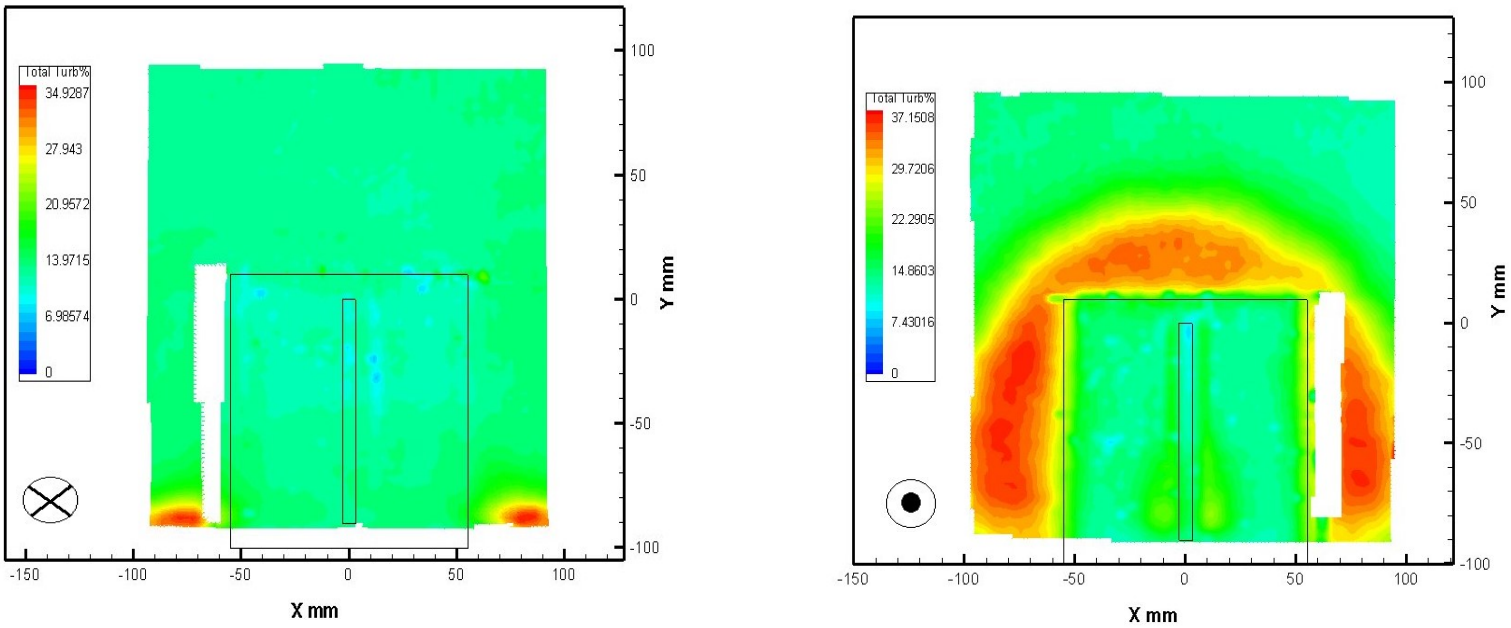
4.2 Ολική τύρβη ως προς την ελεύθερη ροή

Υπολογίζουμε τα ποσοστό τύρβης σε κάθε θέση ως το λόγο της τυπικής απόκλισης της ταχύτητας σε κάθε σημείο ως προς την ταχύτητα της ελεύθερης ροής.

Η τυπική απόκλιση γίνεται από την επεξεργασία 500 στιγμιότυπως για κάθε περίπτωση. Χρειάζεται να τονίσουμε πως καθώς οι μετρήσεις γίνονται με χαμηλό ρυθμό δειγματοληψίας (περίπου 2 sec) και ο εξοπλισμός μας δε μας επιτρέπει την δειγματοληψία με ακριβή χρονικά διαστήματα. Έτσι, ενώ είναι δυνατός ο υπολογισμών στατιστικών μεγεθών όπως η ένταση της τύρβης, δεν είναι δυνατόν να εξάγουμε από τα διαθέσιμα δεδομένα πληροφορίες όπως το φάσμα της τύρβης.

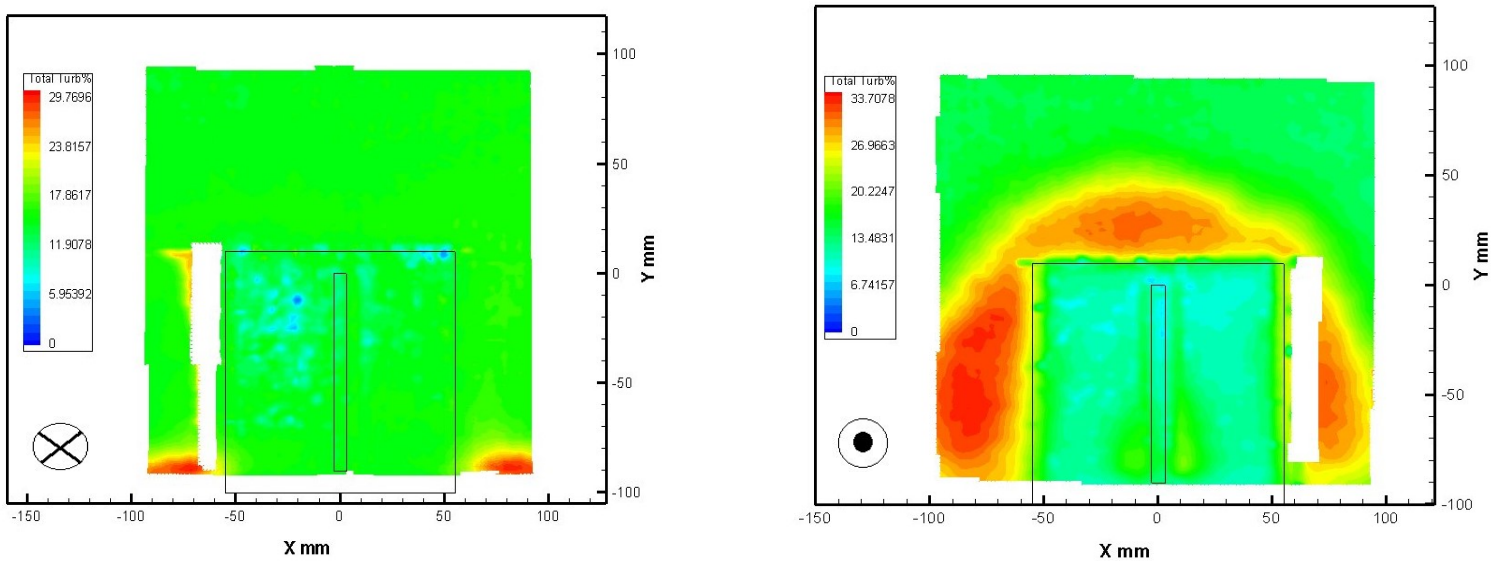
Ωστόσο, κρίνουμε πως η παρουσίαση αυτών των διαγραμμάτων συμβάλει στη κατανόηση της φύσης της ροής.

Στα παρακάτω διαγράμματα το σύμβολο (⊙) σημαίνει πως ο ροή "έρχεται" προς τον αναγώστη, όπως κοιτάμε, και το σύμβολο (⊗) δηλώνει πως η ροή "φεύγει"από τον αναγνώστη.



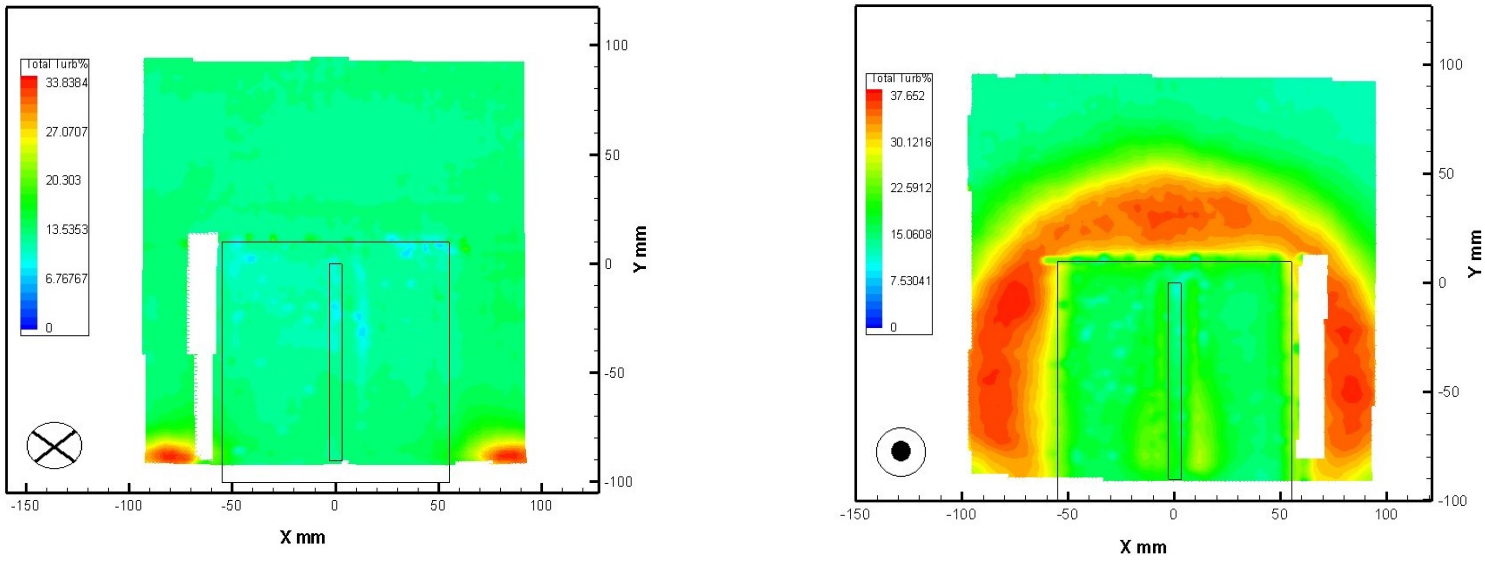
(α) (β)

Σχήμα 4.13: *Τυπική απόκλιση ταχυτήτων ως προς την ελεύθερη ροή για την περίπτωση μοναδικού κύβου σε οριακό στρώμμα χαμηλής διάτμησης για (α) το έμπροσθεν επίπεδο και (β) το οπίσθιο*



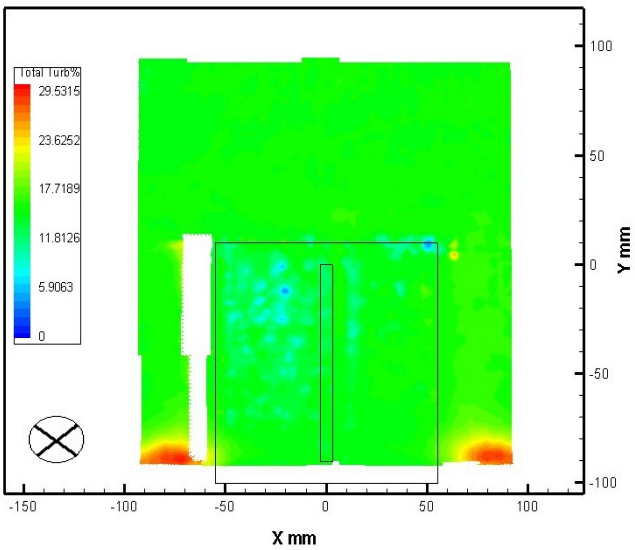
(α) (β)

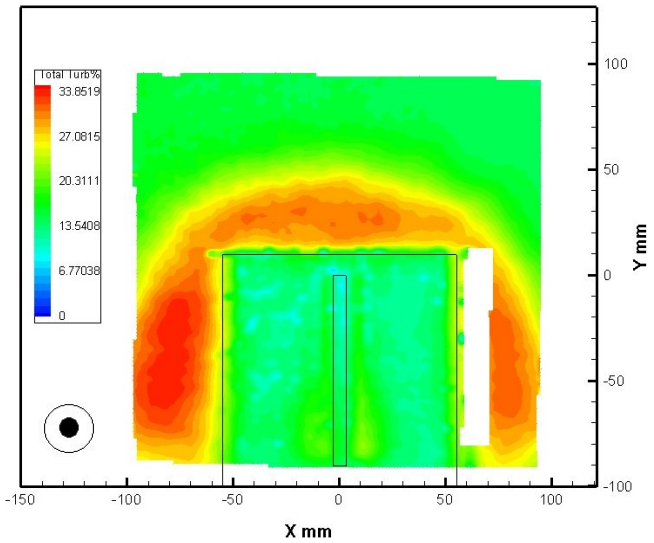
Σχήμα 4.14: *Τυπική απόκλιση ταχυτήτων ως προς την ελεύθερη ροή για την περίπτωτη μοναδικού κύβου σε οριακό στρώμμα υψηλής διάτμησης για (α) το έμπροσθεν επίπεδο και (β) το οπίσθιο*



(α) (β)

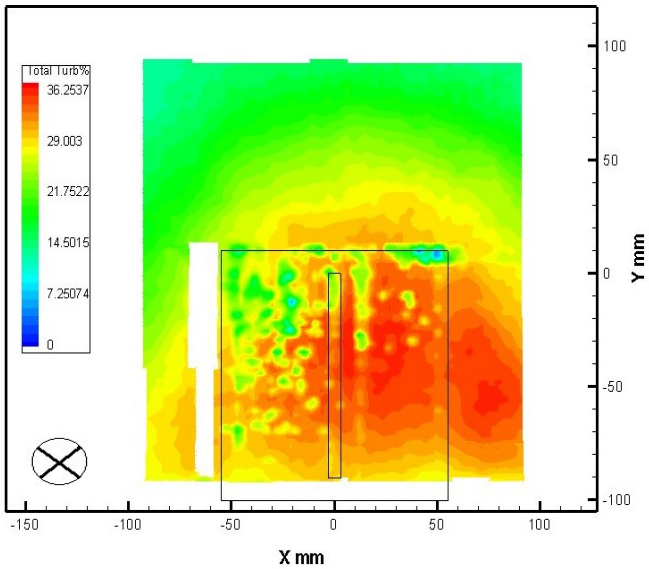
Σχήμα 4.15: *Τυπική απόκλιση ταχυτήτων ως προς την ελεύθερη ροή για την περίπτωτη ύπαρξης δεύτερου κύβου 2H πίσω σε οριακό στρώμμα χαμηλής διάτμησης για (α) το έμπροσθεν επίπεδο και (β) το οπίσθιο*

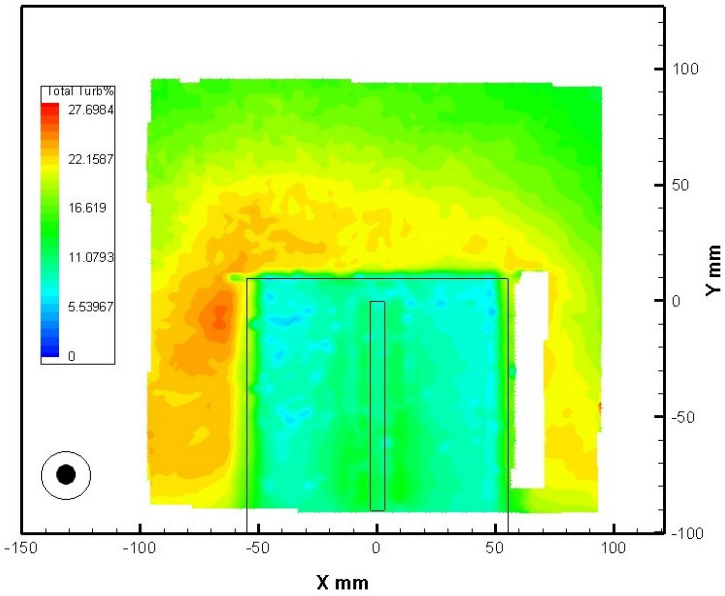




(a) (β)

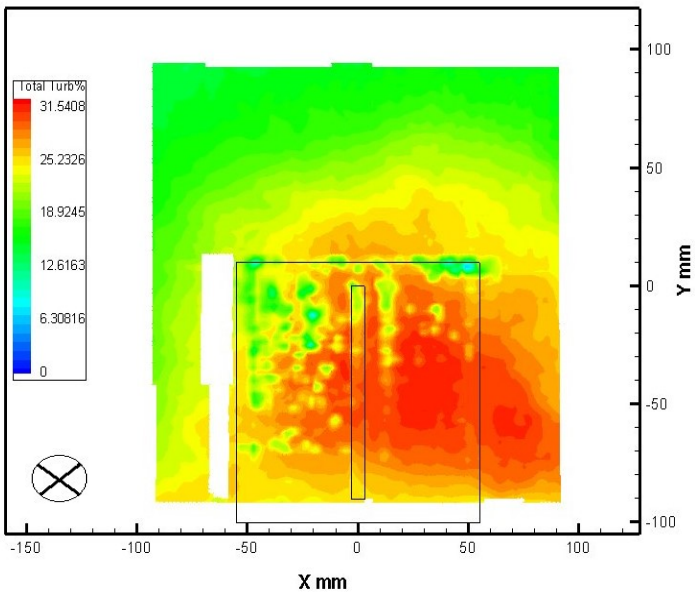
Σχήμα 4.16: *Τυπική απόκλιση ταχυτήτων ως προς την ελεύθερη ροή για την περίπτωτη ύπαρξης δεύτερου κύβου 2H πίσω σε οριακό στρώμμα υψηλής διάτμησης για (α) το έμπροσθεν επίπεδο και (β) το οπίσθιο*



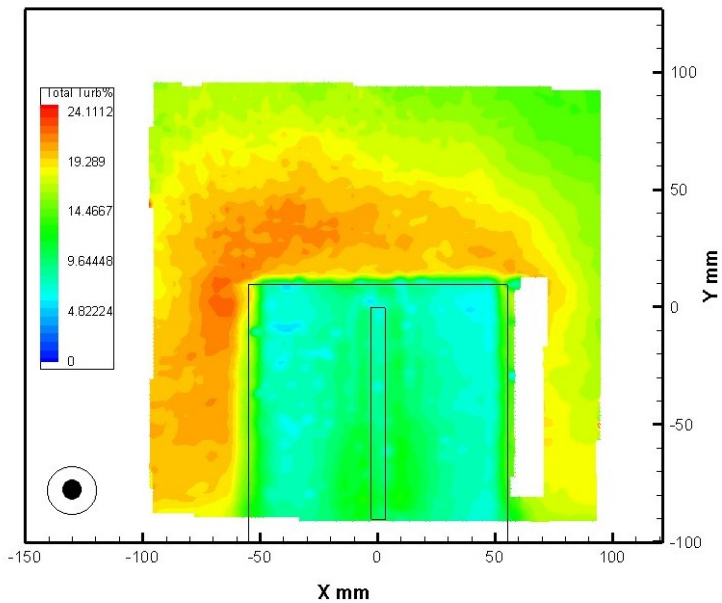


(α) (β)

Σχήμα 4.17: *Τυπική απόκλιση ταχυτήτων ως προς την ελεύθερη ροή για την περίπτωτη ύπαρξης δεύτερου κύβου 2H εμπρός σε οριακό στρώμμα χαμηλής διάτμησης για (α) το έμπροσθεν επίπεδο και (β) το οπίσθιο*



(α)



(β)

Σχήμα 4.18: *Τυπική απόκλιση ταχυτήτων ως προς την ελεύθερη ροή για την περίπτωση ύπαρξης δεύτερου κύβου 2H εμπρός σε οριακό στρώμα χαμηλής διάτμησης για (α) το έμπροσθεν επίπεδο και (β) το οπίσθιο*

Σημείωση: Στα ανωτέρω διαγράμματα για να έχουμε σωστή αντίληψη του προσανατολισμού της ροής, πρέπει να έχουμε υπόψιν μας ότι για το μεν μπροστινό πλάνο η ροή έρχεται από πίσω όπως κοιτάμε ενώ αντίστοιχα για τα πίσω έρχεται προς τα μας.

4.3 Προσδιορισμός θέσεων των στροβίλων

Σε αυτό το σημείο της εργασίας επιδιώκουμε να προσδιορίσουμε τις θέσεις των στροβίλων που δημιουργούνται γύρω από το κτίριο. Για το σκοπό αυτό θα χρησιμοποιήσουμε το Q-criterion το οποία συνιστά ικανή αλλά όχι αναγκαία συνθήκη για την ύπαρξη στροβίλου. Το Q ορίζεται ως εξής:

$Q=(\|\Omega\|^2-\|S\|^2)$ (4.1) , όπου

$\|S\|=[tr(SS^T)]^{\frac{1}{2}}$ (4.2) και

$\|\Omega\|=[tr(\Omega\Omega^T)]^{\frac{1}{2}}$ (4.3)

Το Ω είναι ο τανυστής της στροβιλότητας και το S ο τανυστής του ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης. Δίνονται από τις σχέσεις:

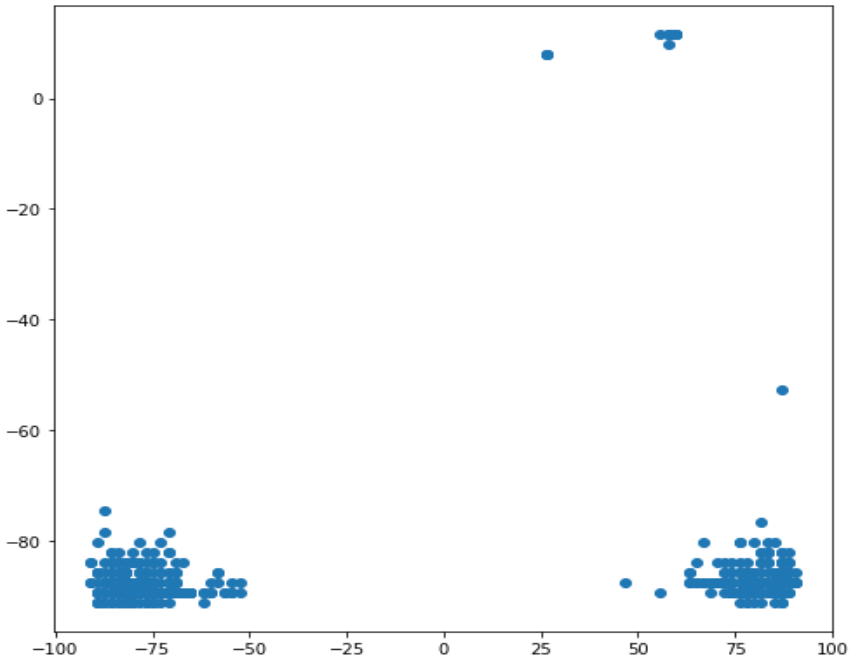
$$S_{ij}=\frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \quad (4.4)$$

$$\Omega_{ij}=\frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}-\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \quad (4.5)$$

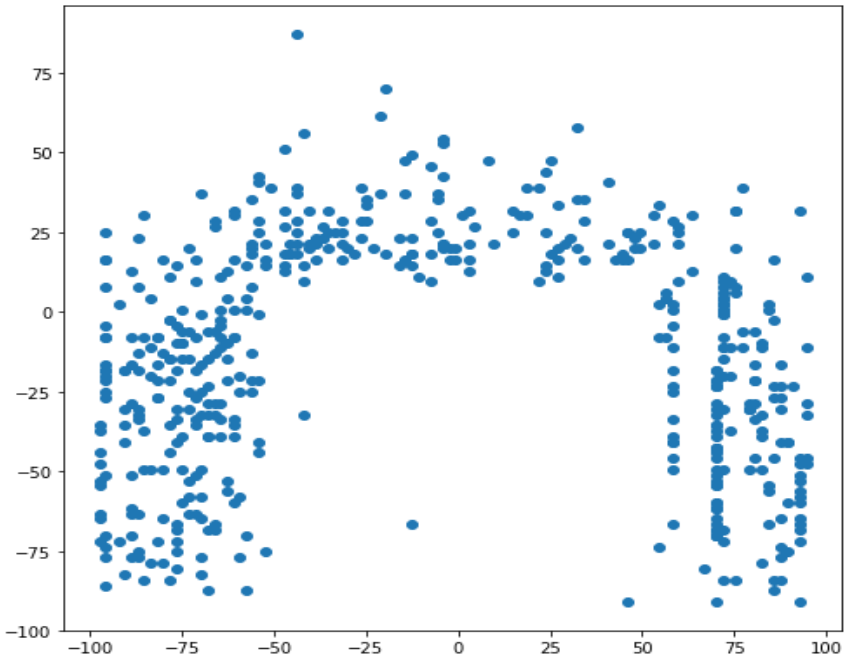
Το Q εκφράζει την τοπική ισορροπία μεταξύ του ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης (shear strain rate) και του μέτρου της στροβιλότητας. Ορίζουμε τον στρόβιλο ως μια περιοχή στην οποία το μέτρο της στροβιλότητας είναι μεγαλύτερο του μέτρου του ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης. Έτσι, η θετική τιμή του Q μπορεί να θεωρηθεί ως κριτήριο ύπαρξης στροβίλου.

Σε κάθε περίπτωση υπολογίζεται για κάθε σειρά μετρήσεων το Q για κάθε ξεχωριστό στιγμιότυπο. Έπειτα αποθηκεύεται η μέγιστη (και θετική) τιμή του Q από κάθε στιγμιότυπο σε ένα διάγραμμα. [23]

(A) Χωρίς ύπαρξη δεύτερου εμποδίου για οριακό στρώμα χαμηλής διάτμησης

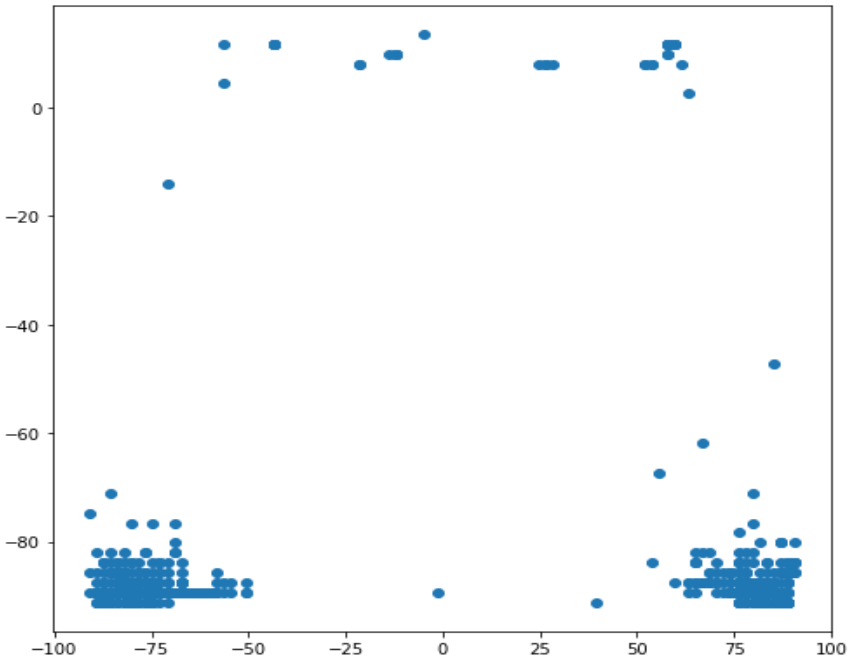


Σχήμα 4.19*. Συντεταγμένες (x,y) των μέγιστων τιμών του κριτηρίου Q για χαμηλής διάτμησης οριακό στρώμα (A) (Επίπεδο μέτρησης : έμπροσθεν κύβου).*

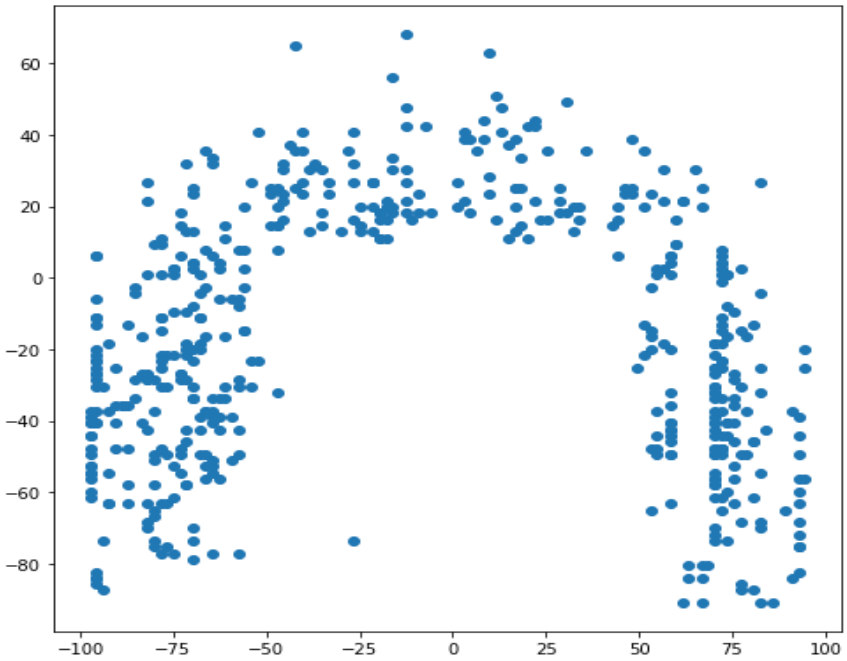


Σχήμα 4.20. *Συντεταγμένες (x,y) των μέγιστων τιμών του κριτηρίου Q για χαμηλής διάτμησης οριακό στρώμα (A) (Επίπεδο μέτρησης : όπισθεν κύβου).*

(B) Χωρίς ύπαρξη δευτέρου εμποδίου για οριακό στρώμα υψηλής διάτμησης

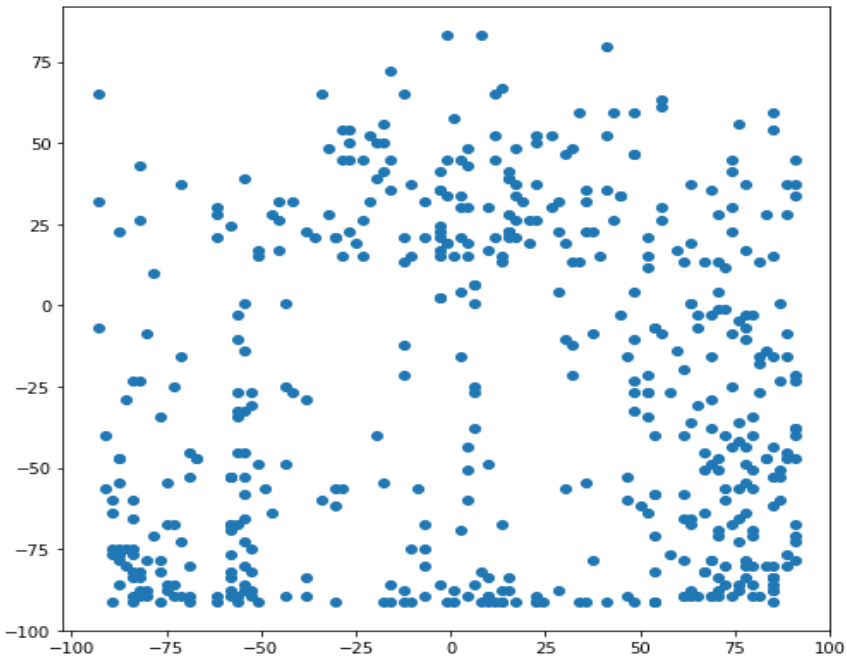


Σχήμα 4.21*. Συντεταγμένες (x,y) των μέγιστων τιμών του κριτηρίου Q για υψηλής διάτμησης οριακό στρώμα (B) (Επίπεδο μέτρησης : έμπροσθεν κύβου).*

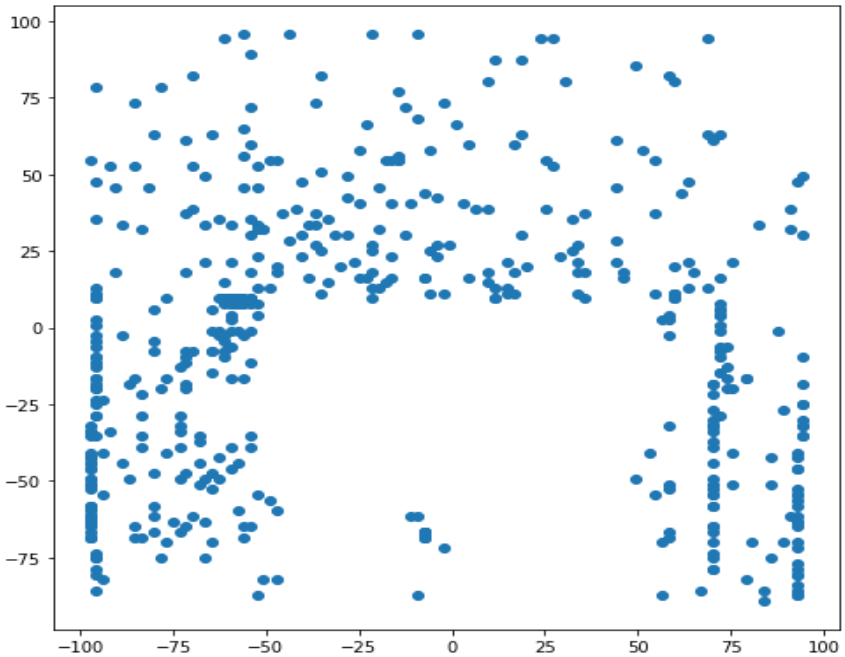


Σχήμα 4.22. *Συντεταγμένες (x,y) των μέγιστων τιμών του κριτηρίου Q για υψηλής διάτμησης οριακό στρώμα (B) (Επίπεδο μέτρησης : όπισθεν κύβου).*

(Γ) Με δευτέρου εμποδίου x=2H ανάντι του μοντέλου για οριακό στρώμμα χαμηλής διάτμησης

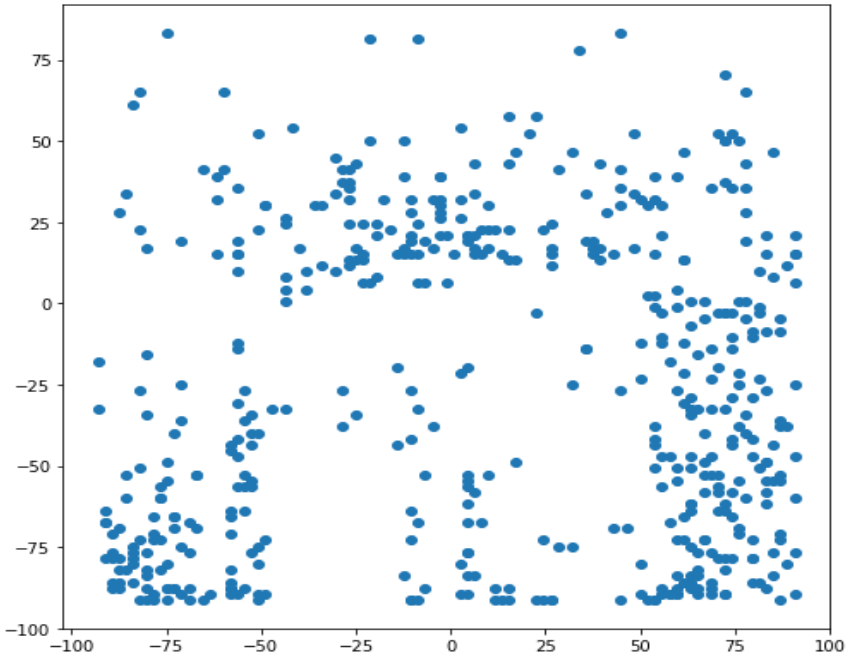


Σχήμα 4.23 *. Συντεταγμένες (x,y) των μέγιστων τιμών του κριτηρίου Q για χαμηλής διάτμησης οριακό στρώμα (A), 2H ανάντι του κύβου, Επίπεδο μέτρησης: έμπροσθεν κύβου.*

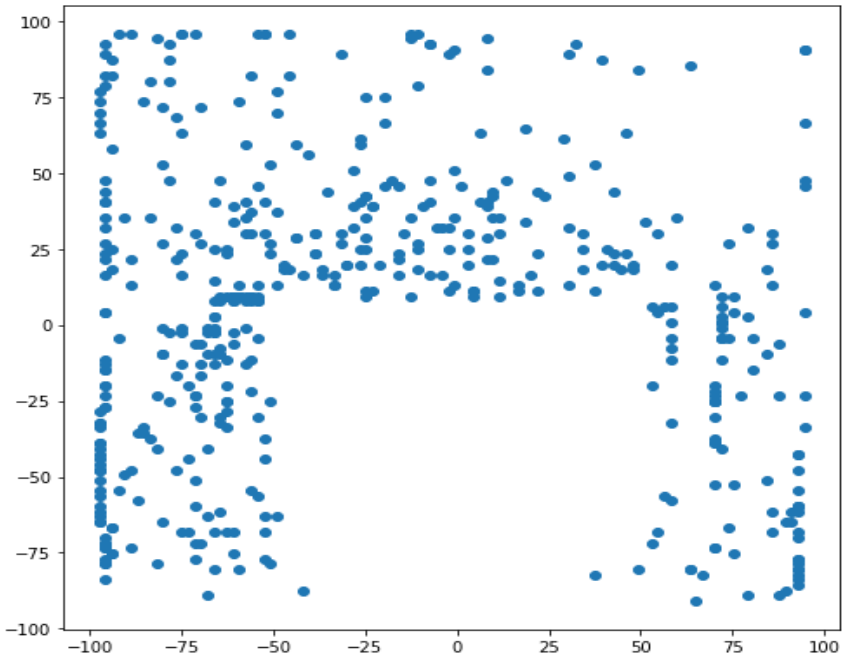


Σχήμα 4.24. *Συντεταγμένες (x,y) των μέγιστων τιμών του κριτηρίου Q για χαμηλής διάτμησης οριακό στρώμα (A), 2H ανάντι του κύβου, Επίπεδο μέτρησης: όπισθεν κύβου.*

(Δ) Με δεύτερο εμπόδιο x=2H ανάντι του μοντέλου για οριακό στρώμα υψηλής διάτμησης

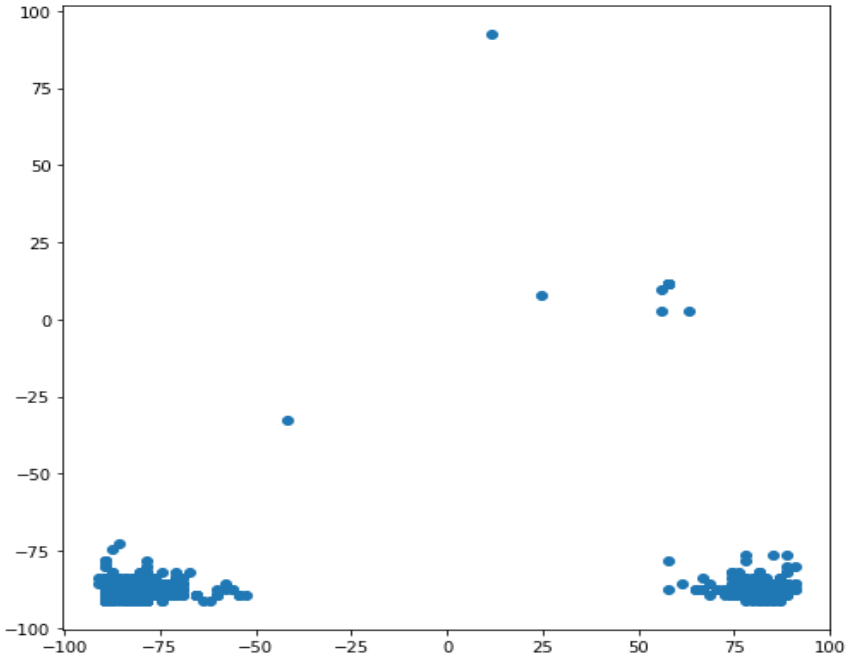


Σχήμα 4.25 *Συντεταγμένες (x,y) των μέγιστων τιμών του κριτηρίου Q για υψηλής διάτμησης οριακό στρώμα (B), 2H ανάντη του κύβου, Επίπεδο μέτρησης: έμπροσθεν κύβου.*

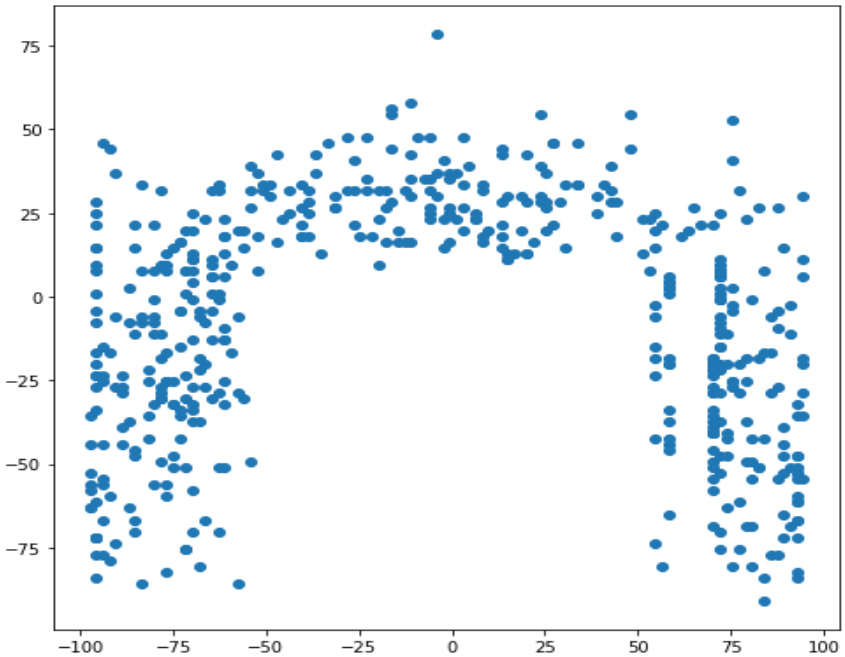


Σχήμα 4.26 *Συντεταγμένες (x,y) των μέγιστων τιμών του κριτηρίου Q για υψηλής διάτμησης οριακό στρώμα (B), 2H ανάντη του κύβου, Επίπεδο μέτρησης: όπισθεν κύβου.*

(E) Με δεύτερο εμπόδιο x=2H κατάντι του μοντέλου για οριακό στρώμα χαμηλής διάτμησης

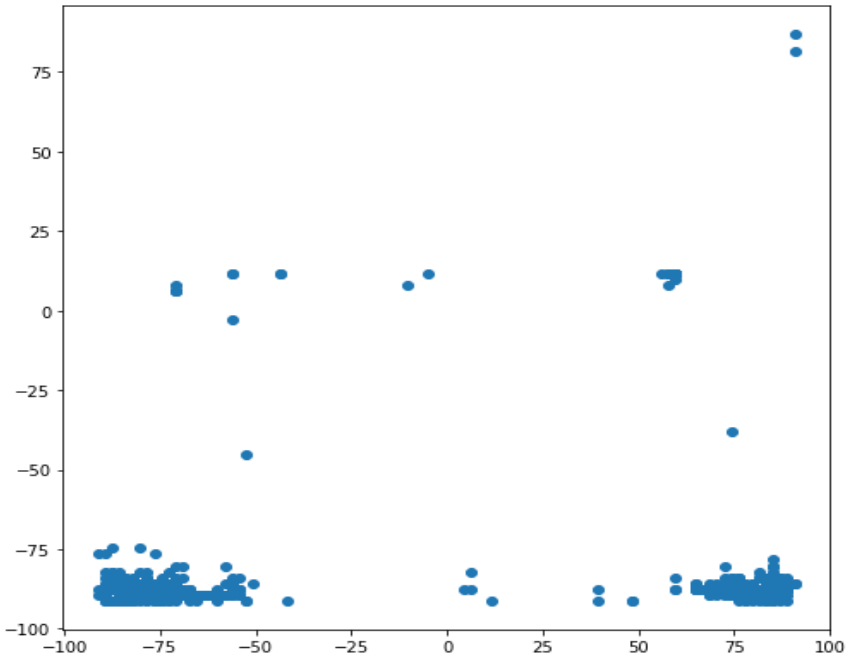


Σχήμα 4.27 *Συντεταγμένες (x,y) των μέγιστων τιμών του κριτηρίου Q για χαμηλής διάτμησης οριακό στρώμα (A), 2H κατάντι του κύβου, Επίπεδο μέτρησης: έμπροσθεν κύβου.*

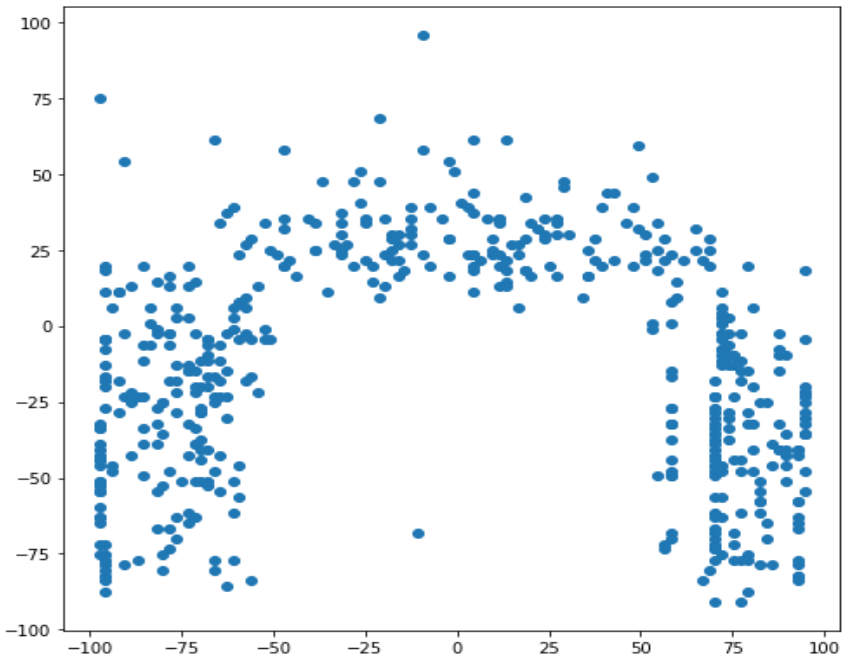


Σχήμα 4.28*. Συντεταγμένες (x,y) των μέγιστων τιμών του κριτηρίου Q για χαμηλής διάτμησης οριακό στρώμα (A), 2H κατάντι του κύβου, Επίπεδο μέτρησης: όπισθεν κύβου.*

ΣΤ) Με δεύτερο εμπόδιο x=2H κατάντι του μοντέλου για οριακό στρώμα υψηλής διάτμησης



Σχήμα 4.29 *Συντεταγμένες (x,y) των μέγιστων τιμών του κριτηρίου Q για υψηλής διάτμησης οριακό στρώμα (B), 2H κατάντι του κύβου, Επίπεδο μέτρησης: έμπροσθεν κύβου.*



Σχήμα 4.30 *Συντεταγμένες (x,y) των μέγιστων τιμών του κριτηρίου Q για υψηλής διάτμησης οριακό στρώμα (B), 2H κατάντι του κύβου, Επίπεδο μέτρησης: όπισθεν κύβου.*

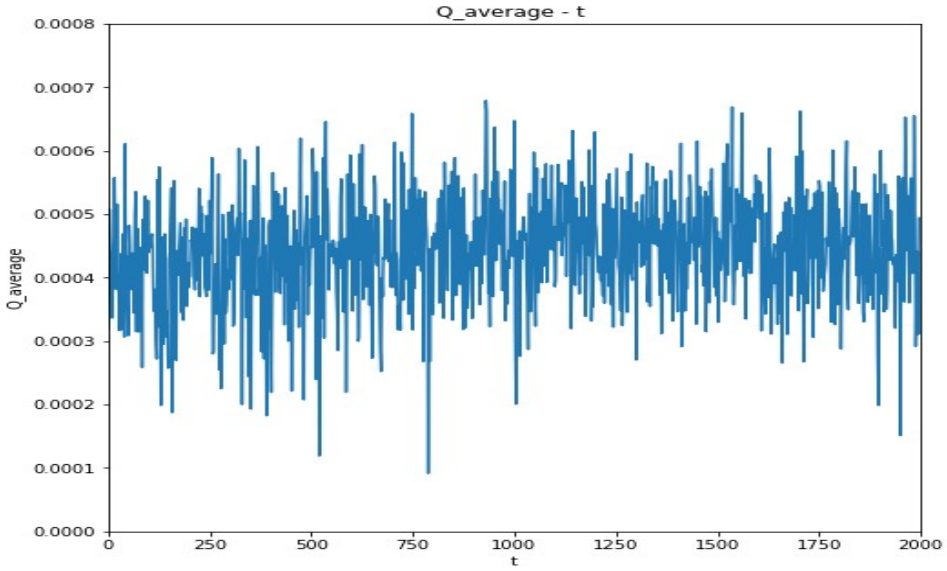
4.4. Αερισμός δια μέσου των ανοιγμάτων του μοντέλου

Για τον υπολογισμό του ρυθμού αερισμού από τα ανοίγματα λαμβάνεται υπόψην η συνιστώσα W της ταχύτητας

Παρουσιάζεται α αερισμός σε κάθε . Παρόλο που η μορφή του διαγράμματος είναι μορφή χρονοσειράς, το χρονικό βήμα είναι ενδεικτικό καθώς δε χρησιμοποιούμε time-resolved PIV. Έτσι οι χρονοσειρές που παρουσιάζονται για κάθε περίπτωση είναι με σκοπό να εκτιμθούν ποιοτικές μεταβολές στο ρυθμό αερισμού και η επεξεργασία των δεδομένων με βάση το χρονικό βήμα θα είχα αρκετά μεγάλο σφάλμα.

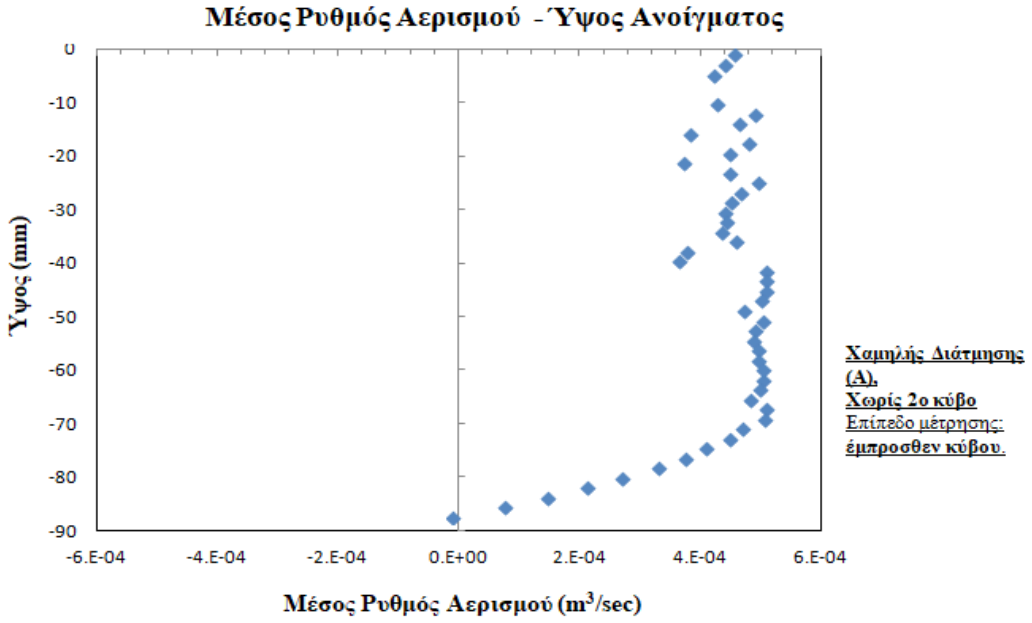
Ακόμα, παρουσιάζονται τα προφίλ ταχυτήτων στα ανοίγματα συναρτήσει του ύψους y. Η ταχύτητα σε κάθε θέση είναι ο μέσος όρος κατά το πλάτος x

(1) Χωρίς ύπαρξη δεύτερου εμποδίου για οριακό στρώμα χαμηλής διάτμησης- μπροστινό επίπεδο



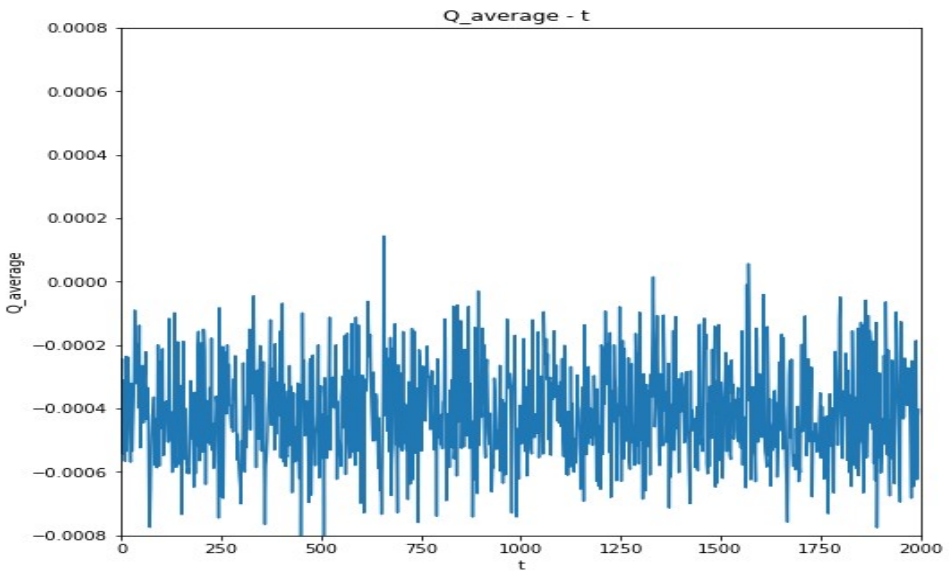
Standard Deviation = 8.4103E-05

Σχήμα 4.31 *Μεταβολή του ρυθμού αερισμό στο χρόνο για τη περίπτωση χωρίς δεύτερο εμπόδιο για οριακό στρώμα χαμηλής διάτμησης για το μπροστινό επίπεδο.*



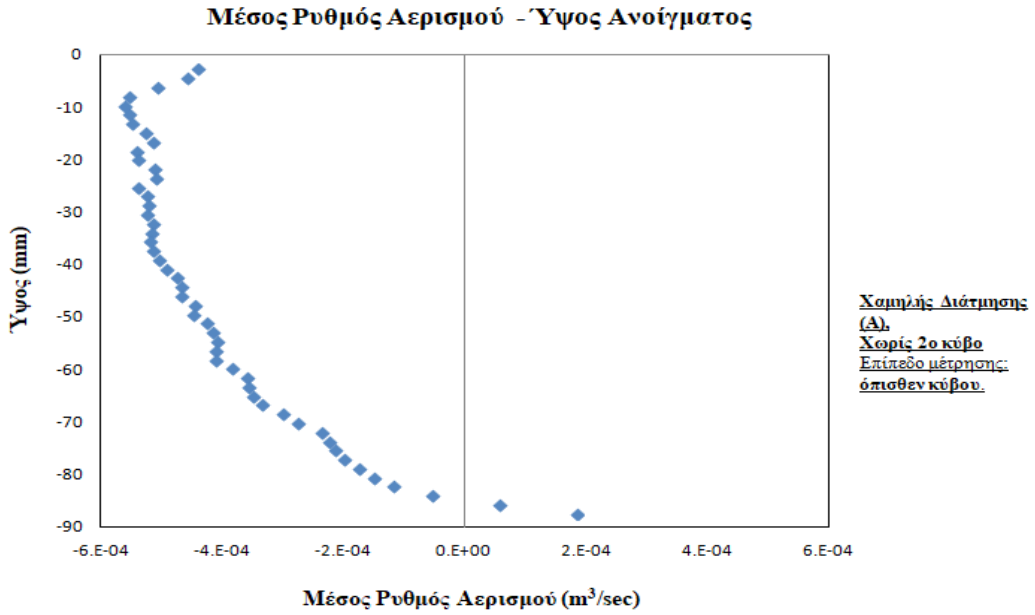
Σχήμα 4.32 *Κατανομή του μέσου ρυθμού αερισμού κατά το ύψος ανοίγματος για τη περίπτωση χωρίς δεύτερο εμπόδιο για οριακό στρώμα χαμηλής διάτμησης. Μπροστινό επίπεδο μέτρησης.*

2) Χωρίς ύπαρξη δεύτερου εμποδίου για οριακό στρώμμα χαμηλής διάτμησης- πίσω επίπεδο



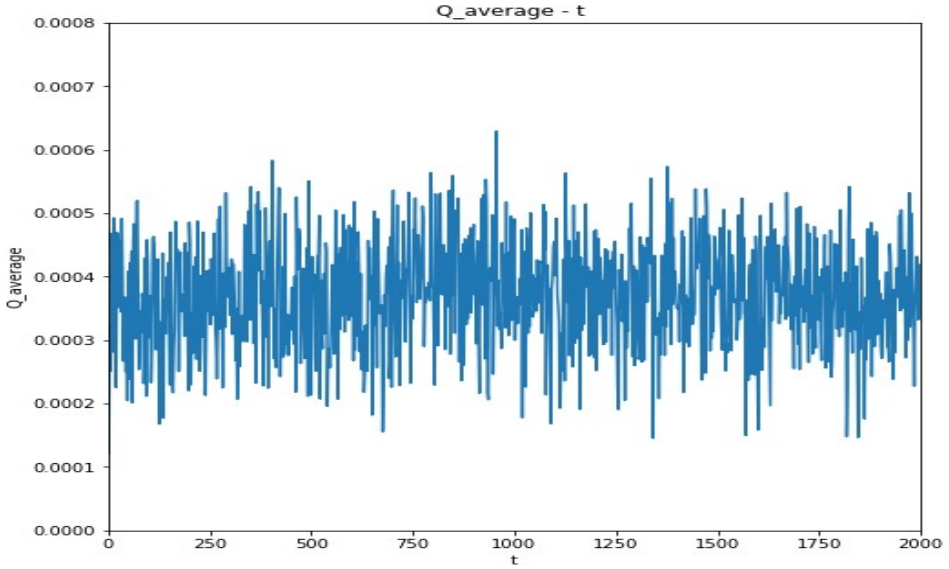
Standard Deviation = 1.5514E-04

Σχήμα 4.33 *Μεταβολή του ρυθμού αερισμό στο χρόνο για τη περίπτωση χωρίς δεύτερο εμπόδιο για οριακό στρώμα χαμηλής διάτμησης για το πίσω επίπεδο.*



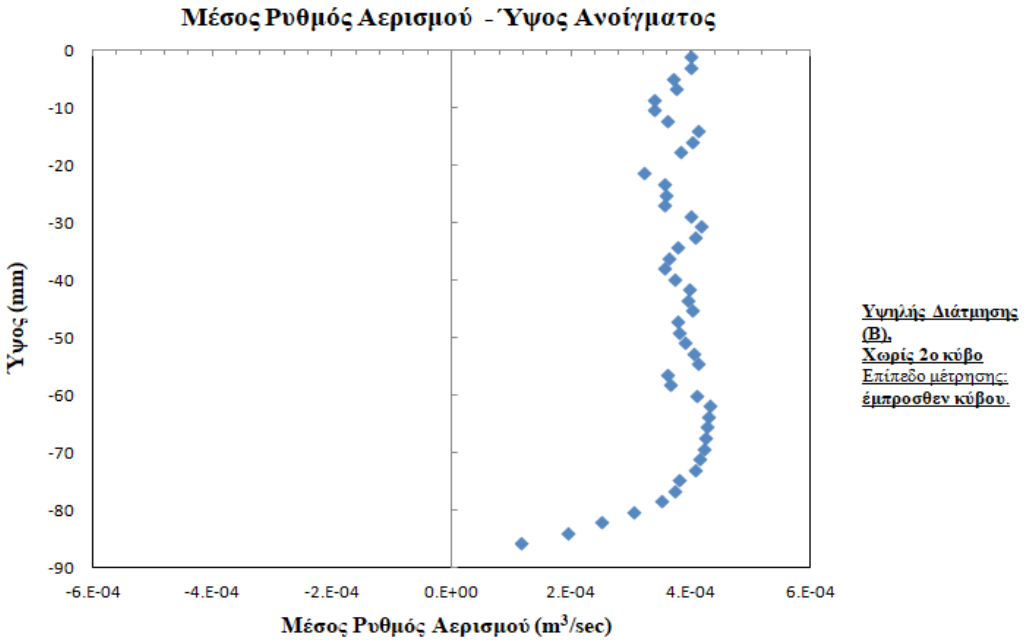
Σχήμα 4.34 *Κατανομή του μέσου ρυθμού αερισμού κατά το ύψος ανοίγματος για τη περίπτωση χωρίς δεύτερο εμπόδιο για οριακό στρώμα χαμηλής διάτμησης. Πίσω επίπεδο μέτρησης.*

3) Χωρίς ύπαρξη δεύτερου εμποδίου για οριακό στρώμμα υψηλής διάτμησης-μπροστινό επίπεδο



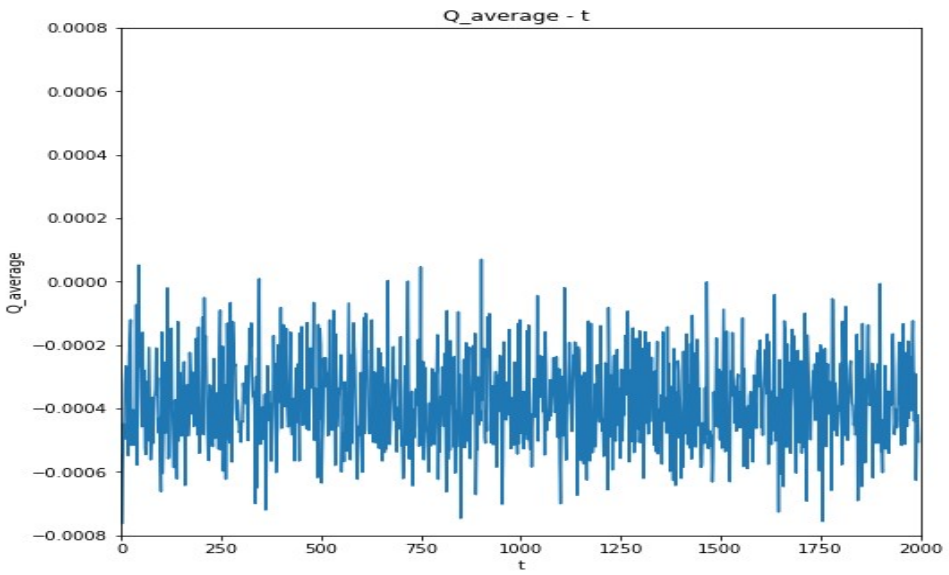
Standard Deviation = 8.3530E-05

Σχήμα 4.35 *Μεταβολή του ρυθμού αερισμό στο χρόνο για τη περίπτωση χωρίς δεύτερο εμπόδιο για οριακό στρώμα υψηλής διάτμησης για το μπροστινό επίπεδο.*



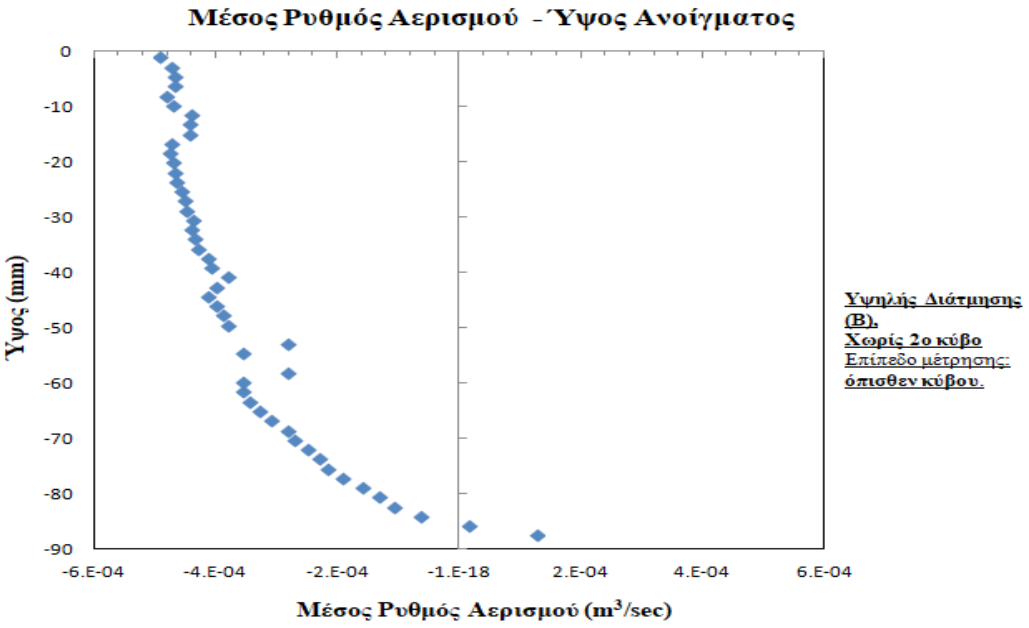
Σχήμα 4.36 *Κατανομή του μέσου ρυθμού αερισμού κατά το ύψος ανοίγματος για τη περίπτωση χωρίς δεύτερο εμπόδιο για οριακό στρώμα υψηλής διάτμησης. Μπροστινό επίπεδο μέτρησης.*

4) Χωρίς ύπαρξη δεύτερου εμποδίου για οριακό στρώμμα υψηλής διάτμησης-πίσω επίπεδο



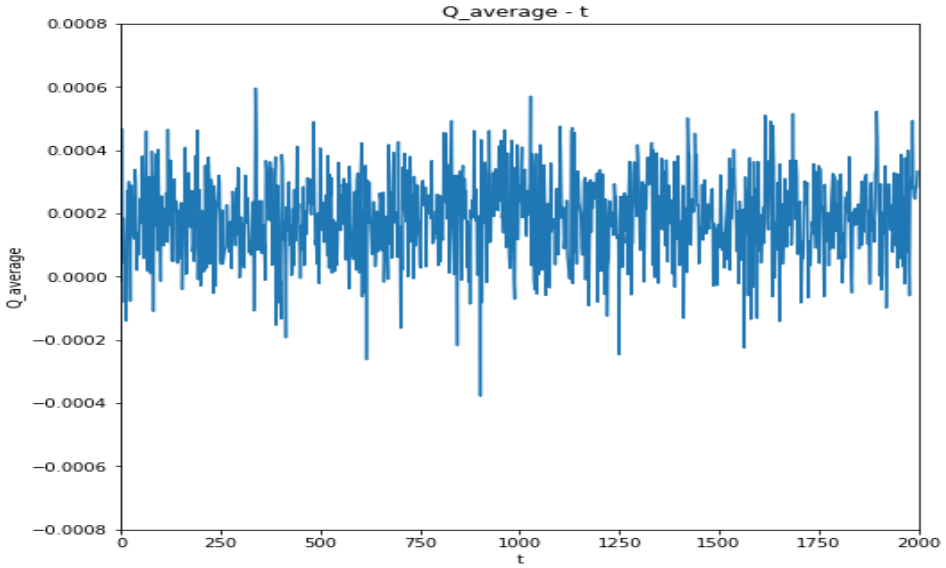
Standard Deviation = 1.4230E-04

Σχήμα 4.37 *Μεταβολή του ρυθμού αερισμό στο χρόνο για τη περίπτωση χωρίς δεύτερο εμπόδιο για οριακό στρώμα υψηλής διάτμησης για το πίσω επίπεδο.*



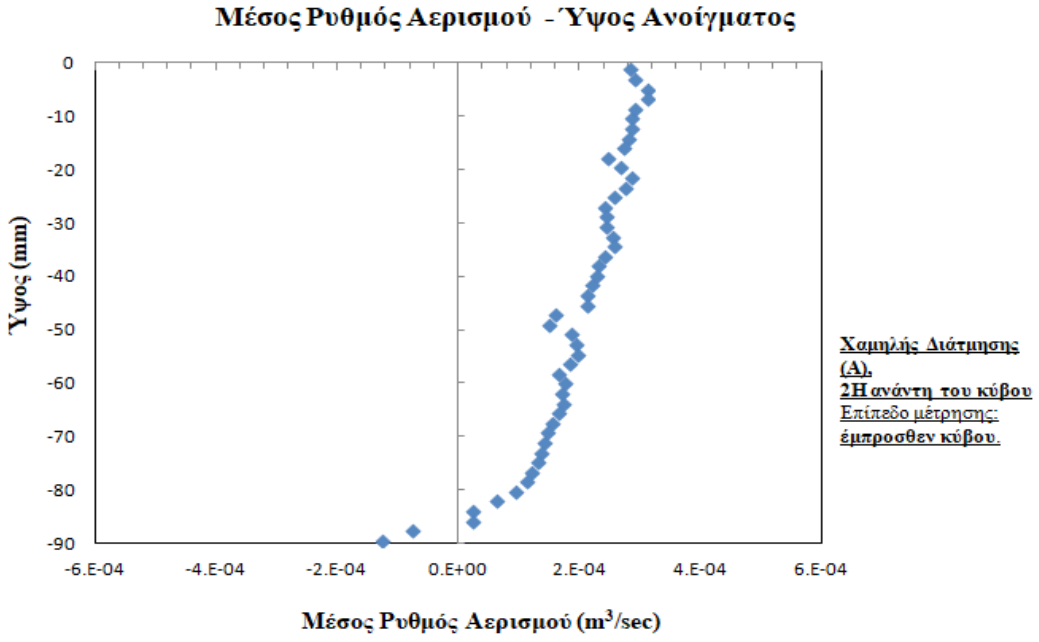
Σχήμα 4.38 *Κατανομή του μέσου ρυθμού αερισμού κατά το ύψος ανοίγματος για τη περίπτωση χωρίς δεύτερο εμπόδιο για οριακό στρώμα υψηλής διάτμησης. Πίσω επίπεδο μέτρησης.*

5) Με δεύτερου εμποδιο σε θέση x=2H ανάντι για οριακό στρώμα χαμηλής διάτμησης-μπροστινό επίπεδο



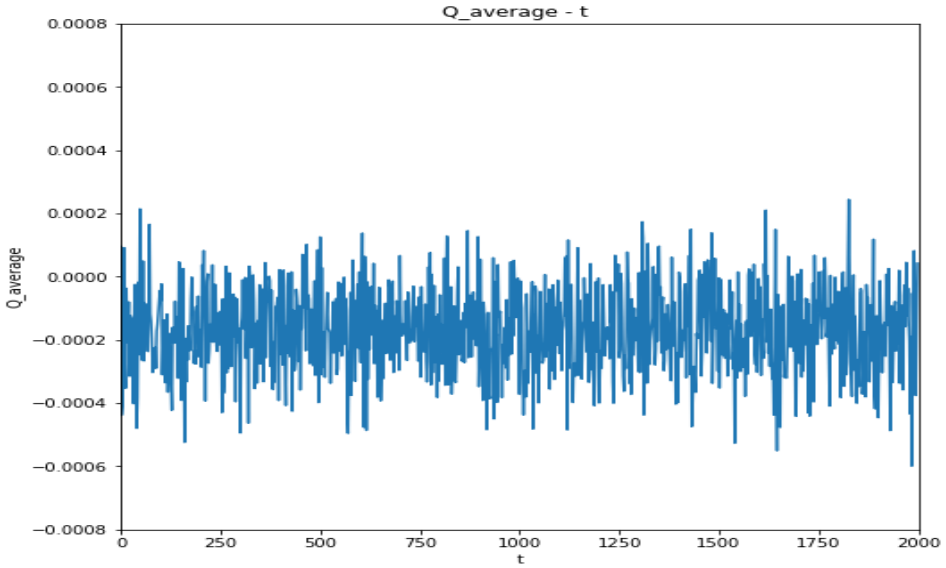
Standard Deviation = 1.3368E-04

Σχήμα 4.39 *Μεταβολή του ρυθμού αερισμό στο χρόνο για τη περίπτωση με δεύτερο εμπόδιο 2H ανάντι για οριακό στρώμα χαμηλής διάτμησης για το μπροστινό επίπεδο.*



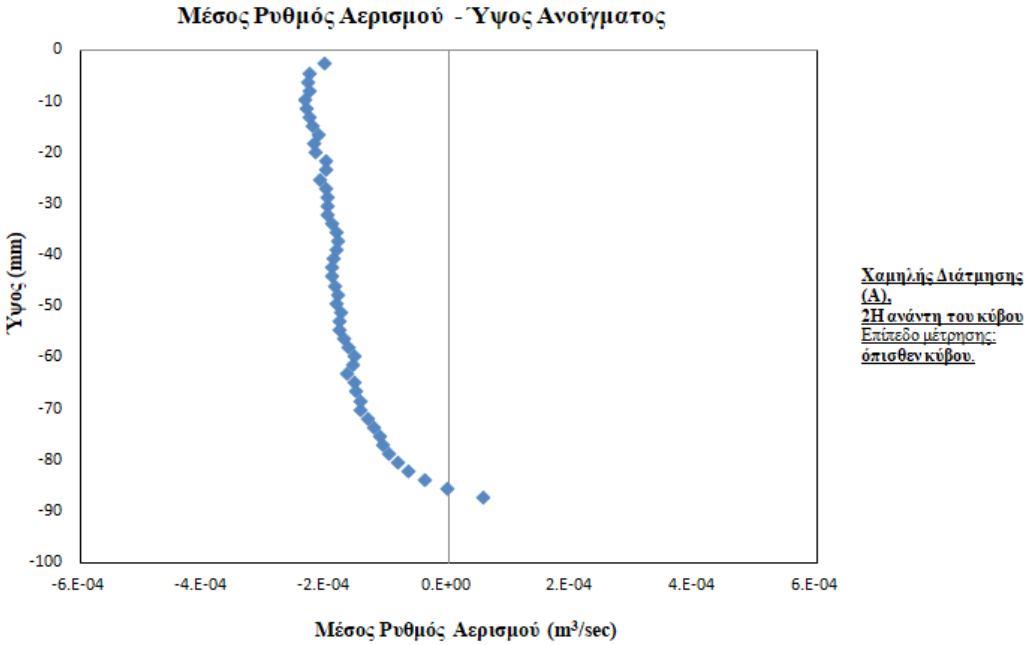
Σχήμα 4.40 *Κατανομή του μέσου ρυθμού αερισμού κατά το ύψος ανοίγματος περίπτωση με δεύτερο εμπόδιο 2H ανάντι για οριακό στρώμα χαμηλής διάτμησης. Μπροστινό επίπεδο μέτρησης.*

6) Με δεύτερου εμποδιο σε θέση x=2H ανάντι για οριακό στρώμα χαμηλής διάτμησης-πίσω επίπεδο



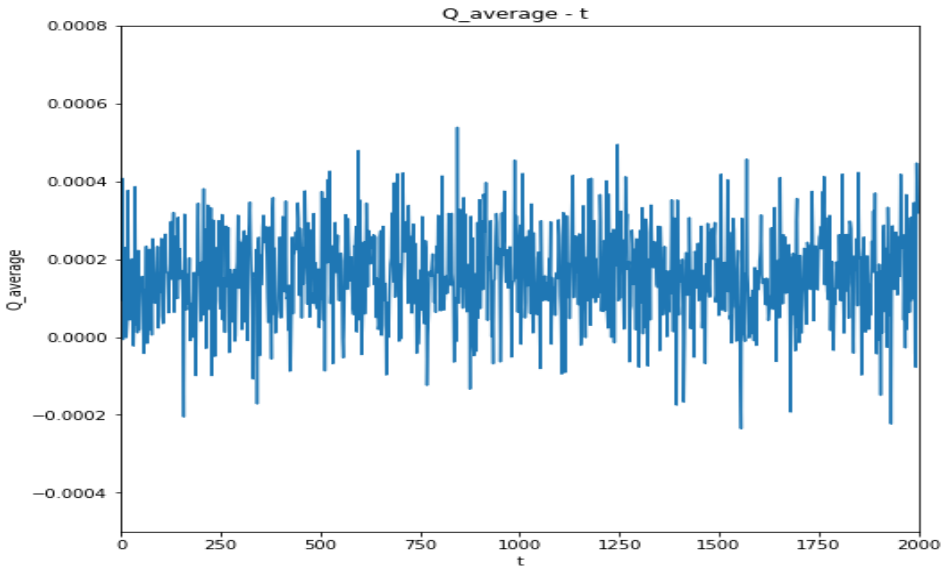
Standard Deviation = 1.3281E-04

Σχήμα 4.41 *Μεταβολή του ρυθμού αερισμό στο χρόνο για τη περίπτωση με δεύτερο εμπόδιο 2H ανάντι για οριακό στρώμα χαμηλής διάτμησης για το πίσω επίπεδο.*



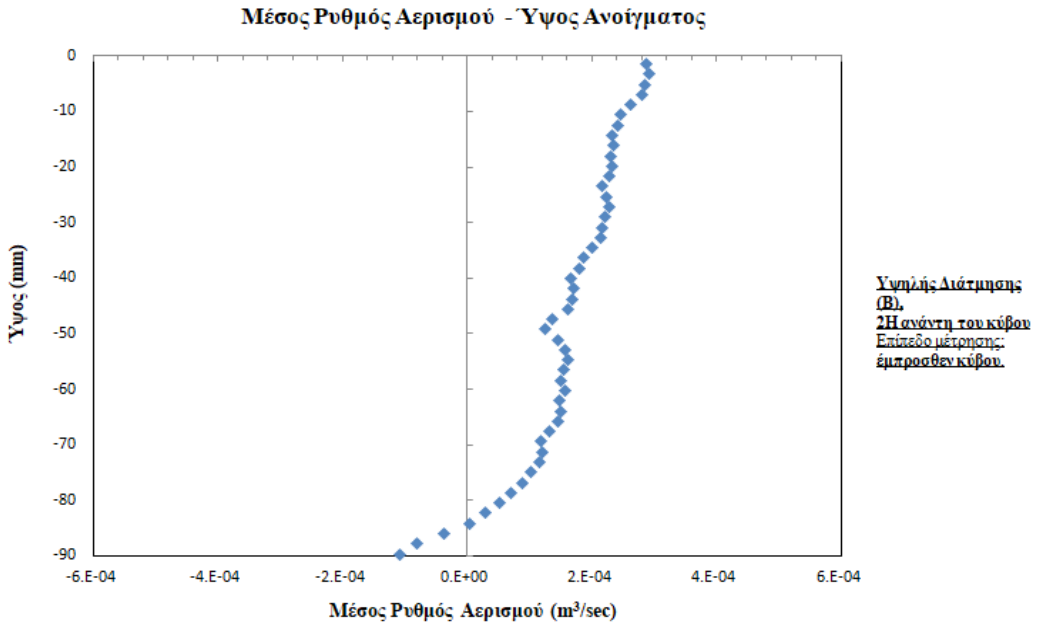
Σχήμα 4.42 *Κατανομή του μέσου ρυθμού αερισμού κατά το ύψος ανοίγματος για τη περίπτωση με δεύτερο εμπόδιο 2H ανάντι για οριακό στρώμα χαμηλής διάτμησης. Πίσω επίπεδο μέτρησης.*

7) Με δεύτερου εμποδιο σε θέση x=2H ανάντι για οριακό στρώμα υψηλής διάτμησης-μπροστινό επίπεδο



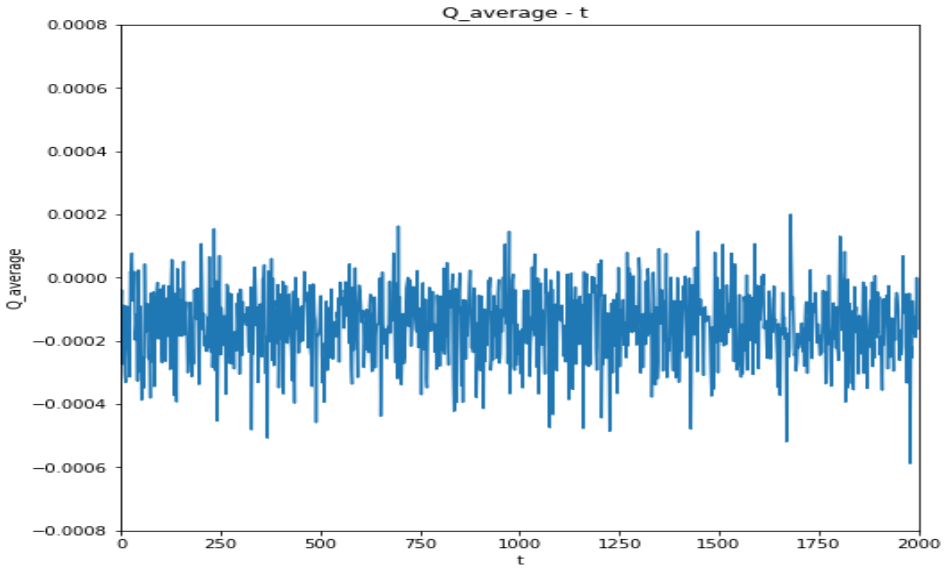
Standard Deviation = 1.1573E-04

Σχήμα 4.43 *Μεταβολή του ρυθμού αερισμό στο χρόνο για τη περίπτωση με δεύτερο εμπόδιο 2H ανάντι για οριακό στρώμα υψηλής διάτμησης για το μπροστινό επίπεδο.*



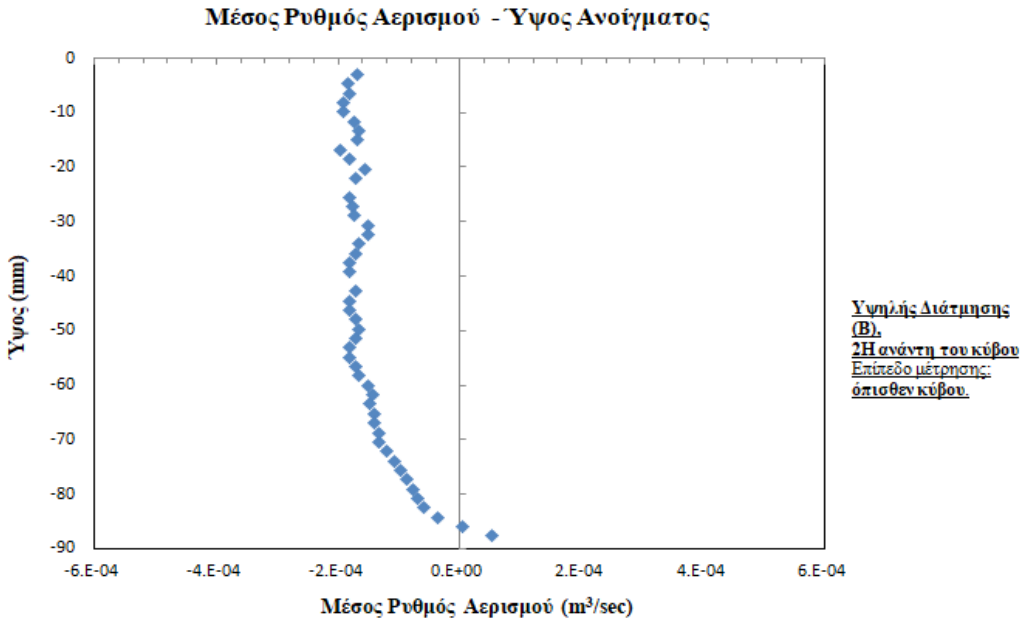
Σχήμα 4.44 *Κατανομή του μέσου ρυθμού αερισμού κατά το ύψος ανοίγματος για τη περίπτωση με δεύτερο εμπόδιο 2H ανάντι για οριακό στρώμα υψηλής διάτμησης. Μπροστινό επίπεδο μέτρησης.*

8) Με δεύτερου εμποδιο σε θέση x=2H ανάντι για οριακό στρώμα υψηλής διάτμησης-πίσω επίπεδο



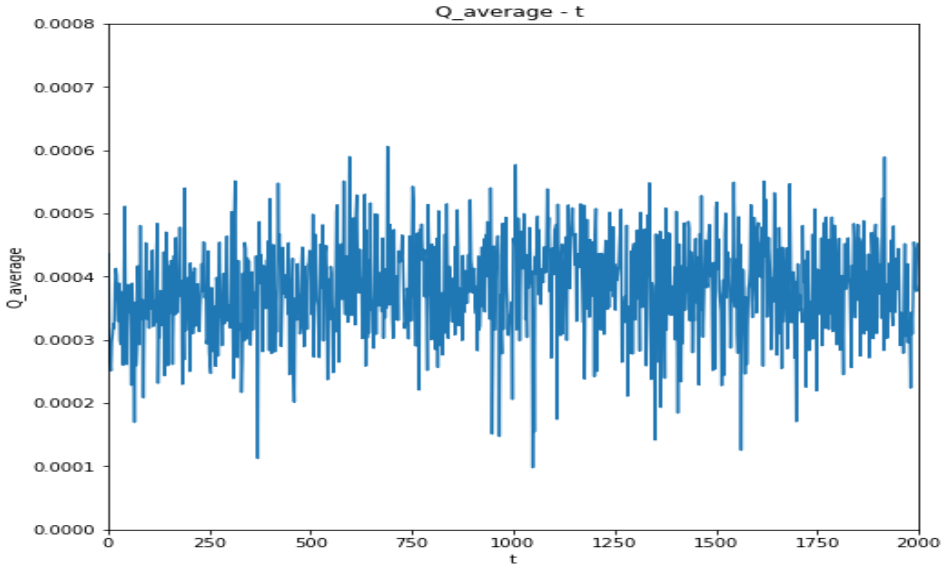
Standard Deviation = 1.1441E-04

Σχήμα 4.45 *Μεταβολή του ρυθμού αερισμό στο χρόνο για τη περίπτωση με δεύτερο εμπόδιο 2H ανάντι για οριακό στρώμα υψηλής διάτμησης για το πίσω επίπεδο.*



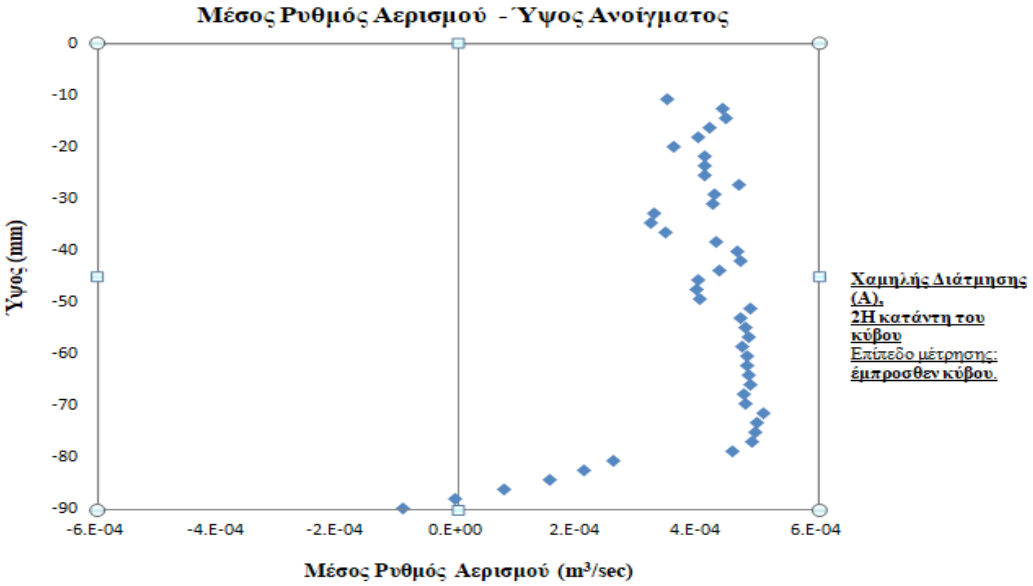
Σχήμα 4.46 *Κατανομή του μέσου ρυθμού αερισμού κατά το ύψος ανοίγματος για τη περίπτωση με δεύτερο εμπόδιο 2H ανάντι για οριακό στρώμα υψηλής διάτμησης. Πίσω επίπεδο μέτρησης.*

9) Με δεύτερου εμποδιο σε θέση x=2H κατάντι για οριακό στρώμα χαμηλής διάτμησης-μπροστινό επίπεδο



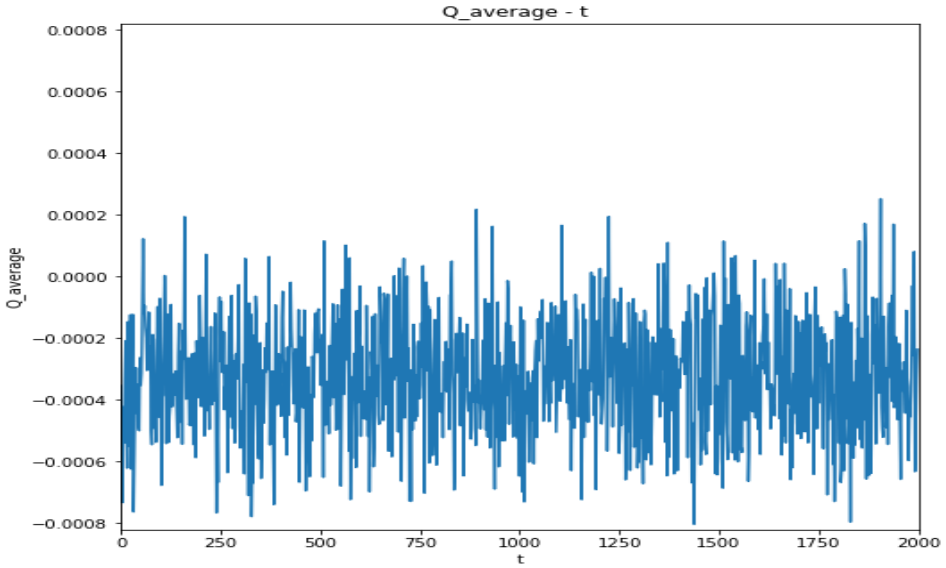
Standard Deviation =7.4920E-05

Σχήμα 4.47 *Μεταβολή του ρυθμού αερισμό στο χρόνο για τη περίπτωση με δεύτερο εμπόδιο 2H κατάντι για οριακό στρώμα χαμηλής διάτμησης για το μπροστινό επίπεδο.*



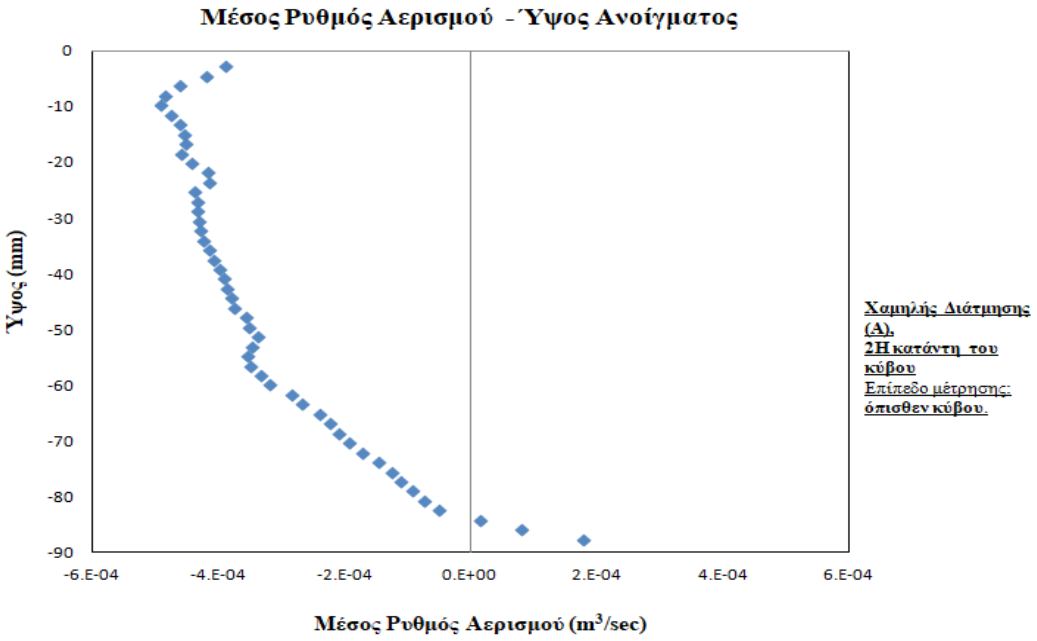
Σχήμα 4.48 *Κατανομή του μέσου ρυθμού αερισμού κατά το ύψος ανοίγματος για τη περίπτωση με δεύτερο εμπόδιο 2H κατάντι για οριακό στρώμα χαμηλής διάτμησης. Μπροστινό επίπεδο μέτρησης.*

10) Με δεύτερο εμπόδιο σε θέση x=2H κατάντι για οριακό στρώμα χαμηλής διάτμησης-πίσω επίπεδο



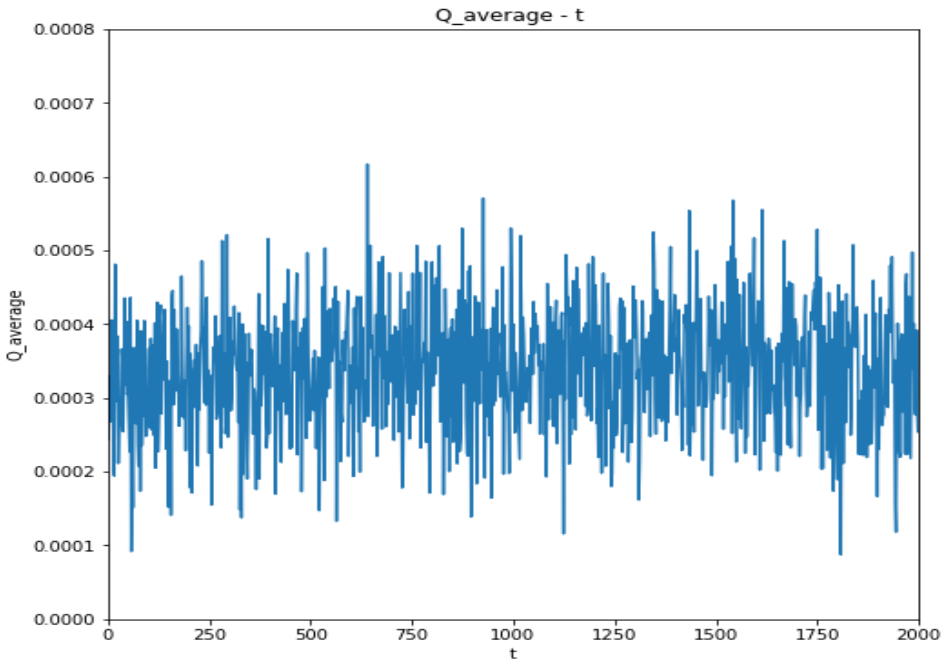
Standard Deviation =1.8475E-04

Σχήμα 4.49 *Μεταβολή του ρυθμού αερισμό στο χρόνο για τη περίπτωση με δεύτερο εμπόδιο 2H κατάντι για οριακό στρώμα χαμηλής διάτμησης για το πίσω επίπεδο.*



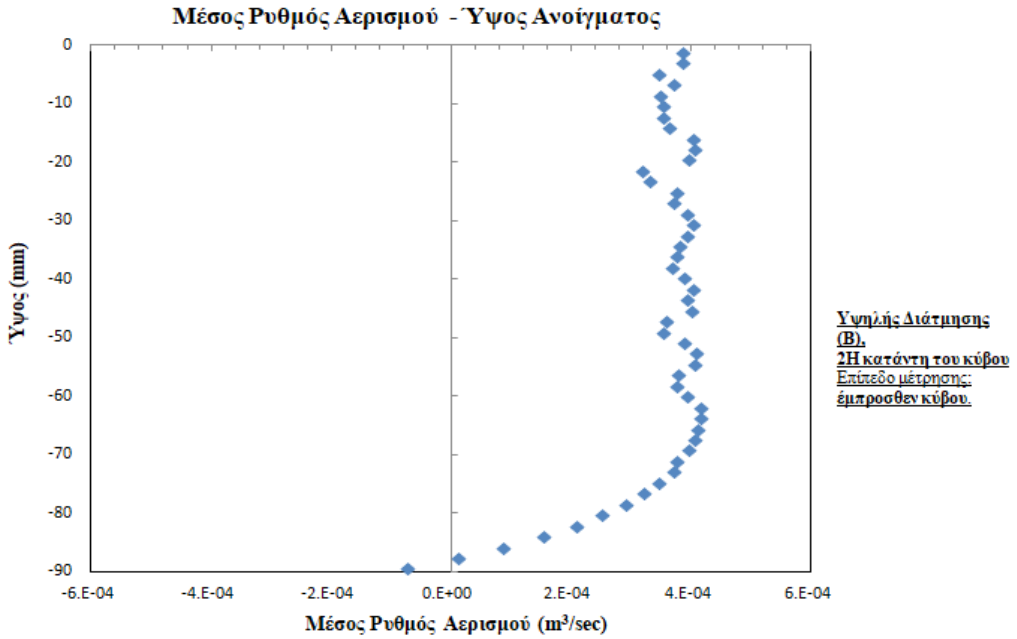
Σχήμα 4.50 *Κατανομή του μέσου ρυθμού αερισμού κατά το ύψος ανοίγματος για τη περίπτωση με δεύτερο εμπόδιο 2H κατάντι για οριακό στρώμα χαμηλής διάτμησης. Πίσω επίπεδο μέτρησης.*

11) Με δεύτερου εμποδιο σε θέση x=2H κατάντι για οριακό στρώμα υψηλής διάτμησης-μπροστινό επίπεδο



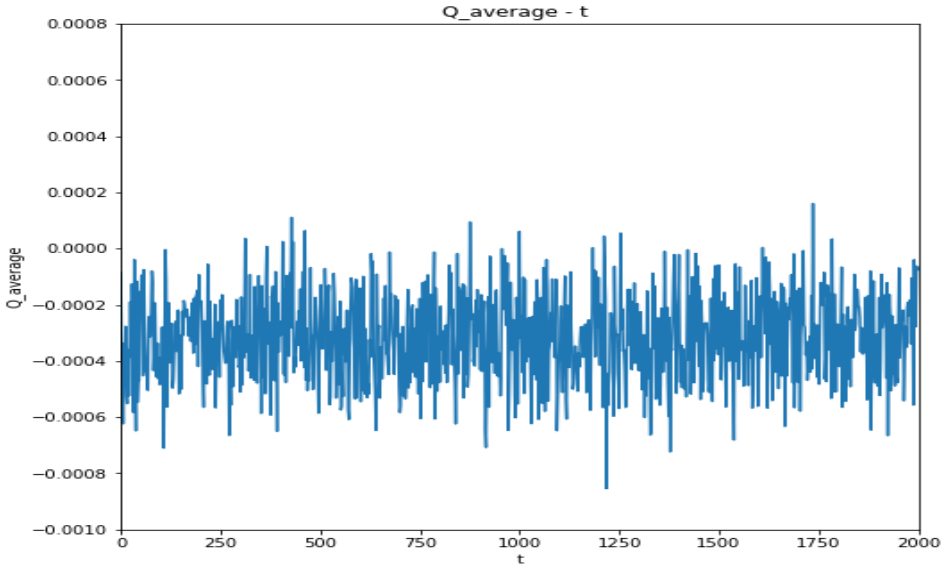
Standard Deviation =8.0827E-05

Σχήμα 4.51 *Μεταβολή του ρυθμού αερισμό στο χρόνο για τη περίπτωση με δεύτερο εμπόδιο 2H κατάντι για οριακό στρώμα υψηλής διάτμησης για το μπροστινό επίπεδο.*



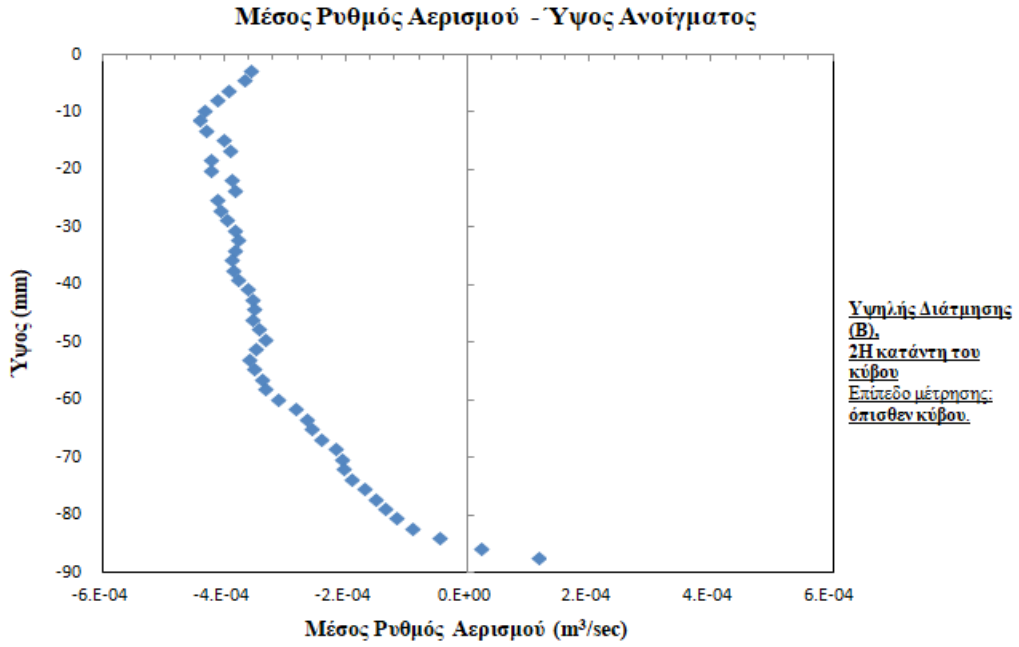
Σχήμα 4.52 *Κατανομή του μέσου ρυθμού αερισμού κατά το ύψος ανοίγματος για τη περίπτωση με δεύτερο εμπόδιο 2H κατάντι για οριακό στρώμα υψηλής διάτμησης. Μπροστινό επίπεδο μέτρησης.*

12) Με δεύτερου εμποδιο σε θέση x=2H κατάντι για οριακό στρώμα υψηλής διάτμησης-πίσω επίπεδο



Standard Deviation = 1.5320E-04

Σχήμα 4.53 *Μεταβολή του ρυθμού αερισμό στο χρόνο για τη περίπτωση με δεύτερο εμπόδιο 2H κατάντι για οριακό στρώμα υψηλής διάτμησης για το πίσω επίπεδο.*



Σχήμα 4.54 *Κατανομή του μέσου ρυθμού αερισμού κατά το ύψος ανοίγματος για τη περίπτωση με δεύτερο εμπόδιο 2H κατάντι για οριακό στρώμα υψηλής διάτμησης. Πίσω επίπεδο μέτρησης.*

Στον πίνακα που ακολουθεί δίνονται οι μέσοι ρυθμοί αερισμού όπως υπολογίστηκαν για το άνοιγμα από τα χίλια στιγμιότυπα κάθε περίπτωσης.

Περίπτωση	Οριακό Στρώμα	Επίπεδο Μέτρησης	Θέση 2ου Κύβου	Μέσος Ρυθμός Αερισμού (m^3/sec)
1	Χαμηλής Διάτμησης (A)	Έμπροσθεν Κύβου	Χωρίς κύβο	4.2812E-04
2	Χαμηλής Διάτμησης (A)	Όπισθεν Κύβου	Χωρίς κύβο	-3.9684E-04
3	Υψηλής Διάτμησης (B)	Έμπροσθεν Κύβου	Χωρίς κύβο	3.7006E-04
4	Υψηλής Διάτμησης (B)	Όπισθεν Κύβου	Χωρίς κύβο	-3.6553E-04
5	Χαμηλής Διάτμησης (A)	Έμπροσθεν Κύβου	2H ανάντη	1.9135E-04
6	Χαμηλής Διάτμησης (A)	Όπισθεν Κύβου	2H ανάντη	-1.6912E-04
7	Υψηλής Διάτμησης (B)	Έμπροσθεν Κύβου	2H ανάντη	1.5865E-04
8	Υψηλής Διάτμησης (B)	Όπισθεν Κύβου	2H ανάντη	-1.5751E-04
9	Χαμηλής Διάτμησης (A)	Έμπροσθεν Κύβου	2H κατάντη	3.8945E-04
10	Χαμηλής Διάτμησης (A)	Όπισθεν Κύβου	2H κατάντη	-3.1737E-04
11	Υψηλής Διάτμησης (B)	Έμπροσθεν Κύβου	2H κατάντη	3.4514E-04
12	Υψηλής Διάτμησης (B)	Όπισθεν Κύβου	2H κατάντη	-3.0560E-04

Πίνακας 4.1 *Ο μέσος ρυθμός αερισμού από το άνοιγμα του μοντέλου για κάθε περίπτωση*

Κεφάλαιο 5: Αξιολόγηση αποτελεσμάτων και συμπεράσματα

Σε αυτό το σημείο τς εργασίας θα επιχειρήσουμε να αξιολογήσουμε τη ποιότητα των αποτελεσμάτων που παρουσιάστηκαν πιο πάνω και να εξάγουμε ορισμένα συμπεράσματα.

Ξεκινώντας το σχολιασμό μας από τα διαγράμματα για τα επίπεδα τύρβης (βλ υποπαράγραφο 4.2), παρατηρούμε ότι για τα μπροστινά επίπεδα μέτρησης - εκτός από την περίπτωση που υπάρχει κυβικό εμπόδιο ανάντι του μοντέλου - υπάρχουν υψηλά επίπεδα τύρβης χαμηλά και εκατέρωθεν του κύβου. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς καθώς σε εκείνες τις περιοχές αναμένεται η υπάρξη πεταλοειδούς στροβίλου. Αυτή η υπόθεση επιβεβαιώνεται και από τα διαγράμματα με τις θέσεις μεγίστων του Q-criterion για κάθε στιγμιότυπο. Βλέπουμε ότι σε αυτές τις περιπτώσεις υπάρχει συσσώρευσης στις ίδιες περιοχές.

Η μορφή των διαγραμμάτων στη περίπτωση που έχουμε τον δεύτερο κύβο σε θέση 2Η ανάντι στη ροή δεν εκπλήσσει καθώς η εισερχόμενη ροή αποτελεί τον ομόρρου του εμποδίου. Επίσης με βάση τη βιβλιογραφία περιμένουμε να μην εμφανίζεται πεταλοειδής στρόβιλος καθώς η ροή δεν έχει προλάβει σε τόσο μικρή απόσταση να επανακολληθεί και να αποκολληθεί εκ νέου.

Προβληματισμό δημιουργεί η ύπαρξη ασυμμετρίας στα διαγράμματα ποσοστών τύρβης, ειδικά στις περιπτώσεις 5,6,7,8. Μάλιστα, αυτή η ασυμμετρία και στην περίπτωση οριακού στρώματος 'Α' και 'Β' εμφανίζεται από την ίδια πλευρά του κύβου. Ωστόσο, αφού μετρήθηκε το πίσω επίπεδο για όλες τις περιπτώσεις ο εξοπλισμός ξεστήθηκε και στήθηκε εκ νέου για να μετρηθεί το μπροστινό του μοντέλου επίπεδο. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την έλλειψη ένδειξης κάποιου συστημικού σφάλματος στην πειραματική διαδικασία, οδηγεί στην υπόθεση ότι πιθανώς υπάρχει κάποια ασυμμετρία στην εισερχόμενη ροή. Το ζήτημα αυτό χρήζει σε κάθε περίπτωση περαιτέρω διερεύνησης.

Όσον αφορά τον ρυθμό αερισμού του μοντέλου, ασφαλώς ένδειξη ορθότητας των μετρήσεων είναι ο μέσος ρυθμός αερισμού στο μπροστινό να είναι με αυτόν στο πίσω επίπεδο μέτρησης, καθώς πρέπει να ικανοποιείται η εξίσωση συνέχειας.

Στον παρακάτω βλέπουμε είναι το ποσοστό διαφοράς εμπρόσθιου και οπίσθιου πλάνου για κάθε περίπτωση:

Περίπτωση	Διαφορά ρυθμού αερισμού (%)
Χαμηλής Διάτμησης - Χωρίς κύβο	7,31%
Υψηλής Διάτμησης Χωρίς κύβο	1,22%
Χαμηλής Διάτμησης 2Η ανάντη	11,62%
Υψηλής Διάτμησης 2Η ανάντη	0,72%
Χαμηλής Διάτμησης 2Η κατάντη	18,51%
Υψηλής Διάτμησης 2Η κατάντη	11,46%

Σε γενικές γραμμές η διαφορά κυμαίνεται σε αποδεκτά όρια, καθώς υπάρχουν διανύσματα ταχυτήτων σε κάθε περίπτωση που λόγω ανακλάσεων φωτός ή σφαλμάτων στην μαθηματική διαδικασία υπολογισμού των διανυσμάτων είναι αναμενόμενο να υπάρχουν κάποιες διαφοροποιήσεις.

Όσον αφορά τη συμπεριφορά του αερισμού συναρτήσει των παραμέτρων που εξετάσαμε, φαίνεται πως για το 'Β' οριακό στρώμα ο ρυθμός αερισμού μειώνεται. Όσον αφορά τη μεταβολή του αερισμού, η ύπαρξη του κυβικού σώματος ανάντι μειώνει πολύ το ρυθμό αερισμού, ενώ και η ύπαρξη εμποδίου κατάντι του μοντέλου δείχνει να τον μειώνει σε πολύ μικρότερο, βέβαια, βαθμό. Επίσης ,σε κάθε διάταξη των σωμάτων ο ρυθμός αερισμού μειώνεται για το οριακό στρώμα υψηλότερης διάτμησης.

Προσωπική συμβολή

Η προσωπική συμβολή του γράφοντος στο πείραμα αυτό περιλάμβανε αρχικά τη μελέτη της σχετικής βιβλιογραφίας. Έπειτα, λαμβάνοντας υπόψη τον διαθέσιμο εξοπλισμό και τις προηγούμενες εργασίες που είχαν πραγματοποιηθεί στο εργαστήριο, έγινε τη πρόταση για το πείραμα και πιο συγκεκριμένα, τις εξεταζόμενες παραμέτρους. Έγινε εισήγηση για την εισαγωγή ενός δεύτερου κυβικού σχήματος σώματος για να εξεταστεί πως αλληλεπιδρά με το κυβικό μοντέλο.

Αξίζει να καταγραφεί, ότι το πείραμα αυτό διαμορφώθηκε και μέσα από αποτυχημένες προσπάθειες και δοκιμές διάφορων ιδεών, όπως η καταγραφή δυναμικών φαινομένων στις επιφάνειες του μοντέλου με χρήση των μανομετρικών οπών που υπήρχαν ήδη σε αυτό.

Κατόπιν, για την υλοποίηση του πειράματος χρειάστηκε να τοποθετηθεί το μοντέλο σε κατάλληλη υποδοχή στο κέντρο της στρεφόμενης τραπέζης του χώρου δοκιμών. Στήσιμο των καμερών εντός της αεροδυναμικής σήραγγας και βαθμονόμησή τους. Τοποθέτηση της συσκευής laser και προσαρμογή της δέσμης για μέτρηση στο επιθυμητό επίπεδο. Κατά την εκτέλεση του πειράματος, χειρισμός του εξοπλισμού για λήψη μετρήσεων, καθώς και λειτουργία της αεροδυναμικής σήραγγας και παρελκόμενου εξοπλισμού (συσκευή ψεκασμού σωματιδίων, δευτερεύοντα οργάνα όπως μανόμετρα για μέτρηση ταχύτητας της ροής εντός του χώρου δοκιμών με σωλήνα Pitot-static, κ.α.).

Τέλος επεξεργασία των μετρήσεων με το λογισμικό Insight4G και χρήση μικρών ρουτίνων για υπολογισμό των μεγεθών που μας ενδιαφέρουν.

Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Στα πλαίσια του πειράματος αυτού γίνανε μετρήσεις για δυο ακόμα περιπτώσεις ως προς τη θέση του κύβου, οι οποίες κρίθηκε σκόπιμο να μην παρουσιαστούν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Σε αυτές τις δυο περιπτώσεις το κυβικό εμπόδιο είχε τοποθετηθεί σε θέσεις 4Η ανάντι και κατάντι του μοντέλου. Η επεξεργασία αυτών των δεδομένων θα δώσει ακόμα περισσότερα δεδομένα διαθέσιμα για την επιρροή του ενός δεύτερου σώματος στη ροή και τον διαμήκη αερισμό ενός κτιρίου.

Ένα μεγάλο πρόβλημα κατά το πείραμα αυτό ήταν οι ανακλάσεις του φωτός πάνω στο μοντέλο. Αυτό είναι ένα εγγενές πρόβλημα της μεθόδου PIV και γίνονται προσπάθειες για τον περιορισμό του ώστε να υπάρχει δυνατότητα μετρήσεων κοντά σε στέρεες επιφάνειες. σε αυτή τη κατεύθυνση. Έχουν γίνει προσπάθειες με χρήση βαφών που ανακλούν τη προσπίπτουσα ακτινοβολία από το laser σε άλλο μήκος

κύματος και χρήση φίλτρων στους φακούς των φωτογραφικών μηχανών. Γενικά, δεν υπάρχει μια κοινά αποδεκτή μέθοδος για τη λύση αυτού του προβλήματος. Προτείνεται η περαιτέρω προσπάθεια και έρευνα στη κατεύθυνση αυτή.

Ενδιαφέρον θα είχε και η χρήση time resolved PIV ωστε να μπορέσουν να καταγραφούν τα δυναμικά φαινόμενα με χρονική ακρίβεια και να ναι δυνατή η ανάλυσή τους στο χρόνο. Αυτό βέβαια απαιτεί ακριβό εξοπλισμό μη διαθέσιμο αυτή τη στιγμή στο ΕΜΠ.

Τέλος, ένας σημαντικός μακροπρόθεσμος στόχος θα ήταν η προσπάθεια ανάπτυξης μεθόδων ελέγχου της ροής διαμέσου ενός κτιρίου ώστε να διατηρεί για παράδειγμα σταθερή τη ροή του αέρα σε διαφορετικές συνθήκες πνέοντος ανέμου.

Βιβλιογραφία

[1] https://en.wikipedia.org/wiki/Dogtrot_house

[2] M. Orme, 2001, Estimates of the energy impact of ventilation and associated financial expenditures, Energy and Buildings 33, p. 199–205

[3] Πάνος Μ., 2017, “Πειραματική προσομοίωση προτύπου κτήριο εκτεθειμένου σε ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα”, διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα

[4] Πάνος Μ., Μανωλέσος Μ., Μπούρης Δ., 2016, Πειραματική Προσομοίωση προτύπου κτηρίου εκτεθειμένου σε ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα, 10η Επιστημονική Συνάντηση, Πανελλήνιο Συνέδριο για τα Φαινόμενα Μηχανικής Ρευστών, Πάτρα

[5] Manolesos, M., Gao, Z., & Bouris, D., 2018, Experimental investigation of the atmospheric boundary layer flow past a building model with openings, Building and Environment,141, 166-181.

[6] Μπεργελές Γ., 2005, Ανεμοκινητήρες, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα

[7] Cook N J. (1978), Determination of the model scale factor in wind-tunnel simulations of the adiabatic atmospheric boundary layer, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 2(4), 311-321

[8] Castro, I. P., and Robins, A. G., 1977, ‘‘The Flow Around a Surface-Mounted Cube in Uniform and Turbulent Streams,’’ J. Fluid Mech., 79, Part 2, pp.307–335.

[9] Ogawa et al, 1981, “A FIELD INVESTIGATION OF THE FLOW AND DIFFUSION AROUND A MODEL CUBE”, Atmospheric enviroment, vol 16, issue 2 , pp. 207-222

[10] Ogawa et al., “Field and wind tunnel study of the flow and diffusion around a model cube- I. Flow measurements, Atmospheric Environment”, Vol. 17, Issue 6, 1983, pp. 1145-1159

[11] Martinuzzi, R., and Tropea, C., 1993, ‘‘The Flow Around Surface-Mounted,Prismatic Obstacles Placed in a Fully Developed Channel Flow,’’ ASME J.Fluids Eng., 115, pp. 85–92.

[12] H. Nakamura et al., 2003, “Local heat transfer around a wall-mounted cube at 45° to flow in a turbulent boundary layer”, Int. J. Heat and Fluid Flow, 24, 807–815

[13] Natarajan V., Chyu M. K., 1994, “Effect of Flow Angle-of-Attack on the Local Heat/mass Transfer From a Wall-Mounted Cube”, Transactions of the ASME, 116, 553-560

[14] Martinuzzi, R. and Havel,B., 2000, “Turbulent Flow Around Two Interfering Surface-Mounted Cubic Obstacles in Tandem Arrangement”, Transactions of the ASME, 122, p24-31

[15] Νάνος Ε. , 2013, "Παραμετρική μελέτη στροβιλογεννητριών τοποθετημένων πάνω σε επίπεδη πλάκα με χρήση μεθόδου STEREO- PIV", διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα

[16] M. Manolesos, Experimental and Computational Study of Three-Dimensional Separation and Separation Control using Passive Vortex Generators (Ph.D. thesis),NTUA, Athens (2013)

[17] https://www.dlr.de/as/en/DesktopDefault.aspx/tabid-183/251_read-12796/gallery-1/gallery_read-Image.5.1574/

[18] http://www.aerolab.mech.ntua.gr/experimental.html

[19] Koutselakis P (2011) Experimental Study of Surface Pressure Distribution on a Cubic Building Model. Diploma Thesis. Dept. Mechanical Engineering, University of Western Macedonia.

[20] Zhou Xing, 2015. Passive Simulation of ABL in a 3.5x2.5m Experimental Wind Tunnel, Master Thesis,China-EU Institute for Clean and Renewable Energy

[21] Irwin, H. ,1981. The design of spires for wind simulation. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 7(3), 361-366.

[22] Karava, P., Stathopoulos, T., & Athienitis, A. (2011). Airflow assessment in cross-ventilated buildings with operable façade elements. Building and Environment, 46(1), 266-279

[23] Holmen V. , 2012, Methods for vortex identification, Master's Theses in Mathematical Sciences, FMA820 20121

[24] Raffel, M., Willert, C. E., & Kompenhans, J., 1998,. Particle image velocimetry: A practical guide, Berlin, Springer