



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΩΝ  
ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

# ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΡΟΤΥΠΟΥ ΚΤΗΡΙΟΥ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ ΣΕ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟ ΟΡΙΑΚΟ ΣΤΡΩΜΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΜΕΛΕΤΙΟΣ Ι. ΠΑΝΟΣ**

**Επιβλέπων:** Δημήτριος Μπούρης, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2017



## Περίληψη

Η ροή γύρω από κυβικής μορφής σώμα επί στερεής επιφάνειας έχει μελετηθεί στο παρελθόν τόσο αριθμητικά όσο και πειραματικά. Η κατανομή πιέσεων στις εξωτερικές επιφάνειες μιας κτηριακής κατασκευής, ακόμη και σε ανέμους χαμηλών ταχυτήτων, είναι κρίσιμη παράμετρος για το ρυθμό αερισμού ή/και διείσδυσης αέρα στο κτήριο και κατ' επέκταση για θέματα ποιότητας αέρα στο εσωτερικό αλλά και εξωτερικό περιβάλλον του. Είναι όμως λίγες οι μελέτες που εξετάζουν την επίδραση των χαρακτηριστικών του ανάντι οριακού στρώματος στη κατανομή πίεσης και στον αερισμό και διείσδυση αέρα, ειδικά όταν υπάρχουν και ανοίγματα στο κτηριακό κέλυφος.

Στη παρούσα εργασία, εξετάζεται πειραματικά η περίπτωση ενός κυβικής μορφής πρότυπου κτηρίου, εκτεθειμένου με τη μια πλευρά του κάθετη ( $0^\circ$ ) ή σε γωνία  $45^\circ$  ως προς τη ροή δύο διαφορετικών ανάντι τυρβωδών οριακών στρωμάτων. Εξετάζεται η επίδραση των τυρβωδών χαρακτηριστικών του οριακού στρώματος καθώς και της παρουσίας ανοιγμάτων στις κάθετες πλευρές του κτηρίου στη διαμόρφωση της επιφανειακής κατανομής πίεσης. Παρατηρείται ευαισθησία της κατανομής πίεσης στη μορφή του οριακού στρώματος για γωνία  $0^\circ$  αλλά η παρουσία των ανοιγμάτων είχε μικρή επίδραση. Για προσανατολισμό  $45^\circ$  ως προς τη ροή, η επίδραση του οριακού στρώματος φαίνεται να είναι μικρότερη αλλά η επίδραση των ανοιγμάτων στις ανάντι πλευρές γίνεται πιο έντονη.

**Λέξεις Κλειδιά:** Κύβος, ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα, συντελεστής πίεσης





NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS  
SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING  
FLUIDS DEPARTMENT  
LABORATORY FOR INNOVATIVE ENVIRONMENTAL  
TECHNOLOGIES

# Experimental Simulation of a Model Building Exposed to an Atmospheric Boundary Layer

Diploma Thesis

**Meletios Panos**

**Supervisor:** Demetri Bouris, Assistant Professor NTUA

Athens, February 2017

## Abstract

The surface pressure distribution on a building's external walls is a critical parameter, even at low wind speeds, for the ventilation and/or infiltration rate and thus has implications related to indoor and outdoor air quality. Although the flow past a surface mounted cube has been studied in the past both numerically and experimentally, there are few published studies that focus on the effect that the characteristics of the upstream boundary layer have on the external surface pressure distribution and the infiltration and ventilation rate, especially when there are openings in the building shell.

The present study is an experimental investigation of the situation where a surface mounted cube is exposed to two different types of turbulent boundary layer at two different orientations i.e. the upstream face vertical ( $0^\circ$ ) or at a  $45^\circ$  angle with respect to the flow. We examine the effect on the surface pressure distribution of the turbulence characteristics of the boundary layer and of the presence of openings on the vertical sides of the cube shell. At the  $0^\circ$  orientation, the pressure distribution is found to be sensitive to the upstream boundary layer characteristics but relatively indifferent to the presence of openings. For the  $45^\circ$  distribution, the boundary layer effect is less pronounced while the effect of openings seems to be enhanced.

**Keywords:** Cube, atmospheric boundary layer, pressure coefficient



## Ευχαριστίες

Με τη Διπλωματική Εργασία ολοκληρώνονται οι σπουδές μου στη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. Θα ήθελα λοιπόν, με την αφορμή αυτή, να ευχαριστήσω όλους εκείνους που στάθηκαν δίπλα μου, σε ολόκληρη τη φοιτητική μου πορεία.

Κατ' αρχήν θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή μου Κ. Μπούρη Δημήτριο, τόσο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντας μου την διεκπεραίωση της παρούσας εργασίας, όσο και για την άριστη συνεργασία μας για την επιτυχημένη ολοκλήρωσή της. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Μανωλέσο Μαρίνο που δίχως την συμμετοχή του, η ολοκλήρωση του πειράματος θα ήταν αδύνατη.

Και φυσικά ευχαριστώ την οικογένειά μου. Την μητέρα μου, Αναστασία, τον αδερφό μου, Σταμάτη που καθ' όλη τη χρονική περίοδο των σπουδών, ήταν στο πλάι μου και με υποστήριζε με κάθε τρόπο, όσο δύσκολο και αν ήταν αυτό. Και φυσικά τον πατέρα μου, Ιωάννη, που είμαι βέβαιος ότι θα ήταν υπερήφανος.

---

---



---

## Περιεχόμενα

<b>1</b>	<b>Εισαγωγή.....</b>	<b>1</b>
1.1	Φυσικός αερισμός κτηρίων.....	1
1.2	Σκοπός της εργασίας.....	3
1.3	Δομή της εργασίας.....	3
<b>2</b>	<b>Ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα.....</b>	<b>5</b>
2.1	Ο άνεμος.....	5
2.1.1	Γενικά για την ατμόσφαιρα.....	5
2.1.2	Ευστάθεια της ατμόσφαιρας.....	7
2.1.3	Κυκλοφορία της ατμόσφαιρας.....	9
2.2	Ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα.....	12
2.2.1	Ανάπτυξη του ΑΟΣ.....	12
2.2.2	Δομή του ΑΟΣ.....	14
2.3	Χαρακτηριστικά ΑΟΣ.....	17
2.3.1	Μέση ταχύτητα.....	17
2.3.2	Ένταση τύρβης.....	20
2.3.3	Ολοκληρωτική κλίμακα μήκους τύρβης.....	22
2.3.4	Φάσμα τυρβώδους κινητικής ενέργειας.....	24
<b>3</b>	<b>Ροή γύρω από κύβο.....</b>	<b>27</b>
3.1	Πεδίο ροής γύρω από κύβο.....	27
3.1.1	Ροή κάθετη στην επιφάνεια του κύβου.....	27
3.1.2	Ροή υπό γωνία πρόσπτωσης 45 μοιρών.....	31
3.2	Κατανομή πίεσης στην επιφάνεια του κύβου.....	34
3.2.1	Ροή κάθετη στην επιφάνεια του κύβου.....	34
3.2.2	Ροή υπό γωνία πρόσπτωσης 45 μοιρών.....	38
<b>4</b>	<b>Πειραματική διάταξη και τεχνικές μετρήσεων.....</b>	<b>43</b>
4.1	Η αεροδυναμική σήραγγα.....	43
4.2	Τεχνική προσομοίωσης ΑΟΣ.....	45
4.2.1	Οβελίσκοι.....	46
4.2.2	Στοιχεία τραχύτητας.....	48
4.2.3	Διάταξη οβελίσκων και στοιχείων τραχύτητας.....	50
4.2.4	Ομοιότητα προσομοίωσης.....	51
4.3	Μέτρηση χαρακτηριστικών ΑΟΣ.....	52
4.3.1	Θερμό νήμα.....	52
4.3.2	Διάταξη θερμού νήματος.....	53

---

4.3.3	Βαθμονόμηση θερμού νήματος .....	56
<b>4.4</b>	<b>Μέτρηση πιέσεων στην επιφάνεια του κύβου .....</b>	<b>57</b>
4.4.1	Ο πρότυπος κύβος .....	57
4.4.2	Διάταξη μέτρησης της πίεσης.....	59
<b>4.5</b>	<b>Σενάρια πειραματικής μελέτης.....</b>	<b>61</b>
4.5.1	Ροή κάθετη στην επιφάνεια του κύβου .....	63
4.5.2	Ροή υπό γωνία πρόσπτωσης 45 μοιρών.....	67
<b>5</b>	<b>Αποτελέσματα και συγκρίσεις .....</b>	<b>71</b>
<b>5.1</b>	<b>Χαρακτηριστικά ΑΟΣ.....</b>	<b>71</b>
5.1.1	Κατατομή μέσης ταχύτητας.....	72
5.1.2	Κατατομή έντασης της τύρβης.....	76
5.1.3	Κατατομή ολοκληρωτικής κλίμακας μήκους τύρβης.....	77
5.1.4	Φάσμα τυρβώδους κινητικής ενέργειας .....	79
5.1.5	Συντελεστής κλίμακας προσομοίωσης.....	83
<b>5.2</b>	<b>Κατανομή συντελεστή πίεσης στην επιφάνεια του κύβου.....</b>	<b>87</b>
5.2.1	Ροή κάθετη στην επιφάνεια του κύβου .....	88
5.2.2	Ροή υπό γωνία πρόσπτωσης 45 μοιρών.....	109
<b>5.3</b>	<b>Αβεβαιότητα μετρήσεων .....</b>	<b>129</b>
5.3.1	Μέτρηση κατατομής ταχυτήτων ΑΟΣ .....	129
5.3.2	Μέτρηση κατανομής πιέσεων στην επιφάνεια του κύβου .....	130
<b>6</b>	<b>Συμπεράσματα και σχόλια.....</b>	<b>137</b>
<b>6.1</b>	<b>Συμπεράσματα .....</b>	<b>137</b>
<b>6.2</b>	<b>Προσωπική συμβολή .....</b>	<b>137</b>
6.2.1	Για την προσομοίωση ΑΟΣ.....	137
6.2.2	Για την μέτρηση του κύβου.....	138
<b>6.3</b>	<b>Σχόλια και μελλοντικές προτάσεις .....</b>	<b>138</b>
6.3.1	Για την προσομοίωση ΑΟΣ.....	138
6.3.2	Για την μέτρηση του κύβου.....	139
	<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>141</b>

---

# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

### 1.1 Φυσικός αερισμός κτηρίων

Φυσικός αερισμός κτηρίων είναι η είσοδος ατμοσφαιρικού αέρα μέσα στο κτήριο μέσω κατάλληλων ανοιγμάτων ή και σχισμών [1], χωρίς τη χρήση φυσητήρων. Ο φυσικός αερισμός χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της θερμοκρασίας και της ποιότητας του αέρα (π.χ. υγρασίας, μείωση της συγκέντρωσης αέριων ρύπων, οσμών κλπ.) στο εσωτερικό και εξωτερικό περιβάλλον του κτηρίου.

Η ροή του αέρα από και προς το εσωτερικό του κτηρίου πραγματοποιείται όταν η στατική πίεση εξωτερικώς του κτηρίου διαφέρει από την στατική πίεση στο εσωτερικό του. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η παροχή  $Q$  μέσω ενός ανοίγματος διατομής  $A$ , εξαρτάται από την διαφορά των στατικών πιέσεων  $\Delta p$ , εσωτερικά και εξωτερικά του κτηρίου. Πιο συγκεκριμένα η διαφορά  $\Delta p$  είναι ίση με τις υδραυλικές απώλειες, οι οποίες είναι συνάρτηση της γεωμετρίας του ανοίγματος. Για συντελεστή τριβής  $\lambda$ , μήκος ανοίγματος  $L$  και υδραυλική διάμετρο  $D_h$ , η σχέση παροχής  $Q$  και διαφοράς στατικών πιέσεων  $\Delta p$  είναι:

$$\Delta p = \lambda \frac{L}{D_h} \frac{\rho}{2} \left( \frac{Q}{A} \right)^2 \quad (1.1)$$

η οποία μπορεί να γενικευτεί στην εξής σχέση:

$$Q = c(\Delta p)^n \quad (1.2)$$

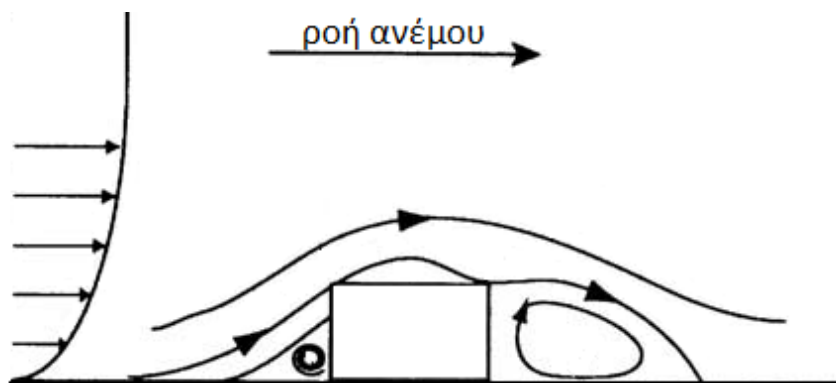
όπου  $c$  μια σταθερά αναλογίας και  $n$  μια παράμετρος που παίρνει τιμές κοντά στην μονάδα, για μικρά ανοίγματα ή μεγάλα μήκη (στρωτή ροή), ενώ τείνει στο 2, για μεγάλα ανοίγματα ή μικρά μήκη (τυρβώδης ροή).

Η διαφορά των πιέσεων  $\Delta p$  προκαλείται κυρίως από δύο αίτια:

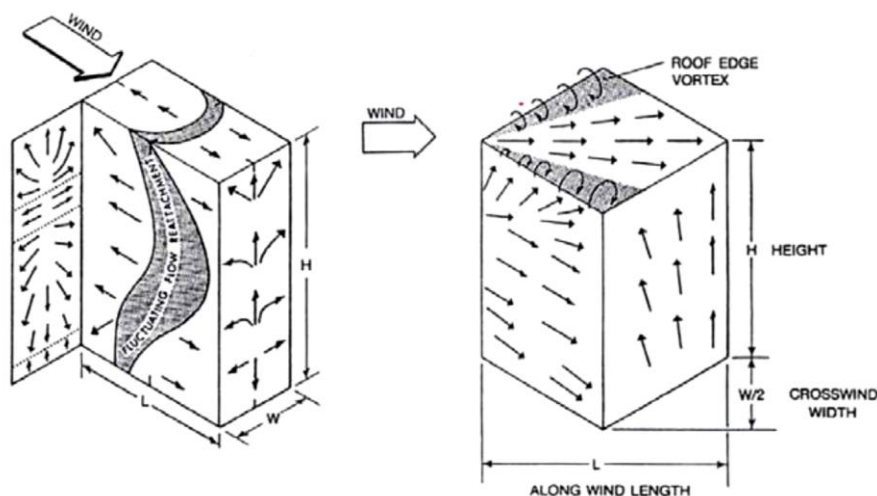
- από την θερμοκρασιακή διαφορά εσωτερικά και εξωτερικά του κτηρίου
- λόγω πνέοντος ανέμου που προκαλεί ανισοκατανομή της πίεσης στην εξωτερική επιφάνεια του κτηρίου (Σχήματα 1.1-1.2).

### Διαφορά πίεσης λόγω πνέοντος ανέμου

Η κατανομή πιέσεων στις εξωτερικές επιφάνειες μιας κτηριακής κατασκευής είναι κρίσιμη παράμετρος για το ρυθμό αερισμού ή και διείδυσης αέρα στο κτήριο [2]. Η κατανομή της πίεσης στην πλευρά ενός κτηρίου λόγω πνέοντος ανέμου εξαρτάται από την γεωμετρία του κτηρίου, από τον προσανατολισμό του ως προς τον άνεμο και από τα χαρακτηριστικά του ανέμου όπως δηλ. ταχύτητα, επίπεδο τύρβης, τα οποία διαμορφώνονται κυρίως από το ανάγλυφο της περιοχής, γειτνιάζοντα κτήρια κλπ.



Σχήμα 1.1: Πεδίο ροής γύρω από κτήριο [3]



Σχήμα 1.2: Πεδίο ροής στην επιφάνεια κτηρίου για δυο διευθύνσεις ανέμου [1]

Η στατική πίεση  $p$  στην επιφάνεια κτηρίων προσδιορίζεται είτε μέσω πειραματικών μετρήσεων σε μοντέλα κτηρίων τοποθετούμενων σε αεροδυναμικές σήραγγες, είτε από αριθμητική προσομοίωση, και δίνεται από τη σχέση:

$$p - p_0 = c_p \frac{\rho}{2} U_0^2 \quad (1.3)$$

όπου  $p$  η στατική πίεση στην επιφάνεια του κύβου,  $p_0$  μία στατική πίεση αναφοράς, συνήθως στο ύψος του κτηρίου ή έξω στην αδιατάρακτη ροή ανάντι του κύβου,  $\rho$  η πυκνότητα του αέρα και  $U_0$  μία ταχύτητα αναφοράς της ροής, συνήθως στο ύψος του κύβου και ανάντι του κύβου σε αδιατάρακτη ροή.

## 1.2 Σκοπός της εργασίας

Η ροή γύρω από κυβικής μορφής σώμα επί στερεής επιφάνειας έχει μελετηθεί στο παρελθόν τόσο αριθμητικά όσο και πειραματικά [4],[5],[6],[7],[8],[9]. Οι περισσότερες από τις μελέτες αφορούσαν τις μη μόνιμες αεροδυναμικές δυνάμεις που εμφανίζονται στις εκτεθειμένες επιφάνειες του κύβου, με ιδιαίτερη έμφαση να δίνεται στην οριζόντια επιφάνεια. Λόγω των προφανών συνεπειών σε κτηριακές κατασκευές εκτεθειμένες σε ανέμους υψηλών ταχυτήτων, οι έρευνες εστίαζαν στην εμφάνιση ακραίων τιμών των δυνάμεων αυτών και έχει γίνει συστηματική προσπάθεια για τη συσχέτισή τους με το ανάντι οριακό στρώμα και τα τυρβώδη χαρακτηριστικά του, όπως η ένταση της τύρβης και η ολοκληρωτική κλίμακα μήκους της.

Ωστόσο, είναι λίγες οι μελέτες που εξετάζουν την επίδραση των χαρακτηριστικών του ανάντι οριακού στρώματος στη κατανομή πίεσης, στον αερισμό και τη διεύθυνση αέρα, ειδικά όταν υπάρχουν και ανοίγματα στο κτηριακό κέλυφος [10],[11].

Στη παρούσα εργασία, εξετάζεται πειραματικά η περίπτωση ενός κυβικής μορφής πρότυπου κτηρίου, εκτεθειμένου στη ροή δύο διαφορετικών ανάντι τυρβωδών οριακών στρωμάτων. Εξετάζεται η επίδραση των τυρβωδών χαρακτηριστικών του οριακού στρώματος, του προσανατολισμού του κύβου και της παρουσίας ανοιγμάτων στις κάθετες πλευρές του στη διαμόρφωση της επιφανειακής κατανομής πίεσης.

## 1.3 Δομή της εργασίας

Η διπλωματική εργασία συντελείται από 6 κεφάλαια τα οποία διαρθρώνονται ως:

- **Κεφάλαιο 1.**

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται το θέμα του φυσικού αερισμού των κτηρίων όπως επίσης και μια μικρή περιγραφή των τρόπων με τον οποίο επιτυγχάνεται. Επίσης, στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται και ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

- **Κεφάλαιο 2.**

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο αρχικά πραγματοποιείται μία εισαγωγή στο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα. Συγκεκριμένα περιγράφεται ο τρόπος δημιουργίας του ανέμου και του οριακού στρώματος. Έπειτα παρουσιάζεται η δομή του οριακού στρώματος. Μετέπειτα παρουσιάζονται και αναλύονται τα χαρακτηριστικά που περιγράφουν ένα οριακό στρώμα και συγκεκριμένα η κατατομή της μέσης ταχύτητας, η

κατατομή της τύρβης, η κατατομή της ολοκληρωτικής κλίμακας μήκους και το φάσμα τυρβώδους κινητικής ενέργειας.

- **Κεφάλαιο 3.**

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται γενικότερα η ροή γύρω από μοντέλου κύβου. Πραγματοποιείται βιβλιογραφική ανασκόπηση στο πεδίο ροής γύρω από κύβο όπως επίσης και της κατανομής του συντελεστή πίεσης στην επιφάνεια του κύβου, για κάθετη στην επιφάνεια ροή και για γωνία 45 μοιρών ως προς την ροή, όπως προέκυψαν είτε από πειραματική διαδικασία, είτε από αριθμητική προσομοίωση.

- **Κεφάλαιο 4.**

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η πειραματική διαδικασία η οποία έλαβε χώρα για την υλοποίηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Παρουσιάζεται η αεροδυναμική σήραγγα στην οποία πραγματοποιήθηκε το πείραμα, οι διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία του οριακού στρώματος. Παρουσιάζονται οι διατάξεις και οι τεχνικές μετρήσεως του οριακού στρώματος. Επίσης παρουσιάζεται η μετρητική διάταξη μετρήσεως της κατανομής της πίεσης στην επιφάνεια του μοντέλου κύβου. Παρουσιάζεται και η τεχνική με την οποία πραγματοποιήθηκε η μέτρηση και η καταγραφή των αποτελεσμάτων των πιέσεων στην επιφάνεια του κύβου.

- **Κεφάλαιο 5.**

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μέτρησης των οριακών στρωμάτων, υπολογίζονται τα χαρακτηριστικά τους και έπειτα γίνεται σύγκριση των οριακών στρωμάτων. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μετρήσεως κατανομής πιέσεων στις επιφάνειες του κύβου και του συντελεστή πίεσης των επιφανειών αυτών. Έπειτα γίνεται σύγκριση των κατανομών συντελεστή πίεσης για κάθετη ( $0^\circ$ ) και σε γωνία  $45^\circ$  ροή ως προς την επιφάνεια του κύβου. Και έπειτα πραγματοποιείται σύγκριση των κατανομών της πίεσης για δυο διαφορετικά οριακά στρώματα όπως και σύγκριση για κύβο με ανοίγματα (και συνδυασμών) και χωρίς ανοίγματα.

- **Κεφάλαιο 6.**

Αυτό είναι το τελευταίο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας. Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζεται μία συνοπτική ανακεφαλαίωση της εργασίας και στη συνέχεια αξιολογούνται τα αποτελέσματά των συγκρίσεων. Τέλος, ακολουθούν προτάσεις για μελλοντική διερεύνηση ή και βελτίωση της πειραματικής διαδικασίας.

# Κεφάλαιο 2

## *Ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα*

### 2.1 Ο άνεμος

Τις οριζόντιες μετακινήσεις του ατμοσφαιρικού αέρα που περιβάλλει τη γη, τις ονομάζουμε άνεμο. Δηλαδή άνεμος καλείται κάθε ρεύμα του ατμοσφαιρικού αέρα που έχει κάποια σχετική κίνηση ως προς το έδαφος.

Στην συγκεκριμένη ενότητα πραγματοποιείται μία εισαγωγή στο άνεμο γενικότερα με περιγραφή της ατμόσφαιρας και του τρόπου δημιουργίας του ανέμου.

#### 2.1.1 Γενικά για την ατμόσφαιρα

Ατμόσφαιρα ορίζεται το σφαιροειδές αέριο περίβλημα που περικλείει ένα ουράνιο σώμα. Οι δυνάμεις που τη συγκρατούν σε υδροστατική ισορροπία γύρω από το σώμα αυτό είναι οι βαρυτικές δυνάμεις του πλανήτη [12]. Συγκεκριμένα για την γη, η ατμόσφαιρά της εκτείνεται μέχρι ύψους 800 με 1000 km από την επιφάνεια του εδάφους. Τα συνιστώμενα αέρια είναι ανομοιόμορφα κατανεμημένα στο ύψος αυτό με τρόπο ώστε το 99.9% της ολικής μάζας της ατμόσφαιρας να βρίσκεται στα πρώτα 50 km και το 0.099% στην περιοχή μεταξύ 50 και 100 km ύψος.

Βασικά χαρακτηριστικά της ατμόσφαιρας είναι η θερμοκρασία, η πίεση και η πυκνότητα. Τα χαρακτηριστικά αυτά υπόκεινται σε σημαντικές μεταβολές που εξαρτώνται από το υψόμετρο (Σχήμα 2.1), την ώρα, την εποχή και άλλους παράγοντες. Βάσει της θερμοκρασίας, η ατμόσφαιρα υποδιαιρείται σε ζώνες, οι οποίες είναι: η τροπόσφαιρα, η στρατόσφαιρα, η μεσόσφαιρα, και η θερμόσφαιρα και επίσης οι ενδιάμεσες ζώνες μεταξύ τους: η τροπόπαυση, η στρατόπαυση και η μεσόπαυση.

#### Τροπόσφαιρα

Τροπόσφαιρα ονομάζεται το κατώτερο τμήμα της ατμόσφαιρας. Εκτείνεται σε ένα μέσο ύψος περίπου 11 km. Στον ισημερινό το μέσο ύψος είναι περίπου 18 km ενώ στους πόλους 8 km. Είναι μια περιοχή αδιάκοπης τυρβώδους κίνησης και ανάμειξης. Είναι η περιοχή περιδίνησης των αέριων μαζών, του σχηματισμού των νεφών και των συνεχών μετακινούμενων θερμών και ψυχρών μετώπων. Είναι επίσης η περιοχή του υετού, των

αστραπών και των καταιγίδων. Στην περιοχή αυτή βρίσκεται σχεδόν όλη η ποσότητα του υδρατμού της ατμόσφαιρας. Παρόλο που είναι ένα πολύ λεπτό τμήμα της ατμόσφαιρας, περιέχει το 80% της ολικής αέριας μάζας. Η θερμοκρασία στην τροπόσφαιρα μειώνεται σχεδόν γραμμικά με το ύψος, το οποίο οφείλεται στην αυξανόμενη απόσταση από την πηγή της θερμότητας που είναι η γήινη επιφάνεια που θερμαίνεται από την ακτινοβολία του ήλιου. Η κατακόρυφη μεταβολή της θερμοκρασίας είναι  $6.5^{\circ}\text{C}/\text{km}$ . Το άνω όριο της τροπόσφαιρας είναι η τροπόπαυση όπου η θερμοκρασιακή μεταβολή είναι μηδενική και κυμαίνεται στους  $-56^{\circ}\text{C}$ .

### **Στρατόσφαιρα**

Στρατόσφαιρα καλείται το στρώμα από την τροπόπαυση έως ύψος 50 km [13]. Από την τροπόπαυση μέχρι τα 35 km περίπου εκτείνεται η κατώτερη στρατόσφαιρα, στην οποία η κατακόρυφη μεταβολή της θερμοκρασίας είναι σχεδόν μηδενική. Η ανώτερη στρατόσφαιρα εκτείνεται από τα 35-50 km και βασικό χαρακτηριστικό της είναι η συνεχής αύξηση της θερμοκρασίας, η οποία σε ύψη κοντά στα 50 km φτάνει τους  $0^{\circ}\text{C}$ . Αυτή η αύξηση οφείλεται στις υψηλές συγκεντρώσεις όζοντος, το οποίο απορροφά μέρος της υπεριώδους ηλιακής ακτινοβολίας. Επίσης στην στρατόσφαιρα είναι και τα ρεύματα αέρα (jet-streams). Το άνω όριο της, στο οποίο η θερμοκρασία λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της, η οποία είναι κοντά στους  $0^{\circ}\text{C}$ , καλείται στρατόπαυση.

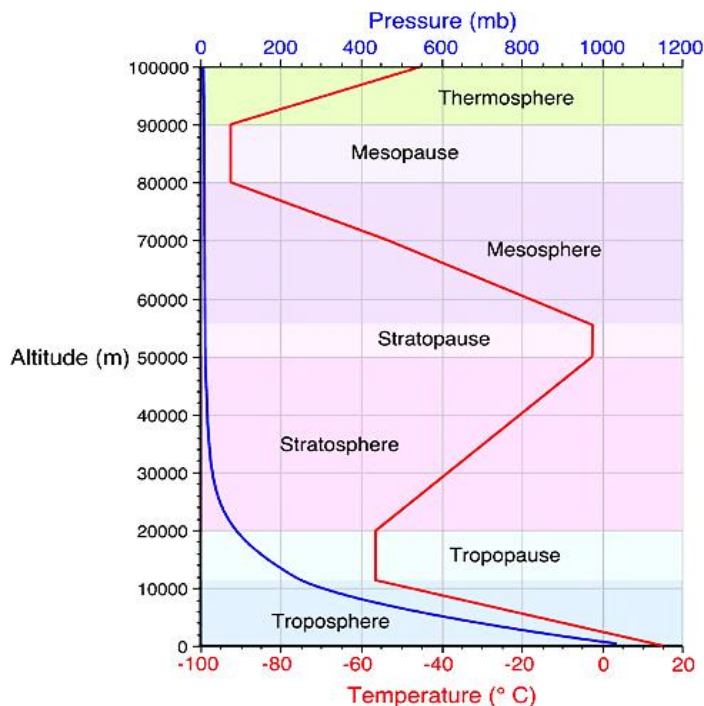
### **Μεσόσφαιρα**

Μεσόσφαιρα είναι το στρώμα πάνω από τη στρατόπαυση και μέχρι το ύψος των 85 km [13]. Εκεί η θερμοκρασία μειώνεται σημαντικά με το ύψος. Βασικό χαρακτηριστικό είναι οι πολύ χαμηλές θερμοκρασίες ( $\sim -80^{\circ}\text{C}$ ), οι οποίες οφείλονται κυρίως στην απουσία του όζοντος. Η μεσόπαυση αποτελεί το άνω όριο της, όπου εκεί είναι και το ψυχρότερο τμήμα της με σταθερές θερμοκρασίες της τάξης των  $-90^{\circ}\text{C}$ .

### **Θερμόσφαιρα**

Θερμόσφαιρα ονομάζεται η ζώνη μεταξύ της μεσόπαυσης και θερμόπαυσης. Στη βάση της επικρατεί σταθερή θερμοκρασιακή δομή, ενώ στη συνέχεια αυξάνει σημαντικά. Αυτό οφείλεται στο ότι απορροφάται μέρος της υπεριώδους ηλιακής ακτινοβολίας. Η θερμοκρασία της θερμόσφαιρας επηρεάζεται από την ηλιακή δραστηριότητα. Σε μέση ηλιακή δραστηριότητα η θερμοκρασία της θερμόσφαιρας φτάνει τους  $700^{\circ}\text{C}$ , ενώ σε ισχυρή ηλιακή δραστηριότητα αγγίζει τους  $1700^{\circ}\text{C}$ . Η θερμόπαυση κυμαίνεται από 500 έως 1000 km.





Σχήμα 2.1: Η κατανομή της πίεσης και της θερμοκρασίας μέσα από τα στρώματα της ατμόσφαιρας [14]

### 2.1.2 Ευστάθεια της ατμόσφαιρας

Κατά την διάρκεια της ημέρας, με μερική εώς καθόλου νέφωση, η επιφάνεια του εδάφους ακτινοβολείται από τον ήλιο, ενώ παράλληλα απορρίπτεται θερμότητα από το έδαφος λόγω ακτινοβολίας [12]. Όταν ο ρυθμός θέρμανσης είναι μεγαλύτερος από την ακτινοβολούσα θερμότητα, τότε το έδαφος αρχίζει να θερμαίνεται. Όταν θερμανθεί αρκετά τότε αρχίζει η κυκλοφορία ρευμάτων συναγωγής που μεταφέρουν θερμότητα σε μάζα αέρα υψηλότερα (Σχήμα 2.2). Επειδή ο αέρας είναι συμπιεστό ρευστό, με την ανύψωση διαστέλλεται καθώς κινείται σε στρώματα με χαμηλότερη πίεση, με αποτέλεσμα να ψύχεται. Το ποσό κατά το οποίο ψύχεται, υπολογίζεται από την καταστατική εξίσωση των αερίων:

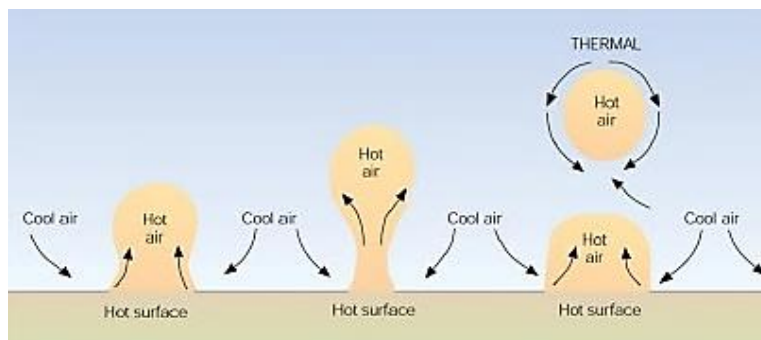
$$P = \rho RT \quad (2.1)$$

την εξίσωση της αδιαβατικής μεταβολής, με  $P_0$ ,  $\rho_0$  τις αρχικές συνθήκες της μεταβολής:

$$\frac{P}{P_0} = \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^\gamma \quad (2.2)$$

και την πίεση καθ' ύψος  $z$  από την υδροστατική εξίσωση:

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho g \quad (2.3)$$



Σχήμα 2.2: Θέρμανση στοιχειώδους τμήματος αέρα από το έδαφος [15]

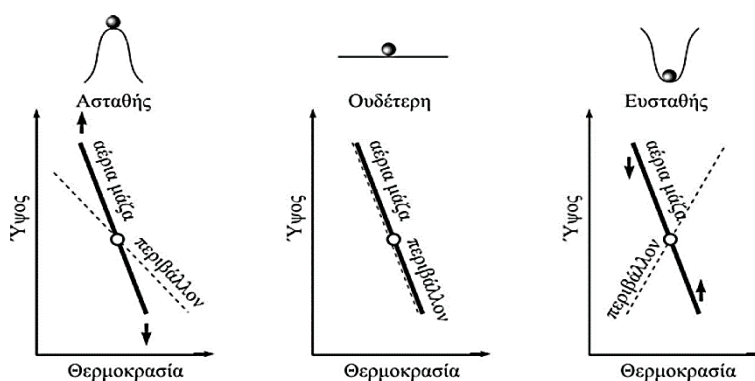
Εάν ένα στοιχειώδες τμήμα αέρα που ανυψώνεται, έχει την πίεση με το περιβάλλον του και πολύ μικρή διαφορά θερμοκρασίας τότε, βάσει των (2.1), (2.2) και (2.3) σε υδροστατική ισορροπία, προκύπτει θερμοβαθμίδα  $\Gamma$  (κατακόρυφη κλίση της θερμοκρασίας) του στοιχειώδους τμήματος αέρα αυτού:

$$\Gamma = \frac{\partial T}{\partial z} = -\frac{(\gamma - 1)g}{\gamma R} = \Gamma_d \quad (2.4)$$

όπου η  $\Gamma_d$  ονομάζεται ξηρή αδιαβατική θερμοβαθμίδα. Εάν υπάρχει κορεσμός υδρατμών (νέφωση) τότε πρέπει να ληφθεί υπόψιν η λανθάνουσα θερμότητα συμπύκνωσης των υδρατμών.

Οι συνθήκες αυτές αναφέρονται σε ουδέτερη ισορροπία. Αν η θερμοβαθμίδα περιβάλλοντος  $\Gamma$  ξεπεράσει την  $\Gamma_d$  τότε το στοιχειώδες τμήμα αέρα θα ανέβει σε ψυχρότερα στρώματα άρα θα συνεχίζει να ανεβαίνει. Εάν η  $\Gamma$  είναι μικρότερη από την  $\Gamma_d$  τότε το τμήμα αέρα θα ανέβει σε θερμότερο τμήμα επομένως θα κατέβει χαμηλά πάλι (Σχήμα 2.3). Επομένως προκύπτει η συνθήκη για την ευστάθεια της ατμόσφαιρας:

- $\Gamma = \Gamma_d$  (ουδέτερη)
- $\Gamma < \Gamma_d$  (ευσταθής)
- $\Gamma > \Gamma_d$  (ασταθής)

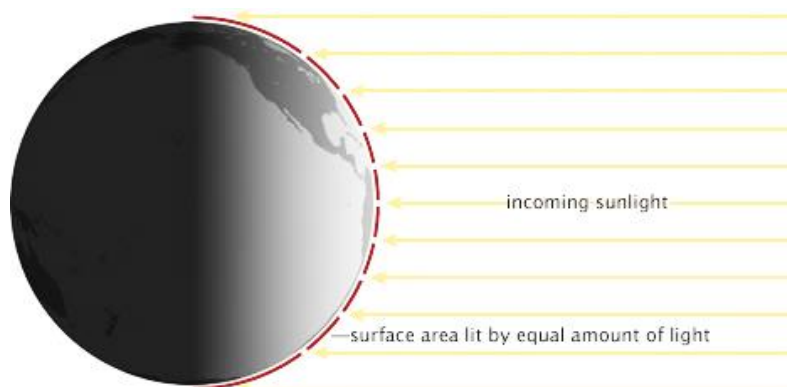


Σχήμα 2.3: Ευστάθεια της ατμόσφαιρας [12]

### 2.1.3 Κυκλοφορία της ατμόσφαιρας

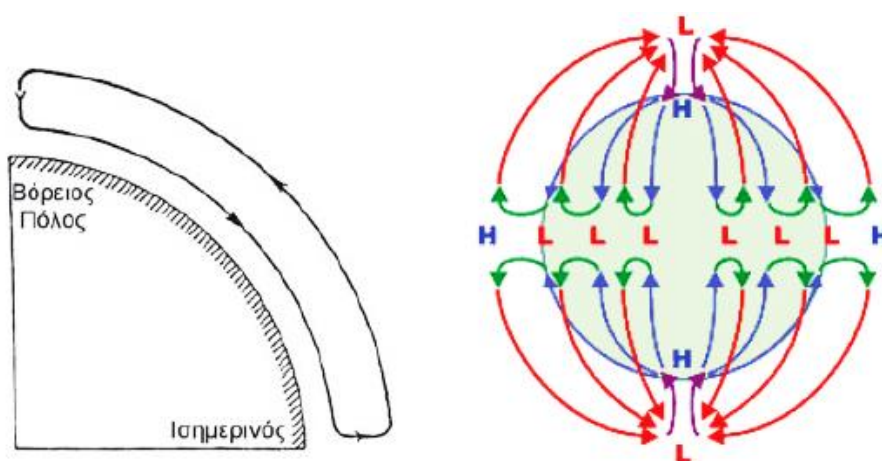
#### Μεγάλα κυκλοφοριακά συστήματα

Όπως είναι γνωστό, η ηλιακή ακτινοβολία δεν πέφτει με την ίδια γωνία σε όλη την γήινη επιφάνεια. Κοντά στον ισημερινό οι ακτίνες πέφτουν κάθετα, ενώ προχωρώντας προς τους πόλους η γωνία πρόσπτωσης ολοένα και μεγαλώνει (Σχήμα 2.4).



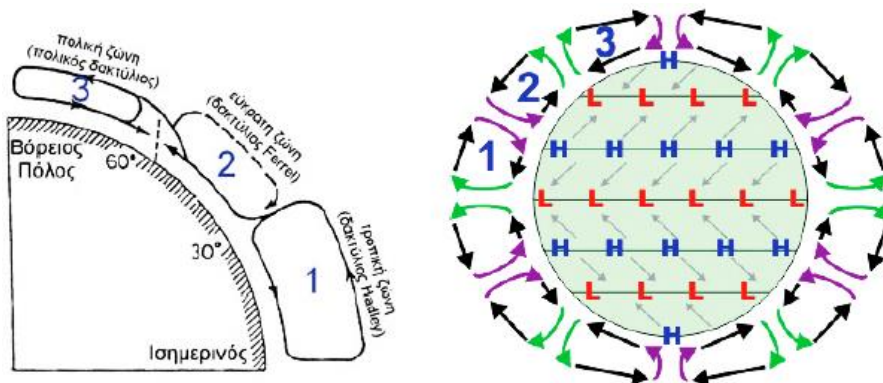
Σχήμα 2.4: Ανομοιομορφία της γωνίας πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας [16]

Εάν υποθέσουμε ότι η γη δεν περιστρέφεται, τότε αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι αέριες μάζες που βρίσκονται στον ισημερινό να θερμαίνονται περισσότερο με αποτέλεσμα τη μείωση της πυκνότητάς τους και ανύψωση σε υψηλότερα στρώματα [17]. Έτσι δημιουργείται περιοχή χαμηλής πίεσης αέρα στα κατώτερα στρώματα. Ενώ οι αέριες μάζες που βρίσκονται στους πόλους είναι ψυχρότερες, άρα πυκνότερες με αποτέλεσμα υψηλότερες πιέσεις στους πόλους. Επομένως δημιουργείται ροή αέρα από τους πόλους προς τον ισημερινό στα χαμηλότερα στρώματα (Σχήμα 2.5).



Σχήμα 2.5: Ιδανική κυκλοφορία της ατμόσφαιρας [18]

Εάν όμως ληφθεί υπόψιν η περιστροφή της γης, αυτή αναγκάζει την εκτροπή της ροής του αέρα λόγω της δύναμης Coriolis. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία τριών κύριων ζωνών κυκλοφορίας, την τροπική ζώνη (Hadley cell), την εύκρατη ζώνη (Ferrel cell) και την πολική ζώνη (polar cell). Έτσι προκύπτουν τα κυκλοφοριακά συστήματα μεγάλης κλίμακας της ατμόσφαιρας (Σχήμα 2.6).

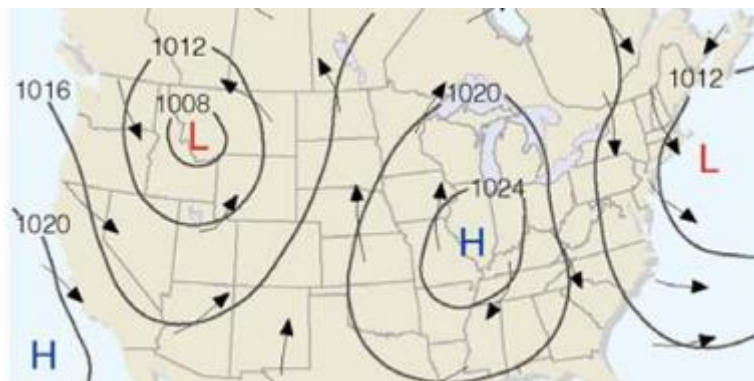


Σχήμα 2.6: Ιδεατή κυκλοφορία της ατμόσφαιρας με περιστροφή [18]

Στην πραγματικότητα όμως η θέρμανση είναι ανομοιόμορφη λόγω:

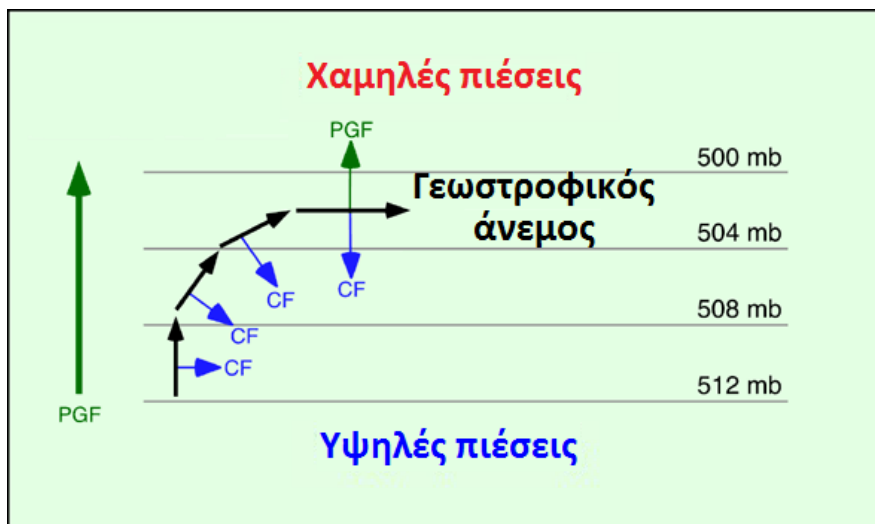
- Περιστροφής της γης (ημερήσιος κύκλος)
- Διαφορετικής κλίσης της επιφάνειας της γης ως προς την ακτινοβολία (εποχιακός κύκλος)
- Διαφορετικού συντελεστή απορρόφησης-ανάκλασης της επιφάνειας (θάλασσα-ξηρά-χιόνι)
- Νέφωσης τμημάτων της γήινης επιφάνειας και άλλων παραγόντων.

Έτσι, από την ανομοιόμορφη θέρμανση της επιφάνειας της γης, προκύπτει ένα περίπλοκο δυναμικό σύστημα κατανομής βαρομετρικών πιέσεων στην επιφάνεια της (Σχήμα 2.7).



Σχήμα 2.7: Παράδειγμα βαρομετρικού χάρτη για την περιοχή των ΗΠΑ [13]

Σε αρκετό ύψος από την επιφάνεια (πχ  $z > 1$  km), οι δυνάμεις τριβής είναι αμελητέες οπότε η επίδραση της δύναμης Coriolis κυριαρχεί. Έτσι η ροή του αέρα εφάπτεται των ισόθλιπτων καμπυλών της περιοχής (Σχήμα 2.8). Για βόρειο ημισφαίριο έχει φορά τέτοια, ώστε οι ισόθλιπτες χαμηλότερης πίεσης να βρίσκονται αριστερά της κατεύθυνσης της ροής. Η ροή αυτή αποκαλείται γεωστροφικός άνεμος.



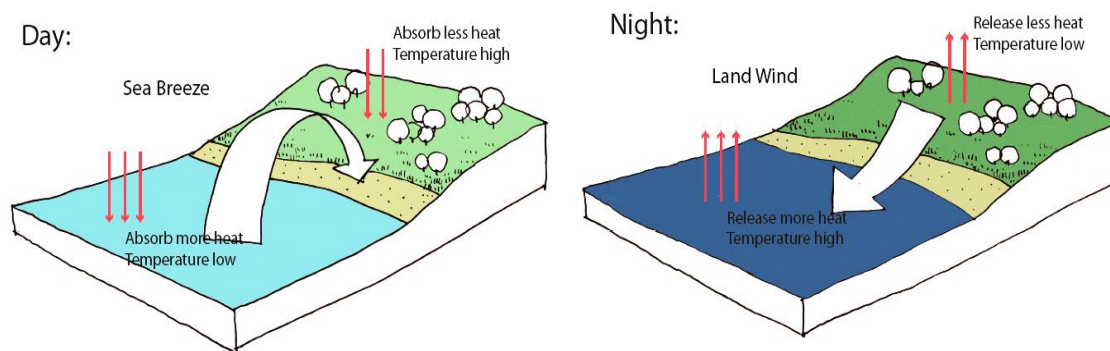
Σχήμα 2.8: Σχηματισμός του γεωστροφικού άνεμου λόγω επίδρασης της δύναμης Coriolis (CF) με αρχική κατεύθυνση ίδια της βαροβαθμίδας (PGF) [19]

### Μικρά κυκλοφοριακά συστήματα

Μικρότερης κλίμακας κυκλοφοριακά συστήματα οφείλονται στην ανισομερή θέρμανση του εδάφους κατά τη διάρκεια του ημερήσιου κύκλου.

Παράδειγμα είναι η θαλάσσια αύρα (sea breeze) [20]. Κατά την διάρκεια της ημέρας η ξηρά θερμαίνεται γρηγορότερα αλλά και ισχυρότερα από τη θάλασσα (ή λίμνη), λόγω μεγαλύτερης θερμοχωρητικότητας και επειδή είναι διαπερατή σε μεγάλο βάθος από τις ηλιακές ακτίνες. Ο αέρας επάνω από την ξηρά θερμαίνεται πιο γρήγορα και περισσότερο από τον αέρα που βρίσκεται πάνω από τη θάλασσα με αποτέλεσμα χαμηλότερη πίεση πάνω από την ξηρά σε σχέση με τη θάλασσα και έτσι δημιουργείται ροή ατμοσφαιρικού αέρα από τη θάλασσα προς την ξηρά (Σχήμα 2.9). Το αντίθετο συμβαίνει κατά τη διάρκεια της νύχτας όπου έχουμε την απόγεια αύρα (land breeze). Η ξηρά ψύχεται γρηγορότερα με αποτέλεσμα υψηλότερη πίεση πάνω από την ξηρά και δημιουργία ροής αέρα από την ξηρά προς τη θάλασσα.

Τα βουνά κατά τη διάρκεια της ημέρας θερμαίνονται γρηγορότερα από τις γειτονικές κοιλάδες. Έτσι ο αέρας που έρχεται σε επαφή με την πλαγιά θερμαίνεται, και θερμαινόμενος ανέρχεται και αντικαθίσταται από τις ψυχρότερες αέριες μάζες της κοιλάδας. Έτσι δημιουργείται ροή από την κοιλάδα προς το βουνό. Το αντίθετο αντίστοιχα συμβαίνει κατά την διάρκεια της νύχτας.



Σχήμα 2.9: Ημερήσια αλλαγή του ανέμου στις παράκτιες περιοχές [21]

## 2.2 Ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα

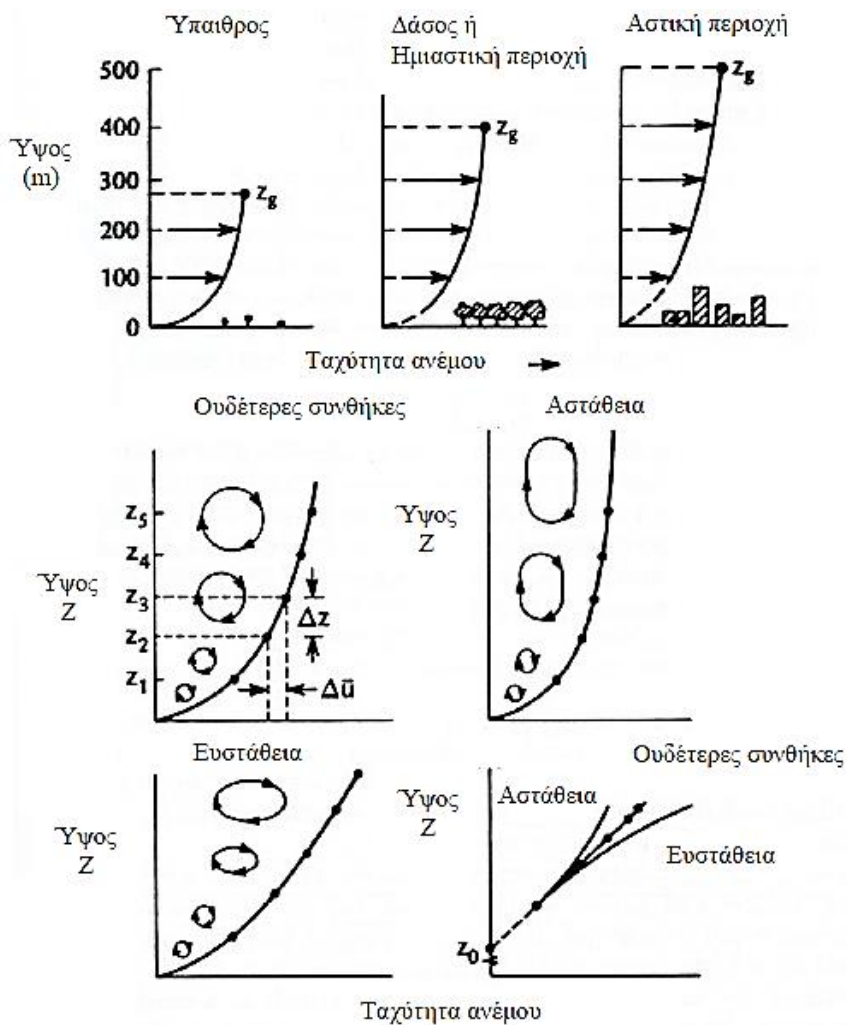
### 2.2.1 Ανάπτυξη του ΑΟΣ

Καθώς η ατμόσφαιρα βρίσκεται σε σχετική κίνηση με την γη στο κατώτατο τμήμα, της λόγω του ιξώδους του αέρα δημιουργείται ένα στρώμα αέρα, το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα (ΑΟΣ), μέσα στο οποίο η σχετική ταχύτητα μεταβάλλεται από μηδέν πάνω στην επιφάνεια της γης, μέχρι μεγαλύτερες τιμές [12].

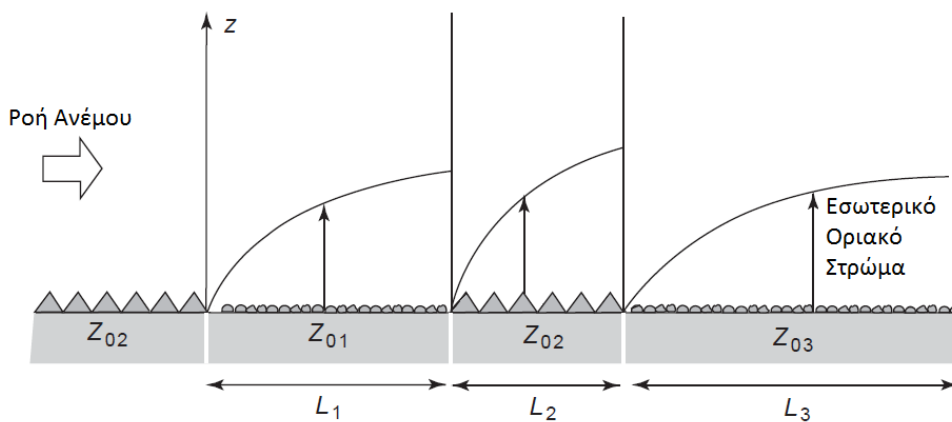
Το ύψος του ΑΟΣ, δεν είναι σταθερό ούτε τοπικά ούτε χρονικά. Οι κύριοι παράγοντες από τους οποίους επηρεάζεται η τιμή αυτή είναι η μορφή του στερεού ορίου, δηλ. της επιφάνειας του εδάφους, και η κατάσταση ευστάθειας της ατμόσφαιρας (Σχήμα 2.10).

Στην ουδέτερη κατάσταση, 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 1,200 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 3,000 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 (Σχήμα 2.11). Από τον Counihan προτάθηκε για ουδέτερη κατάσταση για κάθε μορφή εδάφους, ένα μέσο ύψος ΑΟΣ 600 m.



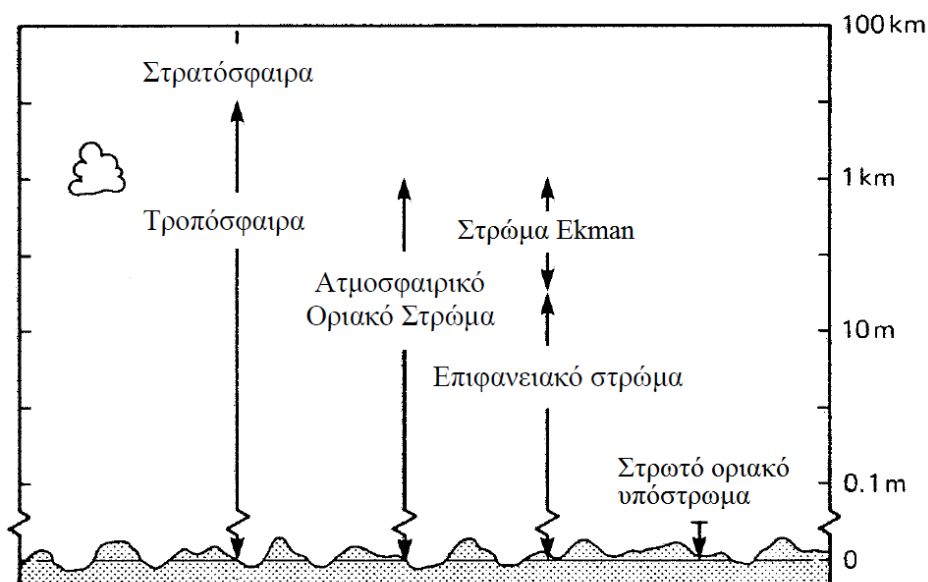
Σχήμα 2.10: Δομή του ΑΟΣ με την επίδραση της τραχύτητα του εδάφους και της ατμοσφαιρικής ευστάθειας ως προς το σχήμα και τη μορφή των στροβίλων [12]



Σχήμα 2.11: Ανάπτυξη εσωτερικού οριακού στρώματος στις αλλαγές τραχύτητας [22]

### 2.2.2 Δομή του ΑΟΣ

Το ΑΟΣ μπορεί να διαιρεθεί σε δύο κυρίως επιμέρους στρώματα, το στρώμα Ekman ή εξωτερικό στρώμα και το επιφανειακό στρώμα ή εσωτερικό στρώμα [12]. Όπου το εσωτερικό στρώμα υποδιαιρείται σε δυο επιμέρους υποστρώματα, το επιφανειακό τυρβώδες υπόστρωμα και το στρωτό οριακό υπόστρωμα (Σχήμα 2.12).

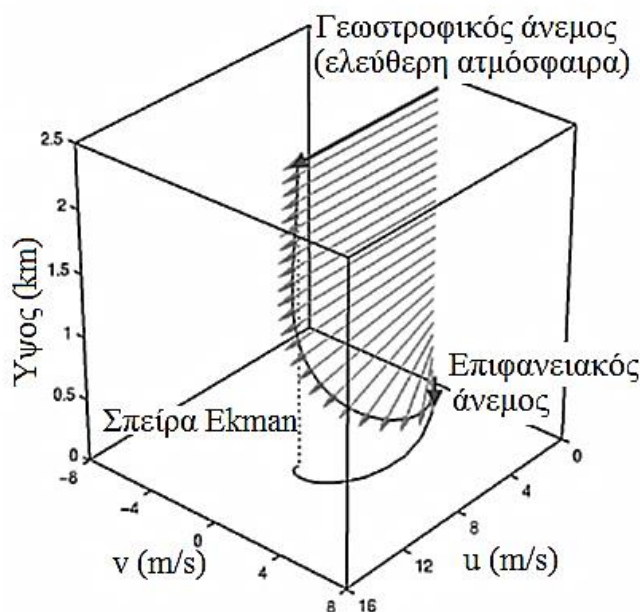


Σχήμα 2.12: Διαστρωμάτωση της κατώτερης ατμόσφαιρας [12]

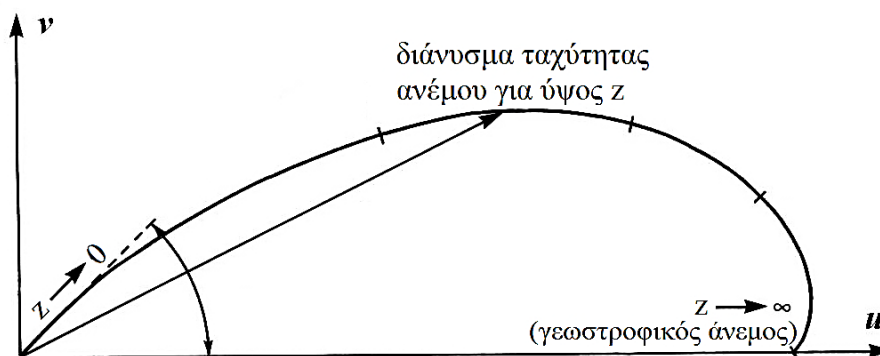
#### Στρώμα Ekman

Το στρώμα Ekman, εκτείνεται από την κορυφή του επιφανειακού στρώματος μέχρι το ύψος του ΑΟΣ, είναι ένα στρώμα στο οποίο υπάρχει ισορροπία μεταξύ της δύναμης Coriolis, της δύναμης λόγω κλίσης της πίεσης και των διατμητικών τάσεων. Κύριο χαρακτηριστικό του στρώματος Ekman είναι η στροφή, καθώς αυξάνει το ύψος, του διανύσματος της οριζόντιας συνιστώσας της ταχύτητας του ανέμου γύρω από κατακόρυφο άξονα, με τρόπο ώστε, με προβολή των διανυσμάτων σε οριζόντιο επίπεδο, τα άκρα τους να βρίσκονται σε μια σπείρα, τη σπείρα Ekman. Αυτό οφείλεται στο ότι στρώμα του ρευστού επιβραδύνεται λόγω τριβής από το στρώμα που βρίσκεται από κάτω και σαν αντίδραση, η ταχύτητα του επάνω στρώματος, λόγω της περιστροφής της γης, στρέφεται προς τα δεξιά της τάσης που εφαρμόζεται. Καθώς η τάση μεταβιβάζεται από το ένα στρώμα στο άλλο, το διάνυσμα της ταχύτητας στρέφεται σταδιακά. Έτσι όσο προσεγγίζεται το έδαφος το διάνυσμα της ταχύτητας στρέφεται προς τα αριστερά του διανύσματος του γεωστροφικού ανέμου για το Βόρειο Ημισφαίριο και δεξιά για Νότιο Ημισφαίριο (Σχήμα 2.13, Σχήμα 2.14).





Σχήμα 2.13: Σπείρα μεταβολής των ταχυτήτων Ekman στον χώρο  $(u, v, z)$  [23]



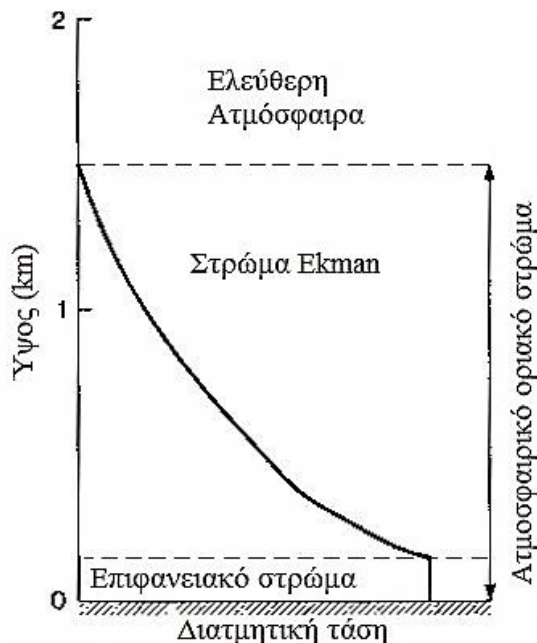
Σχήμα 2.14: Προβολή διανύσματος ταχυτήτων της σπείρας Ekman το έδαφος (επιπεδο  $u, v$ )

Το ιδανικό στρώμα Ekman που καλύπτει όλο το ύψος του ΑΟΣ παρατηρείται σπάνια λόγω του ότι ο συντελεστής τυρβώδους κινητικότητας  $\mu_t$  που επηρεάζει τις συνιστώσες της οριζόντιας ταχύτητας  $u$  και  $v$  της σπείρας, μεταβάλλεται συνεχώς και πολύ γρήγορα με το ύψος κοντά στο έδαφος. Δηλ. η μαθηματική έκφραση του στρώματος Ekman ισχύει μόνο πάνω από το επιφανειακό στρώμα. Έτσι λοιπόν προκύπτει το κάτω όριο του στρώματος Ekman και το άνω όριο για το επιφανειακό στρώμα.

### Επιφανειακό τυρβώδες υπόστρωμα

Το επιφανειακό τυρβώδες υπόστρωμα χαρακτηρίζεται από έντονη, μικρής κλίμακας, τύρβη που δημιουργείται κατά κύριο λόγο από την επιφανειακή τραχύτητα και κατά δεύτερο λόγο από τη μεταφορά θερμότητας λόγω ρευμάτων, ενώ η διανομή της

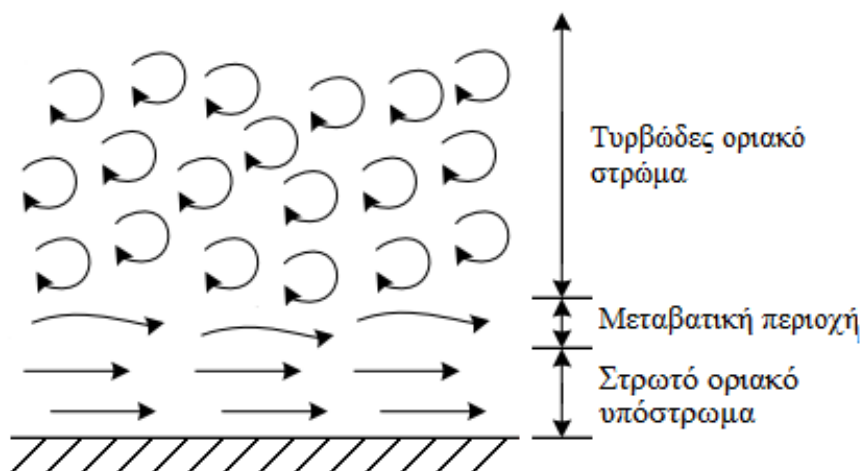
ταχύτητας είναι τέτοια ώστε η οριζόντια διατμητική τάση να είναι σχεδόν σταθερή ανεξάρτητα από το ύψος (Σχήμα 2.15). Το ύψος του επιφανειακού στρώματος κατά τη διάρκεια της ημέρας φτάνει μέχρι τα 100 μέτρα ενώ τη νύχτα το ύψος γίνεται μερικά μέτρα λόγω ευσταθούς κατάστασης της ατμόσφαιρας.



Σχήμα 2.15: Διατμητική τάση καθ' ύψος του ΑΟΣ [24]

### Στρωτό οριακό υπόστρωμα

Σε άμεση επαφή με την επιφάνεια του εδάφους βρίσκεται το στρωτό οριακό υπόστρωμα του οποίου το ύψος είναι το πολύ μερικά χιλιοστά (Σχήμα 2.16). Ο αέρας που το αποτελεί προσκολλάται σε όλες τις επιφάνειες του στερεού ορίου.



Σχήμα 2.16: Στρωτή και τυρβώδης κίνηση του αέρα κοντά στην επιφάνεια του εδάφους

## 2.3 Χαρακτηριστικά ΑΟΣ

Κατά την περίοδο 1880-1959, οι ιδιότητες του ΑΟΣ μελετήθηκαν σε μεγάλο βαθμό και έτσι δημιουργήθηκε μια γενική περιγραφή της δομής της ροής του ΑΟΣ [25]. Όμως οι λεπτομέρειες της ροής του ΑΟΣ παρέμεναν άγνωστες. Μετέπειτα κατά τις δεκαετίες 1960 και 1970 σημαντικός αριθμός δεδομένων από μετρήσεις, επέτρεψε την εξαγωγή πιο λεπτομερούς περιγραφής του ΑΟΣ. Οι εμπειρικές εξισώσεις που αναπτύχθηκαν για την περιγραφή του ΑΟΣ οδήγησαν στην προσομοίωση των ατμοσφαιρικών ροών.

Κατά την προσομοίωση του ΑΟΣ είναι σημαντική η ακριβής περιγραφή του ΑΟΣ και των χαρακτηριστικών του. Για την περιγραφή του ανέμου είναι κοινώς αποδεκτά [26] είναι τα εξής χαρακτηριστικά:

- Η κατατομή της μέσης ταχύτητας του ανέμου με το ύψος για τις οριζόντιες και την κατακόρυφη διεύθυνση ανέμου ( $u, v, w$ ).
- Η κατατομή της έντασης της τύρβης του ανέμου με το ύψος ( $I_u, I_v, I_w$ )
- Η 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.

### 2.3.1 Μέση ταχύτητα

Υπάρχουν αρκετές σχέσεις που περιγράφουν την κατατομή της μέσης ταχύτητας με το ύψος. Το 1880 προτάθηκε ο παραβολικός νόμος από τον Stevenson [27] από την σχέση:

$$\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{ref}} = \sqrt{\left(\frac{z + 22}{z_{ref} + 22}\right)} \quad (2.5)$$

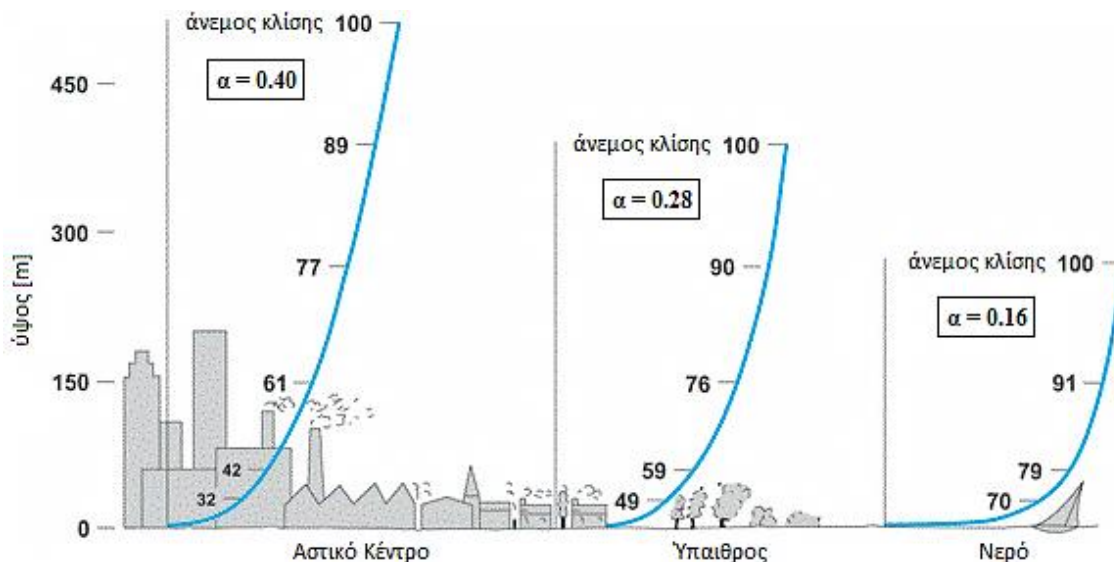
όπου οι μονάδες των  $z, z_{ref}$  να είναι σε m μέτρα. Όμως ο νόμος αυτός δεν μπορούσε να εφαρμοστεί στα τελευταία 10 m των μετρούμενων μέσων ταχυτήτων.

Το 1916 παρουσιάστηκε ο εκθετικός νόμος από τον Hellman [28] ο οποίος έχει τη εξής μορφή:

$$\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{ref}} = \left(\frac{z - d}{z_{ref} - d}\right)^\alpha \quad (2.6)$$

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, όπου στην μετεωρολογία λαμβάνεται  $z_{ref} = 10$  m. Ο εκθέτης  $\alpha$  εξαρτάται από την τραχύτητα του εδάφους (Σχήμα 2.17). Ο εκθετικός νόμος περιγράφει πιο ικανοποιητικά το ΑΟΣ από τον

παραβολικό νόμο, όμως εξακολουθεί να μην περιγράφει ικανοποιητικά τα τελευταία 10 m. Παρόλα αυτά εφαρμόζεται ευρέως δεδομένης της απλότητας του [29].



Σχήμα 2.17: Εκθέτης  $\alpha$  με βάσει την τραχύτητα του εδάφους [30]

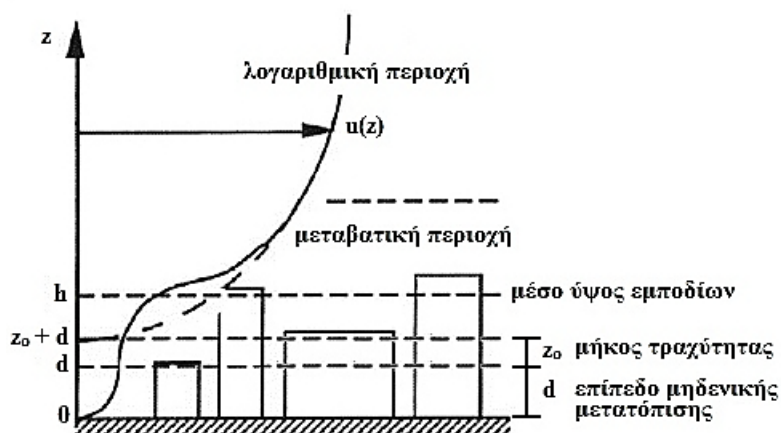
Τύπος επιφάνειας	Εκθέτης $\alpha$
Λίμνη, ωκεανός, ομαλό σκληρό έδαφος	0.10
Χαμηλό γρασίδι	0.15
Ψηλές φυτείες, θάμνοι	0.20
Πυκνή δασική περιοχή	0.25
Μικρή πόλη με λίγα δέντρα και θάμνους	0.30
Αστική περιοχή με ψηλά κτήρια	0.40

Πίνακας 2.1: Τυπικές τιμές του εκθέτη  $\alpha$  για διάφορους τύπους εδάφους [31]

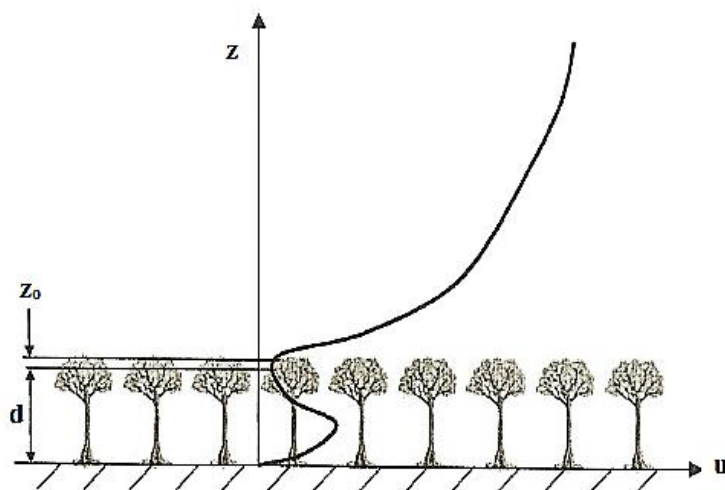
Τελικά το 1949 ο Sutton ανέπτυξε τον λογαριθμικό νόμο [32] που μπορούσε να εφαρμοστεί και στα τελευταία 10 μέτρα του ΑΟΣ εν αντιθέσει με τον εκθετικό και παραβολικό νόμο. Η μέση ταχύτητα εκφράζεται από την σχέση:

$$\bar{u} = \frac{u_*}{k} \ln \left[ \frac{z-d}{z_0} \right] \quad (2.7)$$

όπου  $\bar{u}$  η μέση ταχύτητα του ανέμου στο ύψος  $z$ ,  $u_*$  η ταχύτητα τριβής,  $k$  η σταθερά von Karman με τιμή 0.41,  $z_0$  το μήκος τραχύτητας του εδάφους,  $d$  το επίπεδο μηδενικής μετατόπισης (Σχήμα 2.18).



**Σχήμα 2.18:** Λογαριθμική κατανομή του ανέμου με το ύψος, όπου  $d$  το επίπεδο μηδενικής μετατόπισης,  $z_0$  το μήκος τραχύτητας και  $h$  το μέσο ύψος των εμποδίων [33]



**Σχήμα 2.19:** Λογαριθμική κατατομή του ανέμου σε ουδέτερες συνθήκες σε περιοχές με βλάστηση [34]

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 [35]. 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 μήκος τραχύτητας  $z_0$  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 μήκος τραχύτητας υπολογίζεται πάνω από το επίπεδο μηδενικής μετατόπισης και είναι το ύψος όπου λαμβάνουν χώρα μερικές διεργασίες της ροής αλλά η μέση ταχύτητα της ροής είναι

μηδενική (Σχήμα 2.19). Το μήκος 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.

Επιφάνεια	$z_0$ [m]
Πάγος	$10^{-5}$
Χιόνι	$10^{-3}$
Ομαλή θάλασσα	$10^{-3}$
Επίπεδη έρημος	$10^{-3}$
Γρασίδι	$10^{-2}$
Άκοφτο γρασίδι	0.05
Φυτείες δημητριακών	0.1
Δάσος	1
Προάστια	2
Κέντρο πόλης	5-10

Πίνακας 2.2: Τυπικές τιμές μήκους τραχύτητας εδάφους [17]

Η ταχύτητα τριβής  $u_*$  ορίζεται από την σχέση:

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \quad (2.8)$$

όπου  $\tau_0$  η διατμητική τάση στο έδαφος και  $\rho$  η πυκνότητα του αέρα.

Ο λογαριθμικός νόμος ισχύει για ουδέτερη κατάσταση ατμόσφαιρας όμως μπορεί να γενικευτεί για διάφορες καταστάσεις ευστάθειας συναρτήσει μιας παραμέτρου ευστάθειας  $L$ , του μήκους Monin-Obukhov. Επίσης υπάρχουν διάφορες άλλες παραλλαγές που υπολογίζουν την επίδραση της δύναμης Coriolis για πιο μεγάλα ύψη, βάσει της παραμέτρου Coriolis που εξαρτάται από την ταχύτητα περιστροφής της γης και από το γεωγραφικό πλάτος.

### 2.3.2 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:

$$I_u = \frac{u_{rms}}{\bar{u}} \quad (2.9)$$

όπου  $u_{rms}$  η τυπική απόκλιση της ταχύτητας για δεδομένο ύψος, δηλαδή:

$$u_{rms} = \sqrt{\overline{u'(t)^2}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (u_i')^2} \quad (2.10)$$

ομοίως ορίζονται και για τις ταχύτητες  $v, w$  τα αντίστοιχα  $v_{rms}, w_{rms}$  και  $I_v, I_w$ .

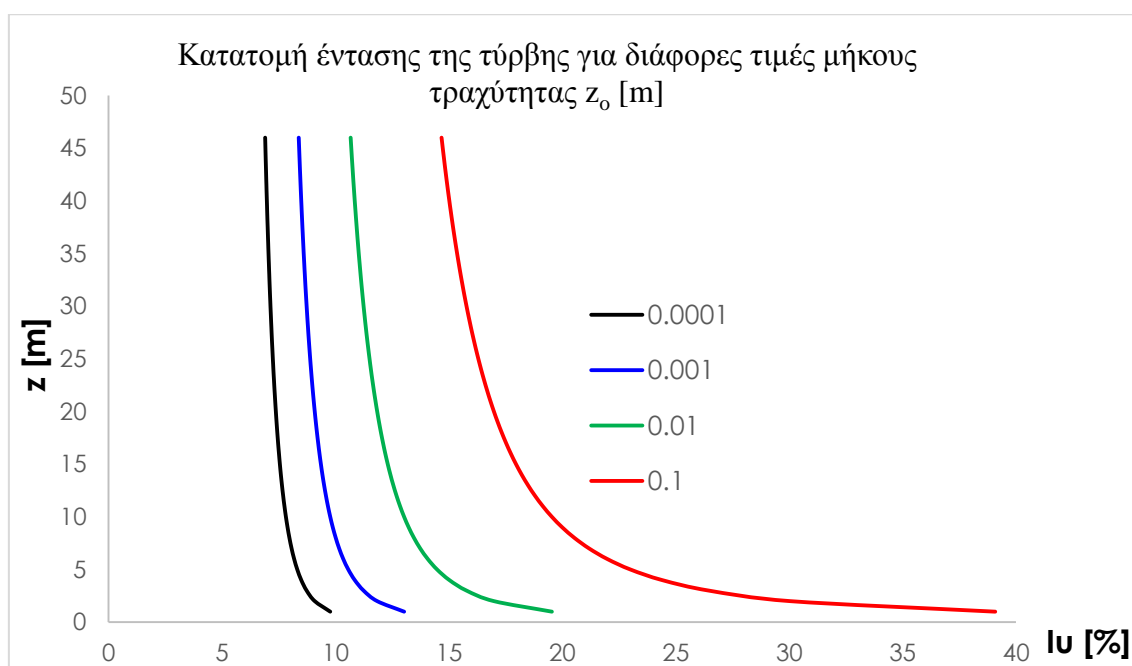
Για την ένταση της τύρβης υπάρχει πληθώρα από εμπειρικές σχέσεις που προέκυψαν πειραματικά. Μετρήσεις στο επιφανειακό οριακό στρώμα έδειξαν ότι η ένταση της τύρβης έχει άμεση σχέση με την ταχύτητα τριβής [12]. Συγκεκριμένα η σχέση είναι:

$$u_{rms} = 2.5u_* \quad (2.11)$$

επομένως συνδυάζοντας την σχέση της  $u_{rms}$  με τον λογαριθμικό νόμο έχουμε την ένταση της τύρβης με το ύψος (Σχήμα 2.20) ως:

$$I_u = 1.00 / \ln(z/z_o) \quad (2.12)$$

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



Σχήμα 2.20: Θεωρητικές κατατομές έντασης της τύρβης για διάφορες τιμές μήκους τραχύτητας

Κατά ESDU 75001 [36] προτείνεται μια λίγο πιο περίπλοκη εναλλακτική σχέση για την κατατομή της τύρβης με το ύψος:

$$I_u = \frac{1}{\ln(z/z_o)} [0.867 + 0.566 \lg z - 0.246(\lg z)^2] \cdot \lambda \quad (2.13)$$

$$\lambda = \begin{cases} \frac{0.76}{z_o^{0.07}} & z_o > 0.02m \\ 1.0 & z_o \leq 0.02m \end{cases} \quad (2.14)$$

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.

### 2.3.3 Ολοκληρωτική κλίμακα μήκους τύρβης

Η ολοκληρωτική κλίμακα μήκους της τύρβης υπολογίζεται εφαρμόζοντας την θεωρία παγιομένης τύρβης του Taylor, η οποία μέσω της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης παρέχει μια ένδειξη της κλίμακας της τύρβης του ανέμου [37].

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

$$R(t_1, t_2) = \overline{[u(t_1)u(t_2)]} \quad (2.15)$$

Στην περίπτωση μιας στατιστικά παγιομένης χρονοσειράς, η αυτοσυσχέτιση εξαρτάται μόνο από την διαφορά  $\tau = t_1 - t_2$  (υστέρηση) (Σχήμα 2.21α) και όχι από τις χρονικές στιγμές  $t_1$  και  $t_2$ . Επομένως η παραπάνω σχέση για στατιστικά παγιομένη χρονοσειρά, γίνεται:

$$R(\tau) = \overline{[u(t)u(t + \tau)]} \quad (2.16)$$

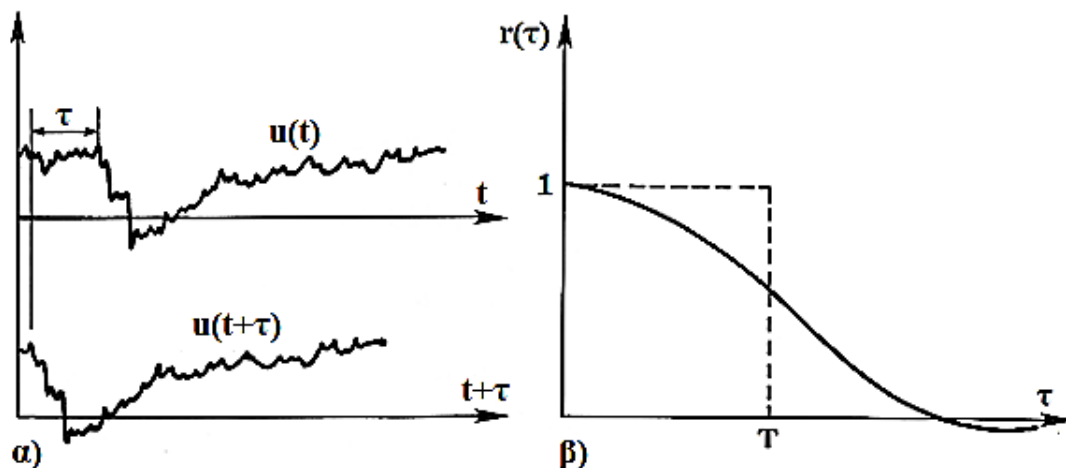
Έτσι ορίζεται η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης με αδιαστατοποίηση ως εξής:

$$r(\tau) = \frac{\overline{[u(t)u(t + \tau)]}}{\overline{u^2}} \quad (2.17)$$

Για χρονική υστέρηση  $\tau = 0$  η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης λαμβάνει την τιμή της μονάδας και φθίνει καθώς αυξάνει η υστέρηση  $\tau$  (Σχήμα 2.21β). Καθώς η  $\tau$  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:

$$Tu_x = \int_0^{\infty} r(\tau) d\tau \quad (2.18)$$





Σχήμα 2.21: α) Μέθοδος υπολογισμού της αυτοσυσχέτισης της χρονοσειράς  $u(t)$  και β) η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης  $r(\tau)$  και η ολοκληρωτική κλίμακα χρόνου  $T$  [38]

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

$$Lu_x = \bar{u} \cdot Tu_x \quad (2.19)$$

Έχουν προκύψει διάφορες εμπειρικές σχέσεις της κατατομής της ολοκληρωτικής κλίμακας μήκους της τύρβης με το ύψος. Το 1972 ο Counihan [39] πρότεινε την εμπειρική σχέση:

$$Lu_x = Cz^m \quad (2.20)$$

όπου οι παράμετροι  $C$  και  $m$  εξαρτώνται από το μήκος τραχύτητας  $z_0$ .

Κατά ESDU 75001 προτείνεται η σχέση:

$$Lu_x = 25 \frac{z^{0.35}}{z_0^{0.063}} \quad (2.21)$$

Κατά ESDU 74031 (1974) [40] προτείνεται ο υπολογισμός μέσω του φάσματος της τυρβώδους κινητικής ενέργειας ως εξής:

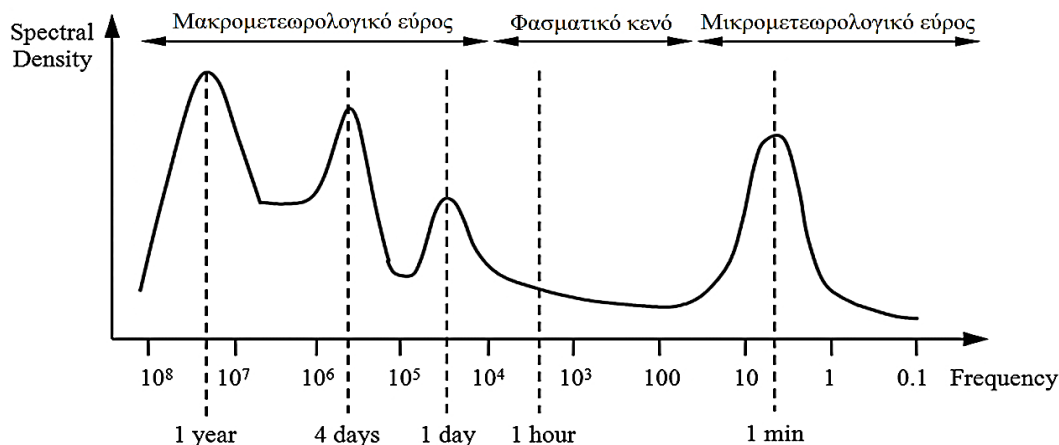
$$Lu_x = \frac{0.146 \cdot \bar{u}_z}{f_{max}} \quad (2.22)$$

όπου  $f_{max}$  η συχνότητα του μεγίστου στο φάσμα τυρβώδους κινητικής ενέργειας.

Γενικά υπάρχει μεγάλη διακύμανση στις δημοσιευμένες τιμές της κλίμακας τύρβης. Η σχέση (2.21) κατά ESDU 75001 βασίζεται σε στοιχεία που θεωρούνται τα πλέον αξιόπιστα και εκφράζει τις μετρήσεις με ακρίβεια  $\pm 30\%$  [12].

### 2.3.4 Φάσμα τυρβώδους κινητικής ενέργειας

Η μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου με το χρόνο για μια μεγάλη χρονική περίοδο περιέχει μεταβολές που οφείλονται σε εποχιακές διακυμάνσεις ταχύτητας, σε μεταβολές ταχύτητας που οφείλονται σε παροδικά κλιματολογικά συστήματα και σε μεταβολές ταχύτητας που οφείλονται στην ασταθή φύση της ροής, την τύρβη [12] (Σχήμα 2.22).



Σχήμα 2.22: Φάσμα του Van der Hoven για την οριζόντια ταχύτητα [41]

Ο Kolmogorov συνέβαλε σημαντικά στην κατανόηση της μικροκλίμακας της τύρβης και στην διαδικασία μεταφοράς ενέργειας από τις μεγαλύτερες στις μικρότερες τύρβες μέσω της θεωρίας ομοιότητας της τύρβης [37]. Η υπόθεση του Kolmogorov έδειξε ότι οι μικρής κλίμακας τύρβες σχετίζονται με τις υψηλές συχνότητες στο άκρο του φάσματος, έχουν ανεξάρτητες ιδιότητες και είναι ισότροπες. Έτσι είναι ευρέως αποδεκτό ότι το μέγεθος των τυρβωδών στροβίλων διαιρείται σε τρεις κατηγορίες (Σχήμα 2.23):

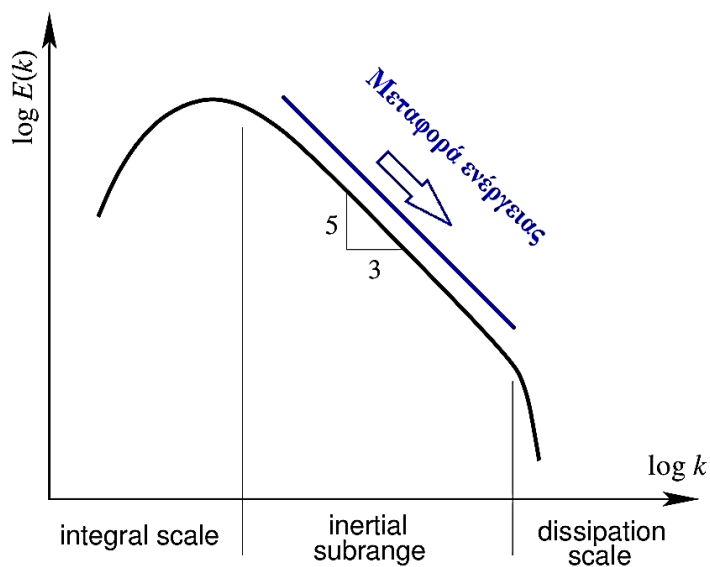
- Το εύρος χαμηλών συχνοτήτων (integral scale-energy containing scale), που εμπεριέχει την περισσότερη κινητική ενέργεια των στροβίλων. Αυτή η ενέργεια μεταφέρεται από τις αδρανειακές δυνάμεις στις υψηλότερες συχνότητες.
- Το ενδιάμεσο εύρος (inertial subrange), που ακολουθεί τον νόμο  $-5/3$  του Kolmogorov.
- Το υψίσυχο εύρος (dissipation scale), όπου οι δυνάμεις ιξώδους κυριαρχούν και πραγματοποιείται καταστροφή της τύρβης.

Για την συνάρτηση πυκνότητας φασματικής ενέργειας  $S(n)$  υπάρχει πληθώρα εμπειρικών σχέσεων έκφρασης της.

Η μορφή που γενικά γίνεται αποδεκτή ως η καλύτερη είναι αυτή του Von-Karman [12]:

$$\frac{n \cdot S_u(n)}{u_{rms}^2} = \frac{4 \tilde{n}}{(1 + 70.8 \tilde{n}^2)^{5/6}} \quad (2.23)$$

όπου η αδιάστατη συχνότητα  $\tilde{n} = (nLu_x)/\bar{u}_z$ , όπου  $n$  η συχνότητα,  $Lu_x$  η ολοκληρωτική κλίμακα μήκους της τύρβης και  $\bar{u}_z$  η μέση ταχύτητα στο ύψος  $z$ .



**Σχήμα 2.23:** Φάσμα τύρβης όπου ενέργεια μεταφέρεται από τις χαμηλές στις υψηλές συχνότητες όπου και τελικά καταστρέφεται η τύρβη [42]



# Κεφάλαιο 3

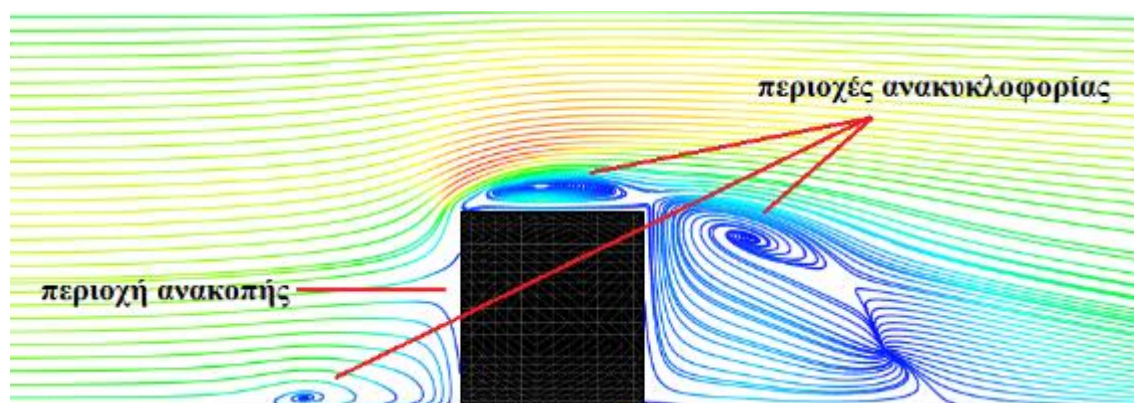
## *Ροή γύρω από κύβο*

### 3.1 Πεδίο ροής γύρω από κύβο

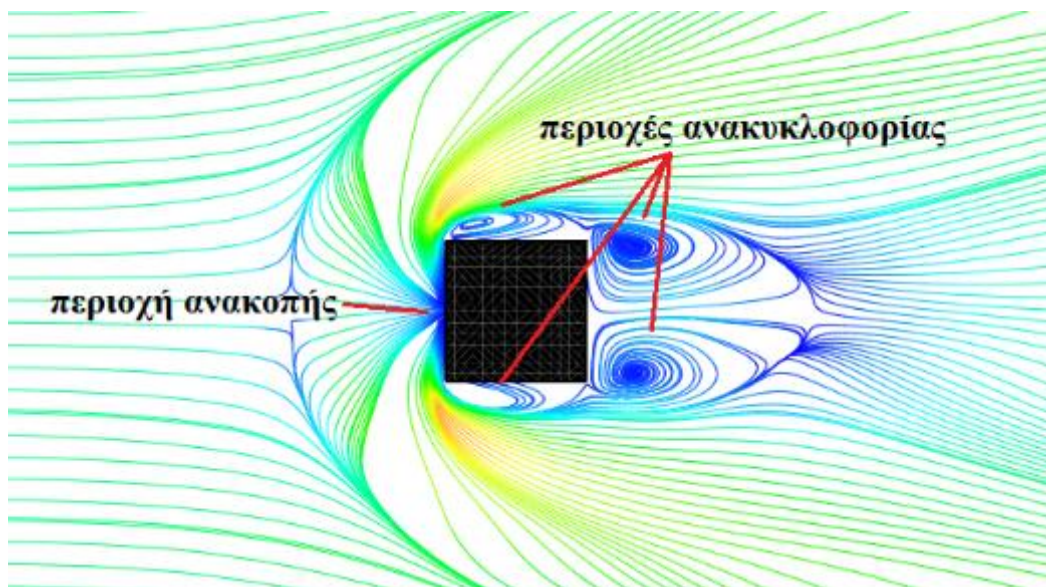
Η ροή γύρω από τρισδιάστατα εμπόδια είναι τόσο πιο πολύπλοκη, όσο πιο σύνθετη είναι η γεωμετρία του εμποδίου [43]. Για να κατανοηθεί, να οπτικοποιηθεί και να ποσοτικοποιηθεί η επίδραση της ροής πάνω σε σύνθετες γεωμετρίες πρέπει αρχικά να μελετηθούν οι απλούστερες. Η μελέτη της ροής αέρα γύρω από μια διάταξη καθορισμένης γεωμετρίας γίνεται είτε μέσω πειραματικής διαδικασίας σε αεροδυναμική σήραγγα, είτε με αριθμητική προσομοίωση.

#### 3.1.1 Ροή κάθετη στην επιφάνεια του κύβου

Στην ομοιόμορφη ροή κάθετη στην επιφάνεια του κύβου (Σχήμα 3.1, Σχήμα 3.2), 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, ανοδικά και καθοδικά ρεύματα, σχηματίζονται αντίστοιχα πάνω και κάτω από την περιοχής ανακοπής της ροής και δεξιά – αριστερά οδηγούνται τα πλευρικά ρεύματα.

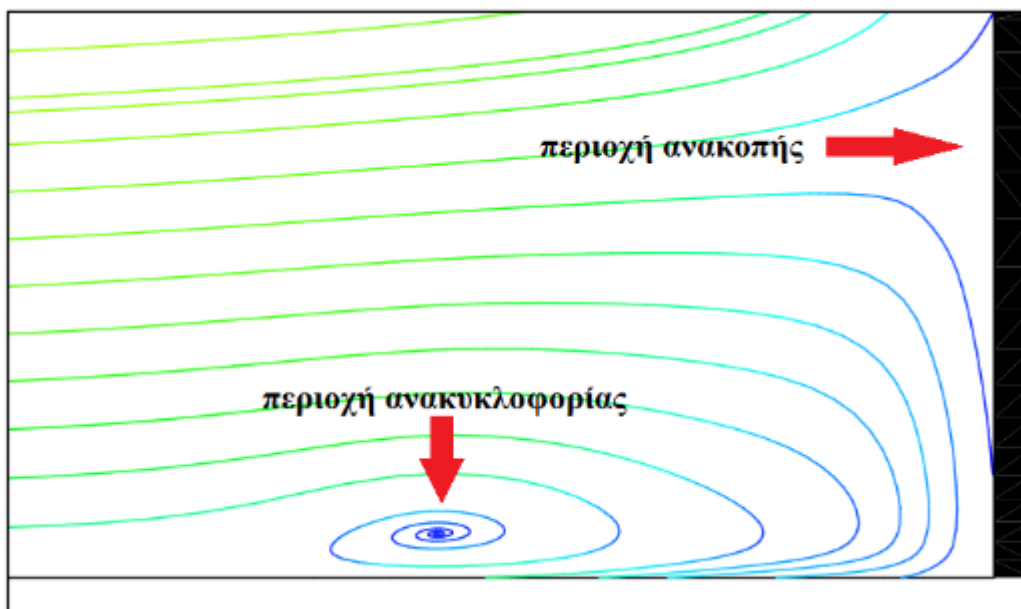


Σχήμα 3.1: Πεδίο ροής στην κατακόρυφη τομή στο μέσον του κύβου [44]

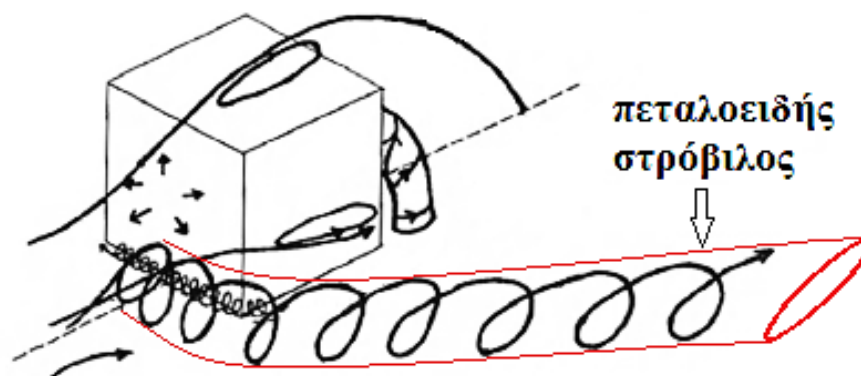


Σχήμα 3.2: Οριζόντια τομή πεδίου ροής στο έδαφος [44]

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 (Σχήμα 3.3), οι οποίες εκτείνονται και περιμετρικά της βάσης του κύβου, σχηματίζοντας μια διαχωρισμένη διάταξη ροής (Σχήμα 3.4, Σχήμα 3.5). Αυτή η διάταξη ροής, σχήματος U, ονομάζεται, πεταλοειδής στρόβιλος (horseshoe vortex).

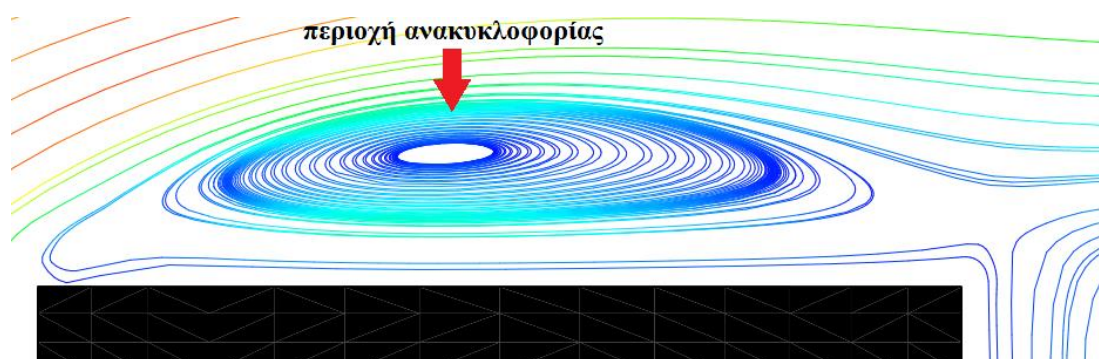


Σχήμα 3.3: Λεπτομέρεια κατακόρυφης τομής δίνης στην ανάντι πρόσοψη του κύβου [44]



Σχήμα 3.4: Διαμόρφωση του πτελοειδή στρόβιλου [45]

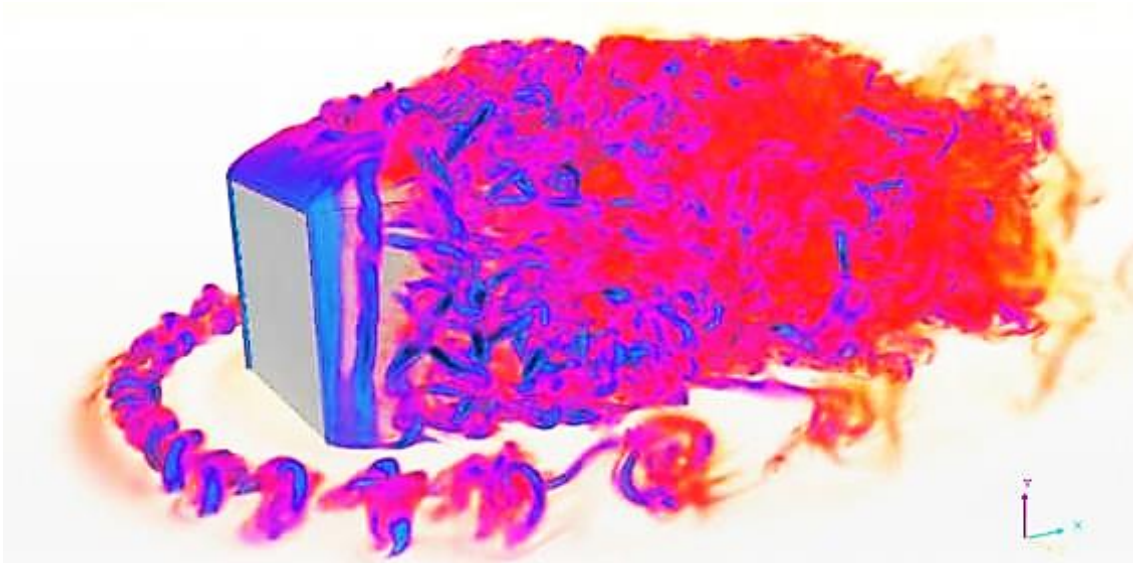
Η ροή των υπολοίπων ρευμάτων διαχωρίζεται προς στις αιχμηρές ακμές του κύβου. Παρατηρείται δηλαδή, αποκόλληση της ροής στις προσήνεμες ακμές, της οροφής και των πλαϊνών πλευρών του κύβου, όπου και εμφανίζονται ζώνες ανακυκλοφορίας (Σχήμα 3.1, Σχήμα 3.2, Σχήμα 3.5, Σχήμα 3.6). Οι ζώνες ανακυκλοφορίας, οι οποίες αποτρέπουν την επανακόλληση της ροής στις επιφάνειες του κύβου, έπειτα παρατηρείται επανακόλληση της ροής στις επιφάνειες του κύβου.



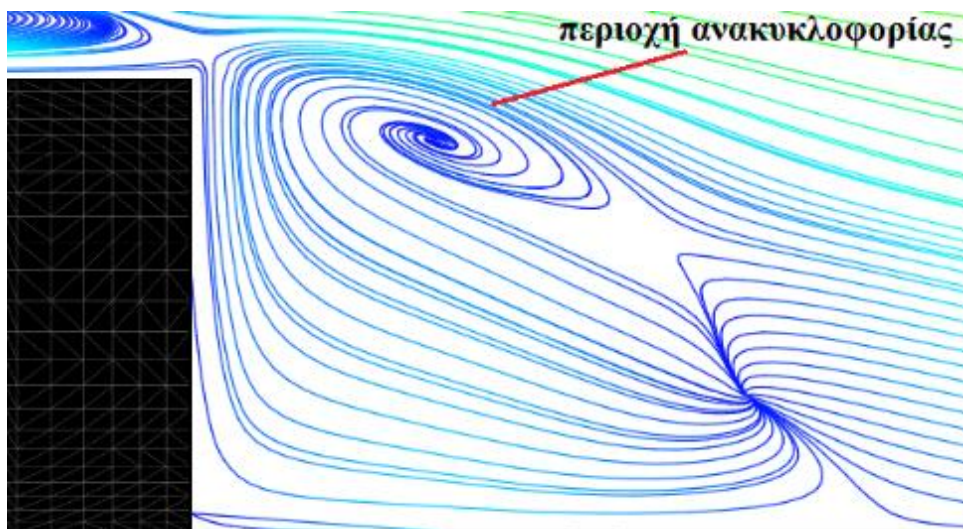
Σχήμα 3.5: Λεπτομέρεια κατακόρυφης τομής δίνης στην οροφή του κύβου [44]

Μετά την επανακόλληση, η ροή φτάνοντας στις υπήνεμες τώρα ακμές, συμπεριφέρεται όπως και στις προσήνεμες. Παρατηρείται λοιπόν κι εδώ αποκόλληση της ροής και δημιουργία δινών ανακυκλοφορίας (Σχήμα 3.7, Σχήμα 3.8), οι οποίες όμως στην προκειμένη περίπτωση εκτείνονται περισσότερο πάνω στην υπήνεμη επιφάνεια, δημιουργώντας μια διάταξη ροής σχήματος αντεστραμμένου U (Σχήμα 3.8).

Οι ταχύτητες κοντά στον τοίχο της υπήνεμης πλευράς είναι συνήθως το ένα τέταρτο εκείνων που βρίσκονται στην αντίστοιχη θέση της προσήνεμης πλευράς του κύβου. Η ροή που οδηγείται πάνω από την οροφή επιταχύνεται σε αντίθεση με την ροή που οδηγείται στο κάτω μέρος της πρόσοψης, η οποία επιβραδύνεται.



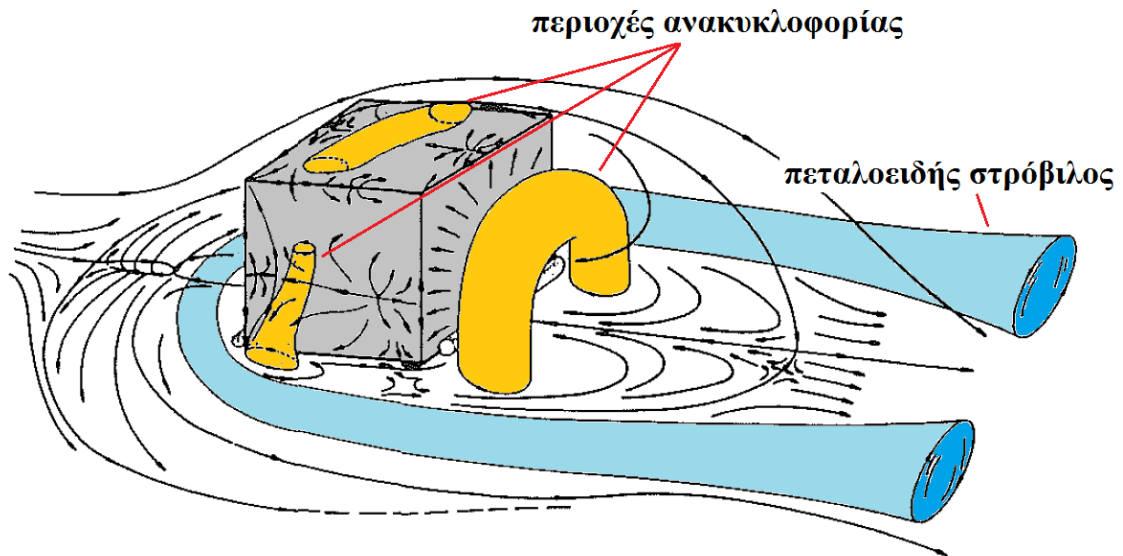
**Σχήμα 3.6:** Διαμόρφωση του πεταλοειδή στρόβιλου και αποκόλληση της ροής σε αριθμητική προσομοίωση [46]



**Σχήμα 3.7:** Λεπτομέρεια κατακόρυφης τομής δίνης στην κατάντι πρόσοψη του κύβου [44]

Για ροή ΑΟΣ το πεδίο ροής διαμορφώνεται κατά τον ίδιο τρόπο, δηλαδή παρατηρείται ο πεταλοειδής στρόβιλος και οι περιοχές ανακυκλοφορίας όπως περιγράφηκαν.

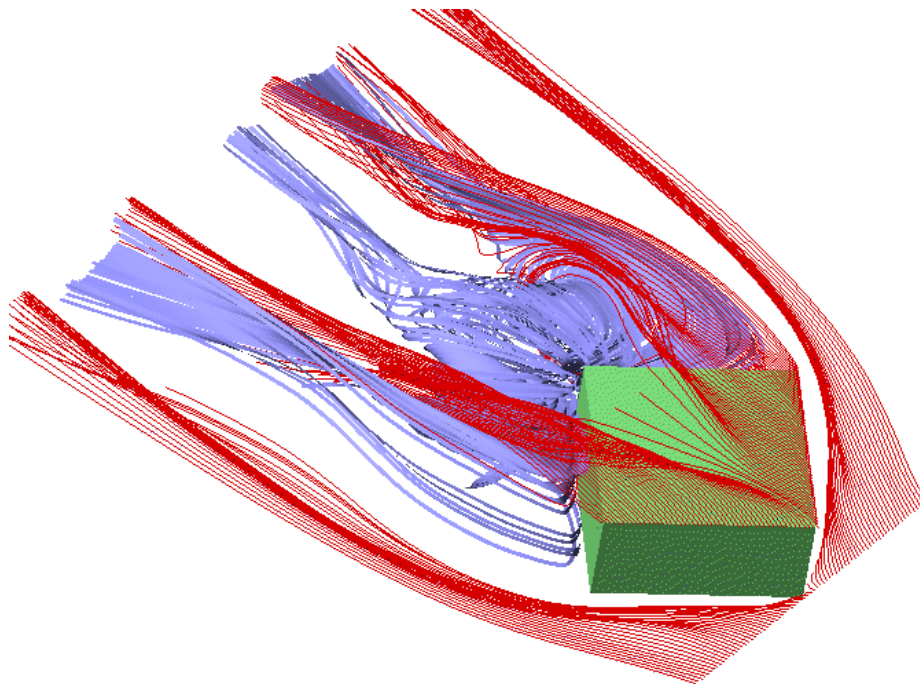




Σχήμα 3.8: Τρισδιάστατη απεικόνιση της ροής γύρω από κύβο [47]

### 3.1.2 Ροή υπό γωνία πρόσπτωσης 45 μοιρών

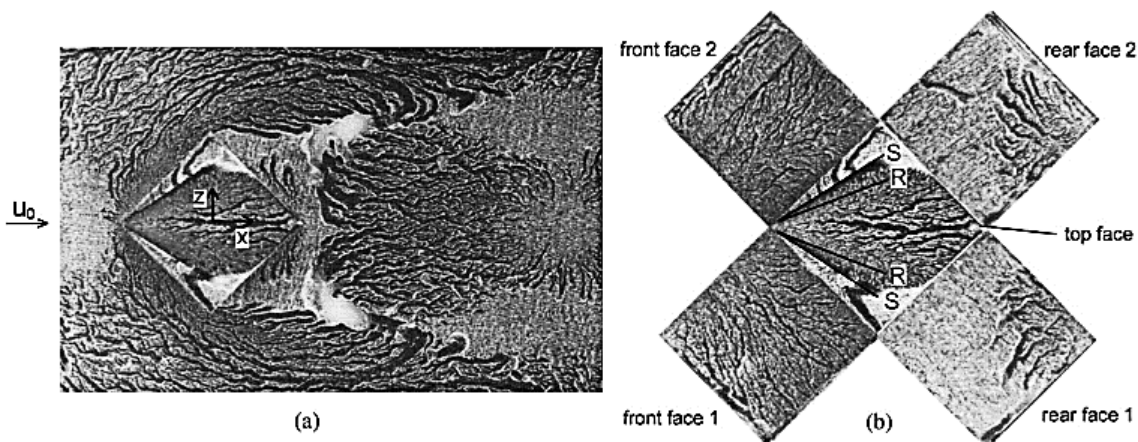
Η ροή γύρω από κύβο υπό γωνία διαμορφώνεται πολύ διαφορετικά απ' ό τι σε κάθετη ροή, ιδίως στην οροφή του κύβου [4],[48],[49],[50] (Σχήμα 3.9, Σχήμα 3.10, Σχήμα 3.11, Σχήμα 3.12). Για ομοιόμορφη ροή και για ροή ΑΟΣ διαμορφώνονται παρόμοια χαρακτηριστικά. Στην βάση του κύβου διαμορφώνεται ο πεταλοειδής στρόβιλος όπως και στην περίπτωση της κάθετης ροής (Σχήμα 3.9, Σχήμα 3.10).



Σχήμα 3.9: Πεδίο ροής γύρω από κύβο για γωνία ροής 45 μοιρών από αριθμητική προσομοίωση [51]

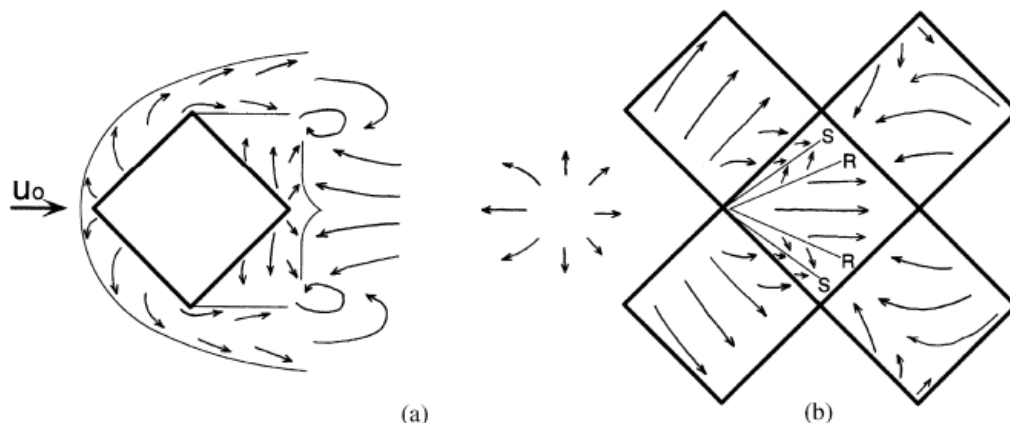


Σχήμα 3.10: Κάτοψη σχηματιζόμενης ροής από έλαιο [50]



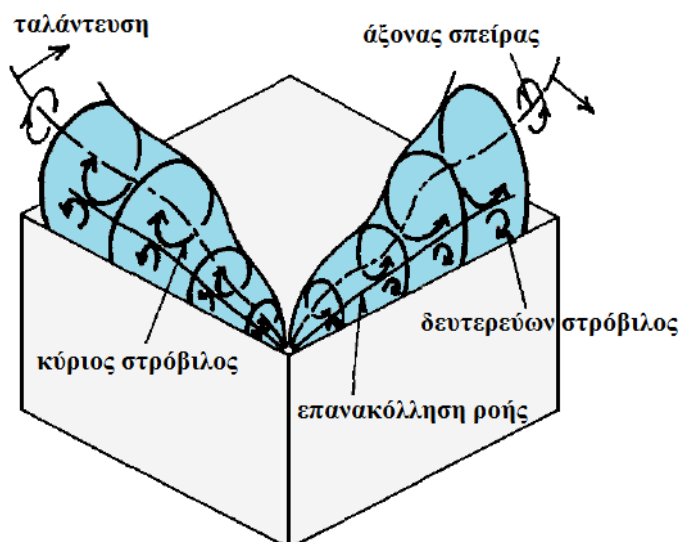
Σχήμα 3.11: α) Κάτοψη σχηματιζόμενης ροής από έλαιο και β) ανάπτυγμα κύβου και η σχηματιζόμενη ροή επάνω στην επιφάνειά του (S: γραμμές αποκόλλησης, R: γραμμές επανακόλλησης) [Error! Bookmark not defined.]

Στην βάση, στις δύο πίσω πλευρές, η αποκολλημένη ροή επανακολλάται σε περίπου 2.7 ύψη κύβου από το κέντρο του κύβου (Σχήμα 3.10, Σχήμα 3.12). Μια ροή ανακυκλοφορίας διαμορφώνεται μεταξύ περιοχής επανακόλλησης και κύβου, που προκαλεί ανοδική ροή στο πίσω μέρος του κύβου (Σχήμα 3.10). Η αλληλεπίδραση μεταξύ πεταλοειδή στρόβιλου και αποκολλημένης ροής δημιουργεί τοξωτό στρόβιλο πίσω από τον κύβο περίπου στο ένα ύψος κύβου από το κέντρο του κύβου (Σχήμα 3.9).



**Σχήμα 3.12:** α) Πεδίο ροής στο έδαφος και β) στην επιφάνεια του κύβου (S: γραμμές αποκόλλησης, R: γραμμές επανακόλλησης) [48]

Στην οροφή διακρίνεται ένα ζεύγος από γραμμές αποκόλλησης της ροής που εκτείνονται από την γωνία προσβολής έως τις δύο πίσω πλευρές, όπως επίσης και ένα ζεύγος γραμμών επανακόλλησης της ροής μεταξύ των γραμμών αποκόλλησης (Σχήμα 3.11, Σχήμα 3.12). Το κύριο χαρακτηριστικό της οροφής είναι το ζεύγος των κωνικών στροβίλων χαμηλής πίεσης (conical vortices) (Σχήμα 3.13) που δημιουργείται από την ακμή προσβολής, το οποίο είναι χαρακτηριστικό ροής μιας δέλτα πτέρυγα 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 και η ένταση των κωνικών στροβίλων, μεταβάλλονται περιοδικά [5],[6],[7],[52] (Σχήμα 3.13).



**Σχήμα 3.13:** Δομή των κωνικών στροβίλων της οροφής [5]

### 3.2 Κατανομή πίεσης στην επιφάνεια του κύβου

Οι μορφές ροής που διαμορφώνονται κατά δημιουργούν ένα πεδίο πιέσεων. Οι πιέσεις αυτές είναι γενικά δυναμικές και όχι σταθερές, είτε λόγω των στροβίλων από το πεδίο ροής, είτε γενικότερα από την τύρβη του ανέμου ή και τις ριπές γενικότερα. Οι στιγμιαίες πιέσεις μπορεί να διαφέρουν σημαντικά από τις μέσες τιμές. Οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές παίζουν σημαντικό ρόλο όσον αφορά τα φορτία που ασκούνται στα κτήρια, οι μέσες τιμές είναι κατάλληλες για υπολογισμούς που αφορούν τον φυσικό αερισμό των κτηρίων. Αντί για των πιέσεων, χρησιμοποιείται το αδιάστατο μέγεθος του συντελεστή πίεσης, και ορίζεται ως:

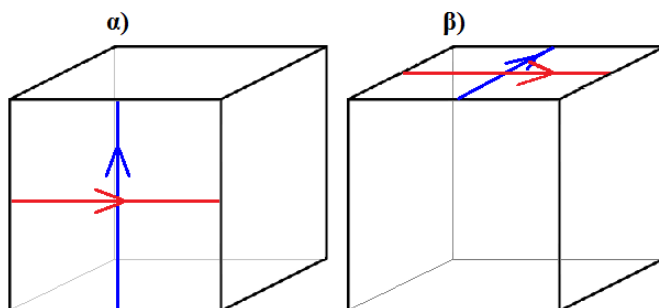
$$C_p = \frac{p - p_o}{\frac{1}{2} \rho U_o^2} \quad (3.1)$$

όπου  $p$  η στατική πίεση στην επιφάνεια του κύβου,  $p_o$  μία στατική πίεση αναφοράς, συνήθως στο ύψος του κτηρίου ή έξω στην αδιατάρακτη ροή ανάντι του κύβου,  $\rho$  η πυκνότητα του αέρα και  $U_o$  μία ταχύτητα αναφοράς της ροής, συνήθως στο ύψος του κύβου και ανάντι του κύβου σε αδιατάρακτη, από τον κύβο, ροή.

Για τον προσδιορισμό της κατανομής των πιέσεων, και επομένως του συντελεστή πίεσης, έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές μελέτες, είτε πειραματικές [4],[47],[53],[54],[55],[56],[57],[58],[59],[60],[61],[62],[63],[64] μέσω αεροδυναμικής σήραγγας, είτε με αριθμητική προσομοίωση [53],[65],[66],[67],[68].

#### 3.2.1 Ροή κάθετη στην επιφάνεια του κύβου

Η κατανομή της πίεσης συνηθίζεται να απεικονίζεται κατά διαδρομές των μέσων γραμμών των επιφανειών. Για όλες τις κάθετες επιφάνειες, δηλαδή εκτός της οροφής, υπάρχει η κατακόρυφη (vertical) και η οριζόντια (horizontal) μέση γραμμή (Σχήμα 3.14α). Για την οροφή υπάρχει η διαμήκης (longitudinal) και η εγκάρσια (transverse) της ροής μέση γραμμή (Σχήμα 3.14β).

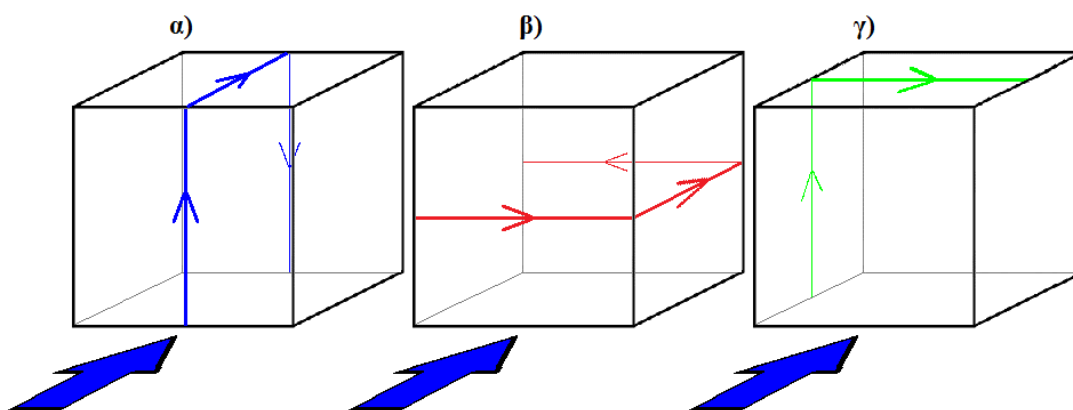


**Σχήμα 3.14:** α) Κατακόρυφη και οριζόντια μέση γραμμή μιας κάθετης επιφάνειας και β) διαμήκης και εγκάρσια της ροής μέση γραμμή.

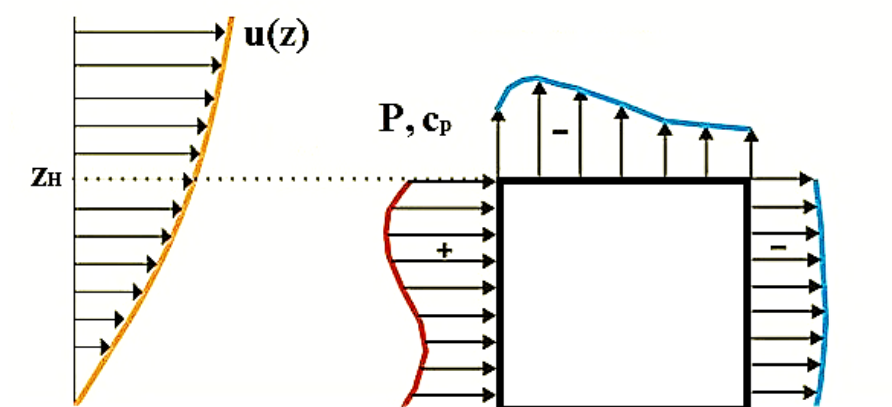
Οι μέσες γραμμές μπορούν να συνδυαστούν κατάλληλα και να αποτελέσουν τρεις διαδρομές, την διαμήκη (longitudinal path) (Σχήμα 3.15α), την οριζόντια (horizontal path) (Σχήμα 3.15β) και την εγκάρσια διαδρομή (transverse path) (Σχήμα 3.15γ).

Την διαμήκη διαδρομή αποτελούν: η κατακόρυφη της εμπρός, η διαμήκης της επάνω και η κατακόρυφη της πίσω επιφάνειας. Την οριζόντια διαδρομή αποτελούν: η οριζόντια της εμπρός, η οριζόντια της πλευρικής και η οριζόντια της πίσω επιφάνειας. Την εγκάρσια διαδρομή αποτελούν: η κατακόρυφη της πλευρικής και η εγκάρσια της επάνω επιφάνειας, στην οποία για μη-συμμετρικό πεδίο πιέσεων, προστίθεται και η κατακόρυφη της άλλης πλευρικής επιφάνειας.

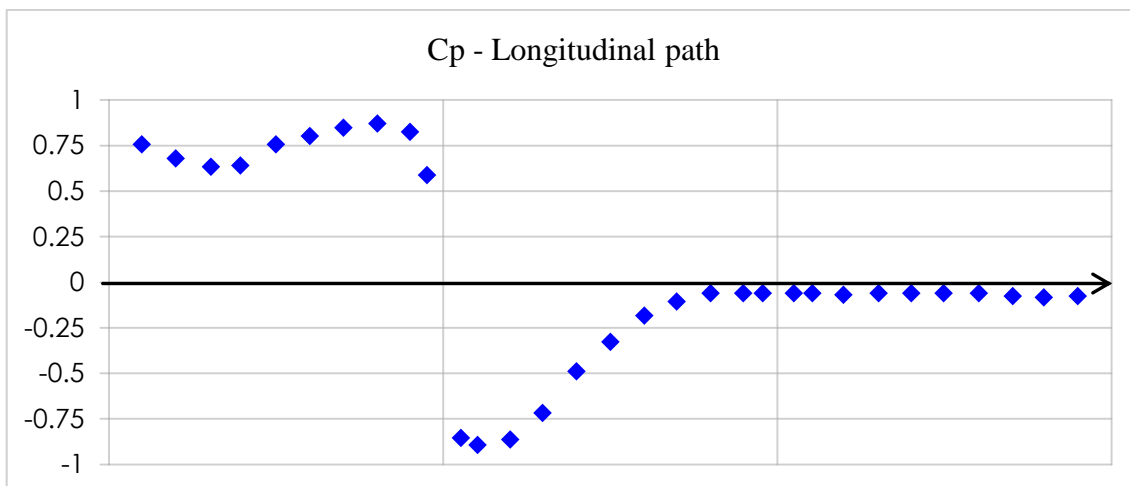
Έτσι η κατανομή των επιφανειών του συντελεστή πίεσης για ροή ΑΟΣ απεικονίζεται στην τομή του με τις ανωτέρω διαδρομές (Σχήμα 3.16, Σχήμα 3.17, Σχήμα 3.18, Σχήμα 3.19).



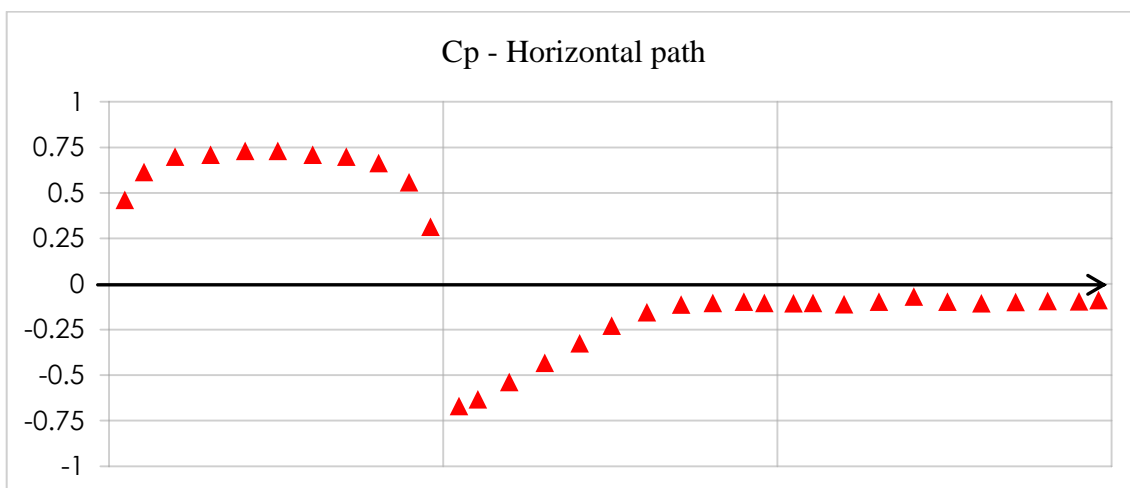
Σχήμα 3.15: α) Διαμήκης διαδρομή μέσης γραμμής, β) οριζόντια διαδρομή μέσης γραμμής γ) εγκάρσια διαδρομή μέσης γραμμής.



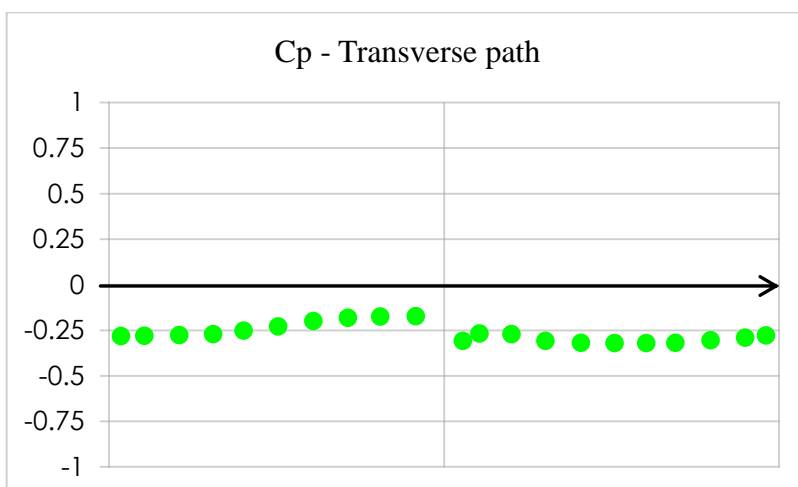
Σχήμα 3.16: Παράδειγμα κατανομής του συντελεστή πίεσης κατά την διαμήκη, με τη ροή, διαδρομή της επιφάνειας



Σχήμα 3.17: Κατανομή συντελεστή πίεσης διαμήκου διαδρομής (Σχήμα 3.15α) (δεδομένα από [4])

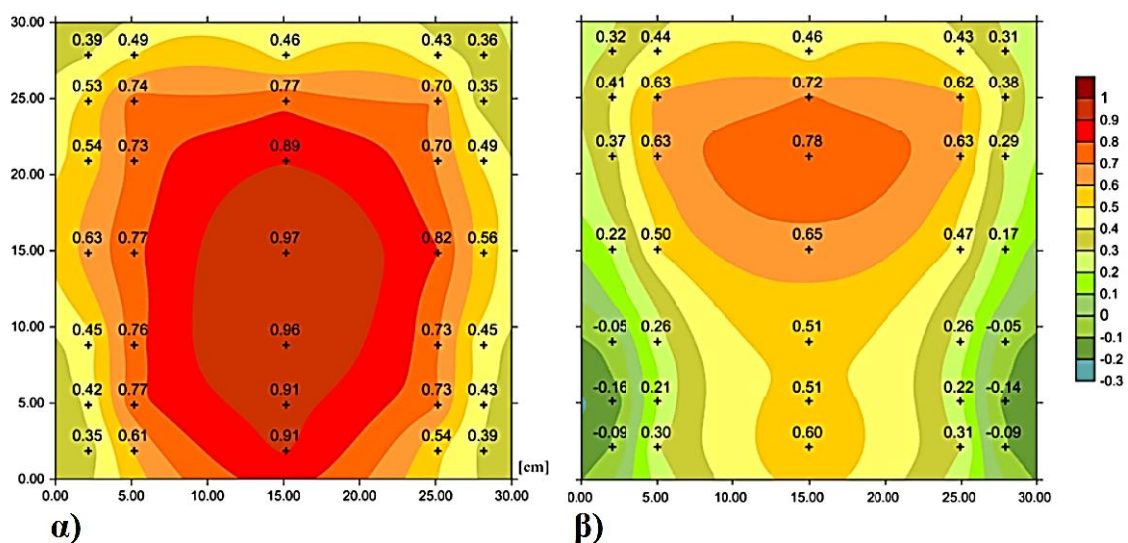


Σχήμα 3.18: Κατανομή συντελεστή πίεσης οριζόντιας διαδρομής (Σχήμα 3.15β) (δεδομένα από [4])

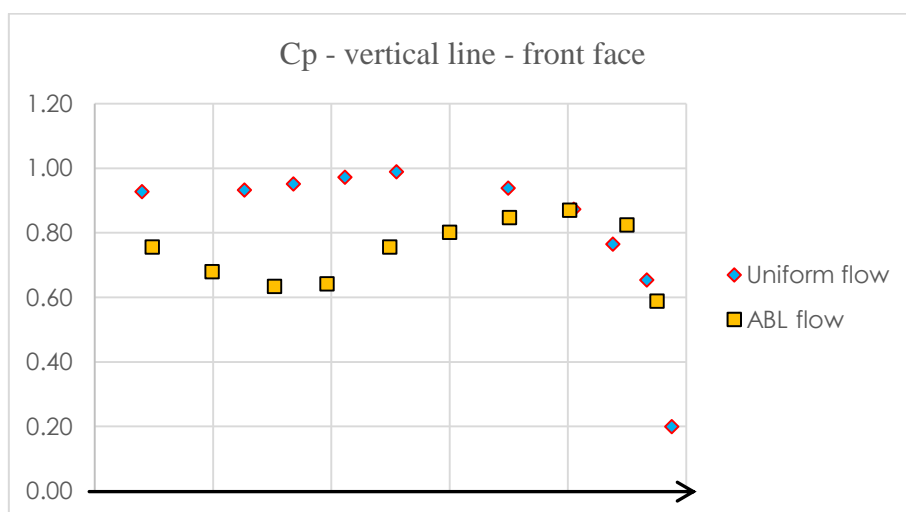


Σχήμα 3.19: Κατανομή συντελεστή πίεσης εγκάρσιας διαδρομής (Σχήμα 3.15γ) (δεδομένα από [4])

Στην προσήνεμη επιφάνεια, λόγω του σημείου ανακοπής, επικρατούν υψηλές πιέσεις. Για ομοιόμορφη ροή η κατανομή των πιέσεων παρουσιάζει μέγιστο κοντά στο κέντρο της επιφάνειας (Σχήμα 3.20α), ενώ ροή ΑΟΣ το μέγιστο μετατοπίζεται προς τα άνω (Σχήμα 3.20β). Επίσης το μέγιστο για την ροή ΑΟΣ έχει χαμηλότερη τιμή από την ομοιόμορφη ροή. Η διαφοροποίηση είναι εμφανής στην θέση του μέγιστου συντελεστή πίεσης όσο και στην τιμή του μέσης κατακόρυφης γραμμής (Σχήμα 3.17, Σχήμα 3.21). Κατά την οριζόντια μέση γραμμή της επιφάνειας η κατανομή είναι συμμετρική και ξεκινάει από χαμηλές τιμές στα άκρα και καταλήγει σε περιοχή μέγιστου στο κέντρο της γραμμής (Σχήμα 3.18).



Σχήμα 3.20: Κατανομή συντελεστή πίεσεων στην εμπρός επιφάνεια για α) ομοιόμορφη ροή και β) ροή ΑΟΣ [62]



Σχήμα 3.21: Κατανομή συντελεστή πίεσης στην κατακόρυφη μέση γραμμή της εμπρός επιφάνειας για ομοιόμορφη ροή και ροή ΑΟΣ (δεδομένα από [4])

Στις πλευρικές επιφάνειες, εκκινώντας από την εμπρός επιφάνεια, λόγω της αποκόλλησης, παρουσιάζεται το ελάχιστο της κατανομής της πίεσης, και οδηγούμενοι προς την υπήνεμη επιφάνεια η πίεση ανακτάται σταδιακά (Σχήμα 3.18). Η κατανομή της κατακόρυφης μέσης γραμμής είναι περίπου σταθερή καθ' ύψος. (Σχήμα 3.19).

Η οροφή έχει παρόμοια συμπεριφορά με τις πλευρικές επιφάνειες, λόγω της αποκόλλησης. Η διαμήκης μέση γραμμή έχει παρόμοια χαρακτηριστικά με την οριζόντια μέση γραμμή της πλευρικής, αλλά η πτώση της πίεσης είναι μεγαλύτερη (Σχήμα 3.17) και η κατανομή της εγκάρσιας μέσης γραμμής είναι περίπου σταθερή (Σχήμα 3.19).

Στην πίσω επιφάνεια επικρατεί ένα περίπου ομοιόμορφο πεδίο κατανομής χαμηλών πιέσεων (Σχήμα 3.17, Σχήμα 3.18). Η πίεση είναι περίπου η ίδια που επικρατούσε στο άκρο των μέσων γραμμών.

### 3.2.2 Ροή υπό γωνία πρόσπτωσης 45 μοιρών

Στην περίπτωση των 45 μοιρών πλέον έχουμε δυο προσήνεμες επιφάνειες, δυο υπήνεμες επιφάνειες και την οροφή. Θεωρητικά η κατανομή της πίεσης θα είναι συμμετρική, οπότε η μια εμπρός επιφάνεια θα είναι κατοπτρική της άλλης, όπως και το ίδιο θα ισχύει και για τις δυο πίσω επιφάνειες.

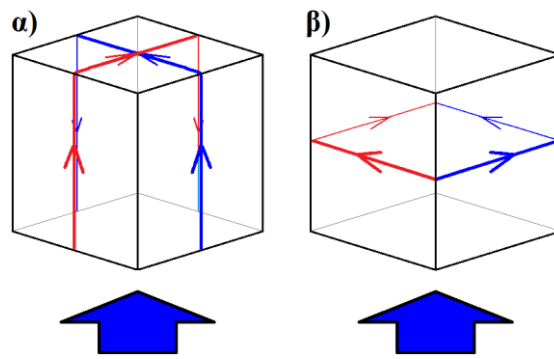
Ο κύβος χωρίζεται σε διαδρομές μέσων γραμμών, όπως στην περίπτωση κάθετης ροής. Έτσι έχουμε την διαδρομή των κατακόρυφων (vertical path) (Σχήμα 3.22α), που αποτελείται από την κατακόρυφη μέση της εμπρός επιφάνειας, την μέση γραμμή της επάνω επιφάνειας, που είναι η συνέχεια της προηγούμενης, και την κατακόρυφη μέση της πίσω επιφάνειας. Εάν η ροή είναι μη-συμμετρική, τότε προκύπτει και η κατοπτρική διαδρομή της (Σχήμα 3.22α). Επίσης έχουμε την οριζόντια διαδρομή (horizontal path) (Σχήμα 3.22β) που αποτελείται από τις οριζόντιες μέσες γραμμές των εμπρός και πίσω επιφανειών, όπου και εδώ για μη-συμμετρική ροή προκύπτει και η κατοπτρική της διαδρομή (Σχήμα 3.22β).

Έτσι η κατανομή των επιφανειών του συντελεστή πίεσης για ροή ΑΟΣ απεικονίζεται στην τομή του με τις ανωτέρω διαδρομές, όπου αξίζει να σημειωθεί ότι στην πραγματικότητα η κατανομή είναι γενικά μη-συμμετρική (Σχήμα 3.23, Σχήμα 3.24).

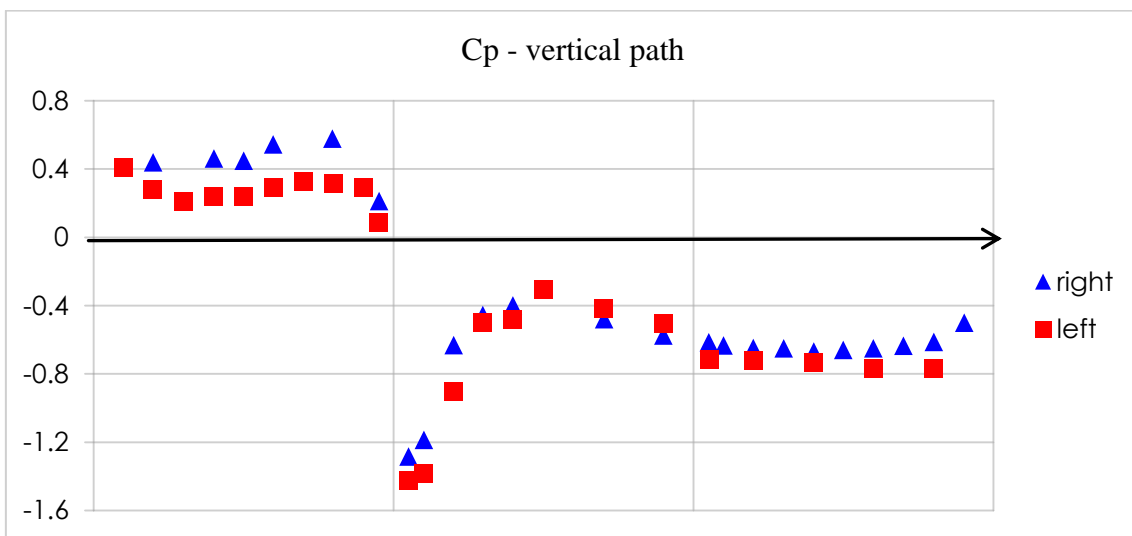
Στις προσήνεμες επιφάνειες, κοντά στην ακμή προσβολής, επικρατούν υψηλές πιέσεις, και πλησιάζοντας την ακμή φυγής, φθίνουν οι πιέσεις (Σχήμα 3.24). Καθ' ύψος η κατανομή είναι όμοια με της προσήνεμης επιφάνειας κάθετης ροής, βέβαια με μικρότερες τιμές (Σχήμα 3.23).

Στις υπήνεμες επιφάνειες επικρατούν αρνητικές πιέσεις, λόγω αποκόλλησης, και περίπου ομοιόμορφο πεδίο κατανομής αυτών των πιέσεων (Σχήμα 3.23, Σχήμα 3.24).

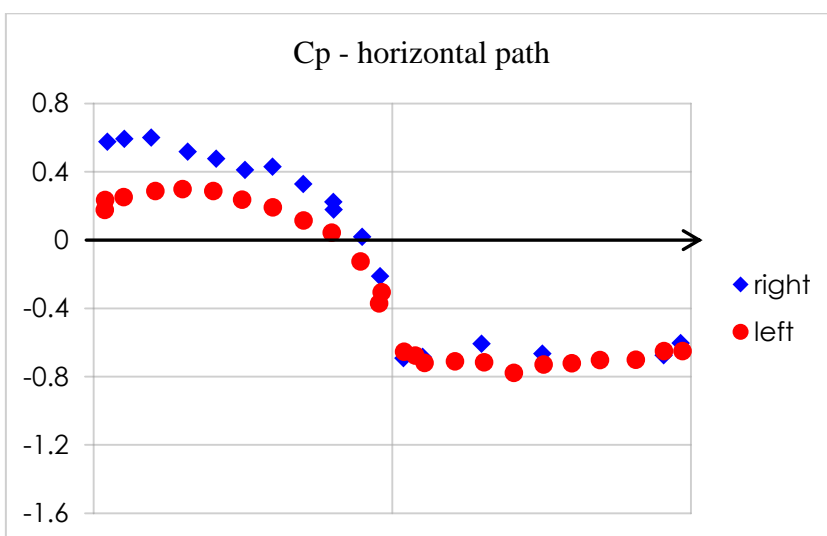




Σχήμα 3.22: α) Κατακόρυφη διαδρομή και β) οριζόντια διαδρομή για μη-συμμετρικές κατανομές.



Σχήμα 3.23: Κατανομή συντελεστή πίεσης κατακόρυφης διαδρομής (Σχήμα 3.22α) (δεδομένα από [4])



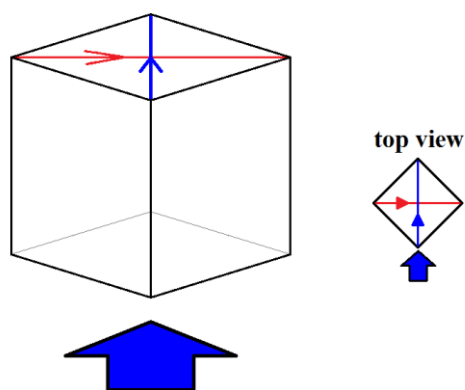
Σχήμα 3.24: Κατανομή συντελεστή πίεσης οριζόντιας διαδρομής (Σχήμα 3.22β) (δεδομένα από [4])

Για την επάνω επιφάνεια επιτυγχάνεται καλύτερη απεικόνιση της κατανομής της μέσω των διαγώνιων της. Δηλαδή της διαμήκους διαγώνιου (longitudinal) γραμμής και της εγκάρσιας (transverse) διαγώνιου γραμμής (Σχήμα 3.25).

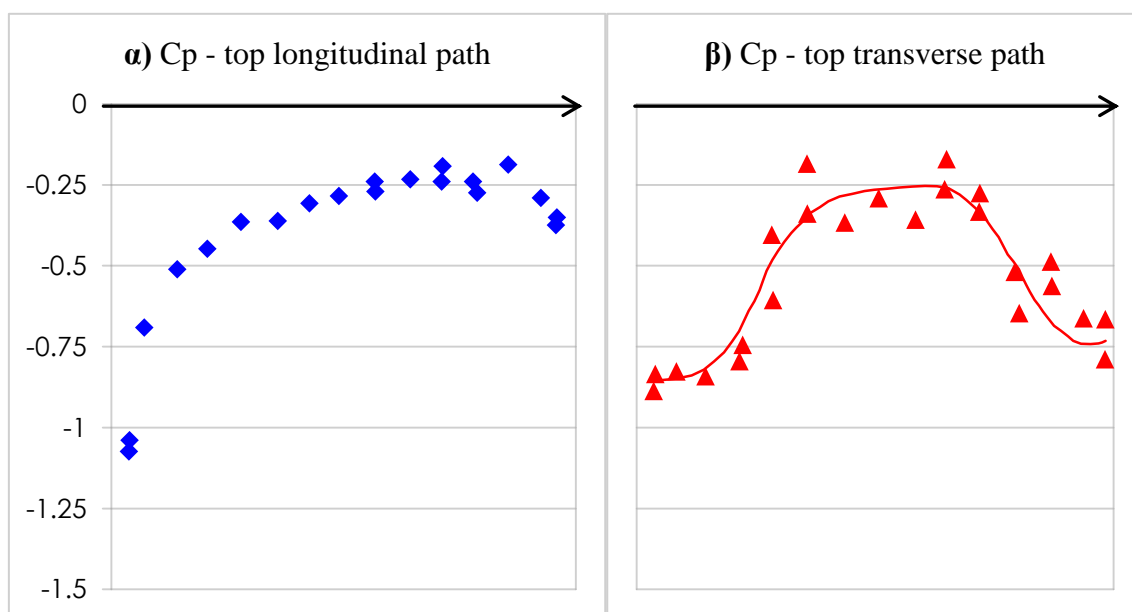
Στην επάνω επιφάνεια, όπως είδαμε, έχουμε αποκόλληση στην ακμή αλλά τον σχηματισμό των κωνικών στροβίλων

Έτσι κατά την διαμήκη διαγώνιο υπάρχει πτώση της πίεσης, λόγω αποκόλλησης, στην προσήνεμη γωνία με σταδιακή απόκτησή της προς την υπήνεμη ακμή της επιφάνειας (Σχήμα 3.26α).

Κατά την εγκάρσια διαγώνιο διακρίνονται οι περιοχές χαμηλής πίεσης των κωνικών στροβίλων κατά τα άκρα της γραμμής (Σχήμα 3.26β).

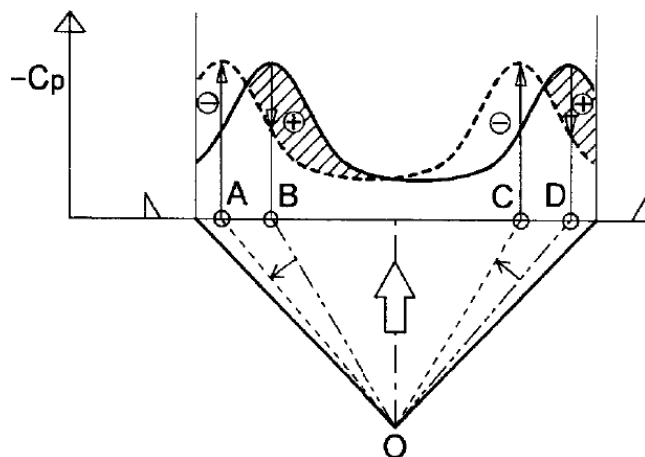


Σχήμα 3.25: Διαδρομή διαμήκους διαγώνιου και εγκάρσιας διαγώνιου

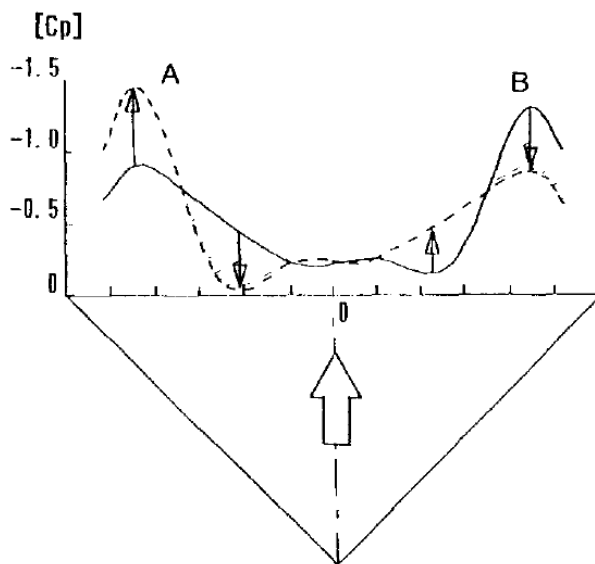


Σχήμα 3.26: Κατανομή συντελεστή πίεσης α) διαμήκους διαγώνιου και β) εγκάρσιας διαγώνιου και καμπύλη προσαρμογής των σημείων (δεδομένα από [4])

Για την εγκάρσια διαγώνιο ενδιαφέρον παρουσιάζει, όχι μόνο η χρονικά μέση τιμή, αλλά και η στιγμιαία κατανομή της πίεσης, λόγω περιοδικής μεταβολής της σπείρας και της έντασης των κωνικών στροβίλων. Οι θέσεις των ελαχίστων εκτελούν περιοδική κίνηση πλευρικά (Σχήμα 3.27) και παράλληλα οι τιμές των ελαχίστων εναλλάσσονται. Οπότε προκύπτει δυναμική κατανομή της πίεσης (Σχήμα 3.28) με περιοδική συμπεριφορά.



Σχήμα 3.27: Ο συντελεστής πίεσης της εγκάρσιας διαγώνιου της οροφής όπως προκύπτει από την περιοδική μετακίνηση των αξόνων της σπείρας των στροβίλων [5]



Σχήμα 3.28: Περιοδική μεταβολή του συντελεστή πίεσης της εγκάρσιας διαγώνιου της οροφής α) για μέγιστη ένταση αριστερού και β) για μέγιστη ένταση δεξιού στροβίλου [52]

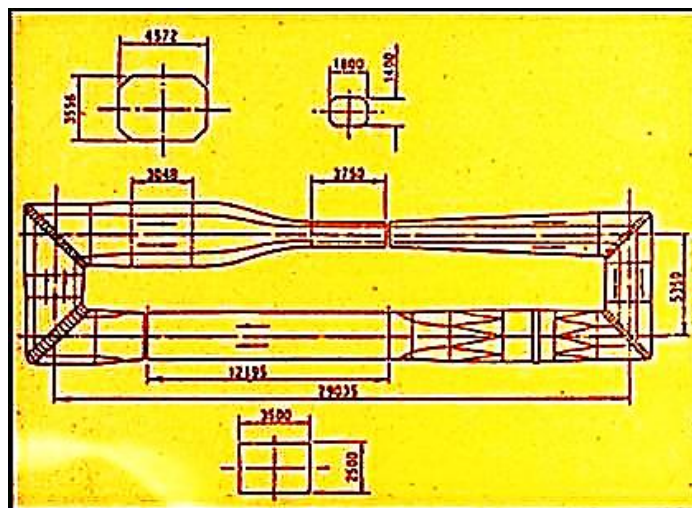


# Κεφάλαιο 4

## Πειραματική διάταξη και τεχνικές μετρήσεων

### 4.1 Η αεροδυναμική σήραγγα

Η κύρια εγκατάσταση του εργαστηρίου αεροδυναμικής του ΕΜΠ, είναι η αεροδυναμική σήραγγα (Σχήμα 4.1), η οποία είναι χαμηλής ταχύτητας (υποηχητική) και κλειστού τύπου. Είναι υψηλής ακρίβειας μετρήσεων εγκατάσταση η οποία μπορεί να εξυπηρετήσει μια ευρεία ποικιλία πειραματικών εφαρμογών. Διαθέτει αξονικό φυσητήρα 8 περυγίων με διάμετρο 2.67m, ο οποίος τροφοδοτείται από ηλεκτροκινητήρα συνεχούς ρεύματος ισχύος 300kW [69]. Το συνολικό μήκος της σήραγγας είναι 32m και έχει τρεις χώρους δοκιμών, τον μικρό, τον μεσαίο και τον μεγάλο χώρο δοκιμών.



Σχήμα 4.1: Σκαρίφημα της αεροδυναμικής σήραγγας, όπου επάνω δεξιά είναι ο μικρός χώρος δοκιμών, κάτω ο μεσαίος χώρος δοκιμών και επάνω αριστερά ο μεγάλος χώρος δοκιμών

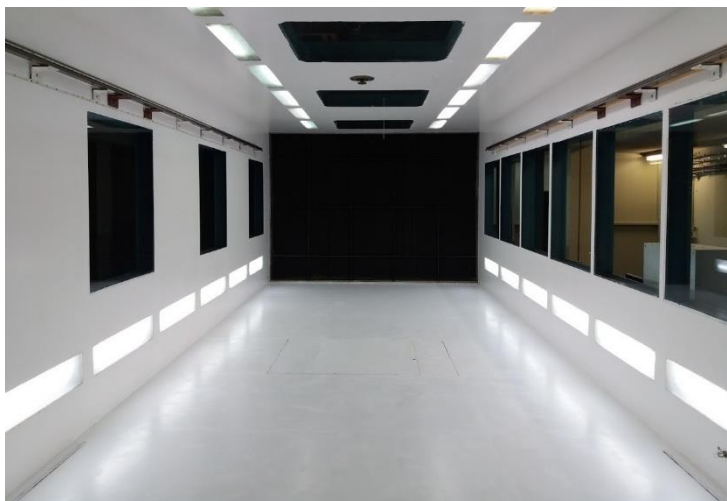
Χώρος δοκιμών	Πλάτος [m]	Ύψος [m]	Μέγιστη ταχύτητα [m/s]
Μεγάλος	4.5	3.5	9.5
Μεσαίος	3.5	2.5	17.0
Μικρός	1.8	1.4	60.0

Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά των χώρων δοκιμών

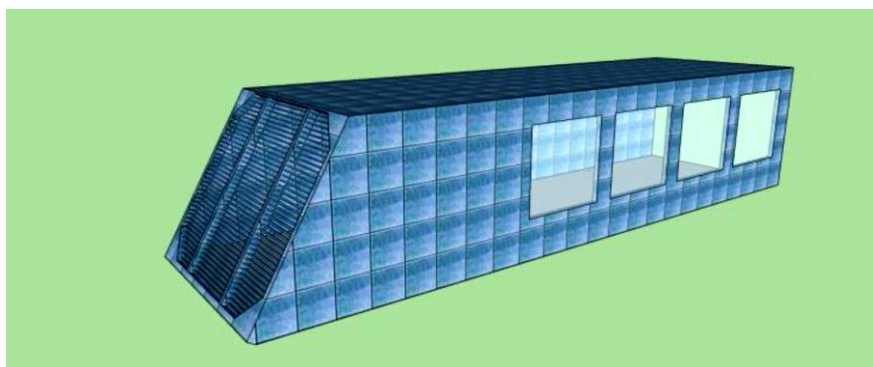
Ο μεγάλος χώρος δοκιμών έχει διαστάσεις πλάτους 4.5m και ύψους 3.5m και αναπτύσσει μέγιστη ταχύτητα ροής 9.5m/s. Είναι ιδανικός χώρος για την δοκιμή μικρών ανεμοκινητήρων.

Ο μικρός χώρος δοκιμών έχει διαστάσεις πλάτους 1.8 m και ύψους 1.4 m και αναπτύσσει μέγιστη ταχύτητα ροής 60m/s με επίπεδο τύρβης 0.2%. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την δοκιμή δισδιάστατων αεροτομών, πτερύγια αεροσκαφών, ατράκτων, μοντέλα αεροσκαφών, οχημάτων κλπ.

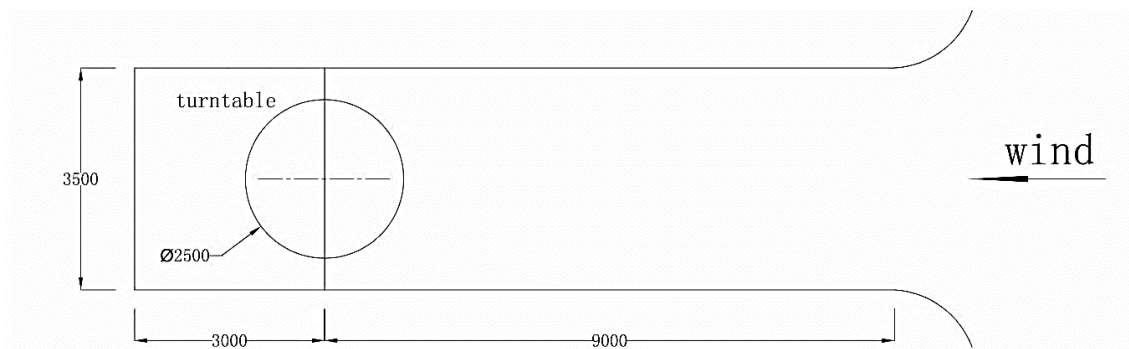
Ο μεσαίος χώρος δοκιμών (Σχήμα 4.2, Σχήμα 4.3, Σχήμα 4.4) είναι ο χώρος που πραγματοποιήθηκε το πείραμα. Έχει διαστάσεις πλάτους 3.5m, ύψους 2.5m, και μήκους 12m και αναπτύσσει μέγιστη ταχύτητα ροής 17m/s. Διαθέτει ηλεκτρικά ελεγχόμενη περιστρεφόμενη τράπεζα (turntable) διαμέτρου 2.5m. Είναι ιδανικός χώρος για την μελέτη μικρών ανεμοκινητήρων και βιομηχανικών εφαρμογών, όπως οπτικοποίηση της ροής και εκτίμηση των αεροδυναμικών δυνάμεων που ασκούνται σε κτηριακές κατασκευές, μελέτες διασποράς ρυπαντών και άλλα.



Σχήμα 4.2: Φωτογραφία εντός του μεσαίου χώρου δοκιμών της σήραγγας



Σχήμα 4.3: Τρισδιάστατο μοντέλο του μεσαίου χώρου δοκιμών της σήραγγας [37]



Σχήμα 4.4: Σκαρίφημα κάτοψης του μεσαίου χώρου δοκιμών της σήραγγας [37]

## 4.2 Τεχνική προσομοίωσης ΑΟΣ

Η προσομοίωση του ΑΟΣ πραγματοποιείται με διάφορες μεθόδους, οι οποίες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο κύριες, τις ενεργητικές και τις παθητικές μεθόδους. Για την επίτευξη μεγάλης κλίμακας προσομοίωσης, είναι απαραίτητη η διεξαγωγή του πειράματος σε αρκετά μεγάλη σήραγγα [62], διότι απαιτείται μήκος 20-30 m για την διαμόρφωση ικανοποιητικώς του οριακού στρώματος.

Οι ενεργητικές μέθοδοι είναι αυτές που χρησιμοποιούν ως γεννήτριες τύρβης, δέσμες αέρα (air jets) για την παραγωγή του ΑΟΣ [70]. Μάλιστα μπορεί να επιτευχθεί και θερμοκρασιακή στρωμάτωση του ΑΟΣ για προσομοίωση διαφόρων καταστάσεων ευστάθειας της ατμόσφαιρας. Βέβαια στρωμάτωση μπορεί να επιτευχθεί και με παθητικές μεθόδους χρησιμοποιώντας θερμαντικά στοιχεία στο έδαφος ή και ανάντι της ροής [71]. Στις παθητικές μεθόδους ως γεννήτριες τύρβης χρησιμοποιούνται εμπόδια όπως πλέγμα, επίπεδες πλάκες, τοίχιο, τριγωνικές πλάκες, τάπητες και άλλα [72].

Σε μικρότερου μήκους σήραγγα, επιτυχημένη προσομοίωση παρουσιάζει ο συνδυασμός οβελίσκων (spires) στην αρχή της σήραγγας, με στοιχεία τραχύτητας (roughness elements) στο έδαφος κατά μήκος της σήραγγας [73].

Έχουν πραγματοποιηθεί προσομοιώσεις με οβελίσκους διαφόρων σχημάτων όπως ελλειπτικοί (elliptic spires), τριγωνικοί (triangular spires), τα δύο προηγούμενα με κομμένα τα επάνω άκρα τους (truncated) και διάφορες άλλες τεχνικές [25],[72],[74],[75],[76].

Ως στοιχεία τραχύτητας εδάφους επιτυχώς χρησιμοποιούνται κύβοι ή πρίσματα. Έχει χρησιμοποιηθεί και ομοιόμορφη κατανομή των στοιχείων σε όλη την επιφάνεια αλλά και διαφορετικές πυκνότητες των στοιχείων ανά μονάδα επιφάνειας. Επίσης, ως στοιχεία τραχύτητας, έχουν χρησιμοποιηθεί τάπητες, χαλίκι, κυλινδρικά στοιχεία και άλλα ακανόνιστα σχήματα [72].

Από τον Counihan [76],[77] προτάθηκε για προσομοίωση σε μικρό μήκος σήραγγας τον συνδυασμό ειδικά διαμορφωμένου τοιχίου (castellated barrier wall) και ελλειπτικών

οβελίσκων στην αρχή της σήραγγας και κατά μήκος της σήραγγας στοιχεία τραχύτητας για την προσομοίωση του εδάφους (Σχήμα 4.5). Με τους οβελίσκους επιτυγχάνεται η αύξηση του οριακού στρώματος ενώ με τα στοιχεία τραχύτητας προσομοιώνεται το η τραχύτητα του εδάφους.



Σχήμα 4.5: Πειραματική διάταξη προσομοίωσης οριακού στρώματος κατά Counihan [78]

#### 4.2.1 Οβελίσκοι

Ο Irwin [73] πρότεινε μια εναλλακτική μορφή παθητικών στοιχείων. Πρότεινε τριγωνικούς οβελίσκους και κυβικά στοιχεία τραχύτητας (Σχήμα 4.6, Σχήμα 4.7α). Προκειμένου σε σήραγγα ύψους  $H$  (2.5m) να επιτευχθεί ύψος οριακού στρώματος  $\delta$  για την επίτευξη του ύψους του οριακού στρώματος με συγκεκριμένη κατατομή μέσης ταχύτητας κατά τον εκθετικό νόμο με εκθέτη  $\alpha$ :

$$\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{ref}} = \left( \frac{z}{z_{ref}} \right)^\alpha \quad (4.1)$$

τότε οι διαστάσεις και διάταξη των οβελίσκων ( $b \cdot h$ ) (Σχήμα 4.7α) υπολογίζονται από τις εξισώσεις (ή και το Σχήμα 4.7β):

$$h = 1.39\delta / (1 + \alpha/2) \quad (4.2)$$

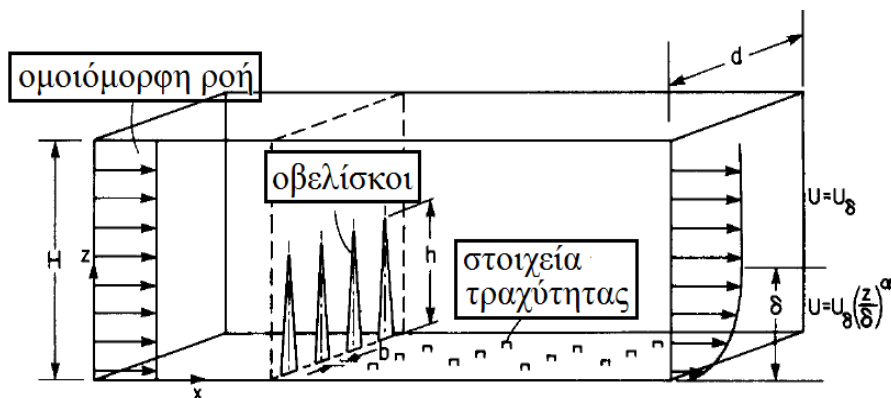
$$\frac{b}{h} = 0.5(1 + \alpha/2) \frac{H}{\delta} \cdot \frac{\psi}{(1 + \psi)} \quad (4.3)$$

$$\psi = \frac{\beta}{(1 - \beta)^2} \left[ \frac{2}{1 + 2\alpha} + \beta - \frac{1.13\alpha}{(1 + \alpha)(1 + \alpha/2)} \right] \quad (4.4)$$

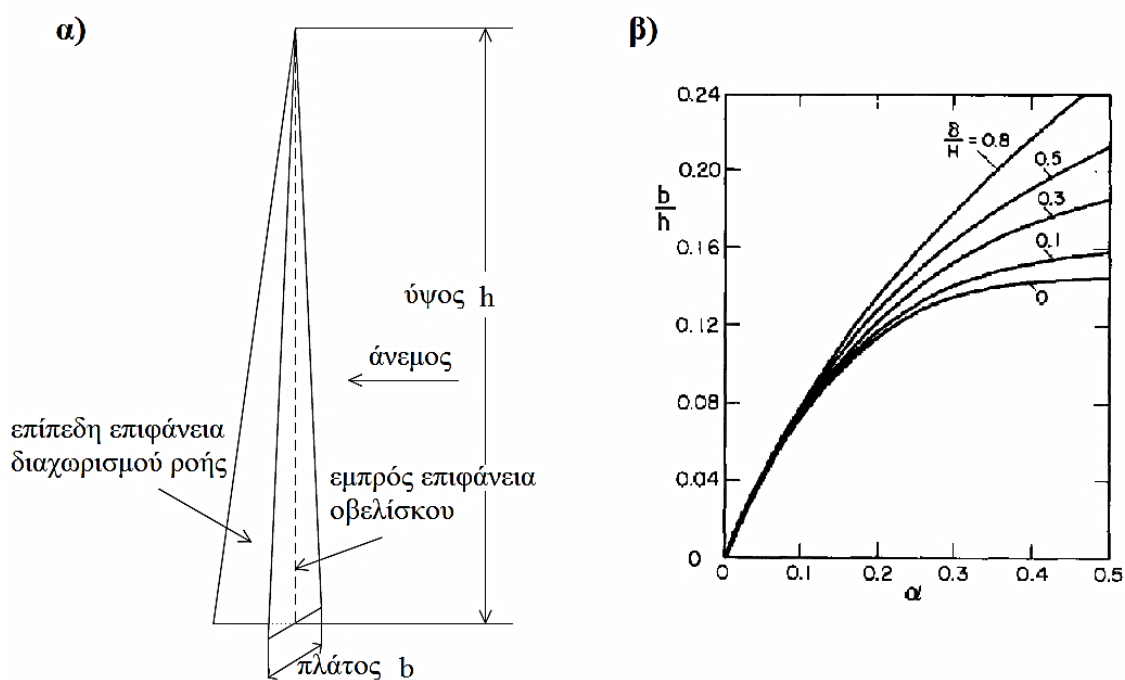
$$\beta = \frac{\delta}{H} \cdot \frac{\alpha}{1 + \alpha} \quad (4.5)$$



Όταν η απόσταση μεταξύ των κέντρων των οβελίσκων είναι  $h/2$ , τότε η απόσταση  $b$  είναι ικανοποιητική για εξασφαλίσει πλευρική ομοιομορφία του οριακού στρώματος.

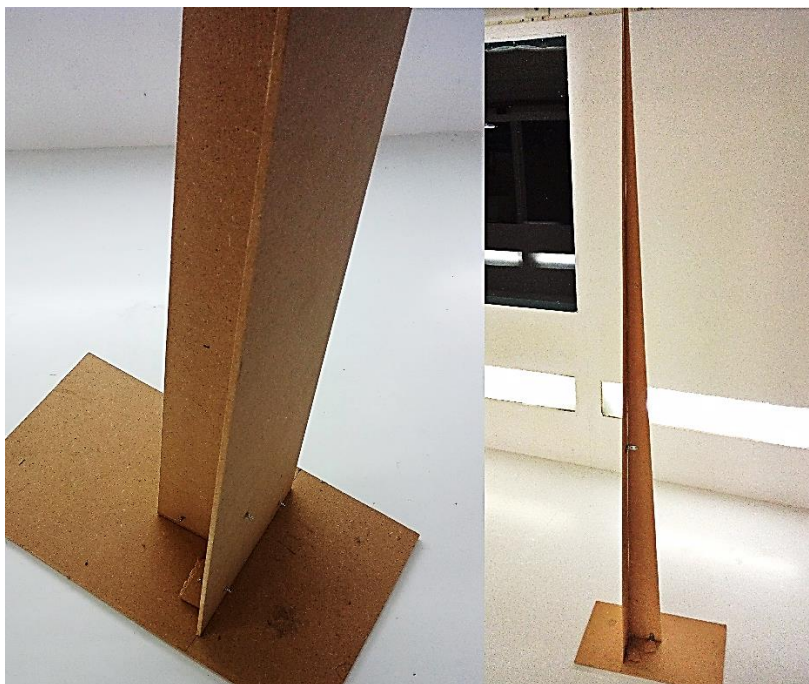


Σχήμα 4.6: Πειραματική διάταξη προσομοίωσης οριακού στρώματος κατά Irwin [73]



Σχήμα 4.7: α) Οβελίσκος κατά Irwin β) λόγος πλάτους-ύψους οβελίσκου συναρτήσει του εκθέτη  $\alpha$  [73]

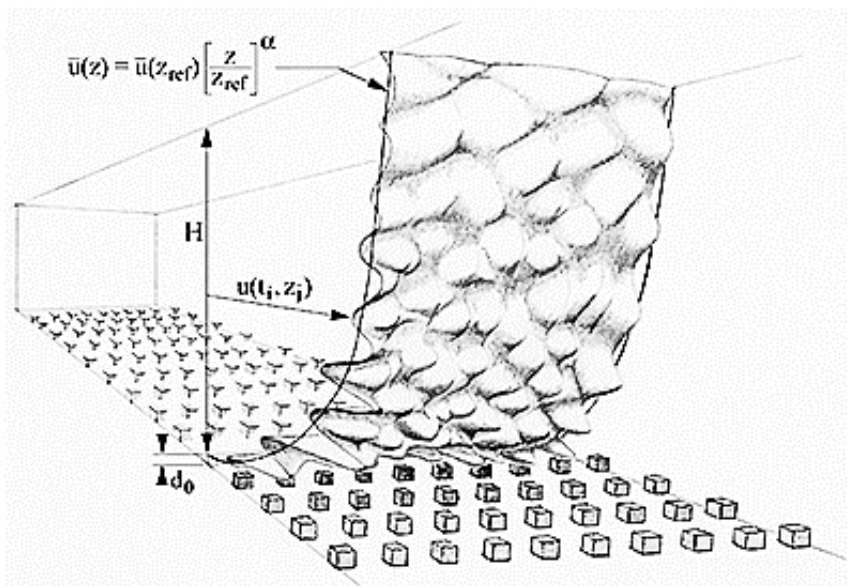
Στο παρόν πείραμα χρησιμοποιήθηκε ο εξοπλισμός των οβελίσκων του Z. Xing [37] (Σχήμα 4.8) ο οποίος με βάση τις παραπάνω κατευθύνσεις σχεδιασμού και κατόπιν δοκιμών, επέλεξε διαστάσεις οβελίσκων  $h=180\text{cm}$ ,  $b=20\text{cm}$  με στόχο ύψος οριακού στρώματος  $\delta=1-1.5\text{m}$  εντός σήραγγας σε τιμές  $\alpha=0.12-0.3$ , και μια κλίμακα αναλογίας 1:300 που θα αντιστοιχεί σε ύψος πραγματικού οριακού στρώματος 400-450m.



Σχήμα 4.8: Αριστερά η βάση του οβελίσκου και δεξιά ο οβελίσκος

#### 4.2.2 Στοιχεία τραχύτητας

Η επιλογή των στοιχείων τραχύτητας γίνεται με σκοπό την προσομοίωση της τραχύτητας του εδάφους (Σχήμα 4.9). Τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα είναι τα πρίσματα και ειδικά οι κύβοι. Για την εκτίμηση του μήκους τραχύτητας που προκύπτει, σημαντικοί είναι οι παράμετροι πυκνότητας των στοιχείων [79]. Έχει αναπτυχθεί μεθοδολογία υπολογισμού στοιχείων τραχύτητας με κυβικά στοιχεία [80],[81].



Σχήμα 4.9: Σχηματική αναπαράσταση διαμόρφωσης οριακού στρώματος με στοιχεία τραχύτητας [82]

Μεταξύ της πλευράς  $k$  των κυβικών στοιχείων και της απόστασης  $D$  μεταξύ αυτών, για ύψος οριακού στρώματος  $\delta$  και εκθέτη  $\alpha$  κατατομής μέσης ταχύτητας, ισχύει η σχέση:

$$\frac{k}{\delta} = \exp \left\{ \frac{2}{3} \ln(D/\delta) - 0.1161 [(2/C_f) + 2.05]^{0.5} \right\} \quad (4.6)$$

όπου:

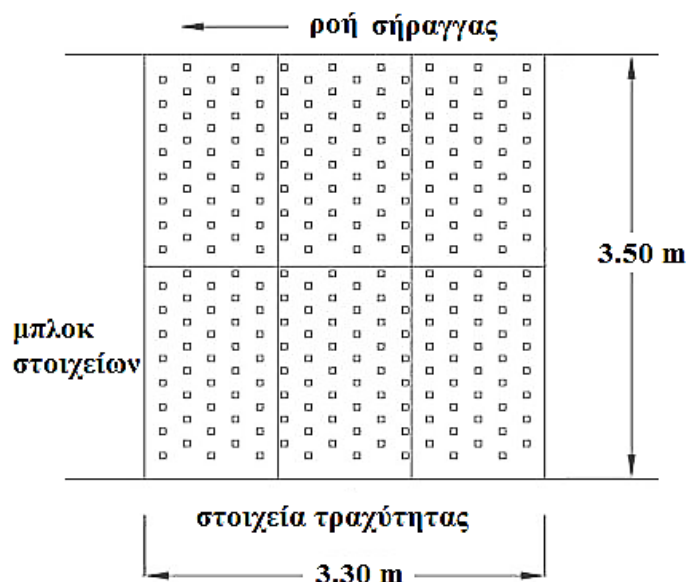
$$C_f = 0.136 \left( \frac{\alpha}{1 + \alpha} \right)^2 \quad (4.7)$$

υπό την προϋπόθεση:

$$30 < \delta D^2 / k^3 < 2000 \quad (4.8)$$

Στο παρόν πείραμα χρησιμοποιήθηκε ο εξοπλισμός στοιχείων τραχύτητας του Z. Xing [37] ο οποίος με βάση τις παραπάνω κατευθύνσεις σχεδιασμού και κατόπιν δοκιμών, επέλεξε πλευρά κύβων  $k=5\text{cm}$  και απόσταση μεταξύ τους  $D=20\text{cm}$ .

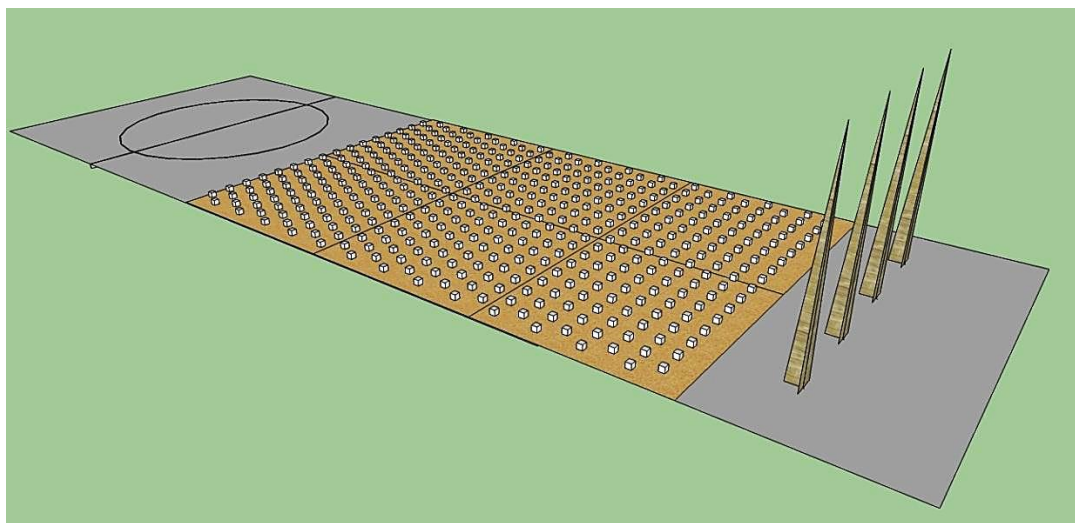
Τα στοιχεία κατασκευάστηκαν από διογκωμένη πολυστερίνη (φελιζόλ) και τοποθετήθηκαν σε έξι μπλοκ διαστάσεων  $175\text{ cm}$  επί  $110\text{ cm}$  τα οποία καταλαμβάνουν μήκος σήραγγας  $3.30\text{ m}$  (Σχήμα 4.10). Έτσι μπορούν να κινηθούν κατά μήκος της σήραγγας ώστε να επιτυγχάνεται η προσομοίωση, διαφορετικού οριακού στρώματος με μία απλή μετακίνηση των μπλοκ κατά μήκος της ροής.



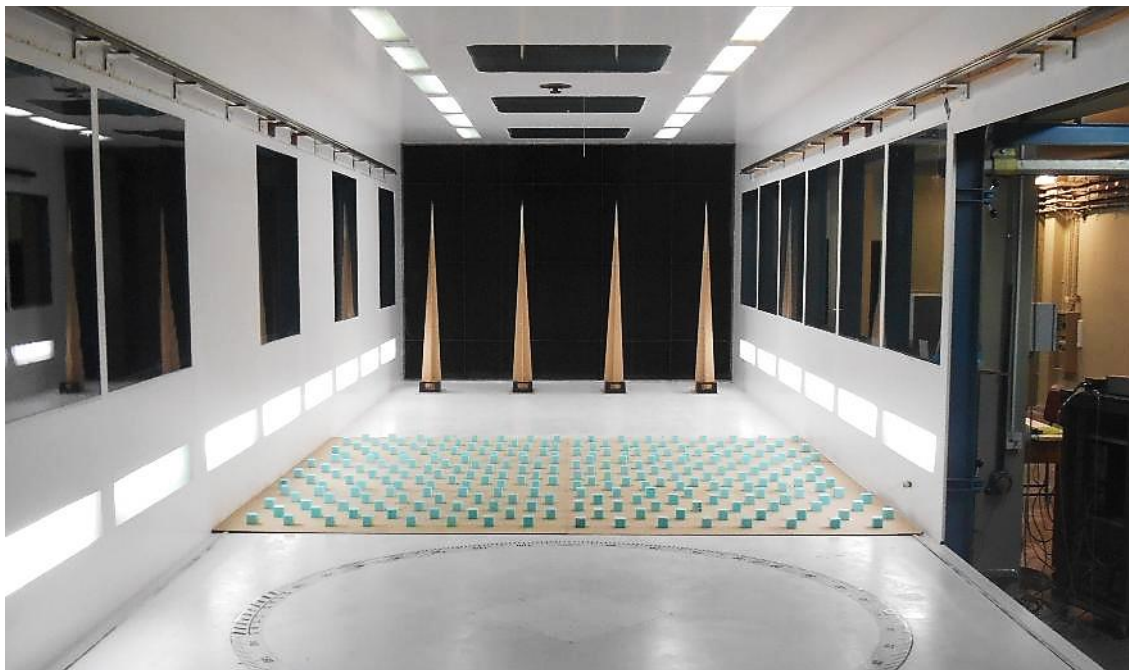
Σχήμα 4.10: Σκαρίφημα τοποθέτησης των μπλοκ των στοιχείων τραχύτητας στην σήραγγα [37]

### 4.2.3 Διάταξη οβελίσκων και στοιχείων τραχύτητας

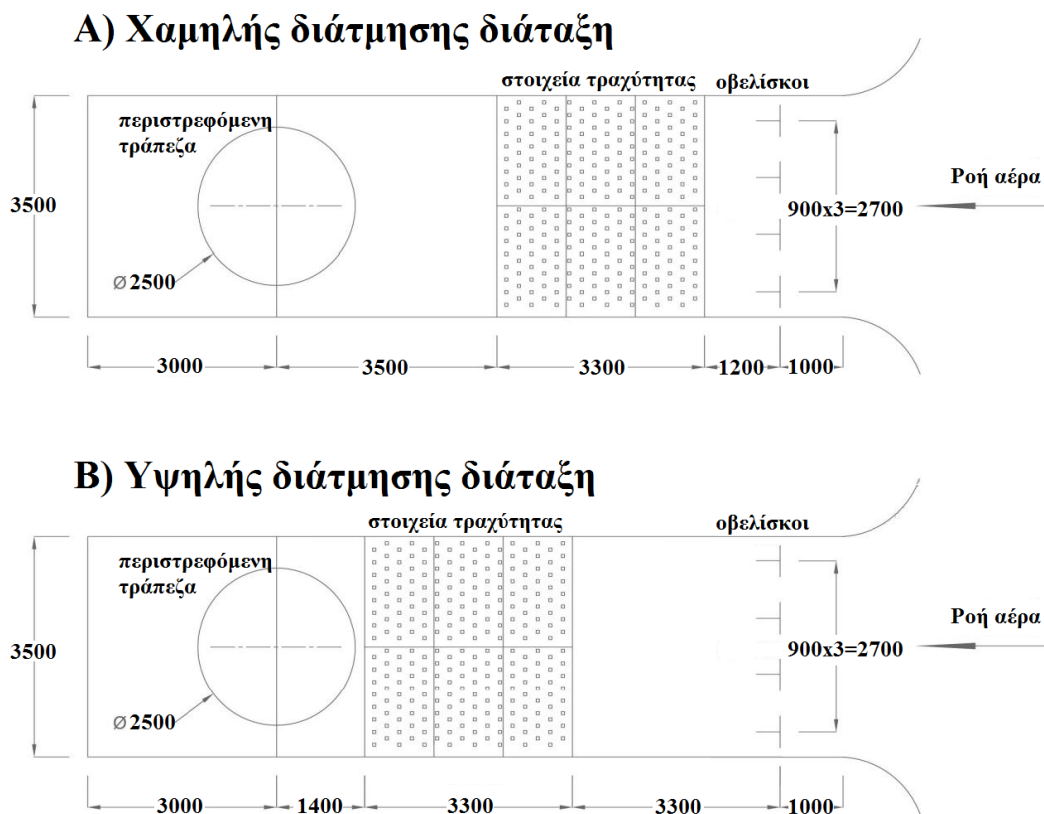
Στο παρόν πείραμα επιλέχθηκαν δύο συνδυασμοί διατάξεων. Μία διάταξη για Α) χαμηλή διάτμηση του οριακού στρώματος και μία διάταξη για Β) υψηλή διάτμηση. Για δεδομένη θέση των οβελίσκων ανάντι της ροής, τα στοιχεία τραχύτητας εγγύς των οβελίσκων αναπαράγουν χαμηλής διάτμησης οριακό στρώμα ενώ απομακρυνόμενα υπάρχει αύξηση της διάτμησης. Έτσι επιλέχθηκαν δύο συνδυασμοί κατά Z. Xing που επιτυγχάνεται (Σχήμα 4.11, Σχήμα 4.12, Σχήμα 4.13).



Σχήμα 4.11: Τρισδιάστατος σχεδιασμός της διάταξης των γεννητριών τύρβης (όχι σε κλίμακα) [37]



Σχήμα 4.12: Διάταξη οβελίσκων και στοιχείων τραχύτητας για το υψηλής διάτμησης οριακό στρώμα (B)



Σχήμα 4.13: Διάταξη των γεννητριών τύρβης για A) χαμηλής διάτμησης B) υψηλής διάτμησης οριακό στρώμα [37]

#### 4.2.4 Ομοιότητα προσομοίωσης

Για την προσομοίωση του ΑΟΣ, η κλίμακα μεγέθους του κτηρίου πρέπει να επιλεγεί, ώστε μεταξύ πρωτότυπου και μοντέλου, να είναι ίσος ο λόγος των γεωμετρικών διαστάσεων και σημαντικών μετεωρολογικών μηκών της ροής. Κατά ASCE [83] η επιλογή κλίμακας μήκους πρέπει να ικανοποιεί κατά το δυνατόν καλύτερα, τους παρακάτω λόγους ομοιότητας:

$$\left(\frac{L_b}{z_o}\right)_m = \left(\frac{L_b}{z_o}\right)_p \quad (4.9)$$

$$\left(\frac{L_b}{z_g}\right)_m = \left(\frac{L_b}{z_g}\right)_p \quad (4.10)$$

$$\left(\frac{L_b}{L_t}\right)_m = \left(\frac{L_b}{L_t}\right)_p \quad (4.11)$$

όπου  $L_b$  είναι το μήκος κλίμακας του κτηρίου (συνήθως το ύψος του),  $z_o$  το μήκος τραχύτητας,  $z_g$  το ύψος του ανέμου κλίσης, δηλαδή το ύψος του οριακού στρώματος,  $L_t$  η χαρακτηριστική κλίμακα μήκους της τύρβης της ροή και οι δείκτες  $m$  και  $p$  αναφέρονται στο προσομοιούμενο μοντέλο και στο πρωτότυπο, αντίστοιχα.

Ο Cook [84] προτείνει μεθοδολογία με την οποία μπορεί να υπολογιστεί η επιτυγχανόμενη κλίμακα αναλογίας  $S$  μεταξύ πραγματικού και προσομοιούμενου οριακού στρώματος. Η μέθοδος στηρίζεται σε μετρημένη κατατομή της ολοκληρωτικής κλίμακας μήκους της τύρβης  $Lu_x$  καθ' ύψος  $z$ , εντός του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος, η οποία περιγράφεται από την σχέση:

$$Lu_x = 25 \frac{z^{0.35}}{z_0^{0.063}} \quad (4.12)$$

Υποθέτοντας ότι η σταθερά αναλογίας  $S$  θα πρέπει να συνδέει το πραγματικό οριακό στρώμα με το προσομοιούμενο, η κατατομή της προσομοιούμενης ολοκληρωτικής κλίμακας μήκους της τύρβης  $Lu_x$  θα είναι [84]:

$$S * Lu_{x_m} = 25[S * z_m]^{0.35} [S * z_{0_m}]^{-0.063} \quad (4.13)$$

όπου ο δείκτης  $m$  αναφέρεται στο προσομοιούμενο μοντέλο. Επιλύοντας ως προς  $S$ :

$$S = \frac{91.3 z_m^{0.491}}{Lu_{x_m}^{1.403} z_{0_m}^{0.088}} \quad (4.14)$$

Για την δυναμική ομοιότητα του αριθμού Reynolds, έχει υποδειχθεί ότι για τιμές αριθμού  $Re > 4 \times 10^3$  υπάρχει ανεξαρτησία της ροής από επιδράσεις αριθμού Reynolds και μπορεί να αγνοηθεί [4].

### 4.3 Μέτρηση χαρακτηριστικών ΑΟΣ

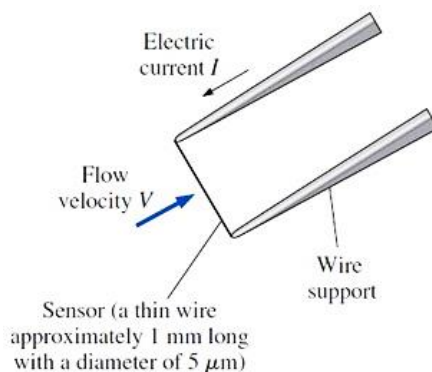
Η μέτρηση της μέσης ταχύτητας του ανέμου μπορεί να πραγματοποιηθεί με αρκετούς τρόπους, όπως με οπτικοποίηση της ροής με καπνό, σωλήνα pitot, τεχνική laser Doppler και άλλα. Όμως για την μέτρηση της τύρβης του ανέμου απαιτείται μία μέθοδος ικανή ώστε να καταγράφει τις τάχιστες διακυμάνσεις της ταχύτητας με υψηλή ακρίβεια και σε κλίμακα χρόνου της τάξεως του millisecond ή 1 kilohertz. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί με την μέθοδο του θερμού νήματος (hot-wire) - σταθερής θερμοκρασίας (CTA).

#### 4.3.1 Θερμό νήμα

Η μέθοδος του θερμού νήματος μετρά την ταχύτητα σε ένα σημείο με υψηλή ακρίβεια και υψηλή συχνότητα απόκρισης. Η μέθοδος μετρά την ταχύτητα του ανέμου μέσω της αλλαγής στην μεταφορά θερμότητας από τον αισθητήρα, που θερμαίνεται ηλεκτρικά, προς το ρευστό που εκτίθεται (Σχήμα 4.14).

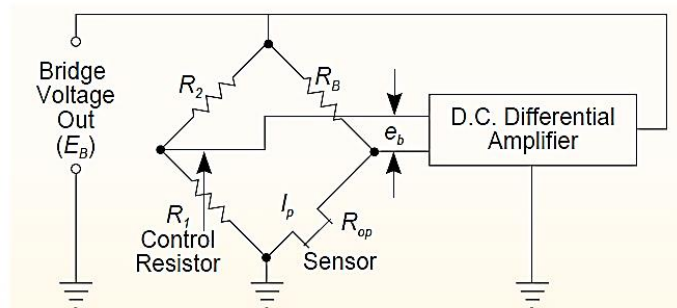
Η διάταξη θερμού νήματος σταθερής θερμοκρασίας αποτελείται από τον αισθητήρα (probe) και το κύκλωμα ελέγχου (Σχήμα 4.15). Ο αισθητήρας διατηρείται σε σταθερή

θερμοκρασία μέσω κυκλώματος ανάδρασης, και συγκεκριμένα γέφυρα Wheatstone και ενισχυτή τάσης. Ο ενισχυτής αναλαμβάνει την διατήρηση της γέφυρας σε ισορροπία



Σχήμα 4.14: Απεικόνιση του αισθητήρα θερμού νήματος [85]

Όταν η γέφυρα είναι εκτός ισορροπίας, τότε προσαρμόζει την τάση κατάλληλα ώστε να επανέλθει η ισορροπία. Εφόσον η θερμοκρασία του νήματος διατηρείται σταθερή, εάν αυξηθεί η ταχύτητα του ρευστού, θα πρέπει η παραγόμενη θερμότητα από το νήμα να αυξηθεί επειδή αυξάνεται η απαγωγή θερμότητας από το ρευστό. Αυτό επιτυγχάνεται με αύξηση έντασης του ρεύματος, που γίνεται από τον ενισχυτή και το αντίθετο συμβαίνει όταν μειώνεται η ταχύτητα του ρευστού. Έτσι η τάση της γέφυρας μπορεί να συσχετιστεί με την ταχύτητα της ροής στον αισθητήρα.



Σχήμα 4.15: Κύκλωμα μονάδας ελέγχου θερμού νήματος σταθερής θερμοκρασίας [86]

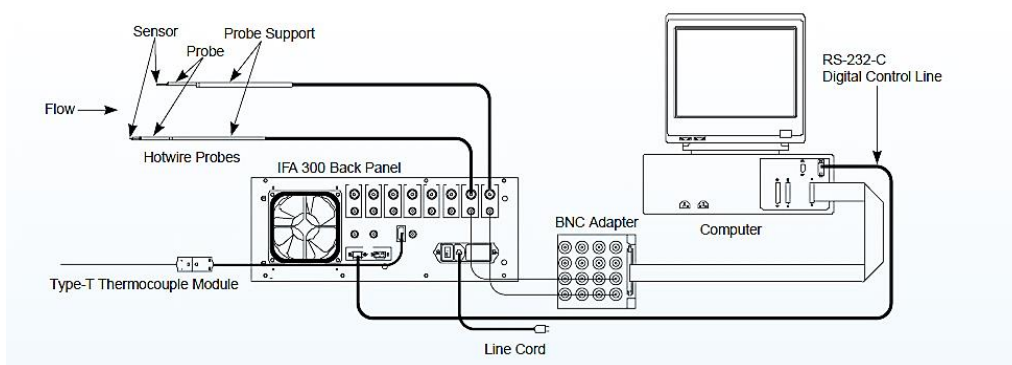
### 4.3.2 Διάταξη θερμού νήματος

Η διάταξη για την μέτρηση του παρόντος πειράματος απαρτίζεται κυρίως από τον αισθητήρα (probe), την συσκευή IFA300 και τον υπολογιστή για τον έλεγχο και την καταγραφή των δεδομένων (Σχήμα 4.16, Σχήμα 4.17, Σχήμα 4.18), μέσω του προγράμματος ThermalPro.

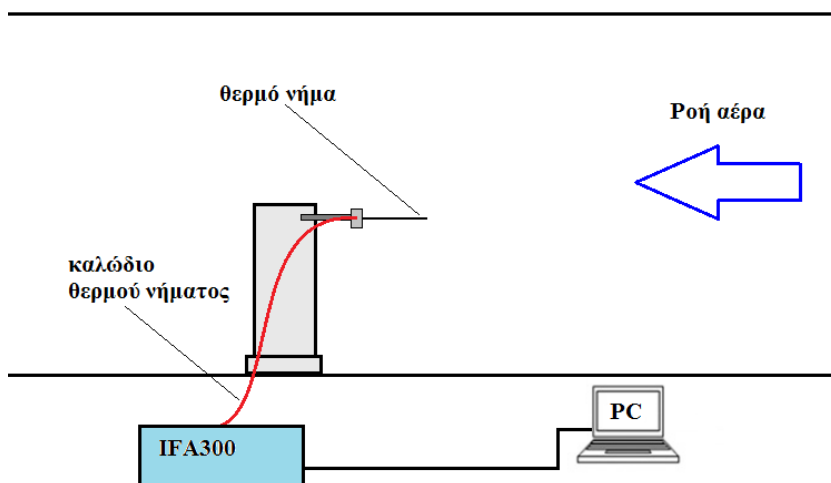
Ο αισθητήρας τοποθετείται στην βάση στήριξης (probe support). Η βάση στήριξης είναι της TSI και είναι το μοντέλο Model 1155-6 Standard Probe Support (Σχήμα 4.19, Σχήμα 4.21) και συνδέεται με το IFA300 μέσω καλωδίωσης. Έχει την δυνατότητα

χρησιμοποίησης διαφορετικών αισθητήρων. Επίσης η βάση στήριξης μπορεί να υποστηρίξει και αισθητήρες μέτρησης δύο διαστάσεων (X-wire). Άλλες βάσεις στήριξης μπορούν να υποστηρίξουν και αισθητήρες μετρήσεως τριών διαστάσεων (3D-wire).

Στην βάση τοποθετείται ο αισθητήρας θερμού νήματος ο οποίος είναι της TSI και είναι το μοντέλο Model 1201-06 Disposable Probe (Σχήμα 4.20, Σχήμα 4.22, Σχήμα 4.23).



Σχήμα 4.16: Διάταξη συσκευής θερμού νήματος IFA300 [86]



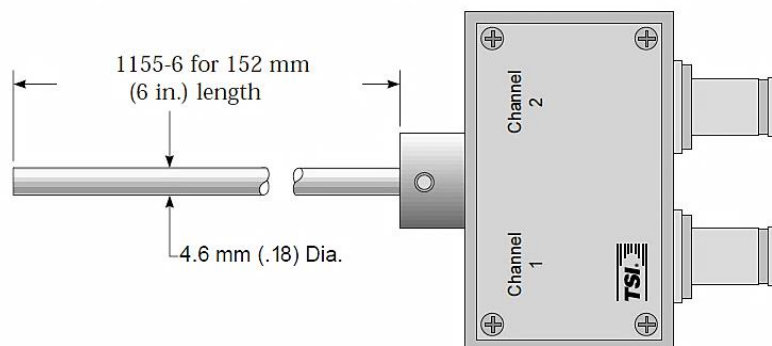
Σχήμα 4.17: Διάταξη μέτρησης της ταχύτητας μέσω θερμού νήματος



Σχήμα 4.18: Διάταξη συσκευής θερμού νήματος IFA300 [86] και πίσω όψη της συσκευής IFA300

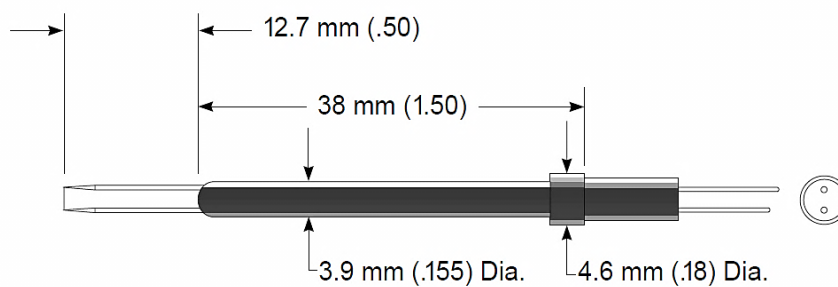


### Model 1155 Standard Probe Support



Σχήμα 4.19: Σχέδιο βάσης στήριξης θερμού νήματος από κατάλογο [86]

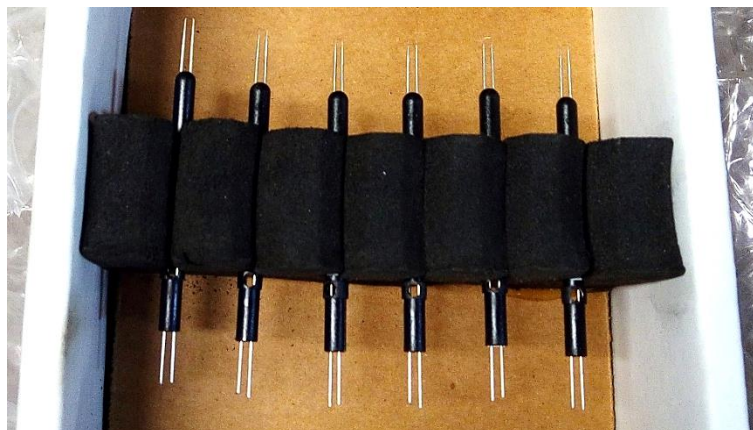
### Model 1201 Disposable Probe



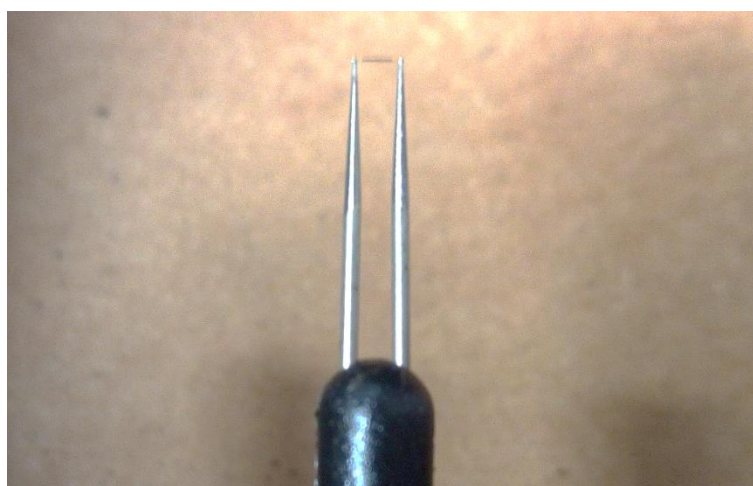
Σχήμα 4.20: Σχέδιο του θερμού νήματος από κατάλογο [86]



Σχήμα 4.21: Βάση στήριξης θερμού νήματος



Σχήμα 4.22: Αισθητήρες θερμού νήματος

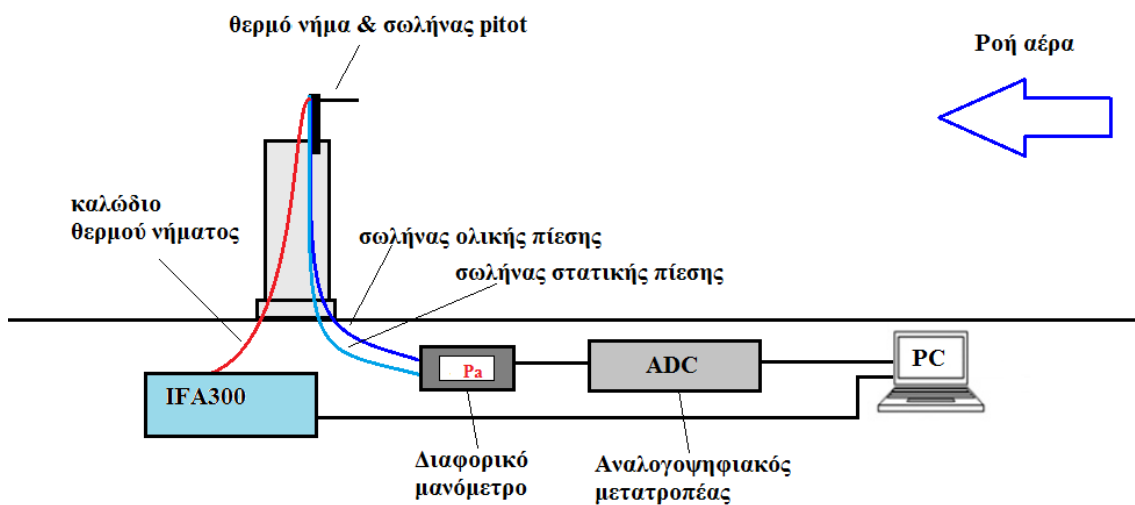


Σχήμα 4.23: Λεπτομέρεια αισθητήρα θερμού νήματος

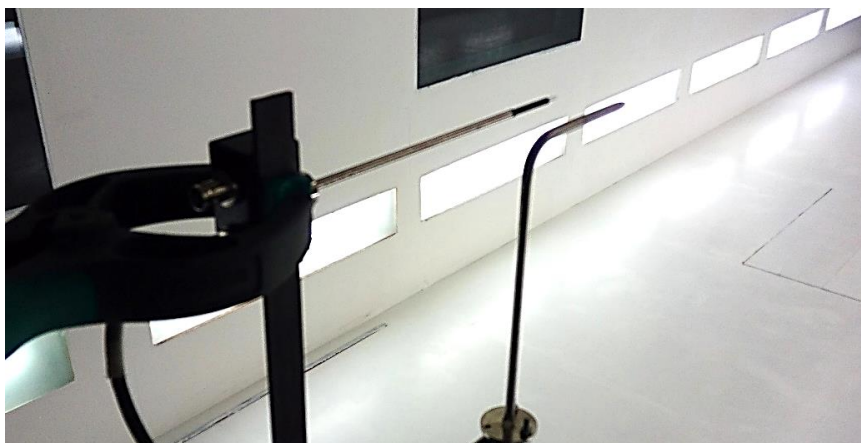
### 4.3.3 Βαθμονόμηση θερμού νήματος

Για την μέτρηση μέσω θερμού νήματος απαιτείται βαθμονόμηση του αισθητήρα για την συσχέτιση της τάσης της γέφυρας με την ταχύτητα της ροής. Η μέθοδος είναι η μέτρηση ροής, γνωστής ταχύτητας.

Η ταχύτητα της ροής θα πρέπει να μεταβάλλεται από μηδέν μέχρι λίγο πάνω από το όριο ταχύτητας που μελετάται. Ο έλεγχος της ταχύτητας γίνεται μέσω των στροφών του φυσητήρα της σήραγγας και η ταχύτητα της ροής που προκύπτει προσδιορίζεται μέσω σωλήνα pitot. Ο σωλήνας pitot και το θερμό νήμα τοποθετούνται το ένα κοντά στο άλλο (Σχήμα 4.24) ώστε η ταχύτητα να είναι ίδια μεταξύ τους. Ο σωλήνας pitot συνδέεται με το διαφορικό μανόμετρο FCO16 της Furness Controls Ltd, του οποίου το σήμα λαμβάνεται από αναλογο-ψηφιακό μετατροπέα (ADC), που συνδέεται με τον υπολογιστή για την καταγραφή της δυναμικής πίεσης  $q$  (Σχήμα 4.25). Περισσότερα επί της βαθμονόμησης στο κεφάλαιο 5.



Σχήμα 4.24: Σχεδιάγραμμα διαδικασίας βαθμονόμησης (όχι σε κλίμακα)



Σχήμα 4.25: Διαδικασία βαθμονόμησης όπου το θερμό νήμα είναι αριστερά και ο σωλήνας pitot δεξιά.

## 4.4 Μέτρηση πιέσεων στην επιφάνεια του κύβου

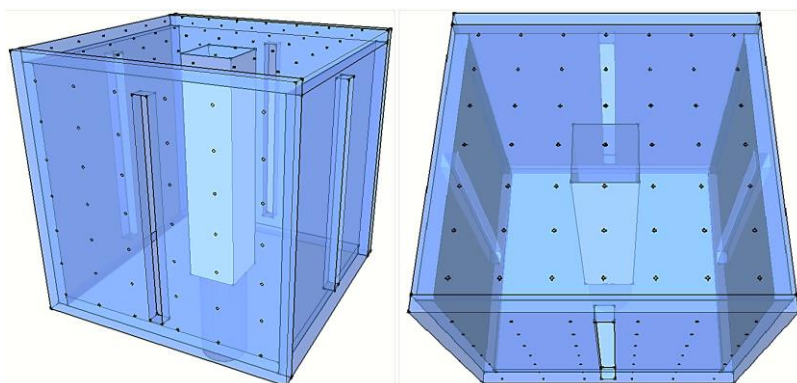
### 4.4.1 Ο πρότυπος κύβος

Το πειραματικό πρότυπο της παρούσας πειραματικής διάταξης, αποτελεί ένας κύβος. Ο πρότυπος κύβος (Σχήμα 4.26, Σχήμα 4.27) κατασκευάστηκε και χρησιμοποιήθηκε για διπλωματική εργασία από τον Π. Κουτσελάκη [43]. Το πρότυπο του κτηρίου είναι κυβικής μορφής με πλευρές από τετράγωνα φύλλα Plexiglass πάχους 5 mm και πλευράς  $H=0.11$  m. Η κάθε κατακόρυφη πλευρά έχει ένα κατακόρυφο άνοιγμα 90mm x 6mm, το οποίο αντιστοιχεί σε περίπου 4.5% του εμβαδού της. Το κατακόρυφο άνοιγμα αυτό, μπορεί να καλύπτεται μερικώς ή ολικώς, ώστε να προσομοιώνονται διαφορετικά σενάρια συνδυασμών.

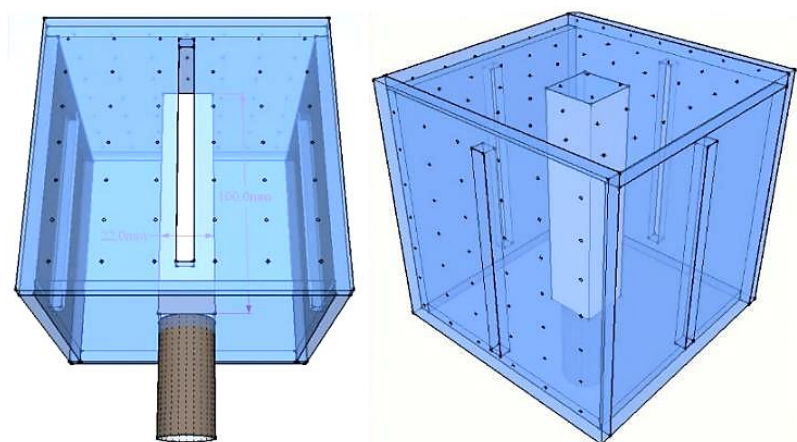
Για τη μέτρηση κατανομής πίεσης, στη μία από τις κάθετες πλευρές τοποθετήθηκαν 42 απολήψεις πίεσης και στην οροφή άλλες 49 (Σχήμα 4.28, Σχήμα 4.29). Στις απολήψεις συνδέθηκαν σωλήνες σιλικόνης, εξωτερικής διαμέτρου 2mm και εσωτερικής 0.5mm .

Προκειμένου να διευκολυνθεί μελλοντική υπολογιστική προσομοίωση, 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. Με τον τρόπο αυτό οι επιφάνειες στο εσωτερικό του κύβου ήταν λείες και το μόνο εμπόδιο ήταν η κεντρική στήλη τετραγωνικής διατομής (Σχήμα 4.26, Σχήμα 4.27).

Μετάπειτα τα σωληνάκια των 2mm ενώθηκαν με διαφανή σωληνάκια σιλικόνης εσωτερικής διαμέτρου 2mm και εξωτερικής 4mm, τα οποία με τη σειρά τους συνδέθηκαν μέσω ρακόρ σε κανάλια πολυαιθυλενίου εξωτερικής διαμέτρου 4mm και εσωτερικής 2.6mm, όπου και αριθμήθηκαν, για ευκολότερη διασύνδεση τους μετέπειτα.



Σχήμα 4.26: Ο πρότυπος κύβος [43]



Σχήμα 4.27: Ο πρότυπος κύβος [43]





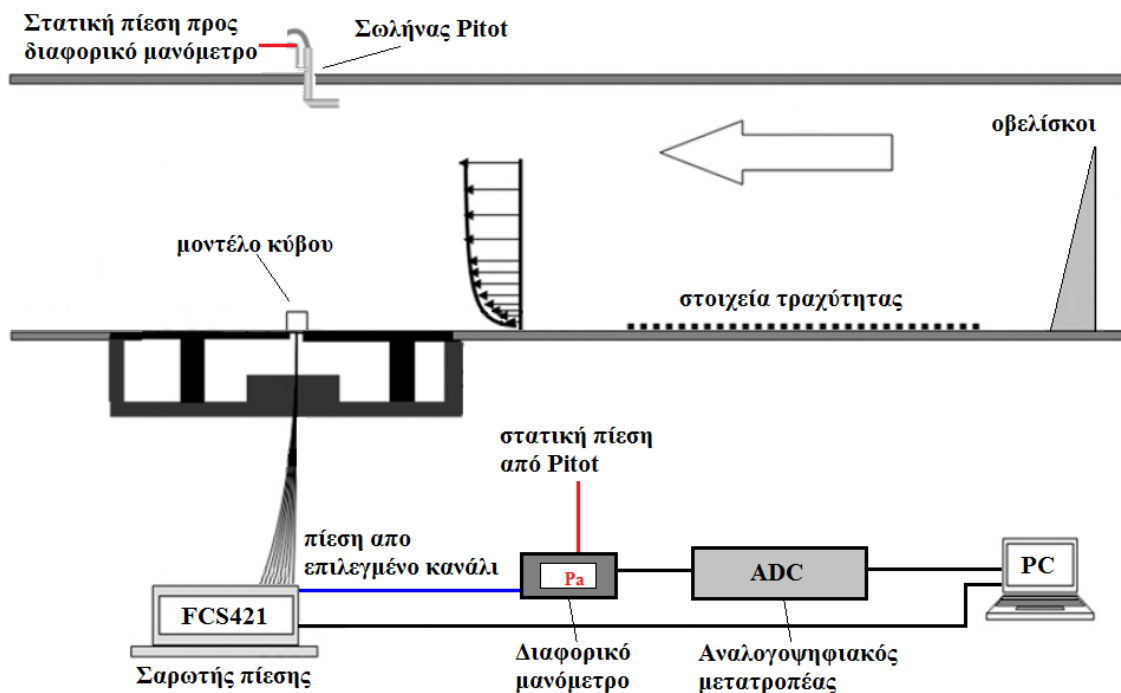
Σχήμα 4.30: Αριστερά ο σαρωτής πίεσης FCS421 [87] και δεξιά το διαφορικό μανόμετρο FCO16 [37]

Ο κύβος τοποθετείται στην περιστρεφόμενη τράπεζα (Σχήμα 4.31) και τα κανάλια των οπών οδηγούνται από κάτω και εξέρχονται της σήραγγας, όπου και θα συνδεθούν στον σαρωτή πίεσης. Στον σαρωτή πίεσης εξέρχεται ένα κανάλι, του οποίου η πίεση είναι από συγκεκριμένο κανάλι εισόδου που έρχεται από τον κύβο. Ο έλεγχος των καναλιών, ελέγχεται μέσω υπολογιστή και μάλιστα αυτοματοποιείται ώστε να σαρώνει όλα τα κανάλια πιέσεων που εισέρχονται στον σαρωτή.

Από τον σαρωτή πίεσης εξέρχεται ένα κανάλι το οποίο συνδέεται με την θετική είσοδο του διαφορικού μανομέτρου. Η αρνητική είσοδος συνδέεται με το κανάλι στατικής πίεσης του σωλήνα pitot. Ο pitot βρίσκεται σε ύψος όπου η ροή είναι ελεύθερη. Δηλαδή η πίεσης αναφοράς είναι η στατική πίεση της ελεύθερης ροής. Έπειτα το διαφορικό μανόμετρο συνδέεται στο αναλογο-ψηφιακό μετατροπέα, που με την σειρά του συνδέεται με τον υπολογιστή για την καταγραφή (Σχήμα 4.32).



Σχήμα 4.31: Ο κύβος εντός σήραγγας με την διάταξη γεννητριών τύρβης



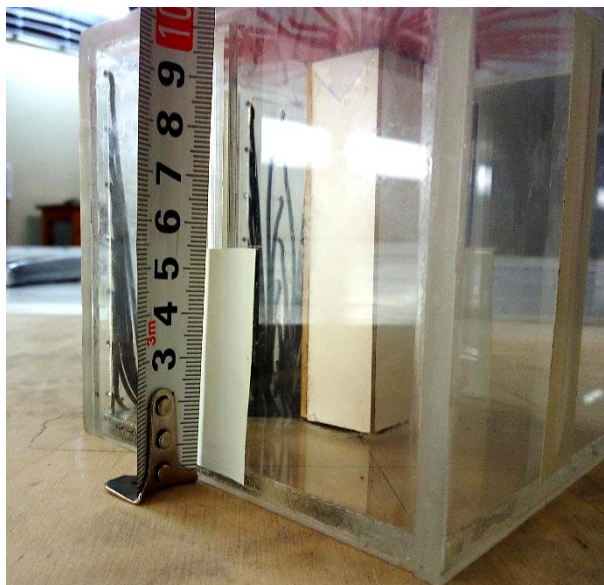
Σχήμα 4.32: Διάταξη μέτρησης πίεσης στην επιφάνεια του κύβου (όχι σε κλίμακα)

## 4.5 Σενάρια πειραματικής μελέτης

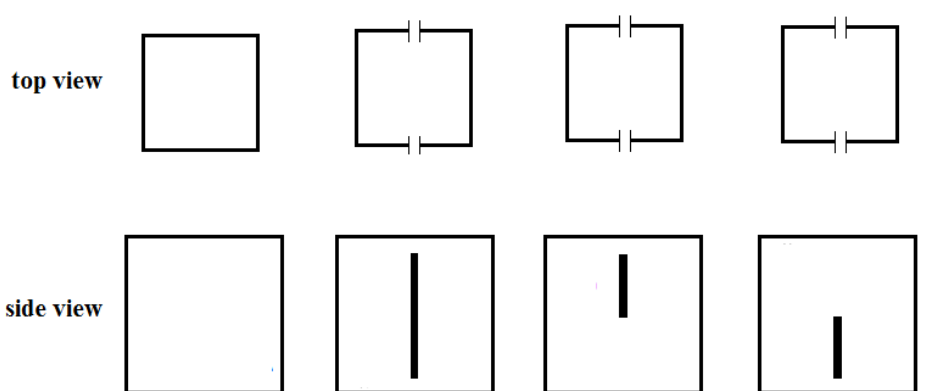
Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετώνται συνολικά δεκαέξι (16) σενάρια, δηλαδή συνδυασμοί γεννητριών τύρβης με συνδυασμούς ανοιγμάτων του κύβου.

Ο κύβος με βάσει τα ανοίγματα, για την παρούσα διπλωματική εργασία μπορεί να επιφέρει τέσσερεις (4) διαφορετικούς συνδυασμούς.

- Πλήρως κλειστός κύβος (Σχήμα 4.34, πρώτο εξ' αριστερών)
- Πλήρως ανοιχτά ανοίγματα για αντιδιαμετρικές επιφάνειες, και κλειστά τα υπόλοιπα ανοίγματα των άλλων δύο κάθετων επιφανειών (Σχήμα 4.34, δεύτερο εξ' αριστερών)
- Μερικώς ανοιχτά ανοίγματα για αντίθετες επιφάνειες, και κλειστά τα υπόλοιπα ανοίγματα των άλλων δύο κάθετων επιφανειών. Συγκεκριμένα ανοιχτά από επάνω μέχρι το ήμισυ του ύψους του κύβου (επάνω άνοιγμα) (Σχήμα 4.34, δεύτερο εκ δεξιών)
- Ομοίως μερικώς ανοιχτά ανοίγματα (Σχήμα 4.33) και συγκεκριμένα ανοιχτά από κάτω μέχρι το ήμισυ του ύψους του κύβου (κάτω άνοιγμα) (Σχήμα 4.34, πρώτο εκ δεξιών)



Σχήμα 4.33: Επάνω άνοιγμα. Κάλυψη από κάτω έως το ήμισυ του ύψους του κύβου ταινία



Σχήμα 4.34: Διαφορετικοί συνδυασμοί ανοιγμάτων του κύβου

Οι παραπάνω συνδυασμοί μελετώνται για κάθε οριακό στρώμα (διατάξεις γεννητριών τύρβης) επομένως είναι τέσσερα (4) για χαμηλής διάτμησης (A) και σε τέσσερα (4) για οριακό στρώμα υψηλής διάτμησης (B), όπως αυτά περιγράφονται στην υποενότητα 4.2.3. Έτσι είναι οκτώ (8) συνδυασμοί ανοιγμάτων κύβου και οριακού στρώματος.

Επίσης, βάσει προσανατολισμού του κύβου για ροή κάθετη στον κύβο και για ροή 45 μοιρών ως προς την επιφάνεια του κύβου των παραπάνω οκτώ συνδυασμών, προκύπτουν οι συνολικά 16 συνδυασμοί.



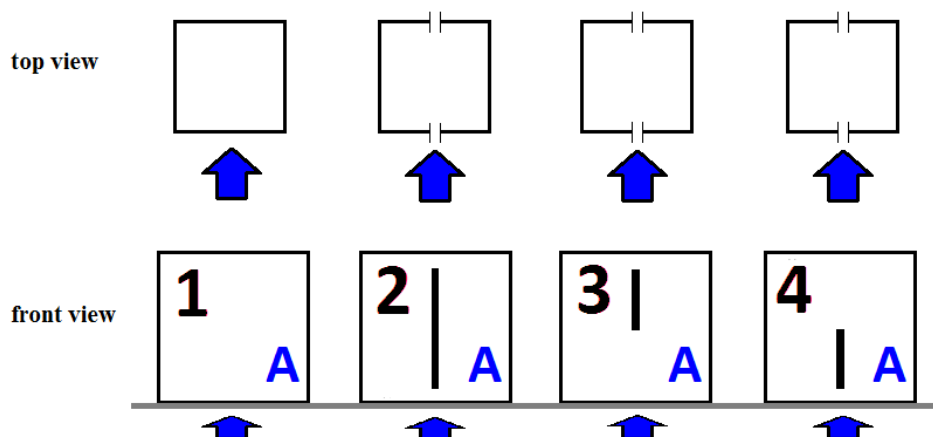
#### 4.5.1 Ροή κάθετη στην επιφάνεια του κύβου

Οι τέσσερεις συνδυασμοί ανοιγμάτων κύβου συνδυάζονται με τα δύο οριακά στρώμα, και προκύπτουν 8 συνολικά συνδυασμοί για ροή κάθετη στην επιφάνεια του κύβου.

Συγκεκριμένα τα ανοίγματα θα είναι στην προσήνεμη επιφάνεια και στην υπήνεμη επιφάνεια. Ενώ στις υπόλοιπες δύο πλευρικές επιφάνειες θα είναι πλήρως κλειστά τα ανοίγματα.

Για το χαμηλής διάτμησης οριακό στρώμα (A) οι περιπτώσεις αριθμούνται ως εξής σενάρια (Σχήμα 4.35):

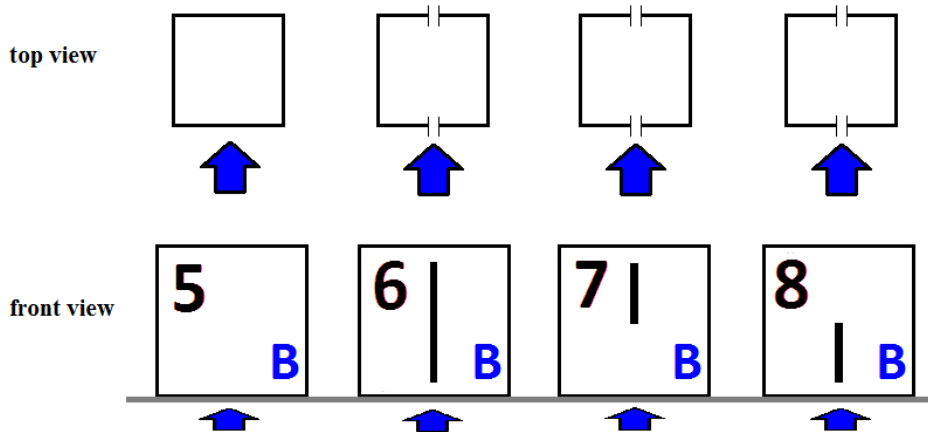
- 1 για κλειστό κύβο
- 2 για πλήρη ανοίγματα
- 3 για επάνω άνοιγμα
- 4 για κάτω άνοιγμα



Σχήμα 4.35: Αρίθμηση των συνδυασμών, καθέτου ροής, για χαμηλής διάτμησης οριακό στρώμα (A)

Για το υψηλής διάτμησης οριακό στρώμα (B) οι περιπτώσεις αριθμούνται ως εξής σενάρια (Σχήμα 4.36):

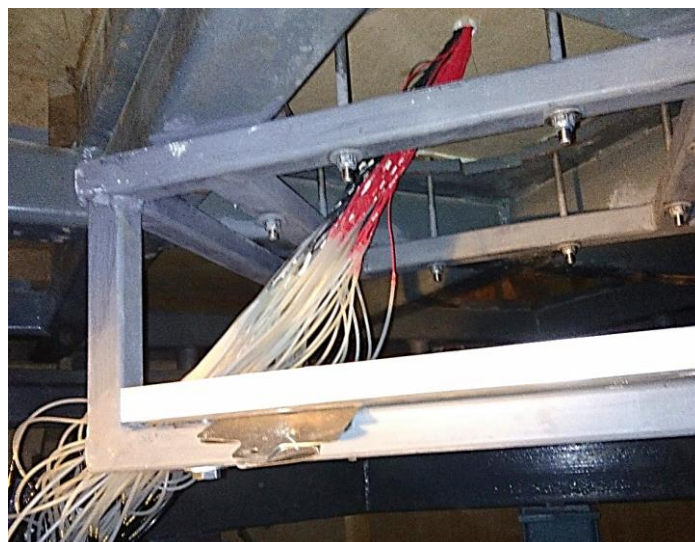
- 5 για κλειστό κύβο
- 6 για πλήρη ανοίγματα
- 7 για επάνω άνοιγμα
- 8 για κάτω άνοιγμα



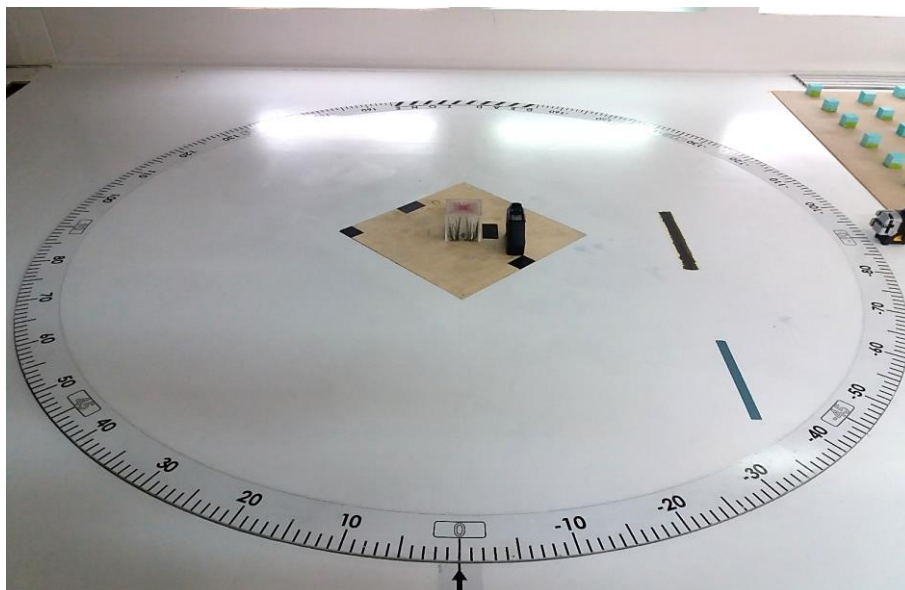
Σχήμα 4.36: Αρίθμηση των συνδυασμών, καθέτου ροής, για υψηλής διάμεσης οριακό στρώμα (B)

Για την μέτρηση εφόσον μόνο μια κάθετη επιφάνεια έχει απολήξεις πίεσης, οι μετρήσεις πραγματοποιούνται δια περιστροφής του κύβου σε βήματα των  $90^\circ$  μέσω της περιστρεφόμενης τράπεζας (Σχήμα 4.39, Σχήμα 4.40, Σχήμα 4.41).

Ωστόσο λόγω περιορισμένου μήκους καναλιών, στην συγκεκριμένη υλοποίηση (Σχήμα 4.37), η περιστρεφόμενη τράπεζα έχει περιορισμένο εύρος περιστροφής. Εκτός από αυτό, υπάρχει και μηχανικός περιορισμός εύρους περιστροφής της τράπεζας (Dead Zone) (Σχήμα 4.38, Σχήμα 4.42), λόγω φύσεως της κατασκευής, ο οποίος περιορισμός είναι ανεξάρτητος από την παρούσα διάταξη.

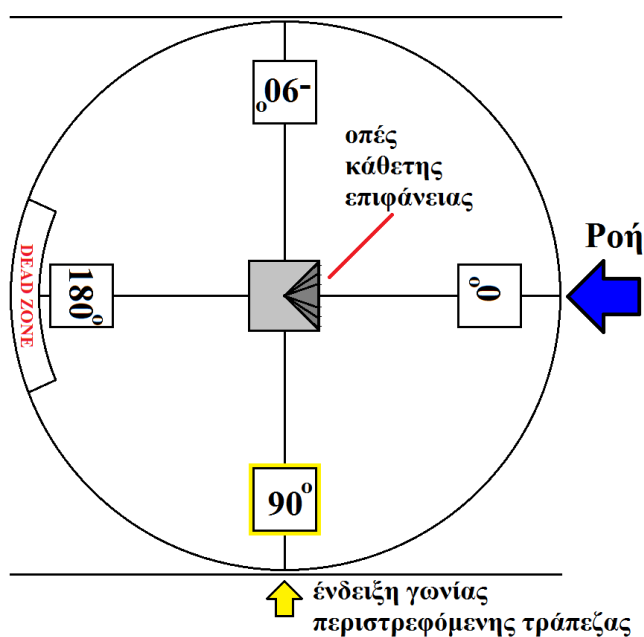


Σχήμα 4.37: Η οδήγηση των καναλιών από την βάση του κύβου προς τον σαρωτή πίεσης και ο περιορισμός περιστροφής λόγω περιορισμένου μήκους των καναλιών αυτών

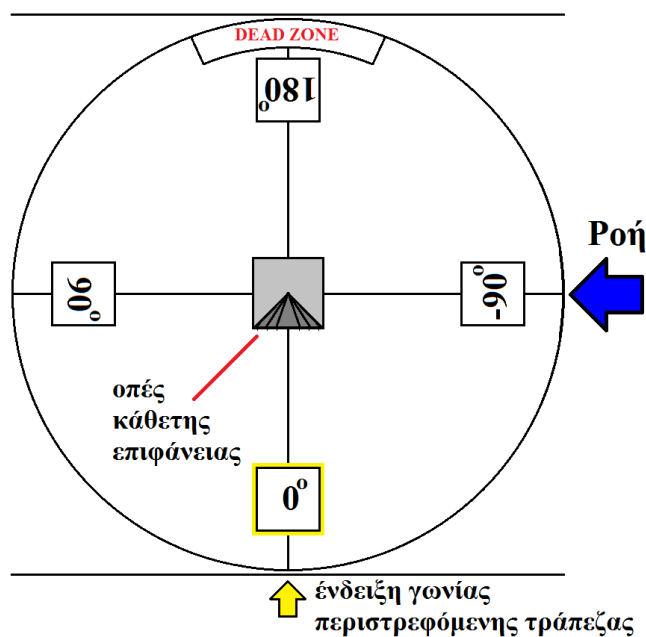


**Σχήμα 4.38:** Η περιστρεφόμενη τράπεζα (turntable), όπου στην εικόνα η ροή έρχεται από δεξιά προς τα αριστερά. Διακρίνεται στο κάτω μέρος ο δείκτης γωνιακής θέσης και επάνω στο βάθος η απαγορευμένη περιοχή, δηλαδή η περιοχή αυτή δεν μπορεί να βρεθεί στον δείκτη γωνιακής θέσεως

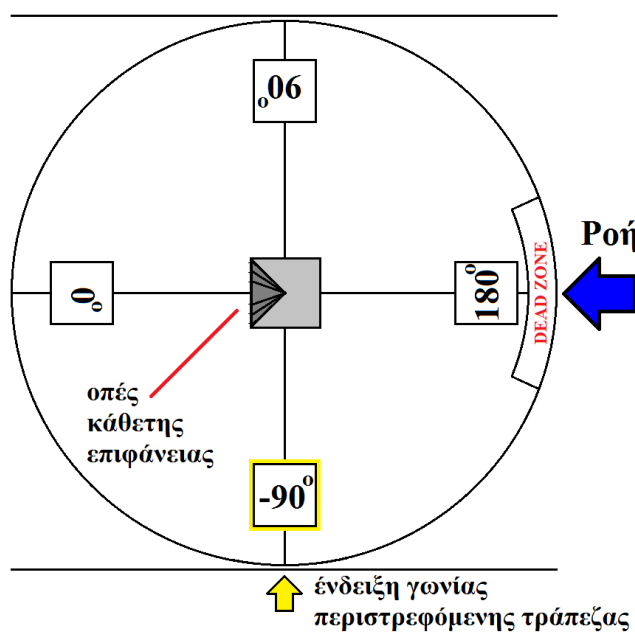
Επομένως πραγματοποιήθηκε μέτρηση μόνο για την μία πλευρική επιφάνεια (αριστερή). Για την άλλη πλευρική επιφάνεια γίνεται παραδοχή συμμετρικής ροής και έτσι θα απεικονιστεί ως κατοπτρική της πλευρικής επιφάνειας που έγινε η μέτρηση. Η ορθότητα της υπόθεσης μπορεί να εξεταστεί από την συμμετρία των κατανομών της προσήνεμης επιφάνειας και της οροφής.



**Σχήμα 4.39:** Μέτρηση προσήνεμης επιφάνειας, δείκτης γωνίας τράπεζας 90 μοίρες (όχι σε κλίμακα)

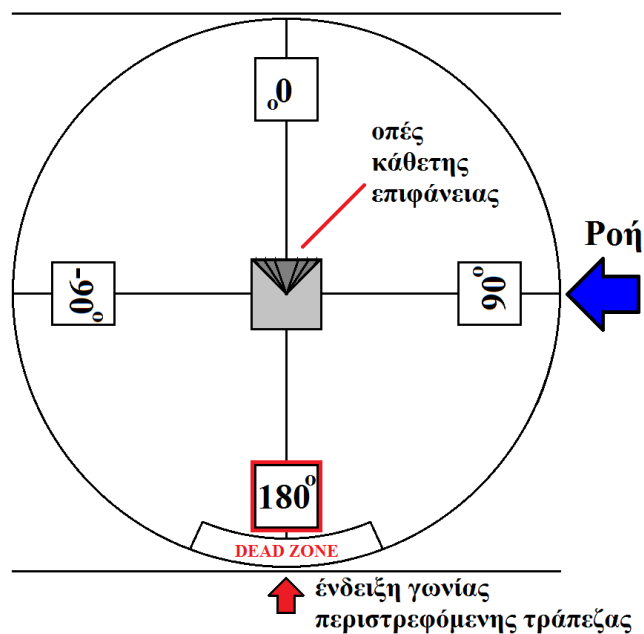


Σχήμα 4.40: Μέτρηση αριστερής πλευρικής επιφάνειας, δείκτης γωνίας τράπεζας 0 μοίρες (όχι σε κλίμακα)



Σχήμα 4.41: Μέτρηση υπήνεμης επιφάνειας, δείκτης γωνίας τράπεζας -90 μοίρες (όχι σε κλίμακα)

Επομένως για κάθε σενάριο, πραγματοποιήθηκαν τρεις συν μία μετρήσεις, δηλαδή για την προσήνεμη επιφάνεια (Σχήμα 4.39), την μία πλευρική επιφάνεια (Σχήμα 4.40), την υπήνεμη επιφάνεια (Σχήμα 4.41) και την οροφή.



**Σχήμα 4.42:** Μη-μετρούμενη δεξιά πλευρική επιφάνεια, δείκτης γωνίας τράπεζας 180 μοίρες. Εντός απαγορευμένης περιοχής περιστροφής, επομένως είναι αδύνατη η μέτρηση (όχι σε κλίμακα)

#### 4.5.2 Ροή υπό γωνία πρόσπτωσης 45 μοιρών

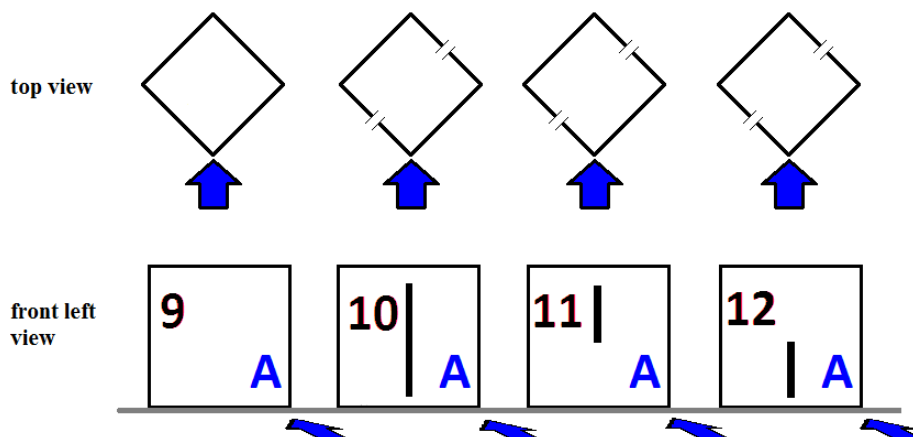
Οι ανοιγμάτων κύβου είναι ίδιοι με της κάθετης γωνίας της ροής και επίσης συνδυάζονται με τα δύο οριακά στρώμα, και έτσι 8 συνολικά συνδυασμούς. Τα σενάρια είναι ακριβώς ίδια με την κάθετη στην επιφάνεια ροή, αλλά με δεξιόστροφη περιστροφή.

Για το χαμηλής διάτμησης οριακό στρώμα (Α) οι περιπτώσεις αριθμούνται ως εξής σενάρια (Σχήμα 4.43):

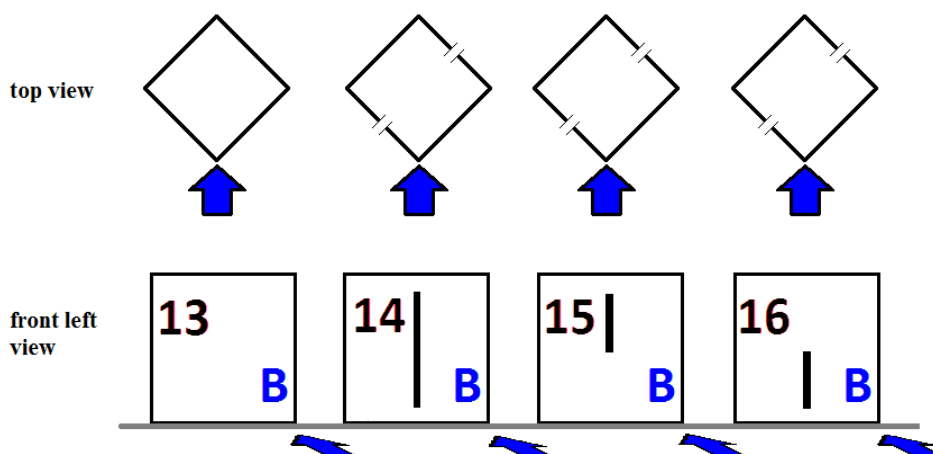
- 9 για κλειστό κύβο
- 10 για πλήρη ανοίγματα
- 11 για επάνω άνοιγμα
- 12 για κάτω άνοιγμα

Για το υψηλής διάτμησης οριακό στρώμα (Β) οι περιπτώσεις αριθμούνται ως εξής σενάρια (Σχήμα 4.44):

- 13 για κλειστό κύβο
- 14 για πλήρη ανοίγματα
- 15 για επάνω άνοιγμα
- 16 για κάτω άνοιγμα



Σχήμα 4.43: Αρίθμηση των συνδυασμών, 45 μοιρών ροής, για χαμηλής διάτμησης οριακό στρώμα (A)



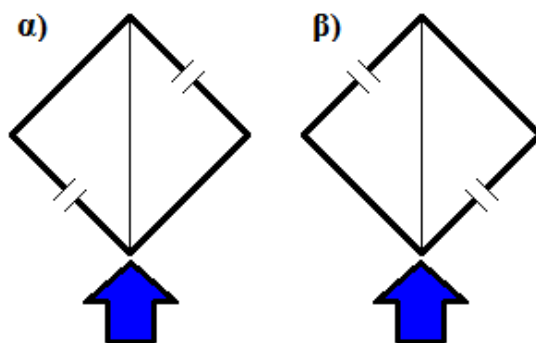
Σχήμα 4.44: Αρίθμηση των συνδυασμών, κάθετου ροής, για υψηλής διάτμησης οριακό στρώμα (B)

Όπως για τα σενάρια της κάθετης ροής, οι μετρήσεις πραγματοποιούνται δια περιστροφής του κύβου σε βήματα των  $90^\circ$  μέσω της περιστρεφόμενης τράπεζας.

Ωστόσο λόγω περιορισμένου εύρους περιστροφής της τράπεζας (όπως εξηγήθηκε στην υποενότητα 4.5.1), περιορίζεται η μέτρηση μόνο στις δύο από τις τέσσερις πλευρικές επιφάνειες (αριστερή προσήνεμη - αριστερή υπήνεμη) (Σχήμα 4.46, Σχήμα 4.47).

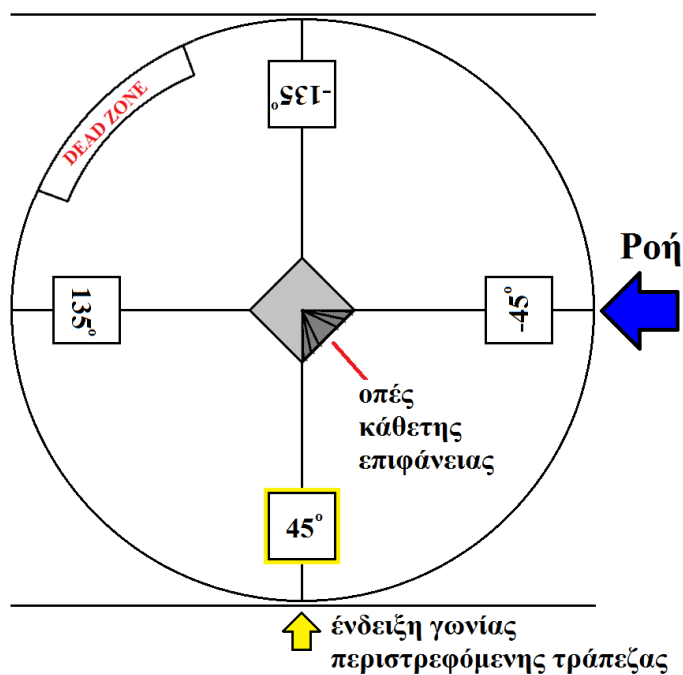
Για τα σενάρια 9 και 13, εφόσον ο κύβος είναι συμμετρικός, γίνεται η υπόθεση συμμετρικής ροής και επομένως η μέτρηση πραγματοποιήθηκε μόνο για την μία εμπρός επιφάνεια (Σχήμα 4.46) και την μία πίσω (Σχήμα 4.47) επιφάνεια. Οι υπόλοιπες δύο, υποθέτουμε ότι είναι κατοπτρικές των άλλων δύο επιφανειών που έγιναν οι μετρήσεις. Η ορθότητα αυτής της υπόθεσης μπορεί να εξεταστεί από τις μετρήσεις της οροφής.

Για τα υπόλοιπα σενάρια (10,11,12,14,15,16), οι μετρήσεις των δύο απέναντι επιφανειών πραγματοποιήθηκε στις δύο εντός εύρους επιφάνειες, με κατοπτρισμό των ανοιγμάτων του κύβου. Έγινε παραδοχή ότι το πεδίο θα είναι κατοπτρικό εφόσον ο κύβος είναι κατοπτρικός (Σχήμα 4.45). Βάσει αυτής της παραδοχής, οι πιέσεις που προκύπτουν υποθέτουμε ότι είναι κατοπτρικές.

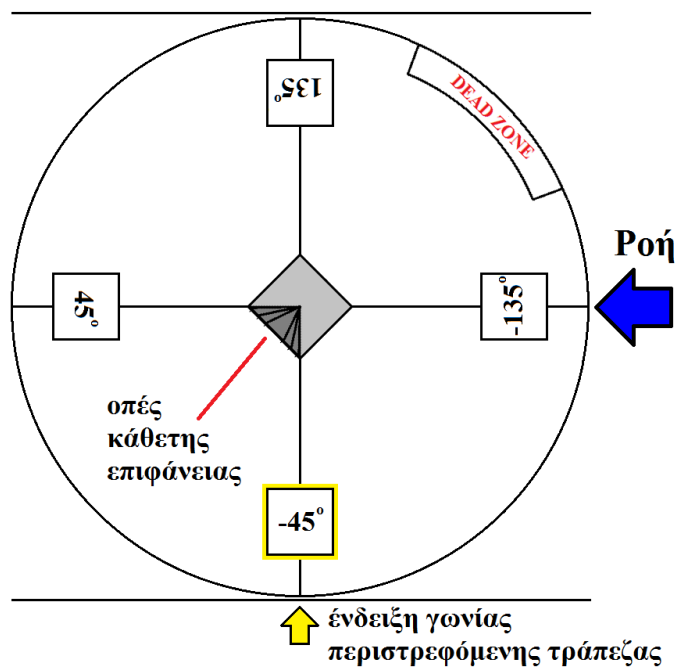


Σχήμα 4.45: α) Κανονική ροή β) κατοπτρική ροή για τα σενάρια 10,11,12,14,15,16

Επομένως για τα σενάρια 9, 13 πραγματοποιήθηκαν δύο συν μία μετρήσεις, δηλαδή για την μία εμπρός επιφάνεια, την μία πίσω επιφάνεια και την οροφή. Και για τα σενάρια 10,11,12,14,15,16 πραγματοποιήθηκαν τέσσερις συν μία μετρήσεις, δηλαδή δύο για τις εμπρός επιφάνειες, δύο για τις πίσω επιφάνειες και την οροφή.



Σχήμα 4.46: Μέτρηση της εμπρός επιφάνειας, δείκτης γωνίας τράπεζας 45 μοίρες (όχι σε κλίμακα)



Σχήμα 4.47: Μέτρηση της πίσω επιφάνειας, δείκτης γωνίας τράπεζας -45 μοίρες (όχι σε κλίμακα)



# Κεφάλαιο 5

## *Αποτελέσματα και συγκρίσεις*

### 5.1 Χαρακτηριστικά ΑΟΣ

Η μέτρηση των χαρακτηριστικών του ανέμου έγινε με την χρήση του θερμού νήματος. Για την μέτρηση μέσω θερμού νήματος απαιτείται βαθμονόμηση του αισθητήρα για την συσχέτιση της τάσης της γέφυρας με την ταχύτητα της ροής.

Η βαθμονόμηση έγινε μέσω του προγράμματος ThermalPro. Ο σωλήνας pitot συνδέεται με το διαφορικό μανόμετρο, του οποίου το σήμα λαμβάνεται από τον αναλογο-ψηφιακό μετατροπέα (ADC), που συνδέεται με τον υπολογιστή για την καταγραφή της δυναμικής πίεσης  $q$ . Έπειτα η ταχύτητα υπολογίστηκε από την σχέση:

$$V = \sqrt{2q/\rho} \quad (5.1)$$

όπου  $V$  η ταχύτητα,  $q$  η δυναμική πίεση και  $\rho$  η πυκνότητα.

Η καμπύλη βαθμονόμησης, η οποία είναι ένα πολυώνυμο 4<sup>ου</sup> βαθμού:

$$V = \alpha_0 + \alpha_1 E + \alpha_2 E^2 + \alpha_3 E^3 + \alpha_4 E^4 \quad (5.2)$$

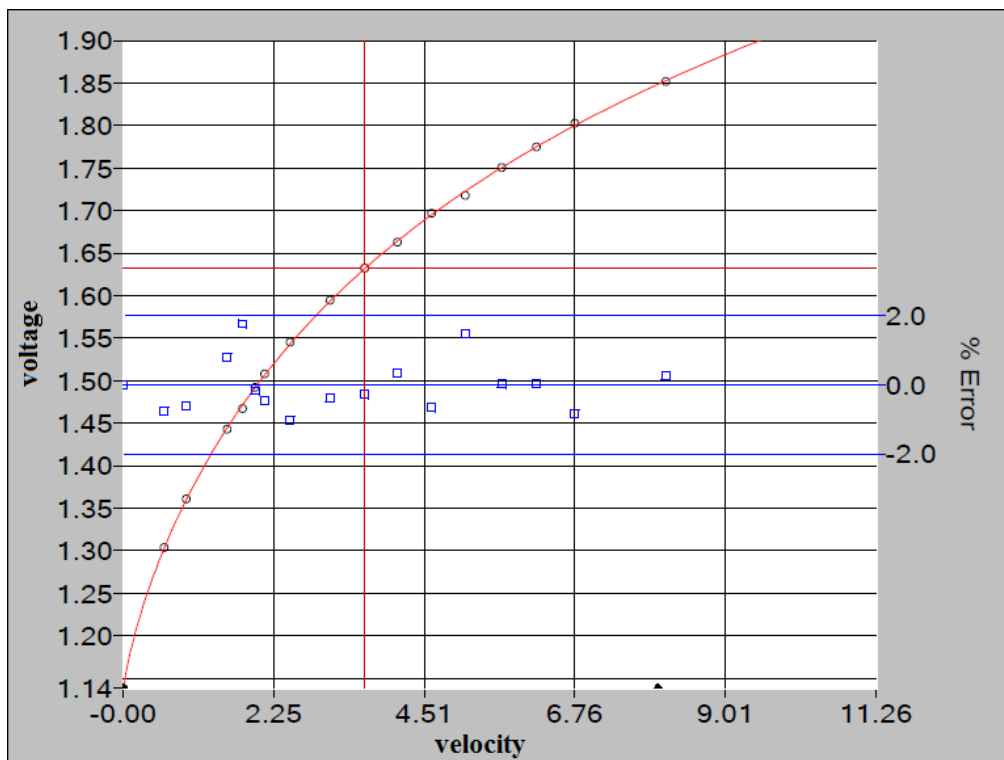
όπου  $V$  η ταχύτητα και  $E$  η τάση της γέφυρας.

Με την λήψη 17 σημείων, οι συντελεστές του πολυωνύμου που προέκυψαν είναι (Σχήμα 5.1):

- $a_0 = 48.33140$
- $a_1 = -141.99531$
- $a_2 = 155.51258$
- $a_3 = -77.17936$
- $a_4 = 15.26742$

και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα υπολογίστηκε:  $MSE = 0.00097 \text{ [m}^2/\text{s}^2]$

Το σχετικό σφάλμα των σημείων ήταν μικρότερο του 2% (Σχήμα 5.1).



Σχήμα 5.1: Καμπύλη βαθμονόμησης θερμού νήματος και τα σφάλματα των σημείων σε περιβάλλον ThermalPro

### 5.1.1 Κατατομή μέσης ταχύτητας

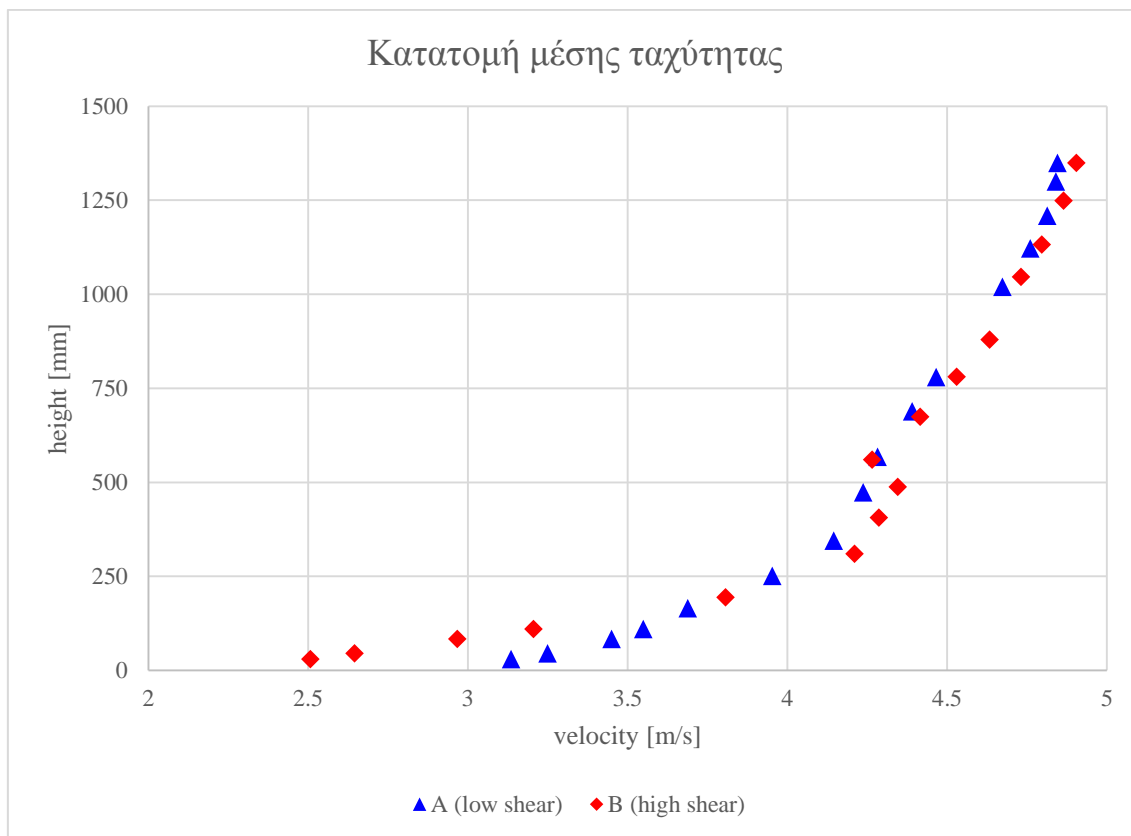
Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε απόσταση 6 υψών κύβου (6H) ανάντι από τη θέση του κέντρου του κύβου. Έτσι η ροή είναι αδιατάρακτη από την παρουσία του κύβου.

Ο χρόνος δειγματοληψίας είναι 105sec, η συχνότητα δειγματοληψίας 10kHz και οι στροφές του φυσητήρα είναι 500rpm. Οι τιμές προέκυψαν κατόπιν δοκιμών προκειμένου να λαμβάνονται στατιστικά σταθερά μεγέθη μέσης ταχύτητας και τύρβης, από τον Z. Xing [37], στο περιβάλλον του ThermalPro.

Για κάθε ύψος, κάθε οριακού στρώματος (A,B) ελήφθησαν δύο χρονοσειρές δειγμάτων ταχύτητας και η διαδικασία λήψης εκκινούσε με την πάροδο ενός λεπτού από την μετάβαση στις 500rpm του φυσητήρα για να θεωρηθεί η ροή μόνιμη.

Η αλλαγή του ύψους του αισθητήρα θερμού νήματος γινόταν χειροκίνητα λόγω βλάβης του μηχανισμού της τραβέρσας εκείνης της χρονικής περιόδου.

Έτσι οι κατατομές της μέσης ταχύτητας, για τα δύο οριακά στρώματα, που προκύπτουν, απεικονίζονται στο Σχήμα 5.2.



Σχήμα 5.2: Κατατομή μέσης ταχύτητας μετρήσεων για τα δύο οριακά στρώματα

Όπως προκύπτει το ύψος του οριακού στρώματος για το χαμηλής διάτμησης είναι περίπου  $\delta_A = 1210\text{mm}$  και για το υψηλής διάτμησης είναι περίπου  $\delta_B = 1320\text{mm}$ . Δηλαδή  $\delta_A = 11H$  και  $\delta_B = 12H$ , όπου  $H$  το ύψος του κύβου.

Με θεώρηση ότι οι κατατομές ακολουθούν τον λογαριθμικό νόμο:

$$\bar{u} = \frac{u_*}{k} \ln \left[ \frac{z-d}{z_o} \right] \quad (5.3)$$

με προσαρμογή των σημείων στον λογαριθμικό νόμο προκύπτουν οι τιμές της ταχύτητας διάτμησης  $u_*$  και του ύψους τραχύτητας  $z_o$ . Το επίπεδο μηδενικής μετατόπισης  $d$  λαμβάνει τιμές που θεωρούνται αμελητέες. Έτσι ο λογαριθμικός νόμος παίρνει την μορφή:

$$\bar{u} = \frac{u_*}{k} \ln \left( \frac{z}{z_o} \right) \quad (5.4)$$

Από την προσαρμογή (Σχήμα 5.3) προέκυψαν οι τιμές για το Α οριακό στρώμα  $u_* = 0.19\text{m/s}$  και  $z_o = 0.05\text{mm}$ , με  $R^2 = 0.984$ . Και για το Β οριακό στρώμα  $u_* = 0.27\text{m/s}$  και  $z_o = 0.70\text{mm}$ , με  $R^2 = 0.973$ .

Επίσης πραγματοποιήθηκε και προσαρμογή των σημείων στον εκθετικό νόμο (Σχήμα 5.4):

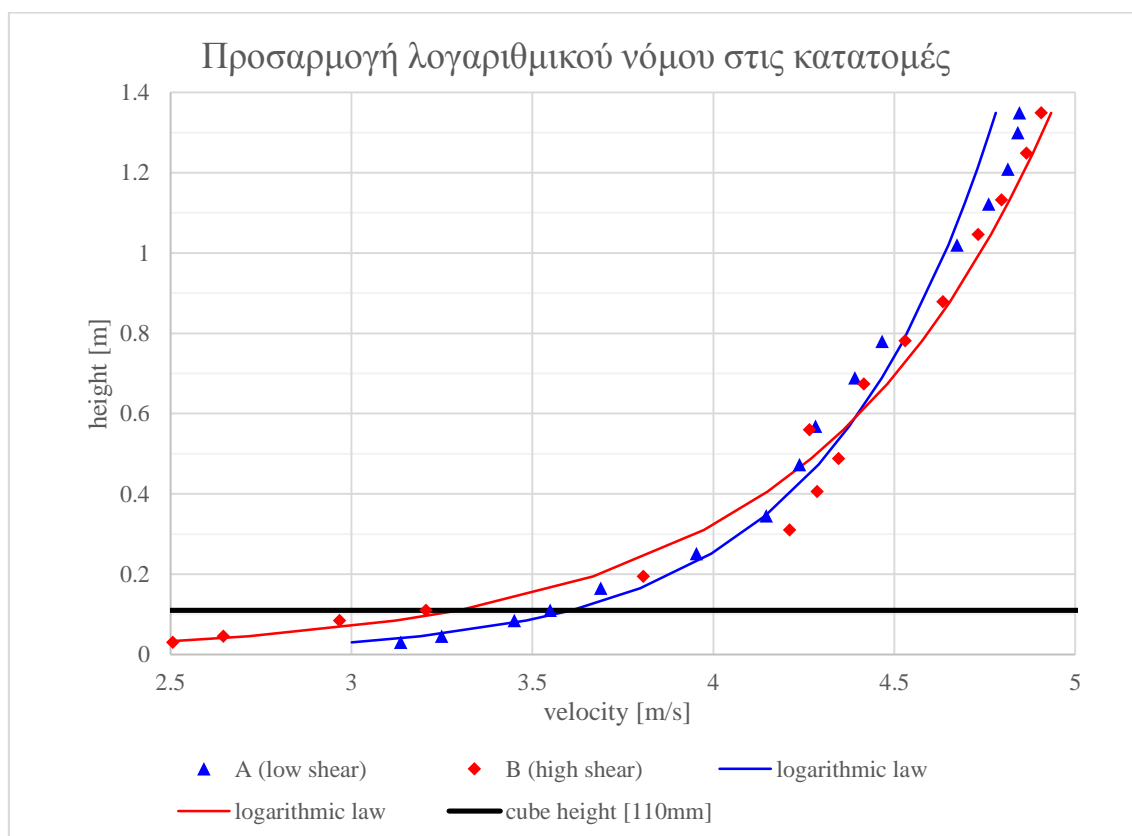
$$\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{ref}} = \left( \frac{z - d}{z_{ref} - d} \right)^\alpha \quad (5.5)$$

όπου ουσιαστικά, αγνοώντας το  $d$ , όπως προηγουμένως, μετασχηματίζεται στην έκφραση:

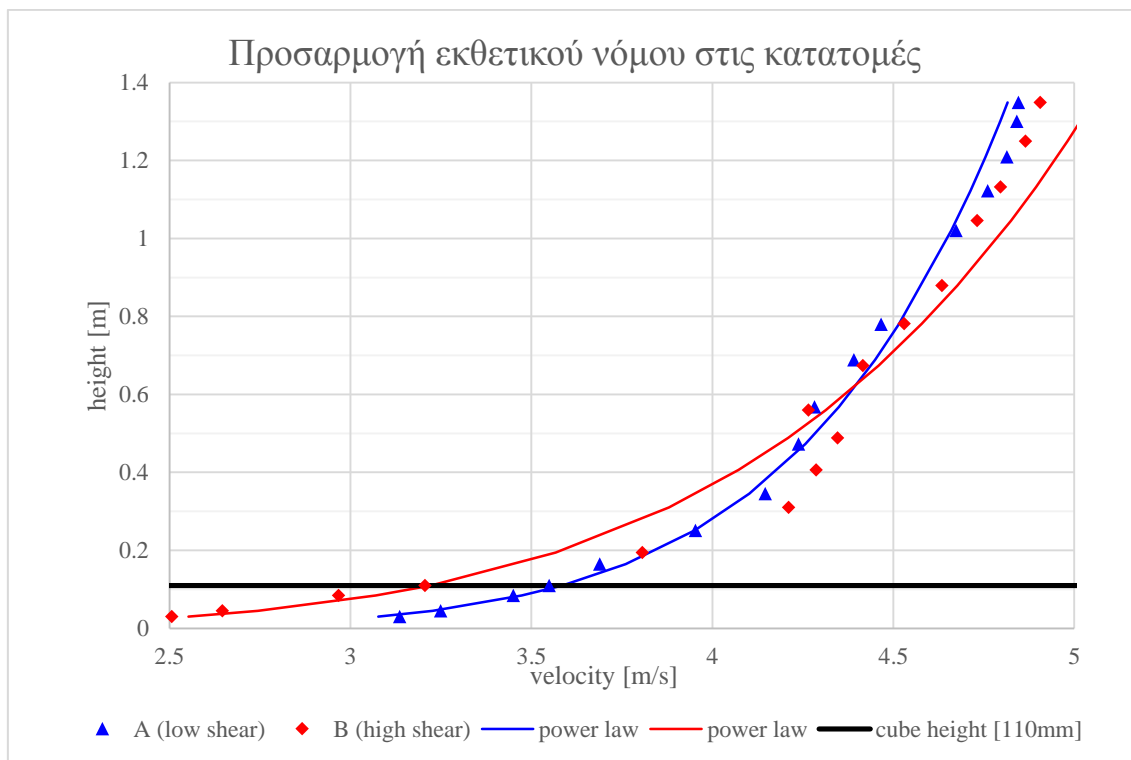
$$\bar{u} = cz^\alpha \quad (5.6)$$

όπου  $\alpha$  ο εκθέτης λογαριθμικής κατανομής και  $c$  μια σταθερά αναλογίας, που δεν ενδιαφέρει στην προκειμένη περίπτωση η τιμή της.

Έτσι προέκυψαν οι τιμές για το Α οριακό στρώμα  $\alpha=0.1177$ , με  $R^2 = 0.9939$ . Και για το Β οριακό στρώμα  $\alpha=0.1793$ , με  $R^2 = 0.9727$ .



Σχήμα 5.3: Προσαρμογή λογαριθμικού νόμου στις κατατομές μέσης ταχύτητας



Σχήμα 5.4: Προσαρμογή εκθετικού νόμου στις κατατομές μέσης ταχύτητας

Έτσι παρουσιάζονται συνοπτικά τα χαρακτηριστικά των δύο κατατομών, στον ακόλουθο πίνακα:

	<b>A οριακό στρώμα</b>	<b>B οριακό στρώμα</b>
Ύψος οριακού στρώματος $\delta$ [mm]	<b>1210</b>	<b>1320</b>
Ταχύτητα διάτμησης $u_*$ [m/s]	<b>0.19</b>	<b>0.27</b>
Ύψος τραχύτητας $z_0$ [mm]	<b>0.05</b>	<b>0.70</b>
Εκθέτης $\alpha$	<b>0.12</b>	<b>0.18</b>

Πίνακας 5.1: Τιμές παραμέτρων των δύο οριακών στρωμάτων

Η διαφοροποίηση στις παραμέτρους των δύο οριακών στρωμάτων είναι εμφανής, και για τους δύο νόμους προσαρμογής που ακολουθήθηκαν. Έτσι είναι ξεκάθαρο ότι το B οριακό στρώμα είναι μεγαλύτερης διάτμησης από το A, όπως και ήταν αναμενόμενο.

Να σημειωθεί ότι η μέτρηση πραγματοποιήθηκε μόνο για την συνιστώσα  $u$  της ταχύτητας και όχι για τις υπόλοιπες δύο συνιστώσες  $v, w$ .

### 5.1.2 Κατατομή έντασης της τύρβης

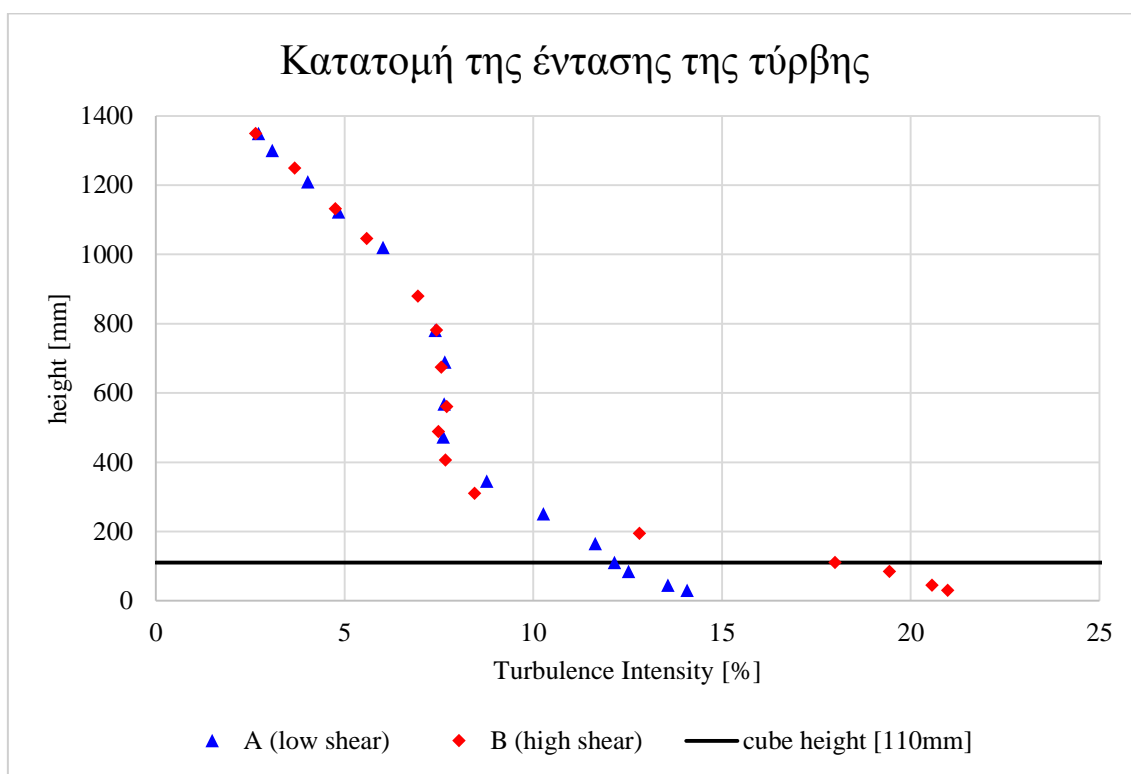
Η ένταση της τύρβης ορίζεται από την σχέση:

$$I_u(z) = \frac{u_{rms}(z)}{\bar{u}(z)} \quad (5.7)$$

όπου  $u_{rms}$  η τυπική απόκλιση της ταχύτητας στο ύψος  $z$ , δηλαδή:

$$u_{rms} = \sqrt{\overline{u'(t)^2}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (u_i')^2} \quad (5.8)$$

Έτσι οι κατατομές της έντασης της τύρβης, για τα δύο οριακά στρώματα, που προκύπτουν, απεικονίζονται στο Σχήμα 5.5.



Σχήμα 5.5: Κατατομή έντασης της τύρβης για τα δύο οριακά στρώματα

Στο ύψος του κύβου το A οριακό στρώμα έχει επίπεδο τύρβης 12.1% ενώ το B οριακό στρώμα 18.0%. Σε ύψος περίπου 500mm και άνω, οι κατατομές σχεδόν συμπίπτουν, διότι η επίδραση των στοιχείων τραχύτητας ουσιαστικά εξασθενεί για το δεδομένο μήκος σήραγγας, που θεωρείται μικρό [62],[73].

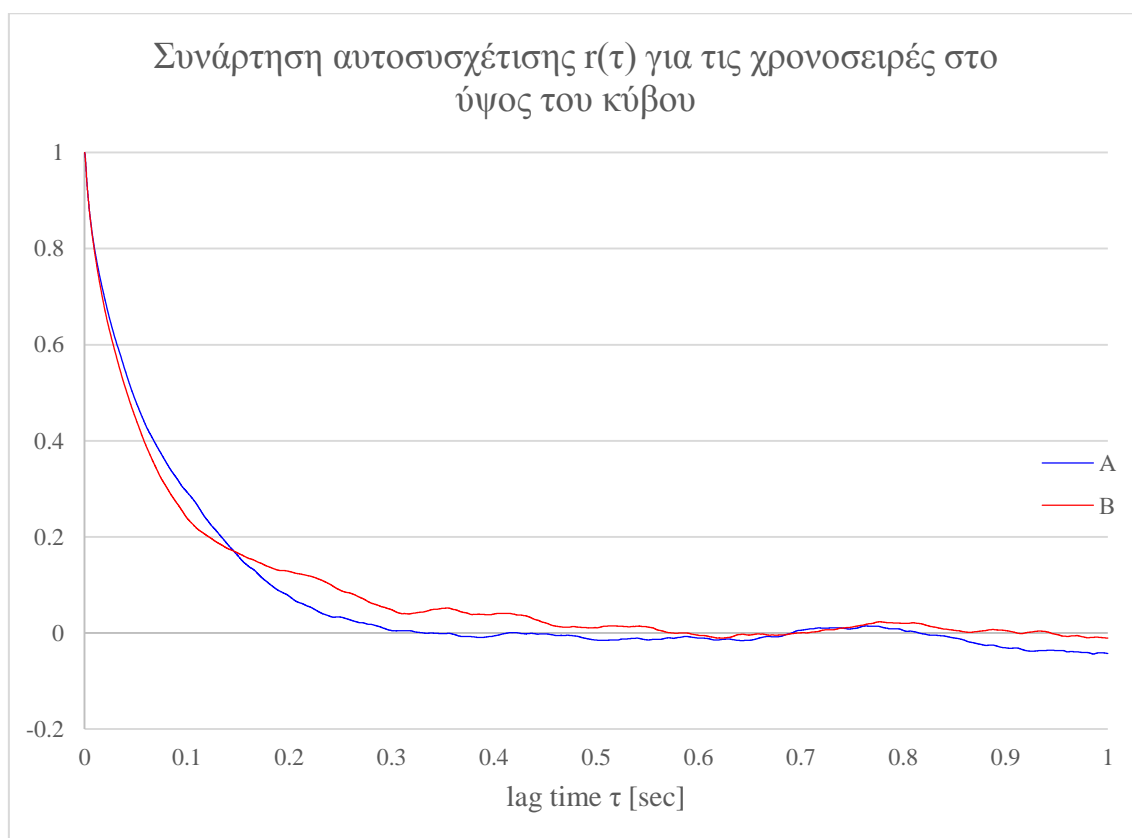
### 5.1.3 Κατατομή ολοκληρωτικής κλίμακας μήκους τύρβης

Η ολοκληρωτική κλίμακα μήκους της τύρβης υπολογίζεται εφαρμόζοντας την θεωρία παγιωμένης τύρβης του Taylor, μέσω της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης (Σχήμα 5.6).

Για κάθε ύψος  $z$ , η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης ορίζεται από την χρονοσειρά της ταχύτητας  $u(t)$  μέσω της σχέσης:

$$r(\tau) = \frac{\overline{[u(t)u(t + \tau)]}}{u^2} \quad (5.9)$$

όπου  $\tau$  η χρονική υστέρηση. Για τον υπολογισμό της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης αναπτύχθηκε κώδικας σε περιβάλλον MATLAB.



**Σχήμα 5.6:** Η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης  $r(\tau)$  για την χρονοσειρά στο ύψος του κύβου, για τα δύο οριακά στρώματα, για υστέρηση  $\tau$  το πρώτο 1 sec, δηλαδή τα πρώτα 10,000 σημεία

Η ολοκληρωτική κλίμακα χρόνου της τύρβης ορίζεται από την σχέση:

$$Tu_x = \int_0^{\infty} r(\tau) d\tau \quad (5.10)$$

Από το πρώτο σημείο μηδενισμού της  $r(\tau)$  και έπειτα, υποθέτουμε ότι η  $r(\tau)$  ταλαντεύεται περί το 0 με ασυμπτωτικό τρόπο, γεγονός το οποίο δεν απέχει αρκετά. Έτσι υποθέτουμε ότι οι διακυμάνσεις της  $r(\tau)$  που συμβαίνουν ύστερα από το πρώτο σημείο μηδενισμού, αλληλοαναιρούνται κατά την ολοκλήρωση. Επομένως η ολοκληρωτική κλίμακα χρόνου της τύρβης υπολογίζεται από την σχέση:

$$Tu_x = \int_0^{T^0} r(\tau) d\tau \quad (5.11)$$

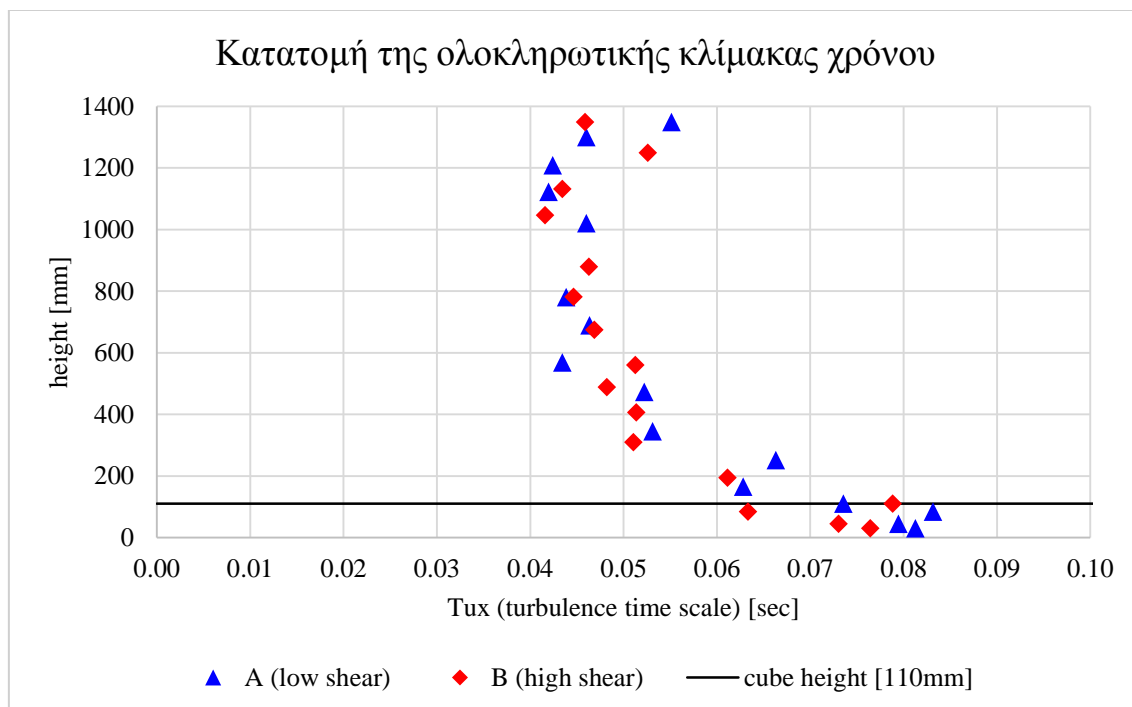
όπου  $T^0$ , για κάθε χρονοσειρά, είναι το πρώτο σημείο μηδενισμού της  $r(\tau)$ .

Η ολοκλήρωση έγινε με την μέθοδο του ορθογωνίου, με  $\Delta\tau = 0.0001\text{sec}$  και ανεξάρτητο της θέσης, έτσι υπολογίζεται η ολοκληρωτική κλίμακα χρόνου (Σχήμα 5.7):

$$Tu_x \approx \sum_{i=0}^{T^0} r_i * \Delta\tau = \Delta\tau * \sum_{i=0}^{T^0} r_i \quad (5.12)$$

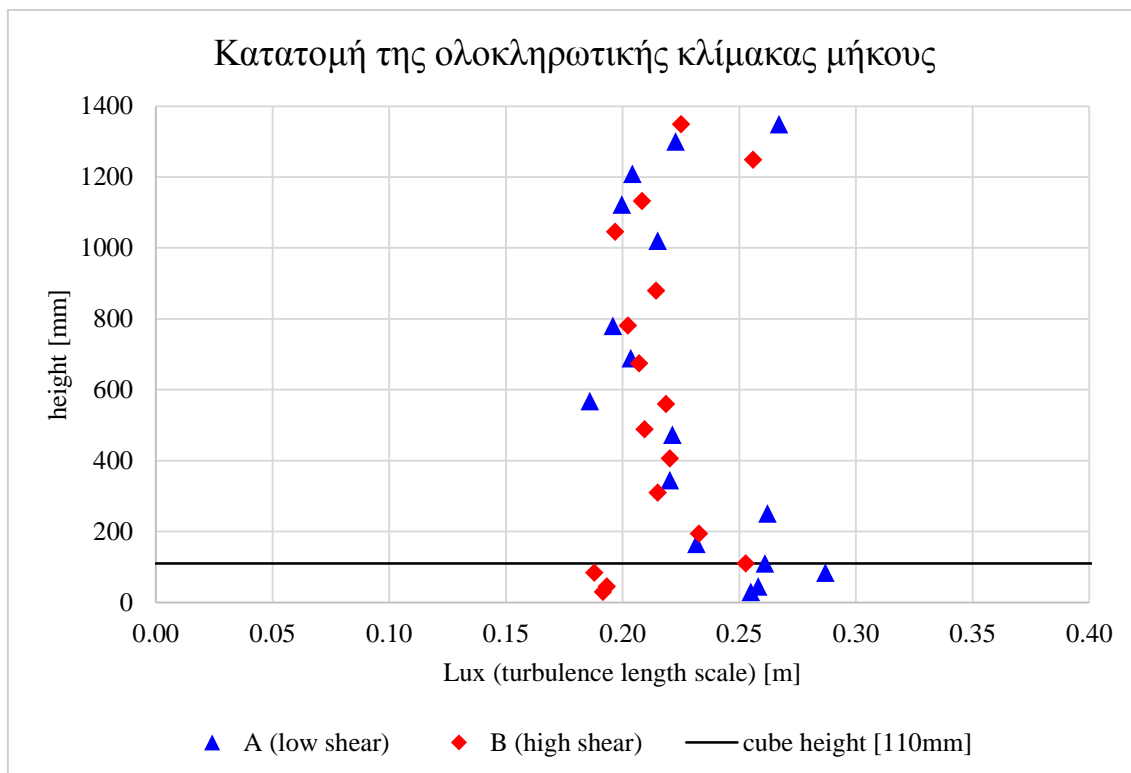
Πλέον βάσει της υπόθεσης του Taylor, η κατατομή της ολοκληρωτικής κλίμακας μήκους (Σχήμα 5.8) προσδιορίζεται από την σχέση:

$$Lu_x = \bar{u} \cdot Tu_x \quad (5.13)$$



Σχήμα 5.7: Κατατομή της ολοκληρωτικής κλίμακας χρόνου της τύρβης





**Σχήμα 5.8:** Κατατομή της ολοκληρωτικής κλίμακας μήκους της τύρβης

Καθ' όλο το ύψος του κύβου, για το A οριακό στρώμα, οι κυρίαρχες τύρβες είναι της τάξεως των 19cm, και για το B οριακό στρώμα, της τάξεως των 26cm. Είναι λογικό οι κυρίαρχες τύρβες του B οριακού στρώματος να είναι μεγαλύτερου μήκους, διότι είναι υψηλότερης διάτμησης, όπως και μεγαλύτερης έντασης της τύρβης χαμηλά στο ύψος του κύβου.

Καθ' όλο το ύψος των δύο οριακών στρωμάτων, φαίνεται ότι οι κυρίαρχες τύρβες είναι τάξεως περί τα 20cm με 25cm χωρίς να είναι ξεκάθαρο κάποιο μοτίβο στην κατατομή. Ίσως ο λόγος είναι ότι η ροή δεν έχει διαμορφωθεί πλήρως.

#### 5.1.4 Φάσμα τυρβώδους κινητικής ενέργειας

Η τυρβώδης κινητική ενέργεια ορίζεται ως:

$$k = \frac{1}{2} [(\overline{u'})^2 + (\overline{v'})^2 + (\overline{w'})^2] \quad (5.14)$$

Οι συνιστώσες  $v$ ,  $w$  δεν έχουν μετρηθεί, και επομένως υπολογίζεται μόνο το ενεργειακό φάσμα κατά την συνιστώσα  $u$ , δηλαδή κατά την  $x$  κατεύθυνση.

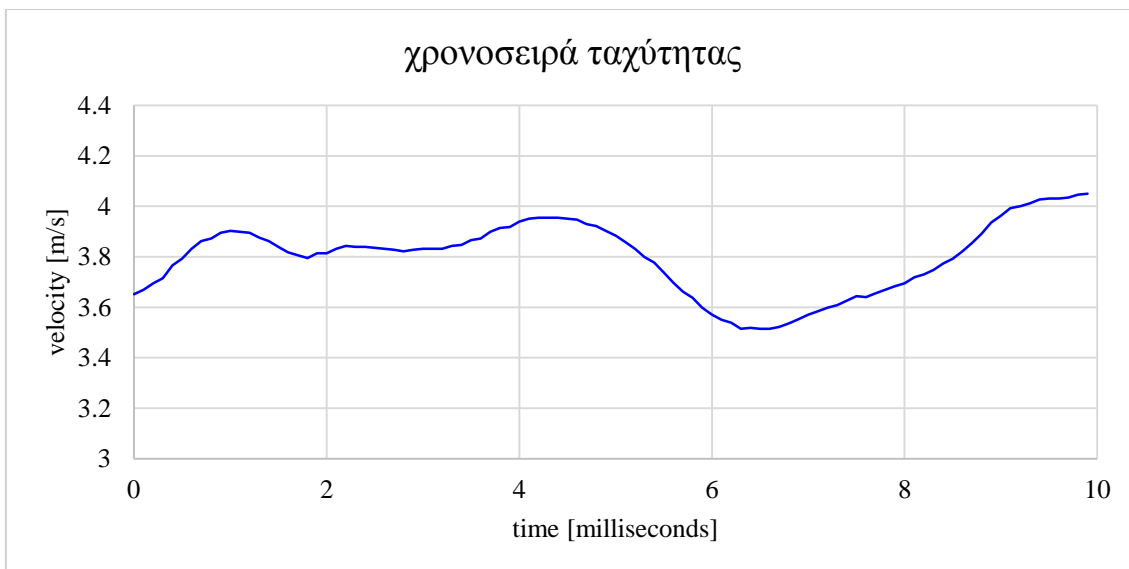
Για μια χρονοσειρά ταχύτητας (Σχήμα 5.9, Σχήμα 5.10) σε δεδομένο ύψος, η ανάλυση σε φάσμα ενέργειας πραγματοποιείται με την βοήθεια του μετασχηματισμού

Fourier (FFT) και έτσι προκύπτουν τα φάσματα του A (Σχήμα 5.11) και B (Σχήμα 5.12) οριακού στρώματος για το ύψος του κύβου.

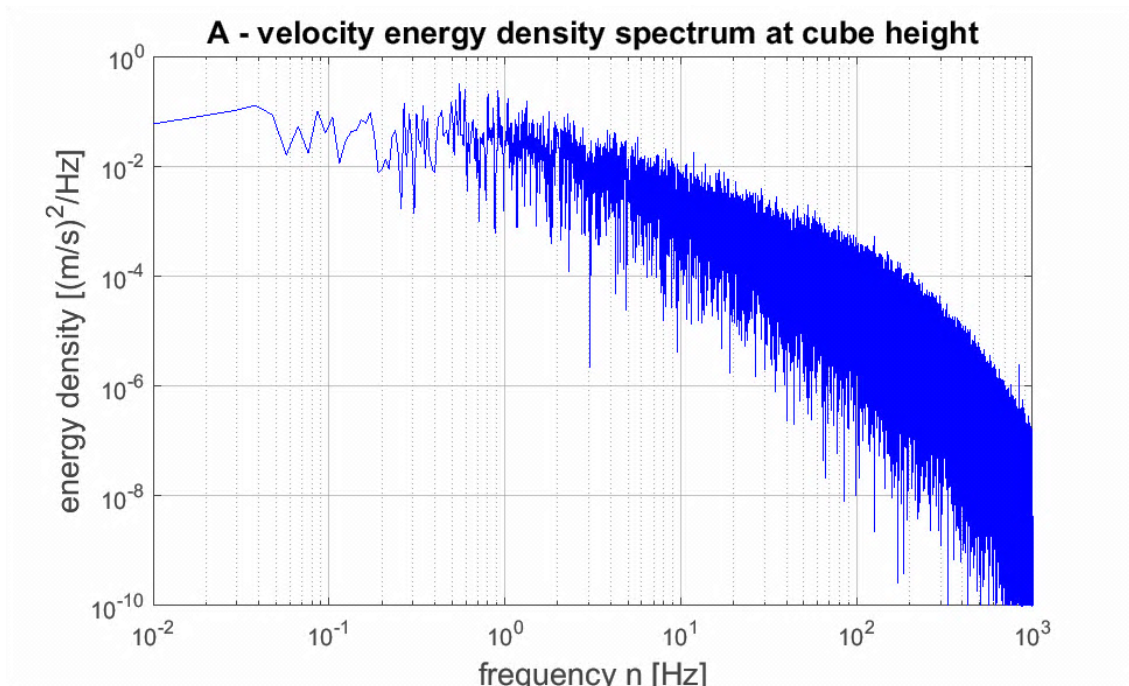
Για την επεξεργασία και την απεικόνιση των φασμάτων ενέργειας των ταχυτήτων αναπτύχθηκε κώδικας σε περιβάλλον MATLAB.



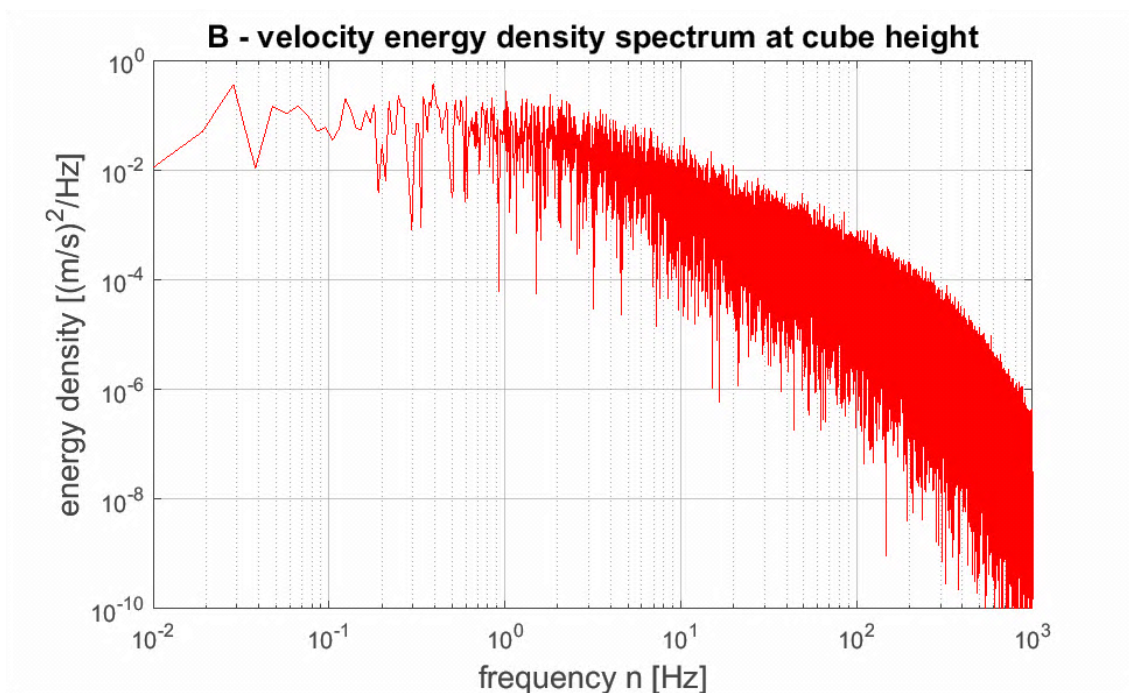
**Σχήμα 5.9:** Χρονοσειρά ταχύτητας στο ύψος του κύβου, για το A οριακό στρώμα, για το πρώτο 1 δευτερόλεπτο (από τα 105), δηλαδή 10,000 σημεία (από τα 1,048,576)



**Σχήμα 5.10:** Χρονοσειρά ταχύτητας στο ύψος του κύβου, για το A οριακό στρώμα, για τα πρώτα 10 χιλιοστοδευτερόλεπτα, δηλαδή 100 σημεία



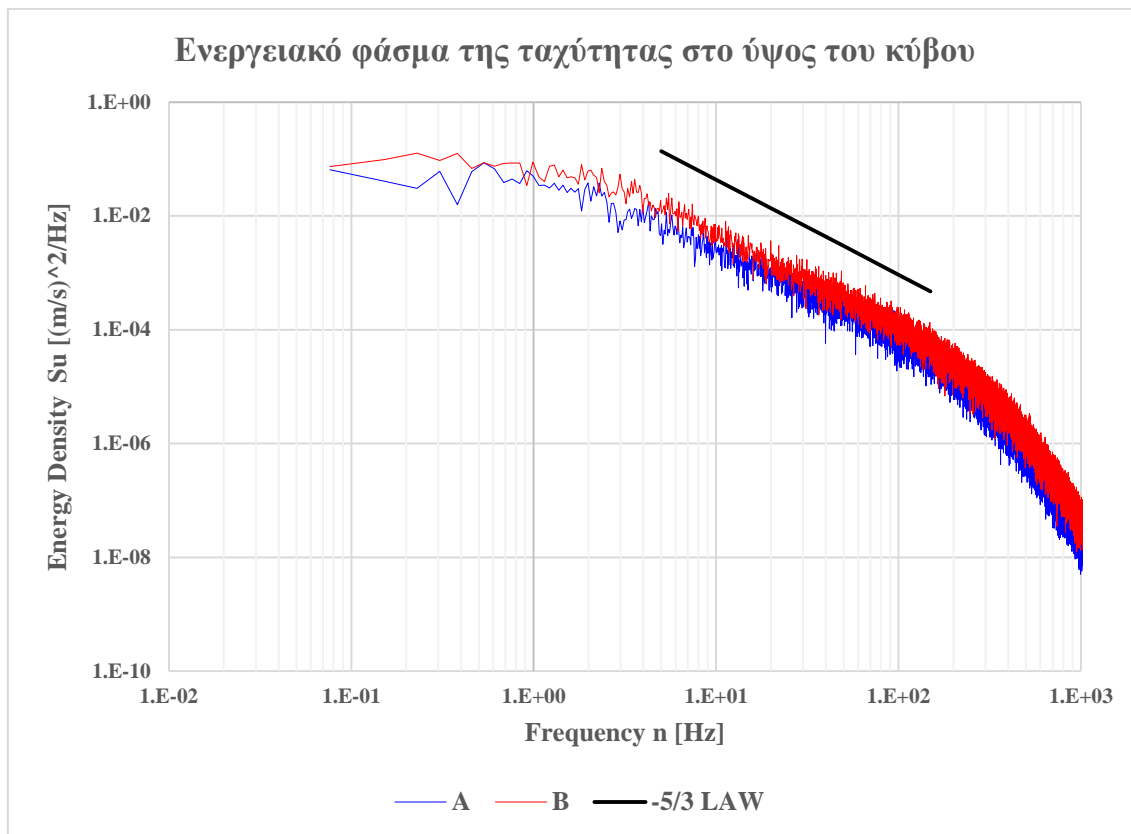
Σχήμα 5.11: Φάσμα ενέργειας της ταχύτητας στο ύψος του κύβου, για το A οριακό στρώμα



Σχήμα 5.12: Φάσμα ενέργειας της ταχύτητας στο ύψος του κύβου, για το B οριακό στρώμα

Από τα σχήματα είναι δύσκολο να διακριθεί η περιοχή του νόμου «-5/3» του Kolmogorov, επομένως πρέπει να γίνει εξομάλυνση των φασμάτων. Για την εξομάλυνση έγινε διαίρεση της χρονοσειράς σε 8 χρονικά υποδιαστήματα και έπειτα ελήφθη ο μέσος

όρος για κάθε συχνότητα. Για την επίτευξη της διαδικασίας δημιουργήθηκε κώδικας σε περιβάλλον MATLAB.



**Σχήμα 5.13:** Εξομαλυμένο φάσμα ενέργειας της ταχύτητας στο ύψος του κύβου, για τα δύο οριακά στρώματα

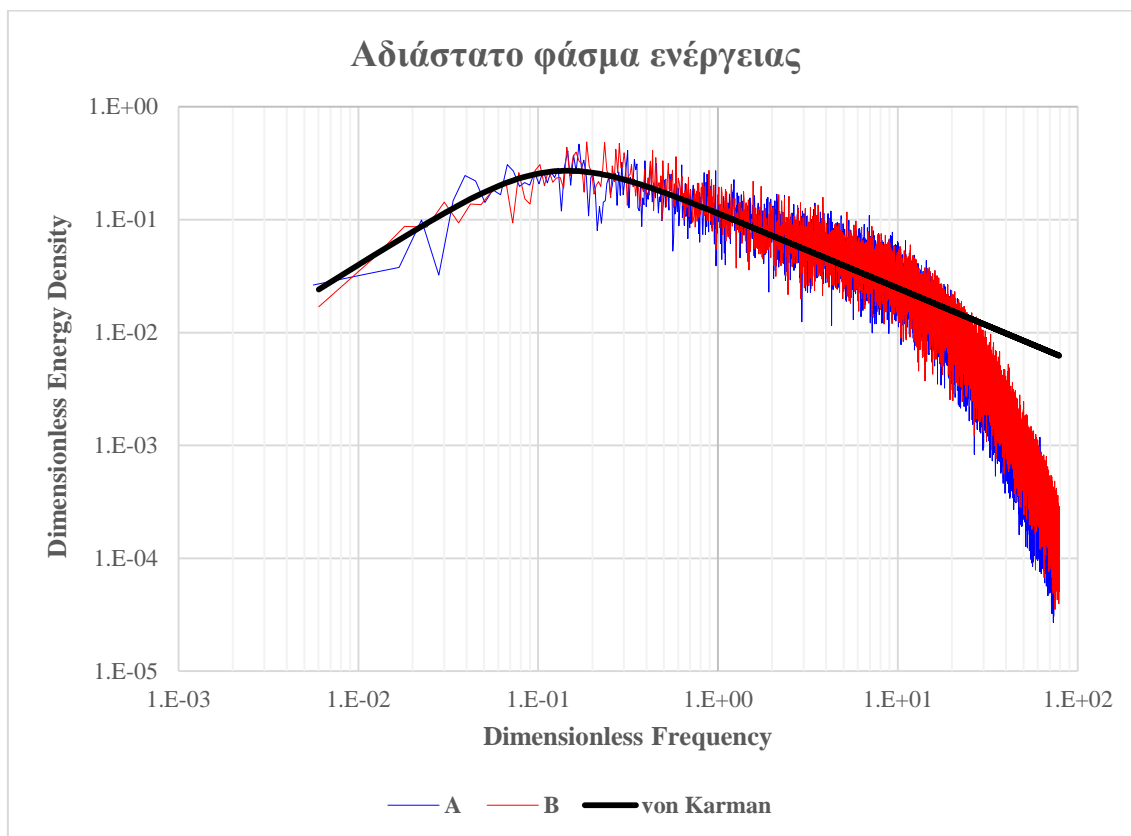
Πλέον, και στα δύο φάσματα (Σχήμα 5.13), είναι φανερή η παρουσία της περιοχής ενδιάμεσου εύρους (inertial subrange), που ακολουθεί τον νόμο «-5/3» του Kolmogorov. Οι κυρίαρχες δίνες των χαμηλών συχνοτήτων (integral scale) οδηγούνται, μέσω του ενδιάμεσου εύρους, στο υψίσυχο εύρος (dissipation scale), όπου οι δυνάμεις ιξώδους κυριαρχούν και πραγματοποιείται καταστροφή της τύρβης.

Η μετάβαση στην υψίσυχη περιοχή καταστροφής της τύρβης διακρίνεται στο σημείο κάμψης του φάσματος μετά τον νόμο «-5/3». Η χρονική κλίμακα στο σημείο αυτό είναι της τάξεως των 200Hz ή 0.005sec.

Τα ανωτέρω φάσματα αδιαστατοποιούνται μέσω της σχέσης του Von-Karman [12]:

$$\frac{n \cdot S_u(n)}{u_{rms}^2} = \frac{4 \tilde{n}}{(1 + 70.8 \tilde{n}^2)^{5/6}} \quad (5.15)$$

όπου η αδιάστατη συχνότητα  $\tilde{n} = (nLu_x)/\bar{u}_z$ , όπου  $n$  η συχνότητα,  $Lu_x$  η ολοκληρωτική κλίμακα μήκους της τύρβης και  $\bar{u}_z$  η μέση ταχύτητα στο ύψος  $z$ .



**Σχήμα 5.14:** Αδιάστατο φάσμα ενέργειας της ταχύτητας στο ύψος του κύβου, για τα δύο οριακά στρώματα και το φάσμα του von Karman

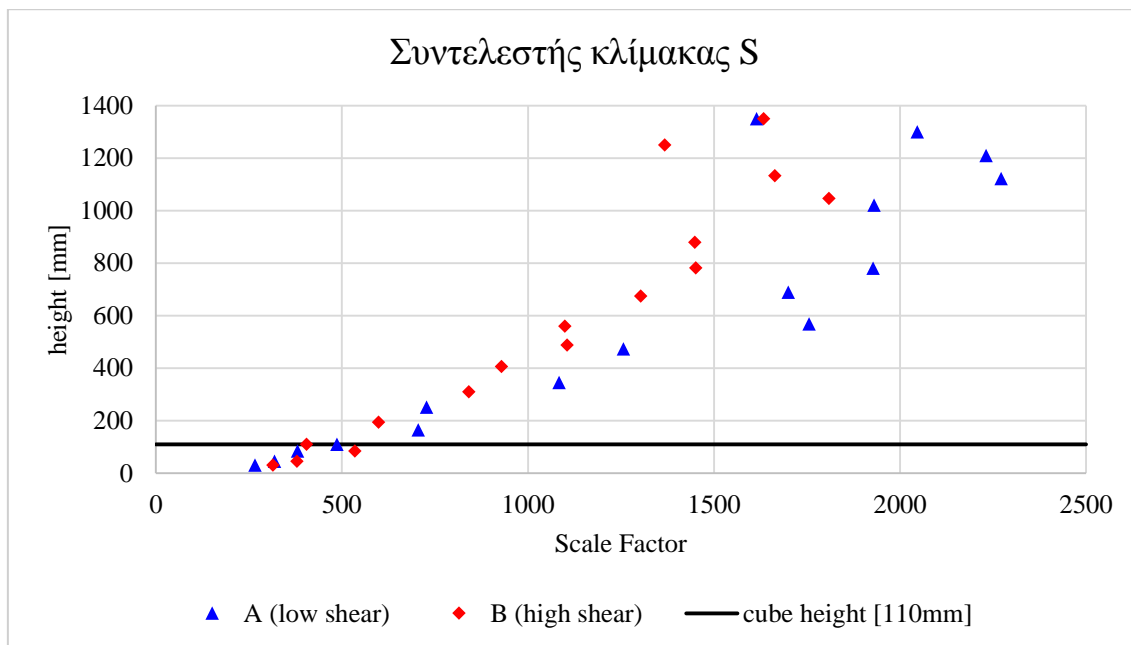
Από το Σχήμα 5.14 φαίνεται ότι υπάρχει συμφωνία με το αδιάστατο φάσμα του von Karman και για τα δύο οριακά στρώματα, από την αρχή των φασμάτων έως περίπου την τιμή 10 της αδιάστατης συχνότητας, όπου ξεκινά η περιοχή καταστροφής της τύρβης.

### 5.1.5 Συντελεστής κλίμακας προσομοίωσης

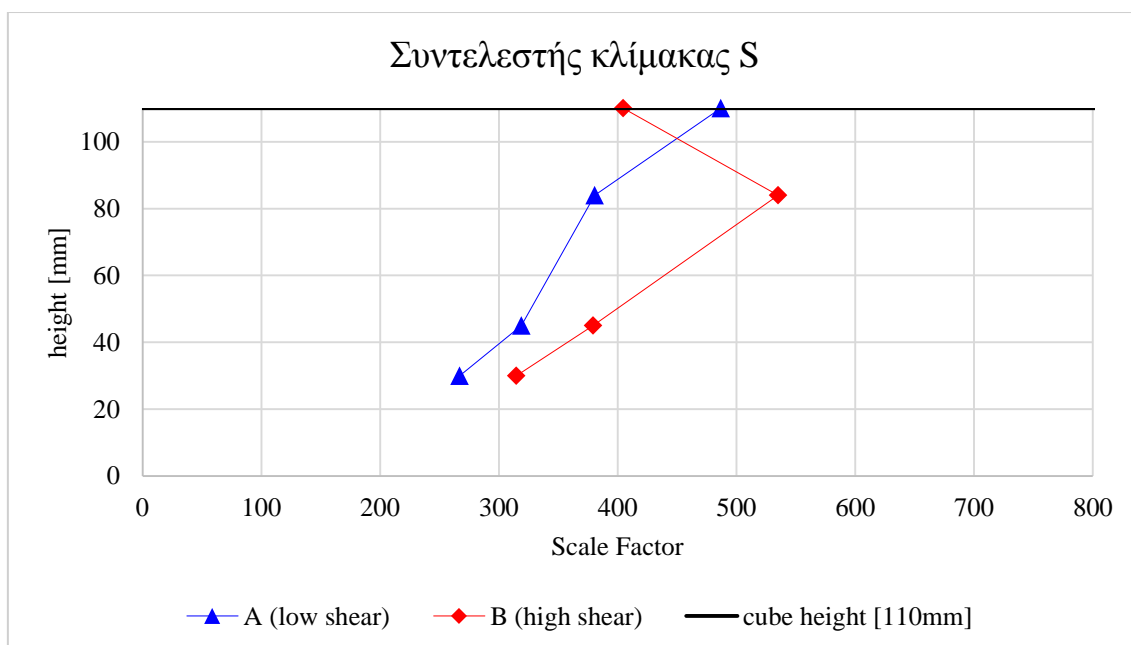
Βάσει μετρημένης κατατομής της ολοκληρωτική κλίμακας μήκους της τύρβης  $Lu_x$  καθ' ύψος  $z$ , εντός του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος, υπολογίζεται ο συντελεστής κλίμακας της προσομοίωσης  $S$  από την σχέση:

$$S = \frac{91.3 z_m^{0.491}}{Lu_{xm}^{1.403} z_{0m}^{0.088}} \quad (5.16)$$

Επομένως γνωρίζοντας την ολοκληρωτική κλίμακας μήκους  $L_{u_x}$  και το ύψος τραχύτητας  $z_0$ , υπολογίζεται ο συντελεστής κλίμακας για κάθε ύψος, κάθε οριακού στρώματος (Σχήμα 5.15, Σχήμα 5.16).



Σχήμα 5.15: Κατατομή του συντελεστή κλίμακας S για τα δύο οριακά στρώματα



Σχήμα 5.16: Λεπτομέρεια, κοντά στο ύψος του κύβου, της κατατομής του συντελεστή κλίμακας S για τα δύο οριακά στρώματα

Ο συντελεστής κλίμακας μεταβάλλεται με το ύψος από τάξεως 250 έως τάξεως 2,250 (Σχήμα 5.15). Όμως το σημείο ενδιαφέροντος είναι ο κύβος, δηλαδή οι τιμές από το έδαφος έως το ύψος του κύβου (Σχήμα 5.16).

Για το Α οριακό στρώμα οι τιμές των τεσσάρων μετρήσεων εντός ύψος κύβου κυμαίνονται από 267 έως 487, με μέσο όρο 363 και τυπική απόκλιση δείγματος 95.

Για το Β οριακό στρώμα οι τιμές των τεσσάρων μετρήσεων εντός ύψος κύβου κυμαίνονται από 315 έως 535, με μέσο όρο 408 και τυπική απόκλιση 93.

Είναι ασφαλές να δεχτούμε ότι η επιτυγχανόμενη κλίμακα και για τα δύο οριακά στρώματα έχει συντελεστή  $S = 400$  για την περιοχή του κύβου.

Επομένως πλέον μπορούν να υπολογιστούν οι παράμετροι των πραγματικών οριακών στρωμάτων που αντιστοιχούν στα προσομοιωμένα οριακά στρώματα (Πίνακας 5.2), μέσω του συντελεστή κλίμακας  $S$ .

	<b>A οριακό στρώμα</b>	<b>B οριακό στρώμα</b>
Ύψος οριακού στρώματος προσομοίωσης $\delta$ [m]	1.21	1.32
Ύψος τραχύτητας προσομοίωσης $z_0$ [m]	$5 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-4}$
Αντίστοιχο πραγματικό $\delta$ [m]	<b>484</b>	<b>528</b>
Αντίστοιχο πραγματικό $z_0$ [m]	<b>0.02</b>	<b>0.28</b>
Εκθέτης $\alpha$	<b>0.12</b>	<b>0.18</b>

**Πίνακας 5.2:** Προσομοιωμένα και αντίστοιχα πραγματικά μεγέθη παραμέτρων των οριακών στρωμάτων

Επομένως το Α οριακό στρώμα αντιστοιχεί σε επιφάνεια με γρασίδι ενώ το Β οριακό στρώμα αντιστοιχεί σε επιφάνεια μεταξύ φυτειών δημητριακών και δάσους [17]. Η ίδια περίπου αντιστοιχία προκύπτει και με βάση τον εκθέτη  $\alpha$  [31].

Όσον αφορά το ύψος του οριακού στρώματος, είναι τυπικές τιμές για ουδέτερο οριακό στρώμα. Είναι λίγο χαμηλότερες από την προτεινόμενη τιμή των 600m του Counihan [12], όμως για τα εδάφη που αντιστοιχούν είναι ίσως ιδανικά.

Για την δυναμική ομοιότητα κατά Reynolds, υπολογίζεται ο αριθμός Reynolds:

$$Re = \frac{\bar{u}_H * Z_H}{\nu} \quad (5.17)$$

όπου  $\bar{u}_H$  η μέση ταχύτητα στο ύψος του κύβου,  $z_H$  το ύψος του κύβου και  $\nu$  η κινηματική συνεκτικότητα του αέρα κατά τη διάρκεια της μέτρησης.

Για το Α οριακό στρώμα  $Re = 2.5 \cdot 10^4$  και για το Β οριακό στρώμα  $Re = 2.2 \cdot 10^4$ , επομένως και τα δύο πληρούν την προϋπόθεση αρκετά πάνω από το προτεινόμενο όριο για ανεξαρτησία της ροής από επιδράσεις αριθμού Reynolds, επομένως η δυναμική ομοιότητα του αριθμού Reynolds μπορεί να αγνοηθεί [4].



## 5.2 Κατανομή συντελεστή πίεσης στην επιφάνεια του κύβου

Ο συντελεστής πίεσης ορίζεται ως:

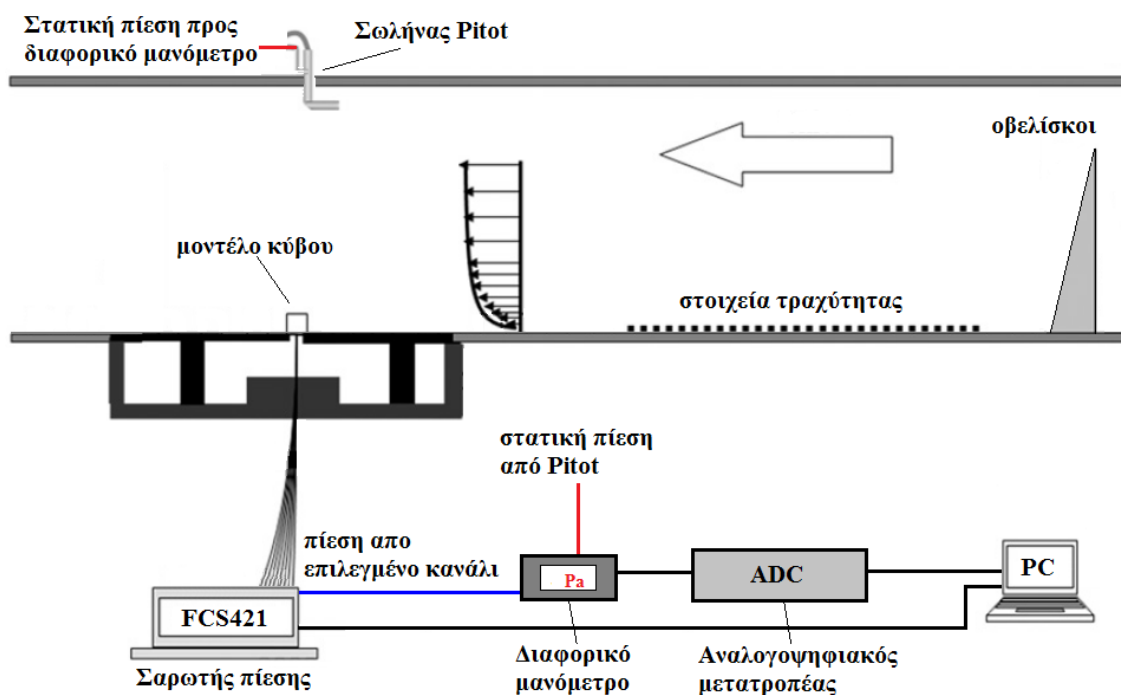
$$C_p = \frac{p - p_o}{\frac{1}{2} \rho U_o^2} = \frac{p - p_o}{q} \quad (5.18)$$

όπου  $p$  η στατική πίεση στην επιφάνεια του κύβου,  $p_o$  η στατική πίεση πάνω από το οριακό στρώμα στην ελεύθερη επιφάνεια,  $\rho$  η πυκνότητα του αέρα,  $U_o$  η μέση ταχύτητα στο ύψος του κύβου,  $h$  ύψη κύβου ανάντι από το κέντρο του κύβου και  $q$  η δυναμική πίεση που προκύπτει βάσει ταχύτητας και πυκνότητας στο ύψος του κύβου,  $h$  ύψη κύβου ανάντι από το κέντρο του κύβου.

Έτσι η σχέση (5.18) διαμορφώνεται ως εξής:

$$C_p = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2} \rho U_H^2} = \frac{\Delta p}{q_H} \quad (5.19)$$

Η ταχύτητα για το Α οριακό στρώμα είναι  $U_H = 3.55\text{m/s}$  και για το Β οριακό στρώμα είναι  $U_H = 3.21\text{m/s}$ . Επομένως οι τιμές της δυναμικής πίεσης για Α οριακό στρώμα είναι  $q_H = 7.33\text{Pa}$  και για το Β οριακό στρώμα είναι  $q_H = 5.99\text{Pa}$ . Αναφέρεται ότι ο λόγος παρεμπόδισης της ροής (blockage) είναι 0.14%.



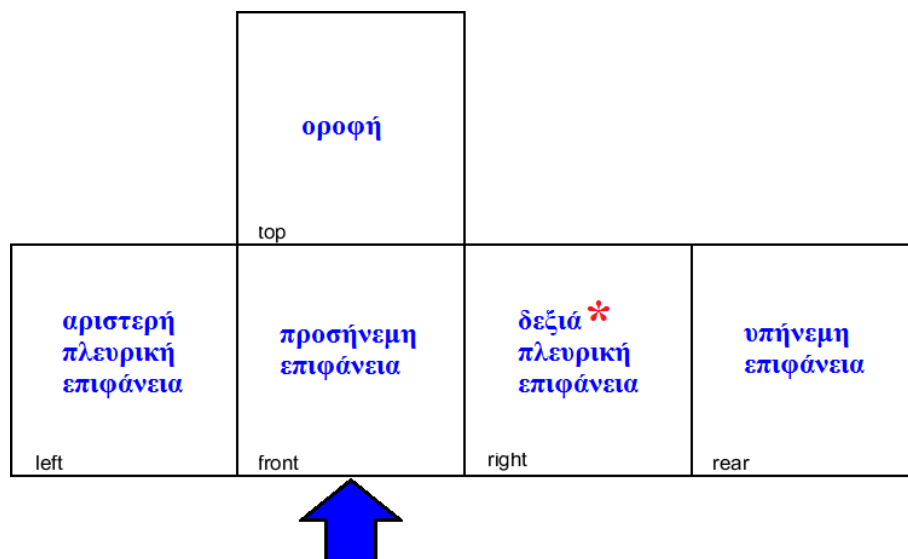
Σχήμα 5.17: Διάταξη μέτρησης πίεσης στην επιφάνεια του κύβου (όχι σε κλίμακα)

Η διαφορά  $\Delta p$  είναι η διαφορά  $p-p_0$ . Το διαφορικό μανόμετρο μετρά ευθέως αυτή την διαφορά. Οι μετρήσεις κατανομής πιέσεων στις εξωτερικές επιφάνειες του κύβου έγιναν με διαφορικό μανόμετρο FCO16 και αυτόματο σαρωτή πιέσεων FCS421 (Σχήμα 5.17). Η συχνότητα δειγματοληψίας των πιέσεων σε κάθε σημείο ήταν 50Hz για χρόνο 10s.

Η διαδικασία καταγραφής έγινε μέσω του προγράμματος LabView της National Instruments, όπου αναλάμβανε την αυτόματη σάρωση των καναλιών της πίεσης αλλά και την καταγραφή των τιμών του διαφορικού μανομέτρου.

### 5.2.1 Ροή κάθετη στην επιφάνεια του κύβου

Για ροή κάθετη στην επιφάνεια του κύβου η κατανομή παρουσιάζεται μέσω ισοβαρών καμπυλών (contour lines) στο ανάπτυγμα του κύβου (Σχήμα 5.18).

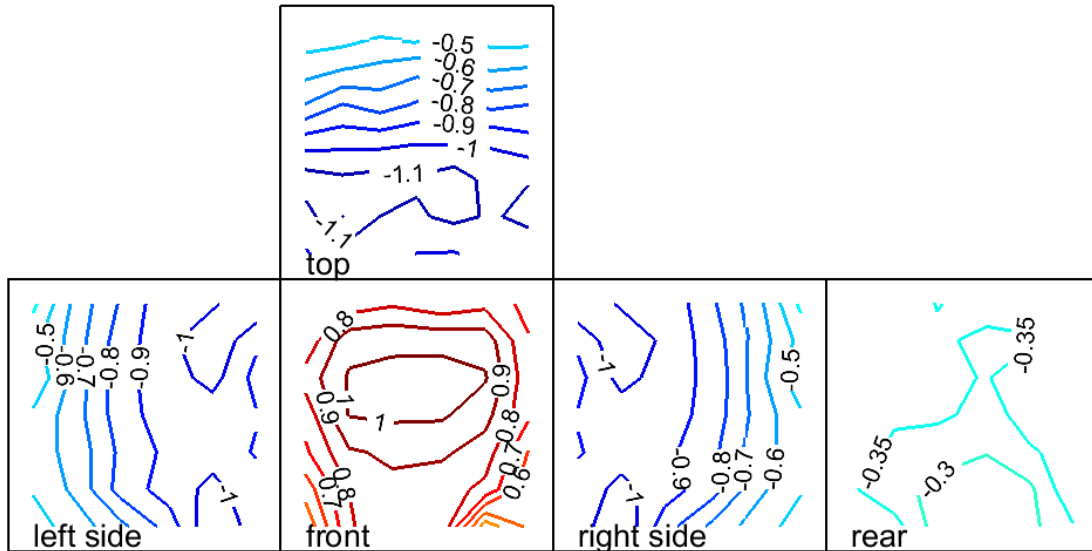


**Σχήμα 5.18:** Ανάπτυγμα κύβου για ροή κάθετη στην επιφάνεια του κύβου όπου παρουσιάζεται η κατανομή του συντελεστή πίεσης μέσω ισοβαρών καμπυλών. Η δεξιά πλευρική επιφάνεια (\*) απεικονίζεται ως κατοπτρική της αριστερής πλευρικής όπως περιγράφεται στην υποενότητα 4.5.1

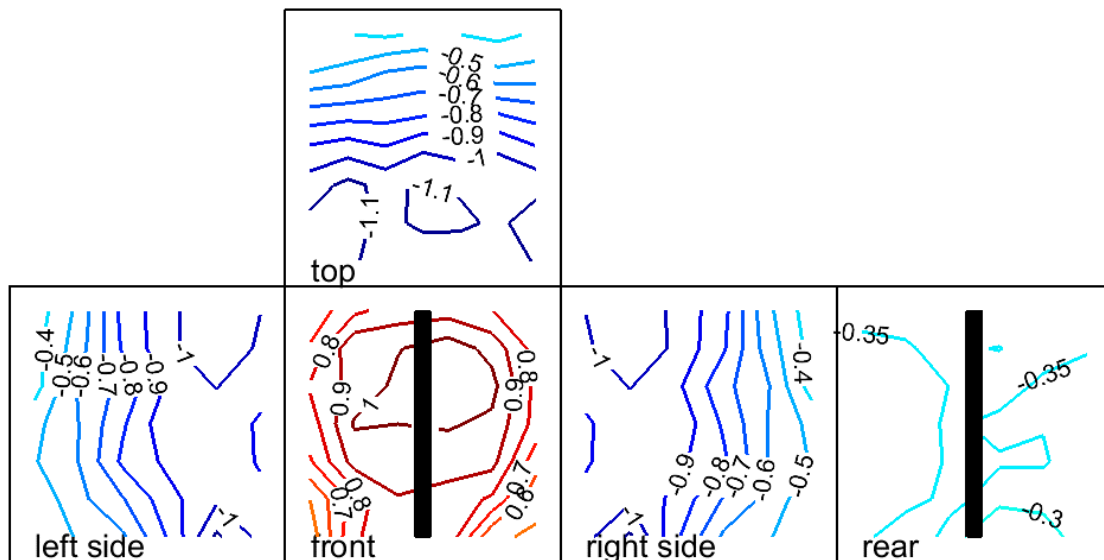
Υπενθυμίζεται ότι η δεξιά πλευρική επιφάνεια (right side) δεν μετρήθηκε και απεικονίζεται ως συμμετρική της αριστερής πλευρικής (left side) με την υπόθεση της συμμετρικής ροής.

Για την απεικόνιση της κατανομής σε ισοβαρείς καμπύλες δημιουργήθηκε κώδικας σε περιβάλλον MATLAB και στη συνέχεια παρουσιάζονται οι κατανομές για τους τέσσερις συνδυασμούς ανοιγμάτων του κύβου και για τα δύο οριακά στρώματα.

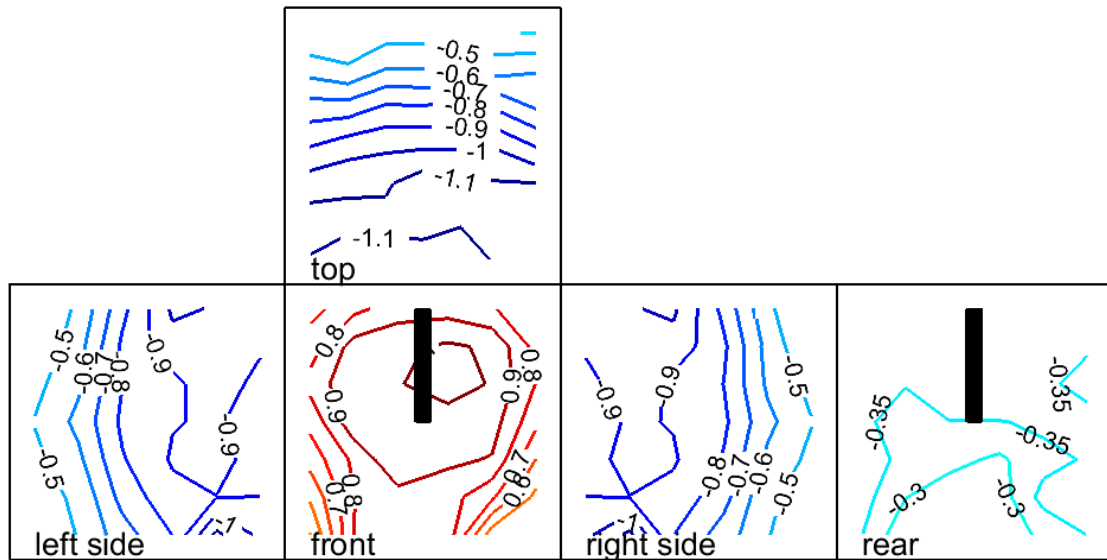
- Για Α οριακό στρώμα:



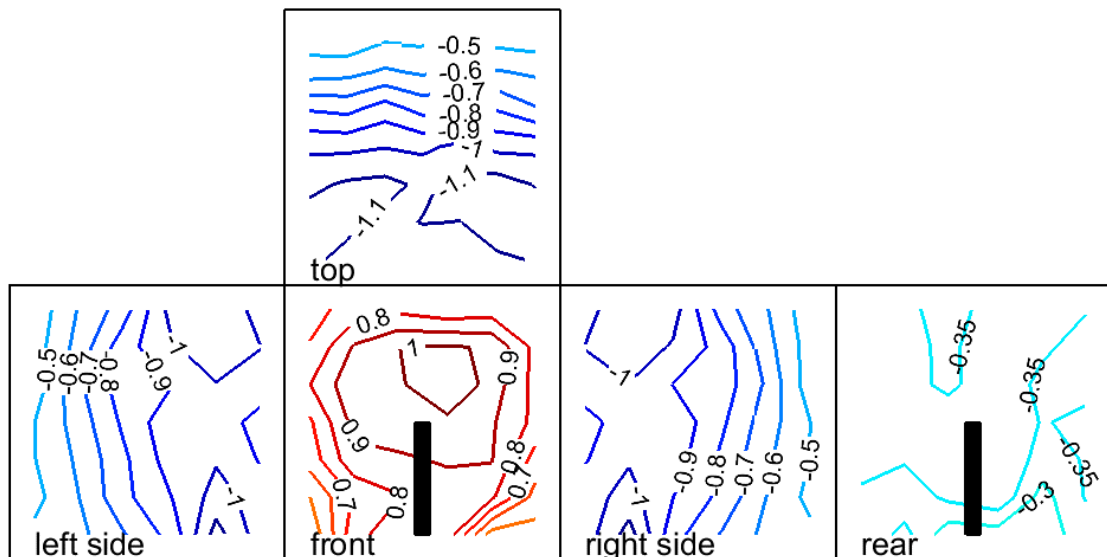
Σχήμα 5.19: Κατανομή συντελεστή πίεσης για κλειστό κύβο και Α οριακό στρώμα



Σχήμα 5.20: Κατανομή συντελεστή πίεσης για πλήρη ανοίγματα και Α οριακό στρώμα

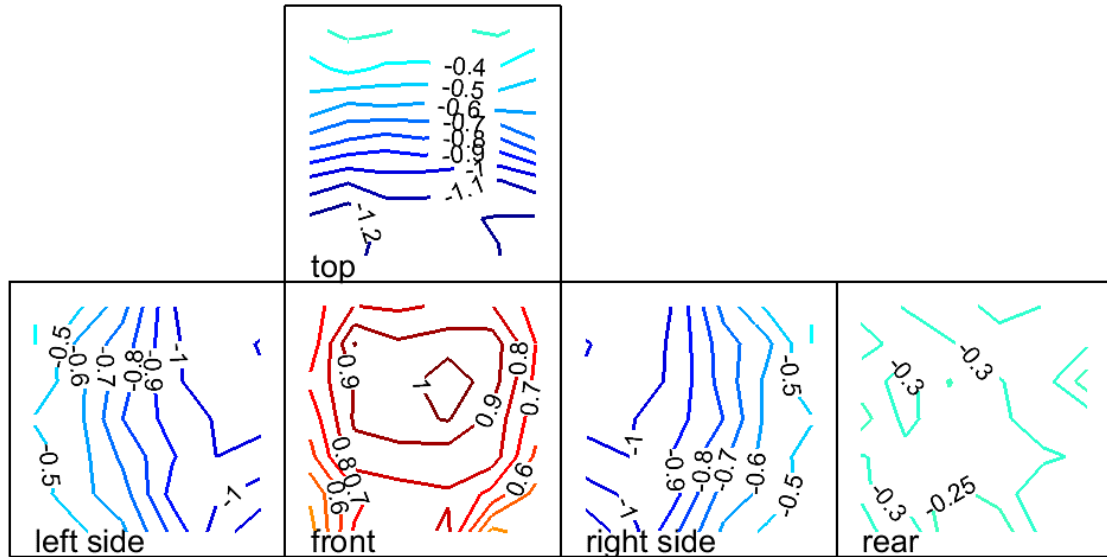


Σχήμα 5.21: Κατανομή συντελεστή πίεσης για επάνω ανοίγματα και Α οριακό στρώμα

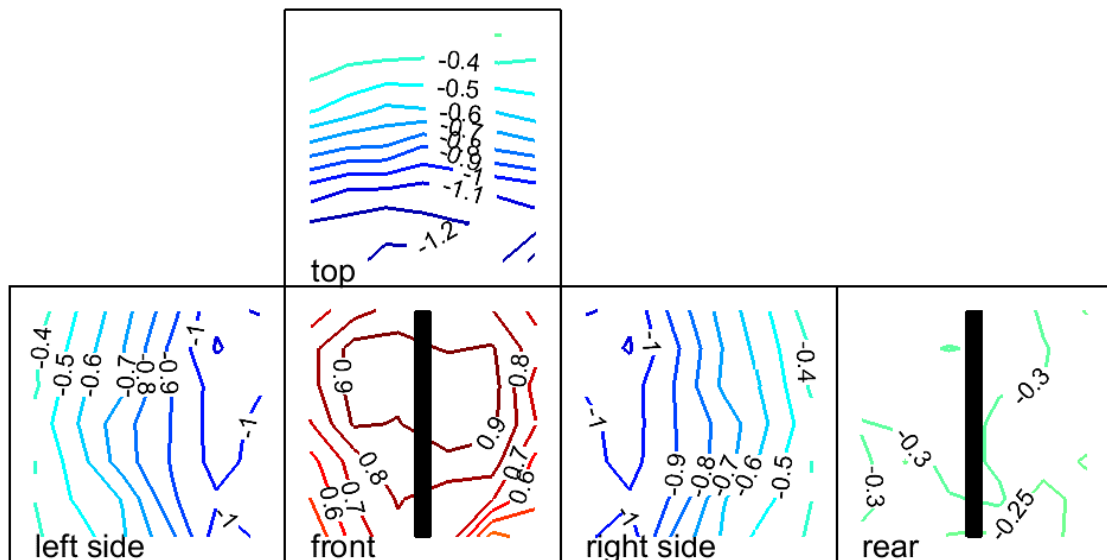


Σχήμα 5.22: Κατανομή συντελεστή πίεσης για κάτω ανοίγματα και Α οριακό στρώμα

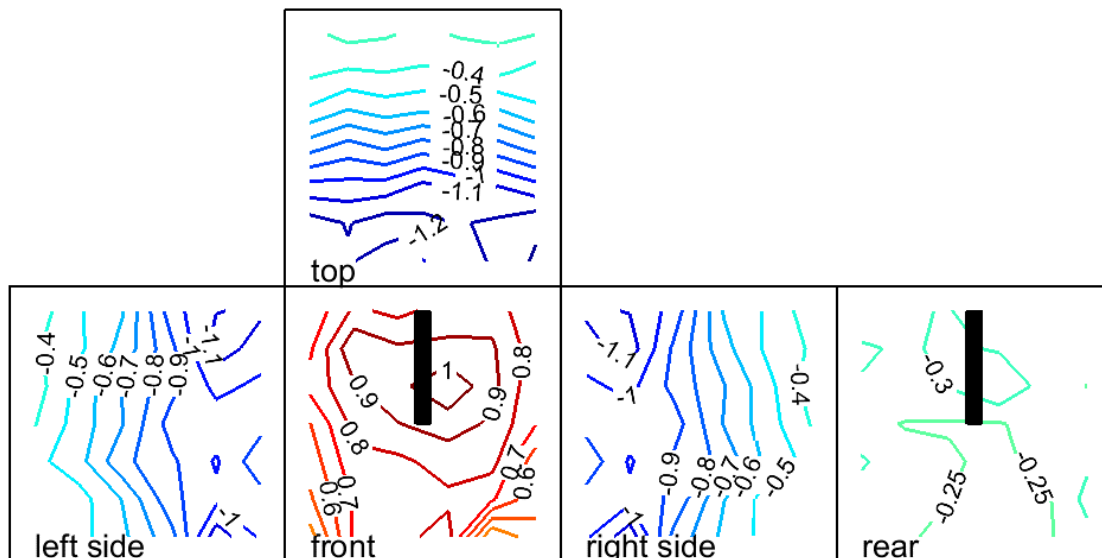
- Για Β οριακό στρώμα:



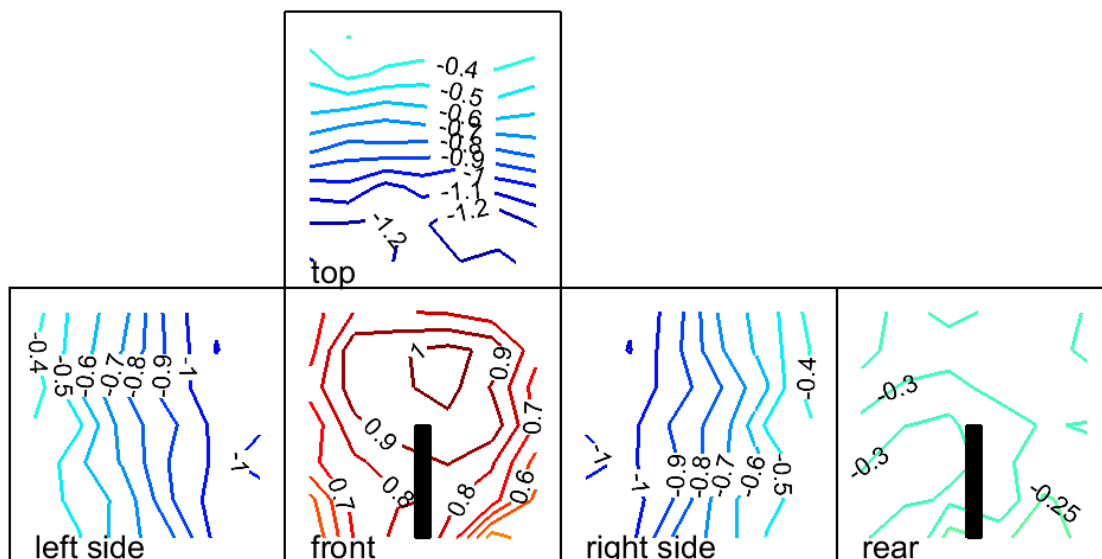
Σχήμα 5.23: Κατανομή συντελεστή πίεσης για κλειστό κύβο και Β οριακό στρώμα



Σχήμα 5.24: Κατανομή συντελεστή πίεσης για πλήρη ανοίγματα και Β οριακό στρώμα



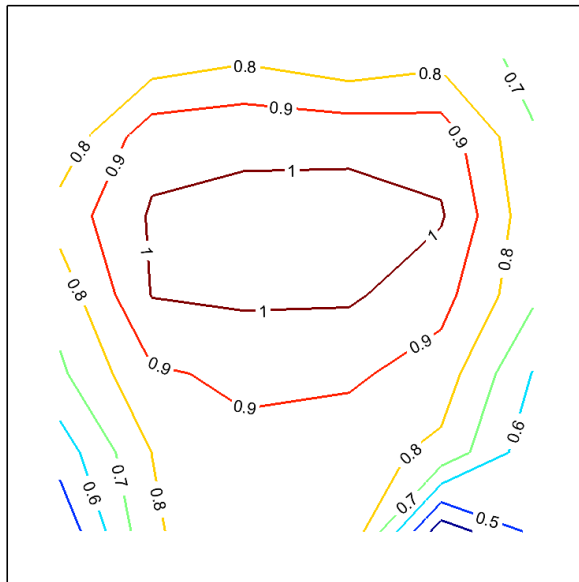
Σχήμα 5.25: Κατανομή συντελεστή πίεσης για επάνω ανοίγματα και Β οριακό στρώμα



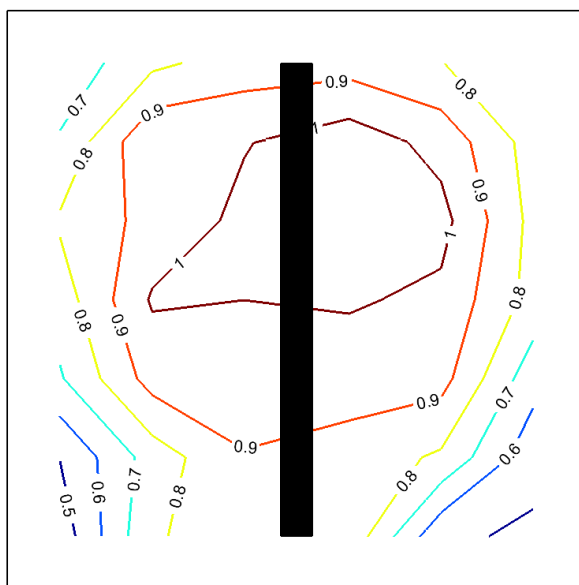
Σχήμα 5.26: Κατανομή συντελεστή πίεσης για κάτω ανοίγματα και Β οριακό στρώμα

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι κατανομές μόνο για την προσήνεμη επιφάνεια.

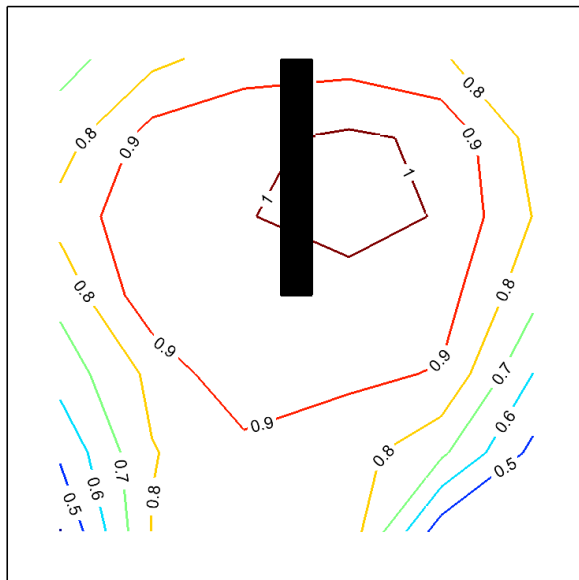
- Για Α οριακό στρώμα:



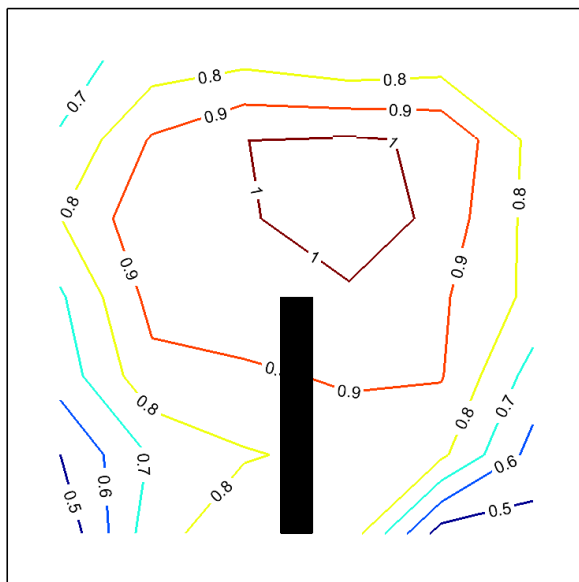
Σχήμα 5.27: Συντελεστής πίεσης προσήνεμης επιφάνειας κλειστού κύβου για Α οριακό στρώμα



Σχήμα 5.28: Συντελεστής πίεσης προσήνεμης επιφάνειας με πλήρη ανοίγματα για Α οριακό στρώμα



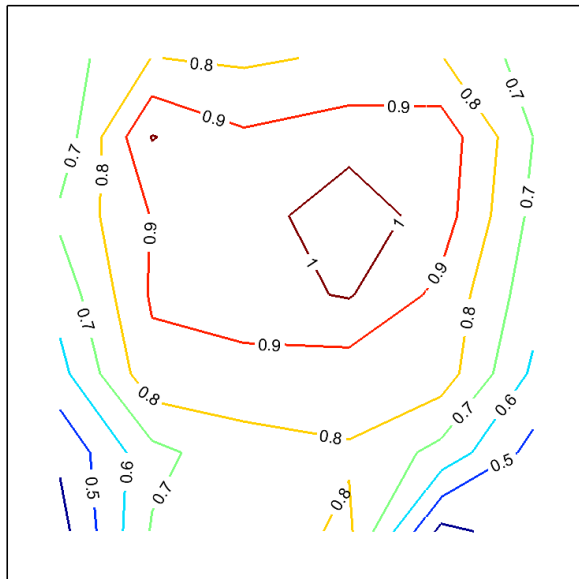
Σχήμα 5.29: Συντελεστής πίεσης προσήνεμης επιφάνειας με επάνω ανοίγματα για Α οριακό στρώμα



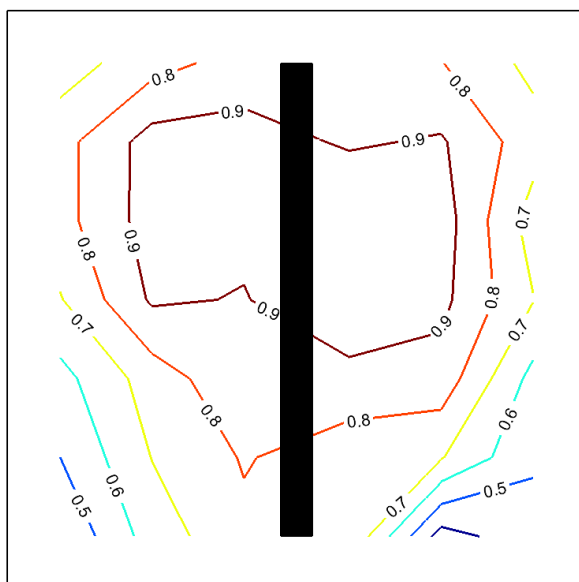
Σχήμα 5.30: Συντελεστής πίεσης προσήνεμης επιφάνειας με κάτω ανοίγματα για Α οριακό στρώμα



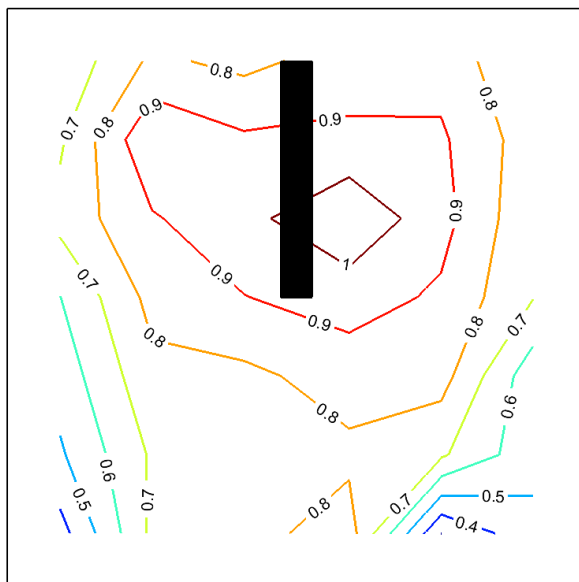
- Για Β οριακό στρώμα:



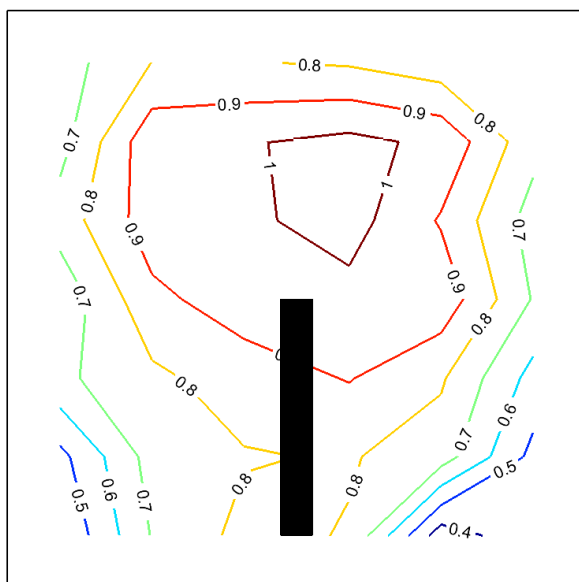
Σχήμα 5.31: Συντελεστής πίεσης προσήνεμης επιφάνειας κλειστού κύβου για Β οριακό στρώμα



Σχήμα 5.32: Συντελεστής πίεσης προσήνεμης επιφάνειας με πλήρη ανοίγματα για Β οριακό στρώμα



Σχήμα 5.33: Συντελεστής πίεσης προσήνεμης επιφάνειας με επάνω ανοίγματα για Β οριακό στρώμα



Σχήμα 5.34: Συντελεστής πίεσης προσήνεμης επιφάνειας με κάτω ανοίγματα για Β οριακό στρώμα

Στην προσήνεμη επιφάνεια των κύβων εύκολα διακρίνεται η περιοχή ανακοπής όπου ο συντελεστής πίεσης λαμβάνει τις υψηλότερες τιμές.

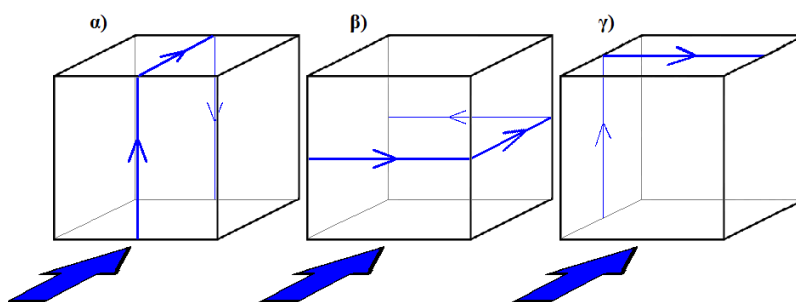
Στην οροφή και στις πλευρικές επιφάνειες διακρίνεται η περιοχή αποκόλλησης όπου ο συντελεστής πίεσης λαμβάνει τις χαμηλότερες τιμές με προοδευτική ανάκτηση πίεσης.

Στην υπήνεμη επιφάνεια ο συντελεστής πίεσης παρουσιάζει ένα ομοιόμορφο πεδίο υποπίεσεων, όπως ήταν αναμενόμενο.

Αξίζει να αναφερθεί ότι σε ορισμένες περιπτώσεις (Σχήμα 5.29, Σχήμα 5.30, Σχήμα 5.31, Σχήμα 5.34) στην προσήνεμη επιφάνεια φαίνεται ότι υπάρχει ασυμμετρία της κατανομής. Αυτό ίσως υποδηλώνει είτε λάθος τοποθέτηση, είτε ανομοιομορφία της ροής κατά τον  $y$  άξονα. Έτσι η υπόθεση συμμετρικής ροής λογικά είναι λανθασμένη αλλά ίσως είναι εντός ορίων σφάλματος.

Για τις συγκρίσεις μεταξύ των σεναρίων χρησιμοποιείται η απεικόνιση της κατανομής κατά τις διαδρομές στις μέσες γραμμές των επιφανειών, την διαμήκη διαδρομή, την οριζόντια διαδρομή και την εγκάρσια διαδρομή (Σχήμα 5.35).

Όμως για τις κάθετες πλευρές, του ανοίγματος δεν υπάρχει μέση γραμμή (Σχήμα 5.36). Έτσι για τις διαδρομές που διατρέχουν κατακόρυφα μια κάθετη επιφάνεια, δεν ορίζεται.

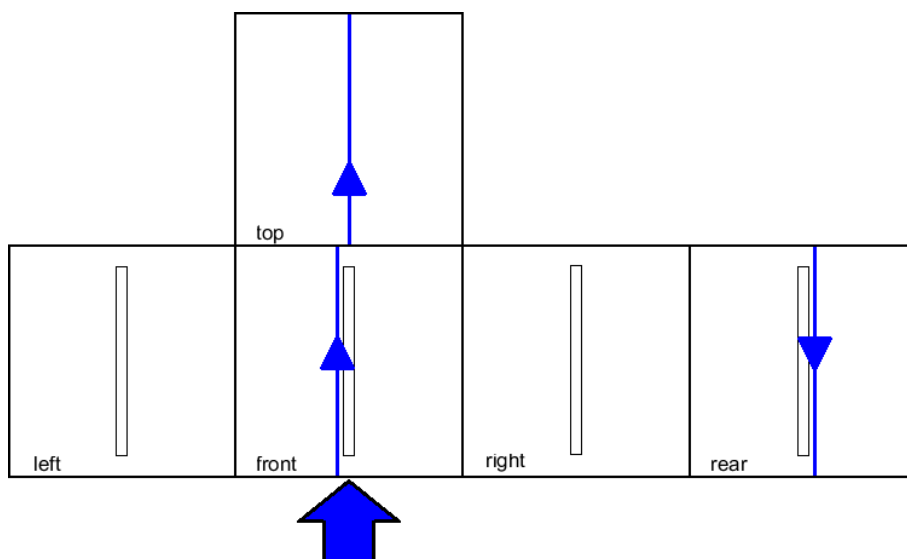


Σχήμα 5.35: α) Διαμήκης διαδρομή μέσης γραμμής, β) οριζόντια διαδρομή μέσης γραμμής γ) εγκάρσια διαδρομή μέσης γραμμής.

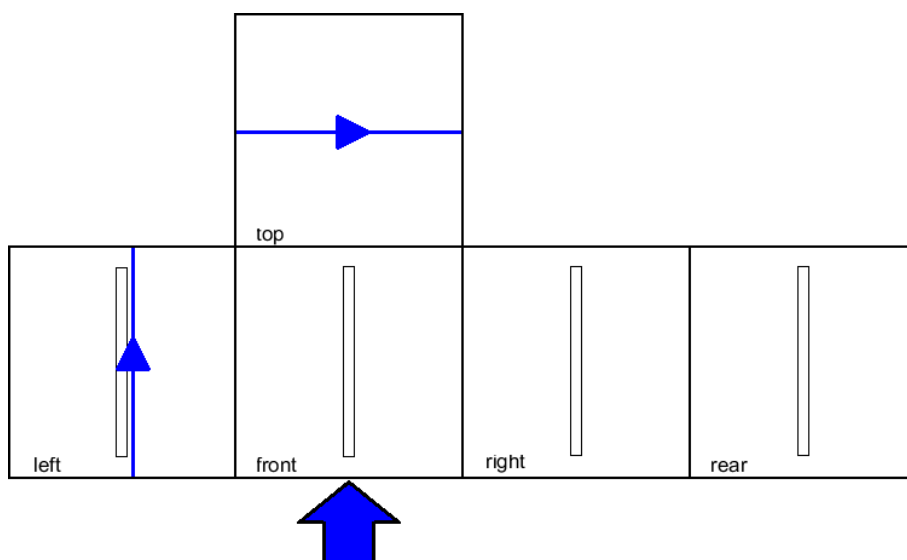


Σχήμα 5.36: Κάθετη επιφάνεια

Αντ' αυτού λαμβάνονται οι κατακόρυφες ακριβώς δίπλα από το άνοιγμα. Για την εμπρός επιφάνεια λαμβάνεται η αριστερή στήλη καναλιών του ανοίγματος (κοιτώντας από ανάντι προς κατόντι). Για την πίσω επιφάνεια λαμβάνεται η δεξιά του ανοίγματος (κοιτώντας από κατόντι προς ανάντι). Για την πλευρική (αριστερή μόνον) λαμβάνεται η δεξιά στήλη. Έτσι διαμορφώνεται η διαμήκης διαδρομή (Σχήμα 5.37) και η εγκάρσια διαδρομή (Σχήμα 5.38).



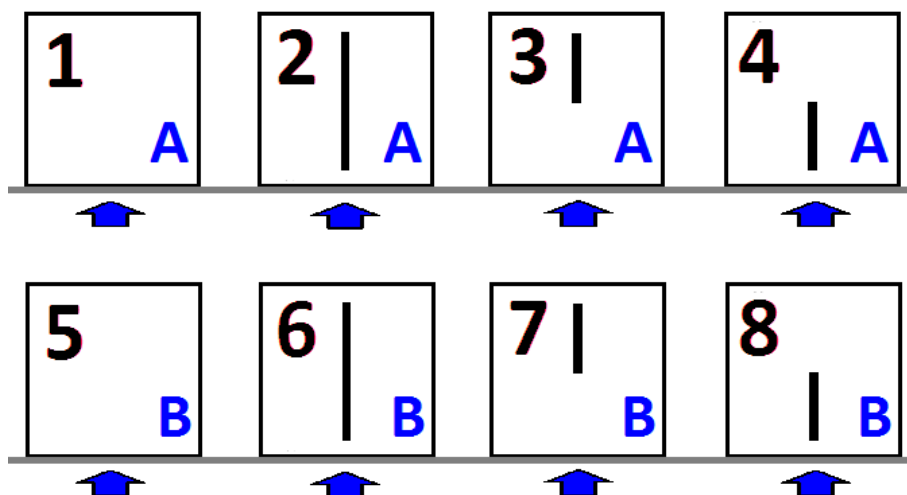
Σχήμα 5.37: Διαδρομές για διαμήκη διαδρομή (Σχήμα 5.35α) λόγω ανοιγμάτων του κύβου



Σχήμα 5.38: Διαδρομές για εγκάρσια διαδρομή (Σχήμα 5.35β) λόγω ανοιγμάτων του κύβου

Υπενθυμίζονται οι αριθμήσεις των σεναρίων των συνδυασμών ανοιγμάτων κύβου και οριακών στρώματων (Σχήμα 5.39).

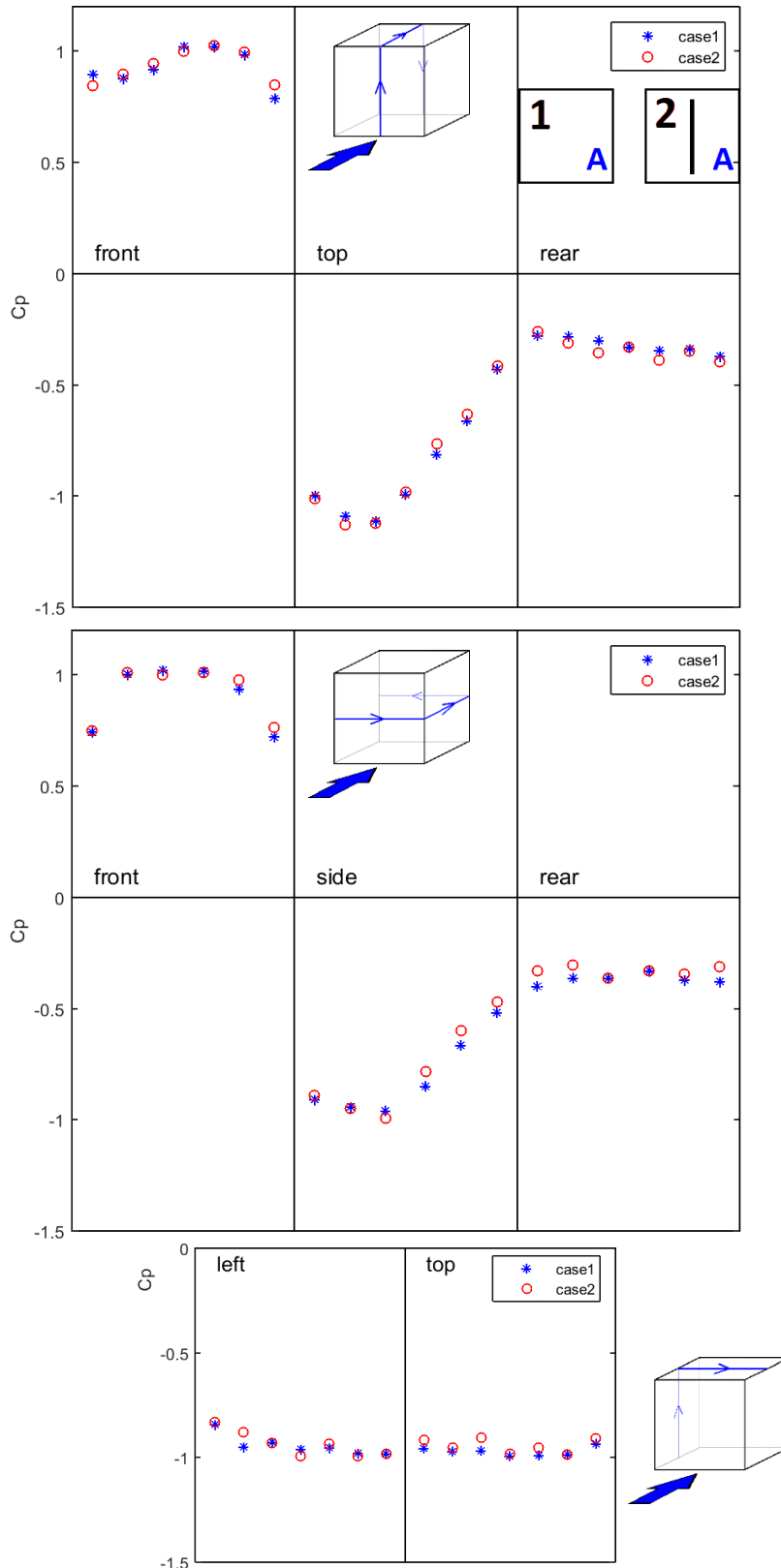
- 1 κλειστός κύβος, A οριακό στρώμα
- 2 πλήρη ανοίγματα, A οριακό στρώμα
- 3 επάνω ανοίγματα, A οριακό στρώμα
- 4 κάτω ανοίγματα, A οριακό στρώμα
- 5 κλειστός κύβος, B οριακό στρώμα
- 6 πλήρη ανοίγματα, B οριακό στρώμα
- 7 επάνω ανοίγματα, B οριακό στρώμα
- 8 κάτω ανοίγματα, B οριακό στρώμα



Σχήμα 5.39: Αρίθμηση των σεναρίων κάθετης ροής

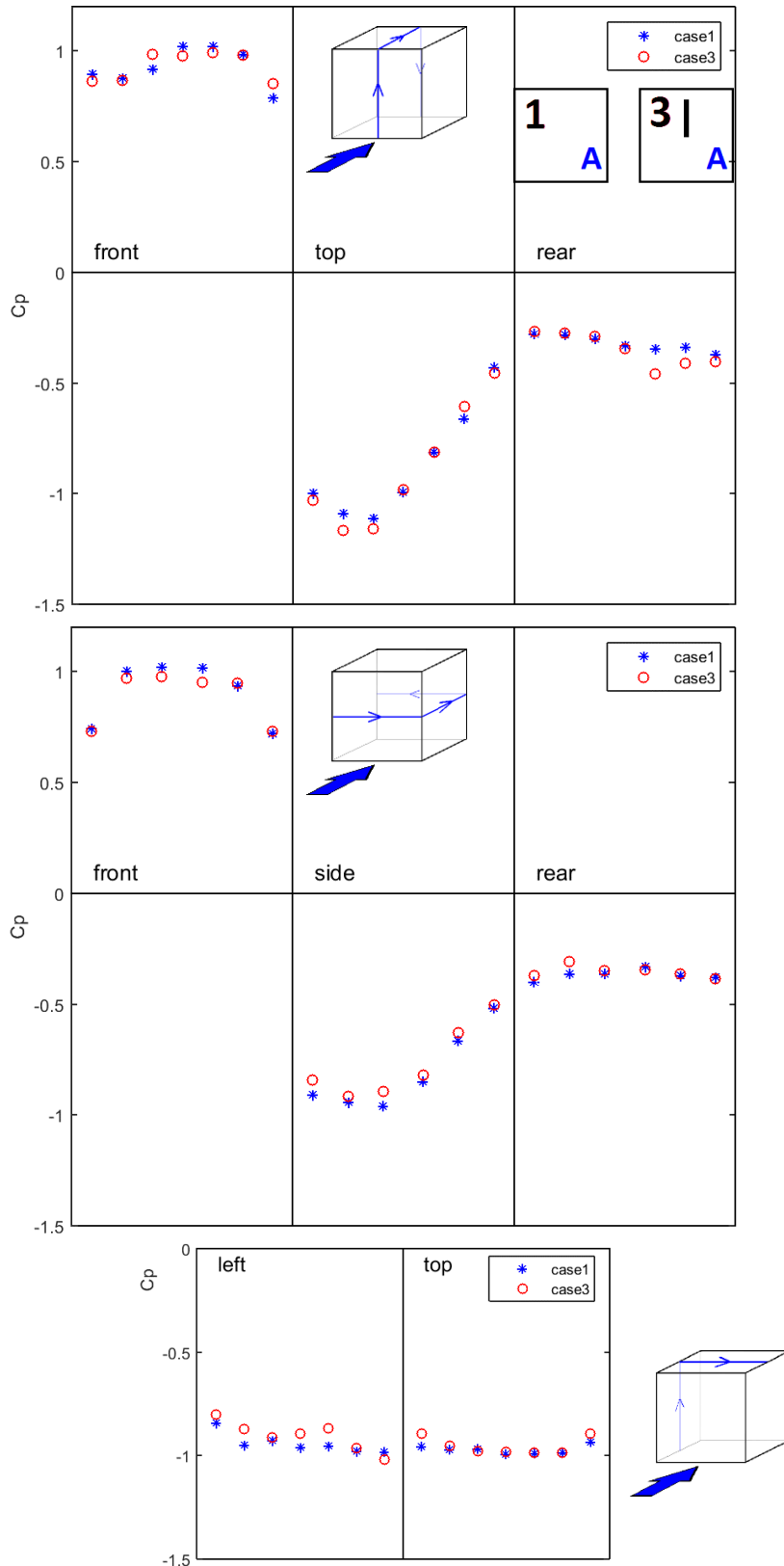
Για την απεικόνιση δημιουργήθηκε κώδικας σε περιβάλλον MATLAB και στη συνέχεια απεικονίζονται τα διαγράμματα με συγκρίσεις μεταξύ διάφορων σεναρίων.

- Σύγκριση κλειστού κύβου και κύβου με πλήρη ανοίγματα για Α οριακό στρώμα



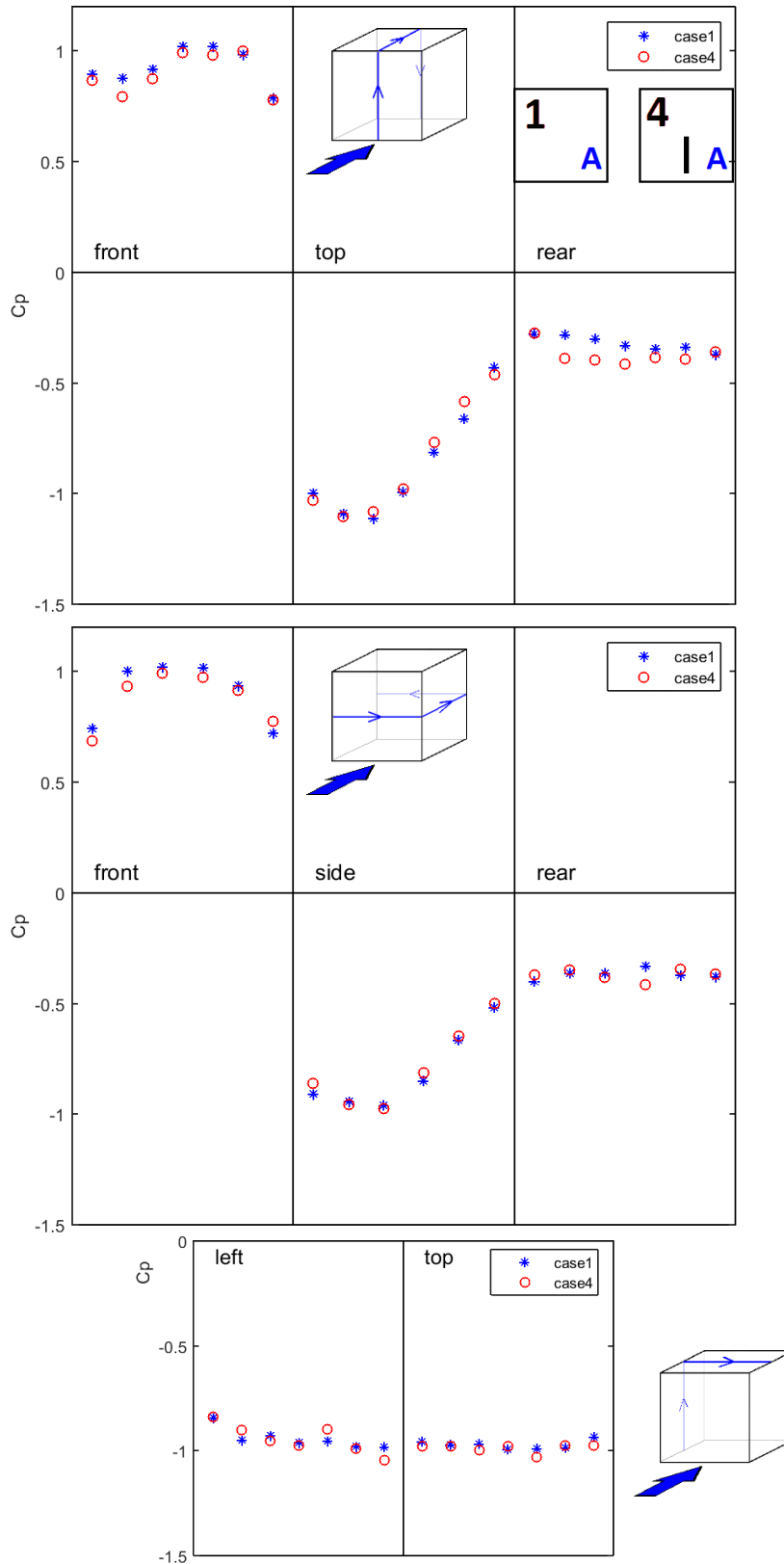
Σχήμα 5.40: Σύγκριση σεναρίων 1 και 2

- Σύγκριση κλειστού κύβου και κύβου με επάνω ανοίγματα για Α οριακό στρώμα



Σχήμα 5.41: Σύγκριση σεναρίων 1 και 3

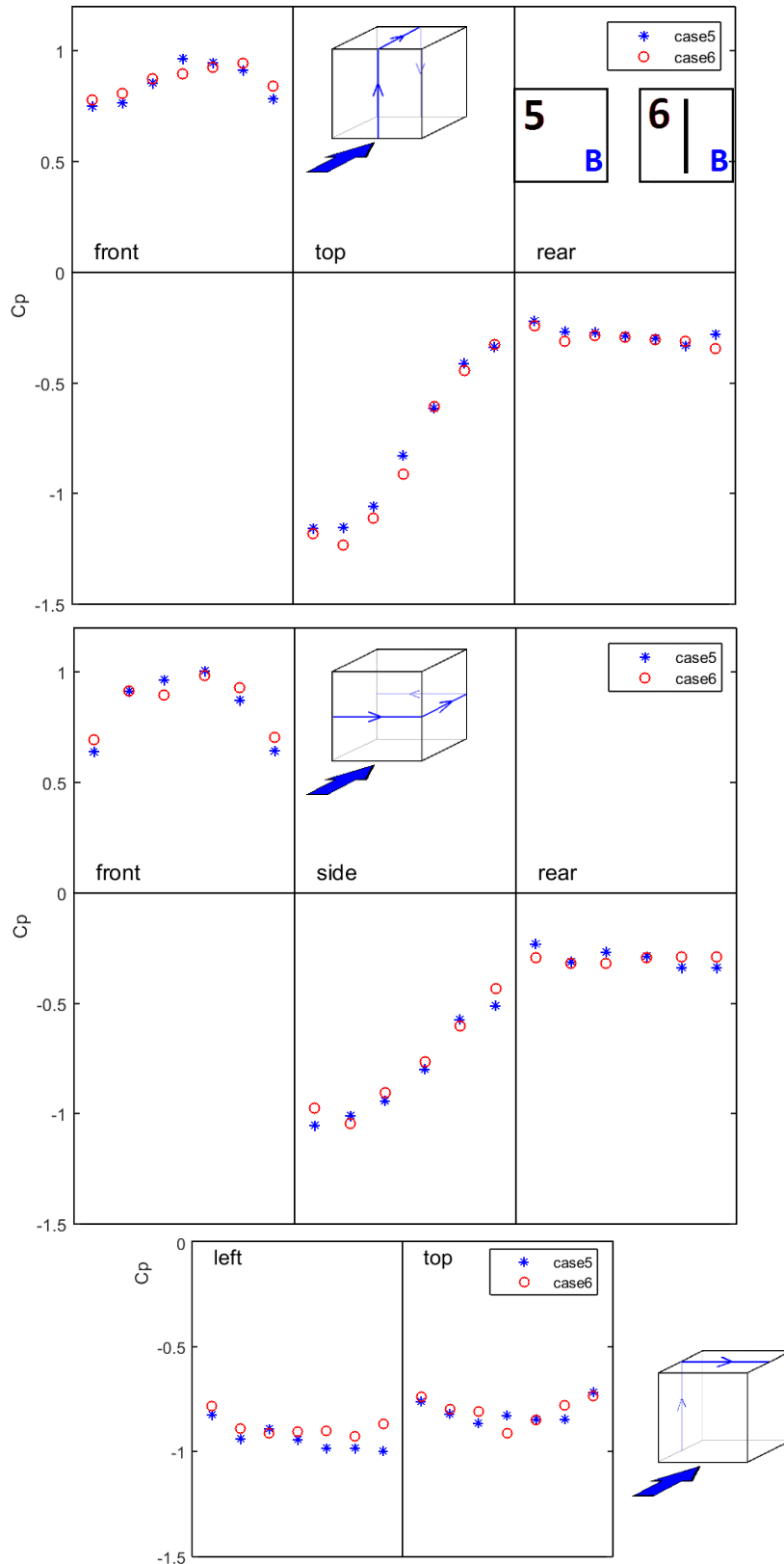
- Σύγκριση κλειστού κύβου και κύβου με κάτω ανοίγματα για Α οριακό στρώμα



Σχήμα 5.42: Σύγκριση σεναρίων 1 και 4

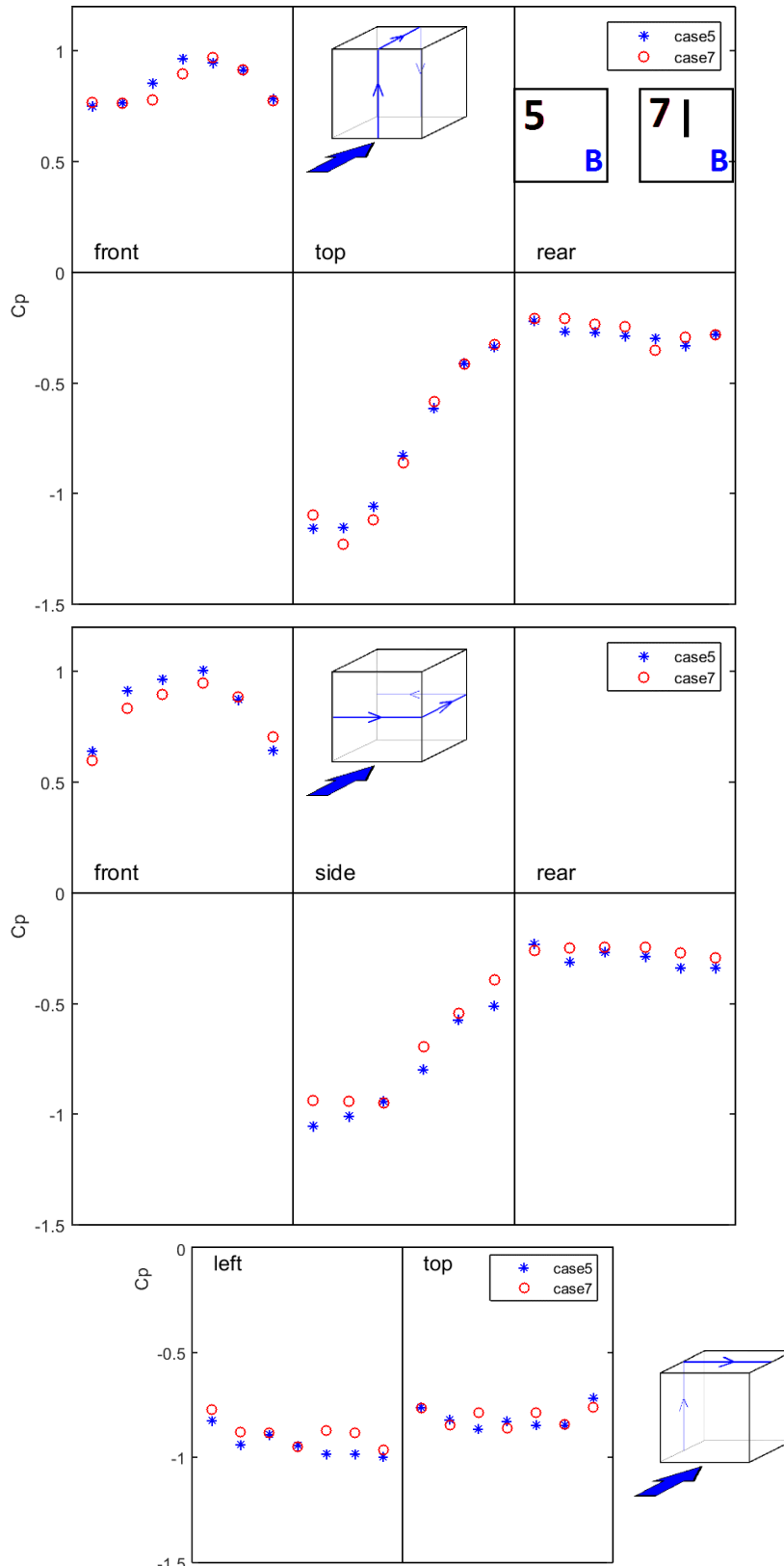


- Σύγκριση κλειστού κύβου και κύβου με πλήρη ανοίγματα για Β οριακό στρώμα



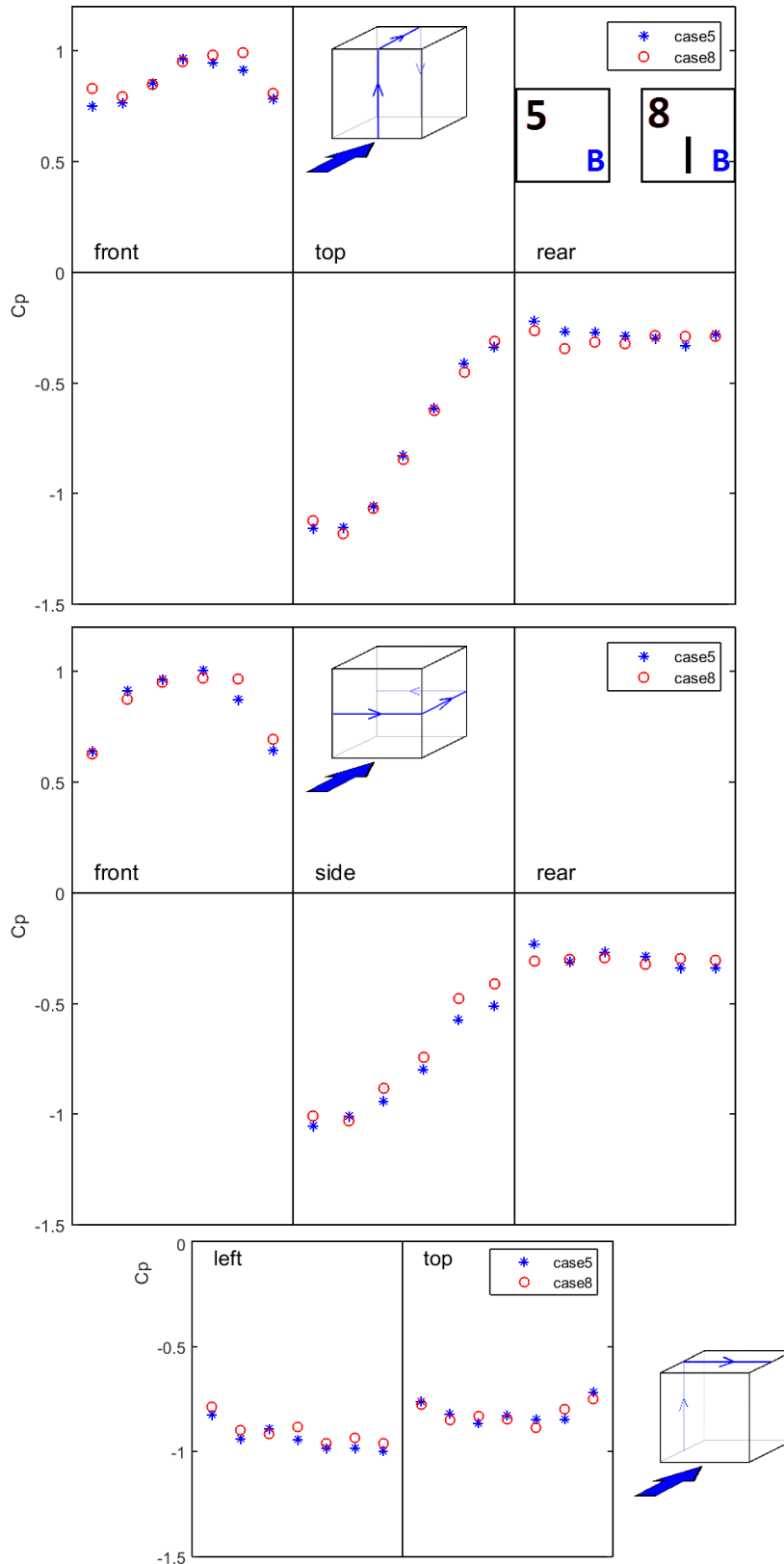
Σχήμα 5.43: Σύγκριση σεναρίων 5 και 6

- Σύγκριση κλειστού κύβου και κύβου με επάνω ανοίγματα για Β οριακό στρώμα



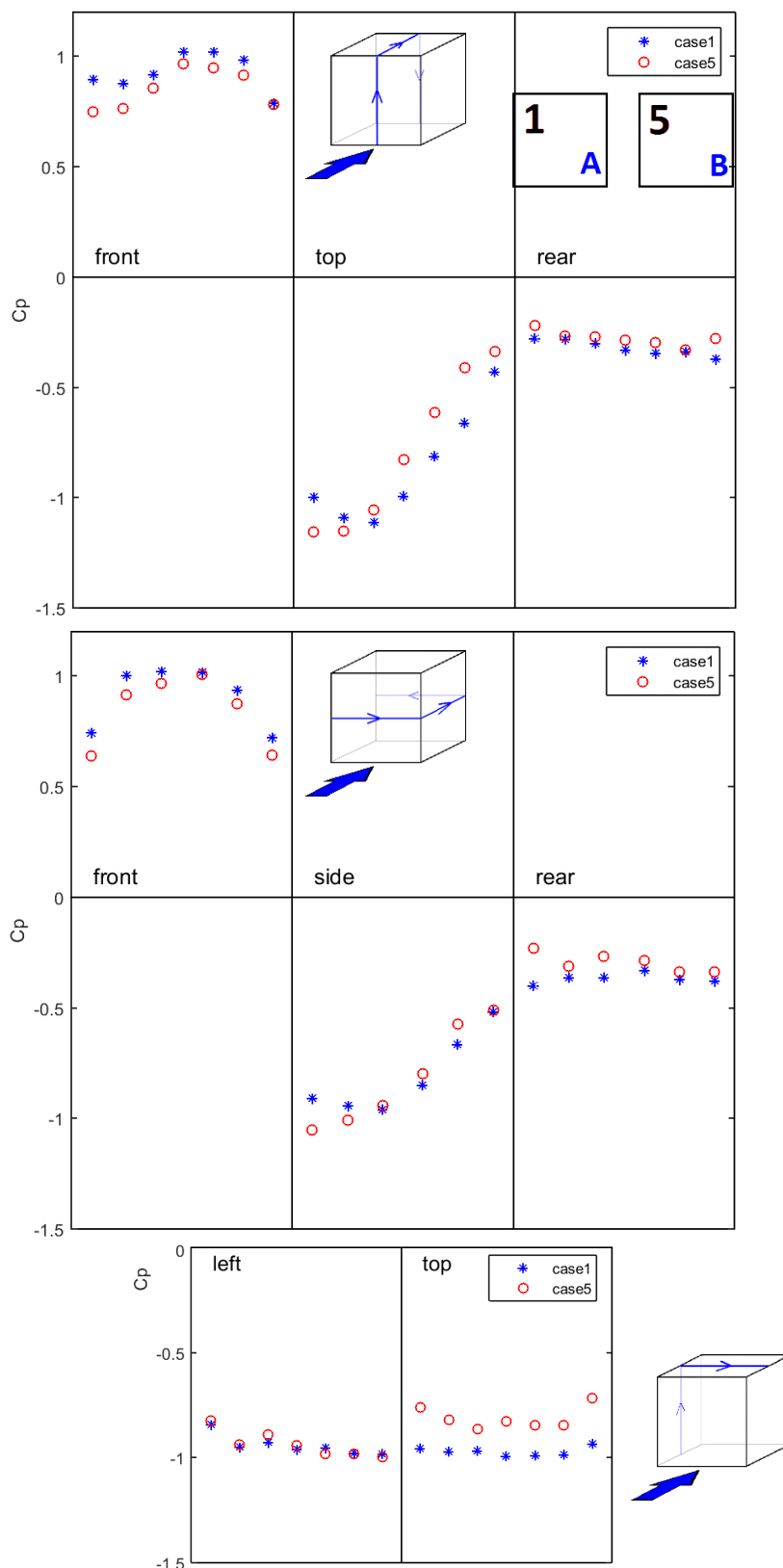
Σχήμα 5.44: Σύγκριση σεναρίων 5 και 7

- Σύγκριση κλειστού κύβου και κύβου με κάτω ανοίγματα για Β οριακό στρώμα



Σχήμα 5.45: Σύγκριση σεναρίων 5 και 8

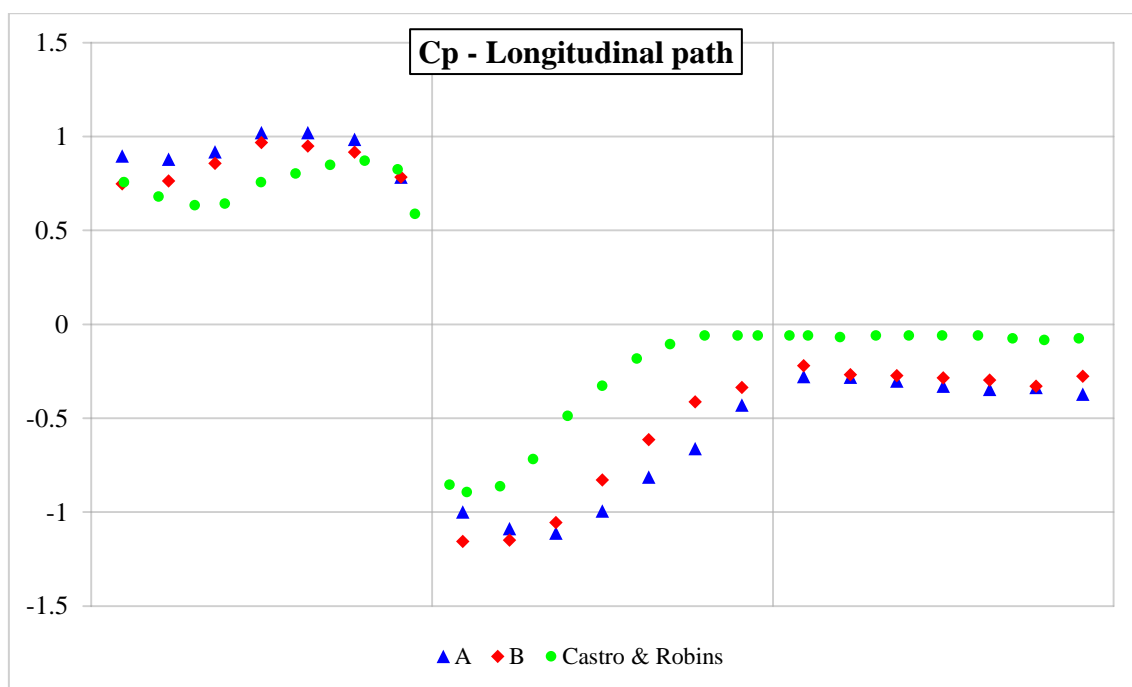
- Σύγκριση κλειστού κύβου για τα δύο οριακά στρώματα



Σχήμα 5.46: Σύγκριση σεναρίων 1 και 5

Χαρακτηριστικό των αποτελεσμάτων, και για τα δύο οριακά στρώματα, είναι ελάχιστη η μεταβολή που παρατηρείται με τη παρουσία των ανοιγμάτων. Συγκρίνοντας τους κλειστούς κύβους και αυτούς με τα πλήρη ανοίγματα (Σχήμα 5.40, Σχήμα 5.43), φαίνεται ότι η παρουσία των ανοιγμάτων επιφέρει πολύ μικρές μεταβολές στις κατατομές του συντελεστή πίεσης, με εξαίρεση αυτές της ανάντι πλευράς, όπου διακρίνεται μια πιο γραμμική μεταβολή από τη βάση της πλευράς μέχρι λίγο πριν τη κορυφή. Αυτό ερμηνεύεται ως επίδραση στο σχηματιζόμενο πεταλοειδή στρόβιλο στη βάση της ανάντι πλευράς, με τη παρουσία των ανοιγμάτων να τον εξασθενίζει διοχετεύοντας παροχή και διά του εσωτερικού του κύβου.

Γίνεται σύγκριση των κατατομών της πίεσης κλειστού κύβου, των δύο οριακών στρωμάτων με τα αποτελέσματα των μετρήσεων των Castro & Robins [4] (Σχήμα 5.47) με οριακό στρώμα πολύ μεγαλύτερης διάτμησης ( $z_0=4 \text{ mm}$ ) και πάχους ( $\delta=10H$ ).

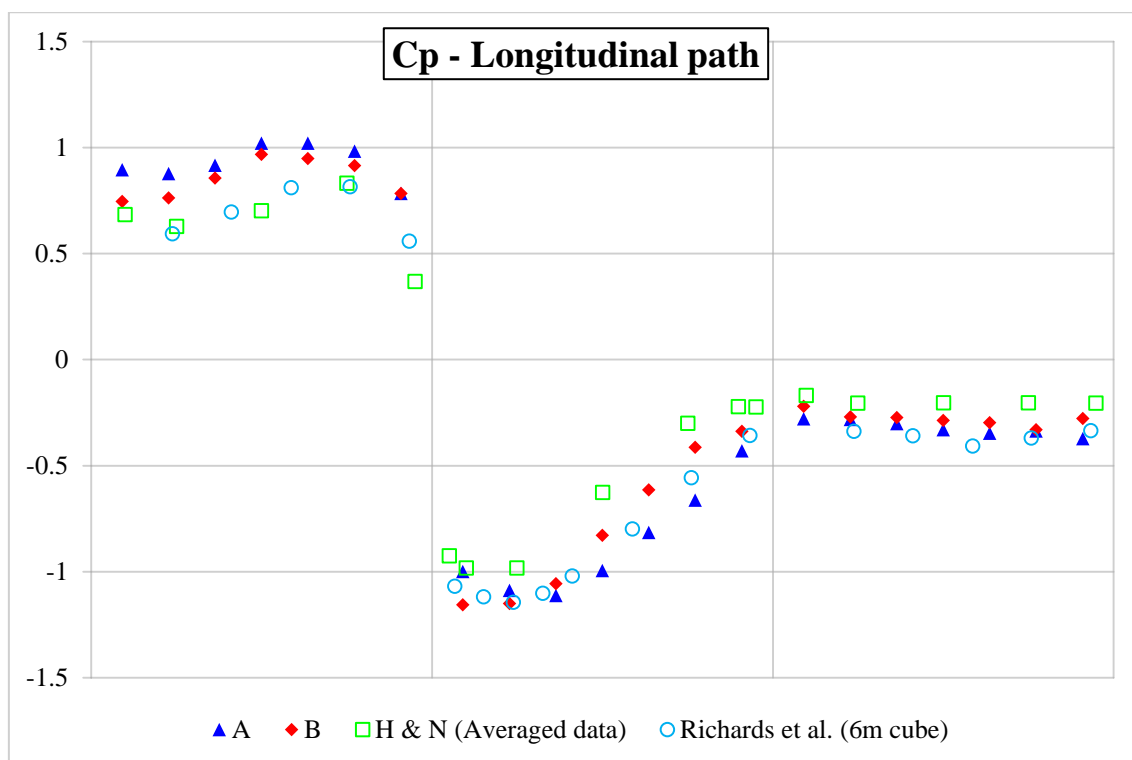


Σχήμα 5.47: Σύγκριση κλειστού κύβου για τα δύο οριακά στρώματα και Castro & Robins [4]

Είναι εμφανής η προοδευτική τάση μεταβολής της κατατομής των πιέσεων από το σενάριο (1) χαμηλής διάτμησης προς το (5) υψηλότερης και τελικά αυτή των Castro & Robins. Χαμηλά στην ανάντι πλευρά η περιοχή ανακοπής εξασθενίζει και ανεβαίνει σε μεγαλύτερο ύψος όσο μεγαλύτερη είναι η διάτμηση στο οριακό στρώμα ενώ και στην οροφή φαίνεται ότι η ελάχιστη πίεση εμφανίζεται πιο κοντά στην ανάντι ακμή και υπάρχει επανακόλληση της ροής στη περίπτωση των Castro & Robins. Η μεταβολή που παρατηρείται ανάμεσα στα σενάρια (1) και (5) πιθανόν να είναι ένδειξη της τάσης της ροής να επανακολληθεί στη περίπτωση μεγάλης διάτμησης.

Επίσης αξιοσημείωτη είναι η σύγκριση των κατατομών της πίεσης με τα δεδομένα των Holscher & Niemann [88], όπου είναι ο μέσος όρος 15 πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν έως το 1998. Τα πειράματα έχουν εύρος εκθέτη του οριακού στρώματος  $\alpha = 0.19 - 0.29$ , επίπεδο τύρβης στο ύψος του κύβου  $I_u = 12 - 30\%$ , ύψη οριακού στρώματος  $\delta = 3H - 4H$  (ύψη κύβου), με δύο περιπτώσεις 2H και 2.5H, και ύψη κύβων 50mm - 300mm.

Και σύγκριση με δεδομένα των Richards et al. [60] όπου έγινε μέτρηση πλήρους κλίμακας σε μοντέλο κύβο ύψους 6 m. Το ύψος τραχύτητας του οριακού στρώματος κυμαίνονταν από  $z_o = 0.006m$  έως  $0.01m$ .



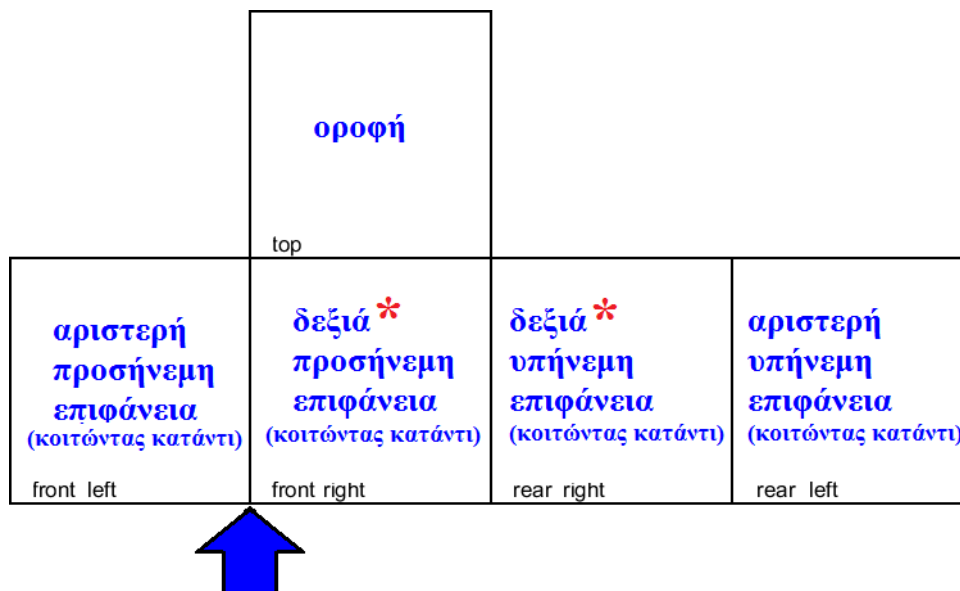
Σχήμα 5.48: Σύγκριση κλειστού κύβου για τα δύο οριακά στρώματα και δεδομένων από [88] και [60]

Φαίνεται ότι υπάρχει συμφωνία με μικρές μεταβολές για την οροφή και την υπήνεμη επιφάνεια.

Για την προσήνεμη επιφάνεια υπάρχει απόκλιση η οποία είναι σε αποδεκτή τάξη μεγέθους.

### 5.2.2 Ροή υπό γωνία πρόσπτωσης 45 μοιρών

Για υπό γωνία 45 μοιρών, το ανάπτυγμα του κύβου διαμορφώνεται αναλόγως (Σχήμα 5.49):

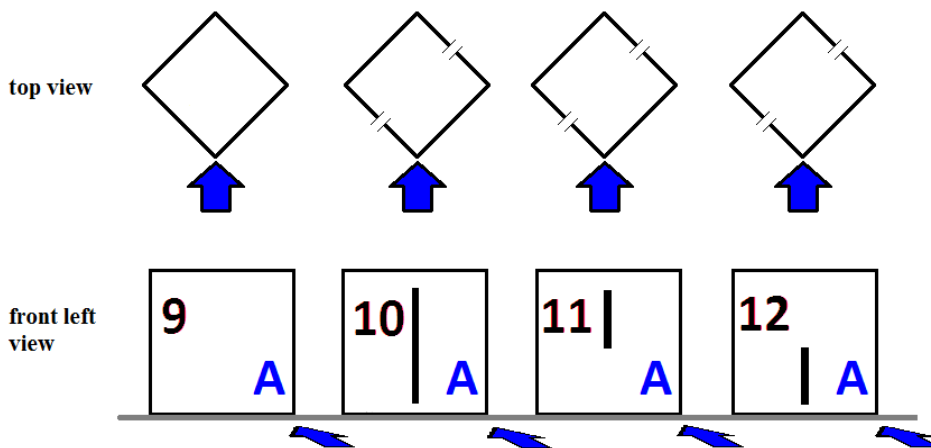


**Σχήμα 5.49:** Ανάπτυγμα κύβου για ροή 45 μοιρών στην επιφάνεια του κύβου όπου παρουσιάζεται η κατανομή του συντελεστή πίεσης μέσω ισοβαρών καμπυλών. Ο υπολογισμός των δεξιών επιφανειών (\*) περιγράφεται στην υποενότητα 4.5.2.

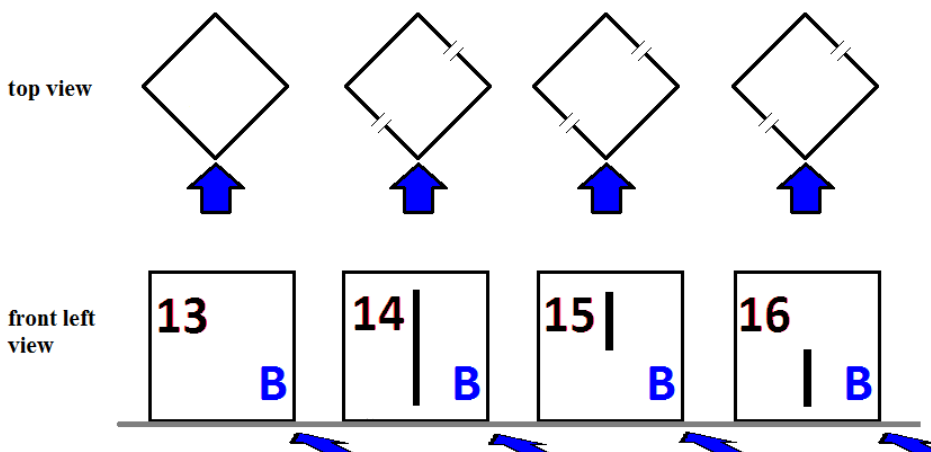
Υπενθυμίζεται ότι στις περιπτώσεις των δεξιών επιφανειών (front right - rear right), μετρήθηκε η κατανομή στις αριστερές επιφάνειες (front left - rear left), με κατοπτρικά τοποθετημένο κύβο, όπου έγινε η παραδοχή κατοπτρικής ροής.

Υπενθυμίζονται οι αριθμήσεις των σεναρίων των συνδυασμών ανοιγμάτων κύβου και οριακών στρωμάτων (Σχήμα 5.50, Σχήμα 5.51).

- 9 για κλειστό κύβο, Α οριακό στρώμα
- 10 για πλήρη ανοίγματα, Α οριακό στρώμα
- 11 για επάνω άνοιγμα, Α οριακό στρώμα
- 12 για κάτω άνοιγμα, Α οριακό στρώμα
- 13 για κλειστό κύβο, Β οριακό στρώμα
- 14 για πλήρη ανοίγματα, Β οριακό στρώμα
- 15 για επάνω άνοιγμα, Β οριακό στρώμα
- 16 για κάτω άνοιγμα, Β οριακό στρώμα



Σχήμα 5.50: Αρίθμηση των συνδυασμών, 45 μοιρών ροής, για χαμηλής διάτμησης οριακό στρώμα (A)

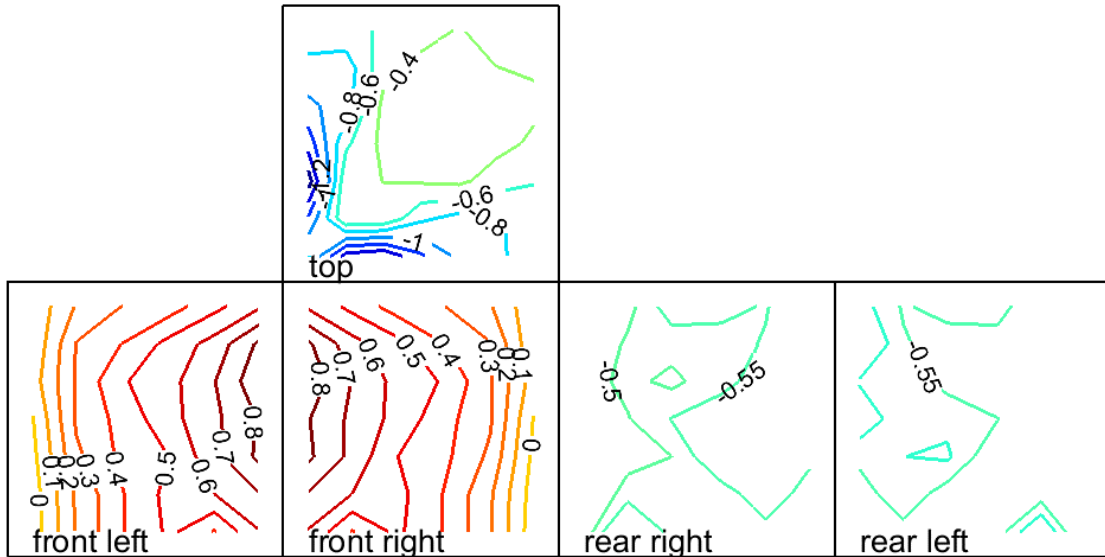


Σχήμα 5.51: Αρίθμηση των συνδυασμών, καθέτου ροής, για υψηλής διάτμησης οριακό στρώμα (B)

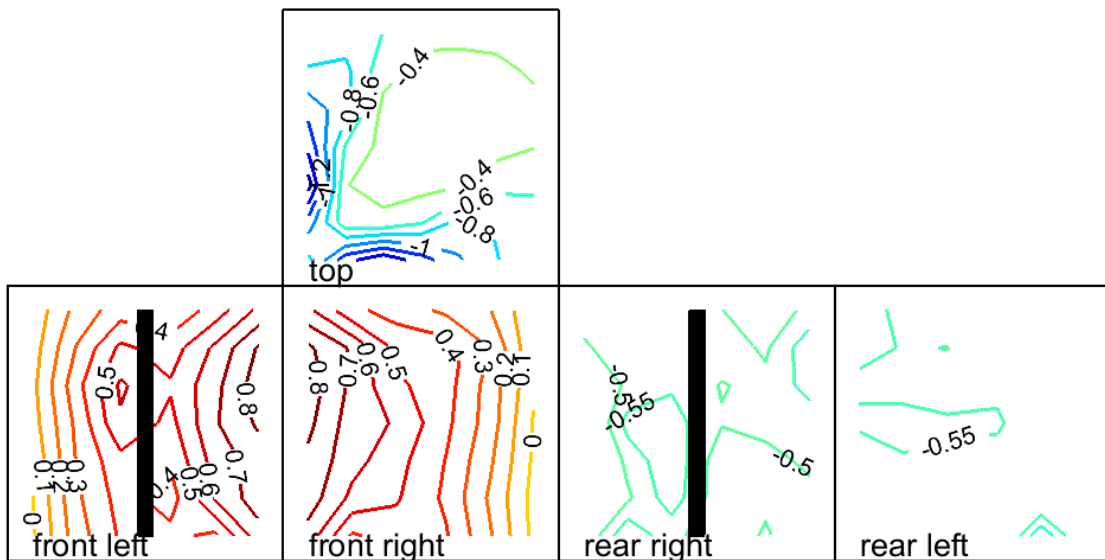
Για την απεικόνιση της κατανομής σε ισοβαρείς καμπύλες δημιουργήθηκε κώδικας σε περιβάλλον MATLAB και στη συνέχεια παρουσιάζονται οι κατανομές για τους τέσσερις συνδυασμούς ανοιγμάτων του κύβου και για τα δύο οριακά στρώματα.



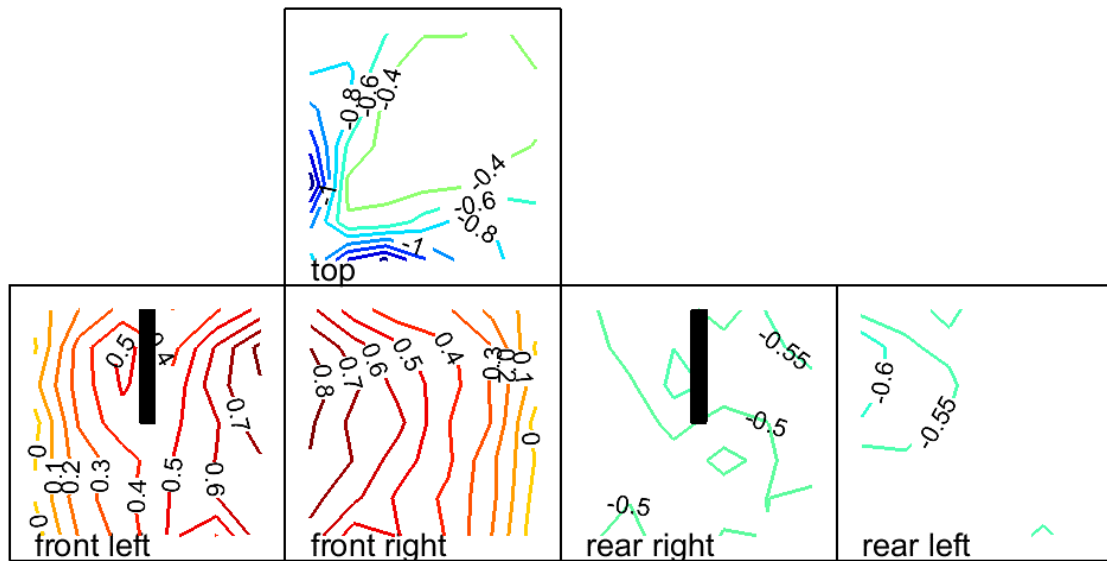
- Για Α οριακό στρώμα:



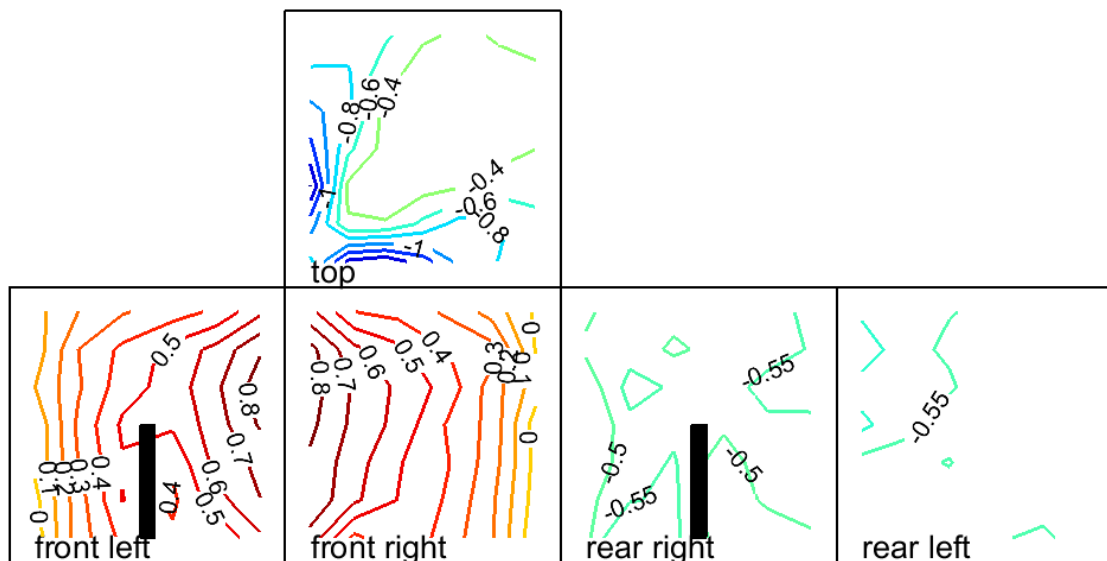
Σχήμα 5.52: Κατανομή συντελεστή πίεσης για σενάριο 9



Σχήμα 5.53: Κατανομή συντελεστή πίεσης για σενάριο 10

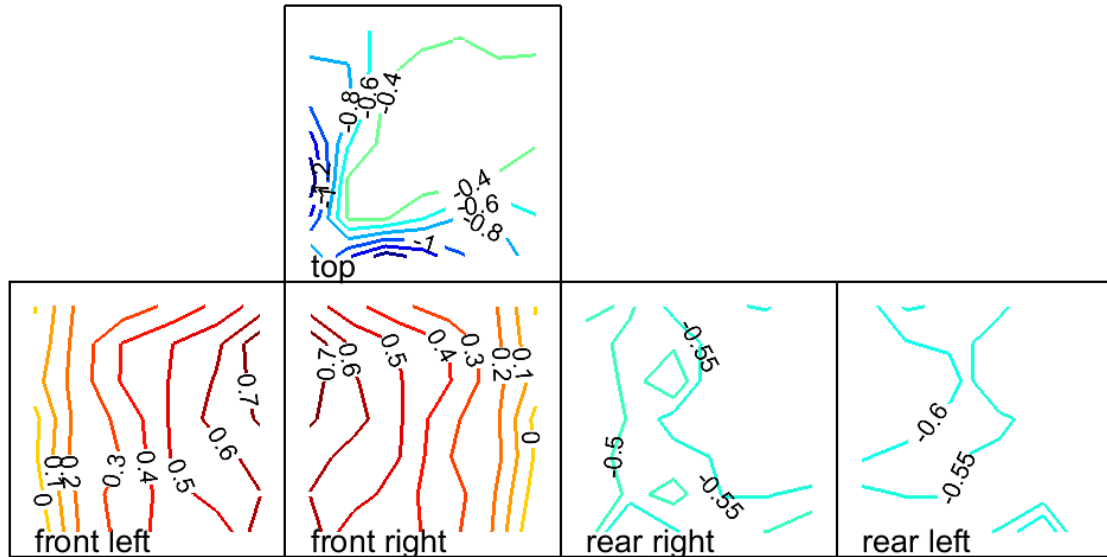


Σχήμα 5.54: Κατανομή συντελεστή πίεσης για σενάριο 11

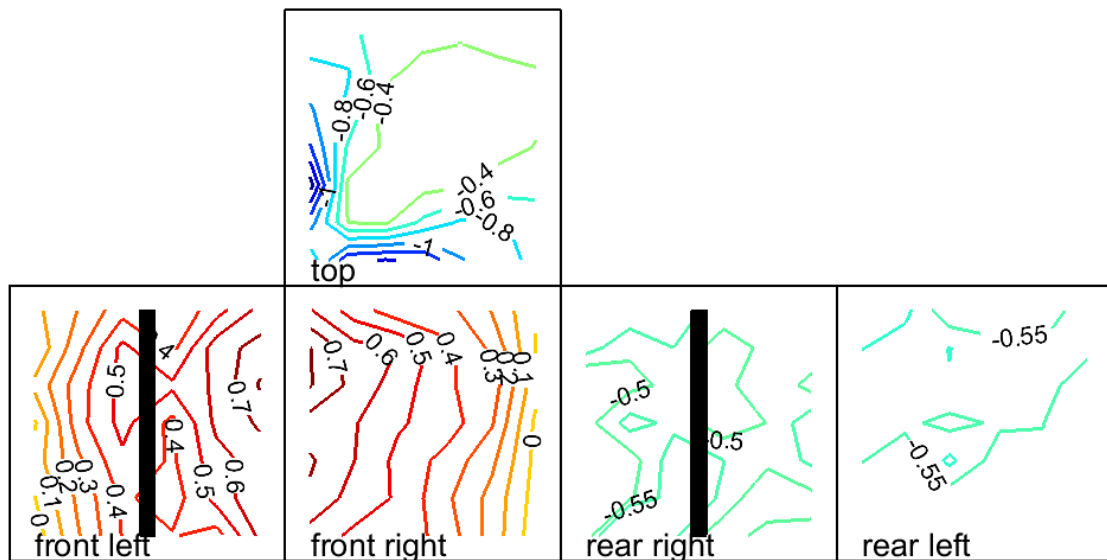


Σχήμα 5.55: Κατανομή συντελεστή πίεσης για σενάριο 12

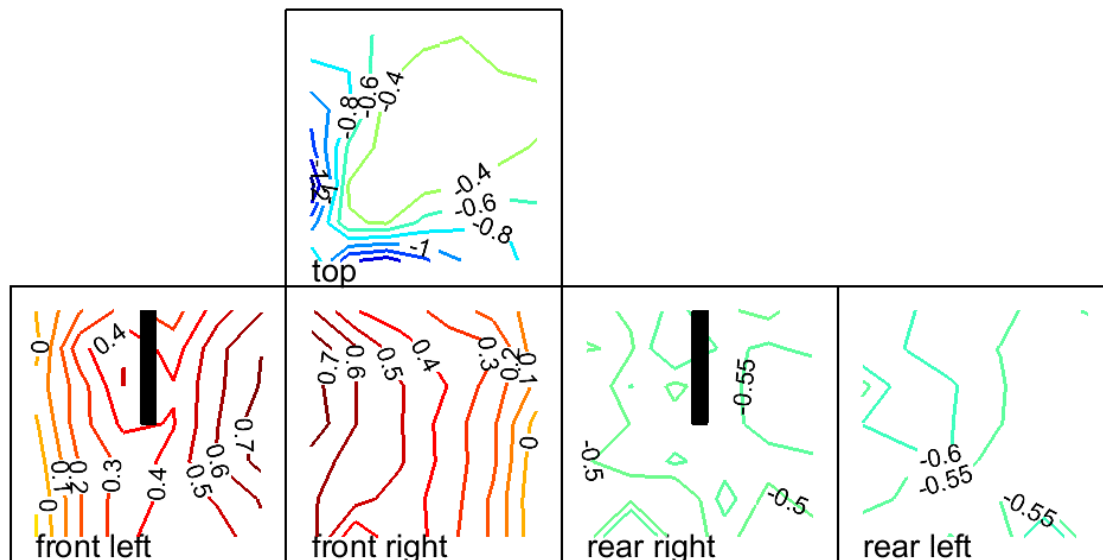
- Για Β οριακό στρώμα:



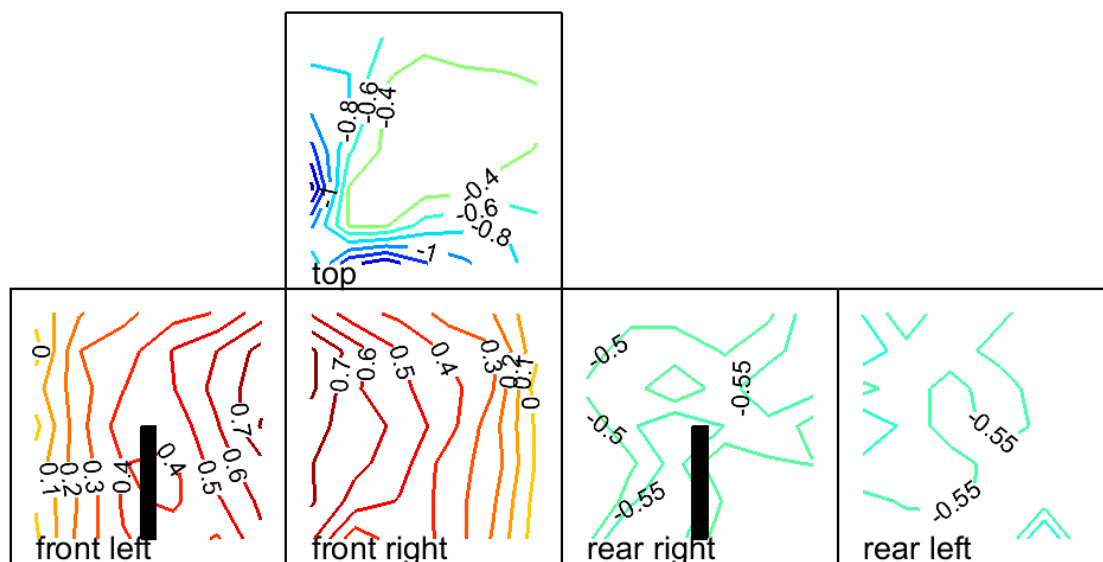
Σχήμα 5.56: Κατανομή συντελεστή πίεσης για σενάριο 13



Σχήμα 5.57: Κατανομή συντελεστή πίεσης για σενάριο 14



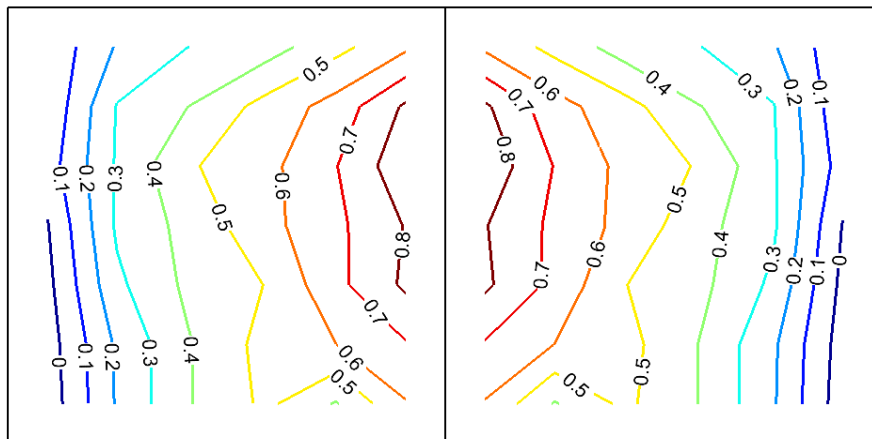
Σχήμα 5.58: Κατανομή συντελεστή πίεσης για σενάριο 15



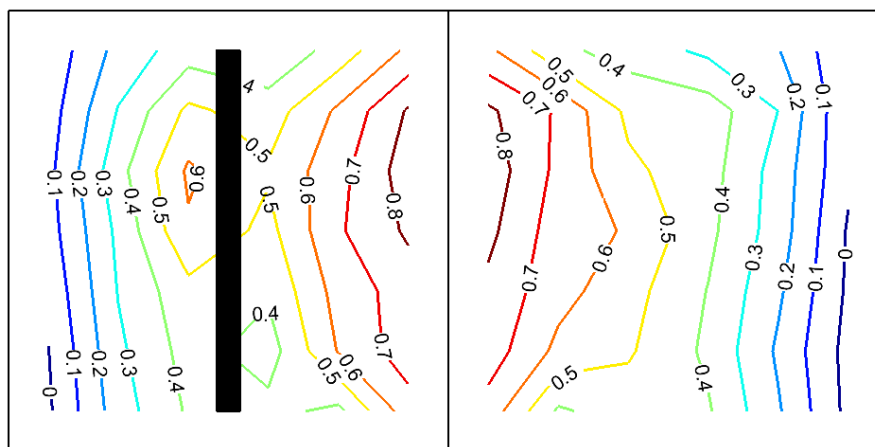
Σχήμα 5.59: Κατανομή συντελεστή πίεσης για σενάριο 16

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι κατανομές μόνο για τις προσήνεμες επιφάνειες.

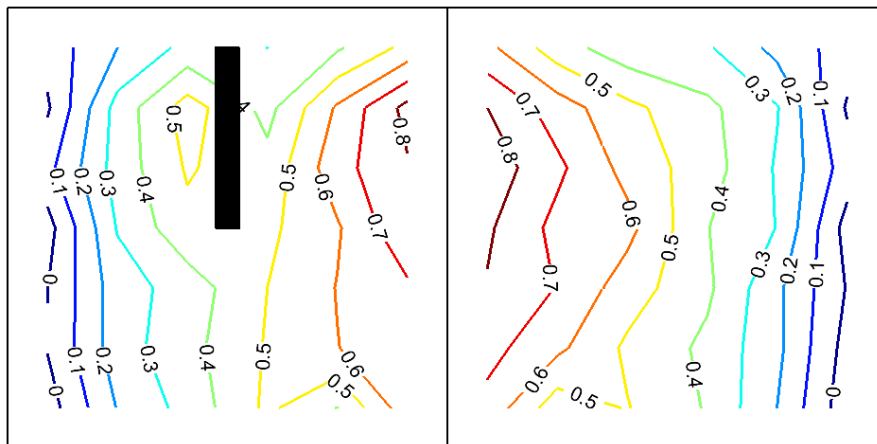
- Για Α οριακό στρώμα:



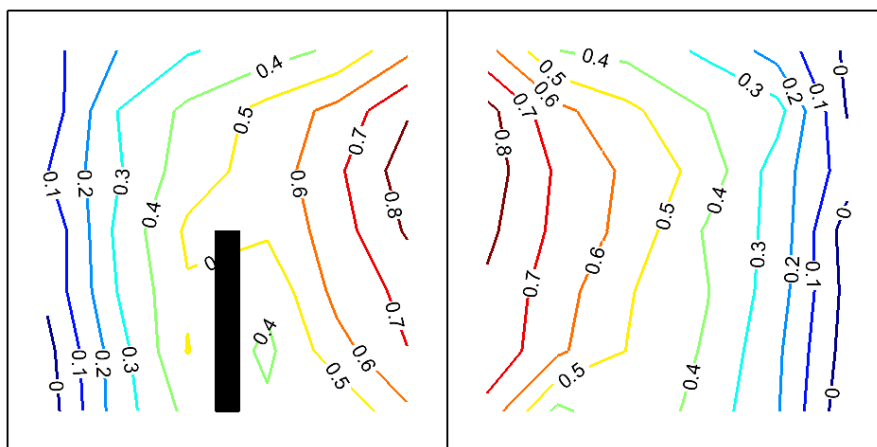
Σχήμα 5.60: Κατανομή συντελεστή πίεσης προσήνεμων επιφανειών για σενάριο 9



Σχήμα 5.61: Κατανομή συντελεστή πίεσης προσήνεμων επιφανειών για σενάριο 10

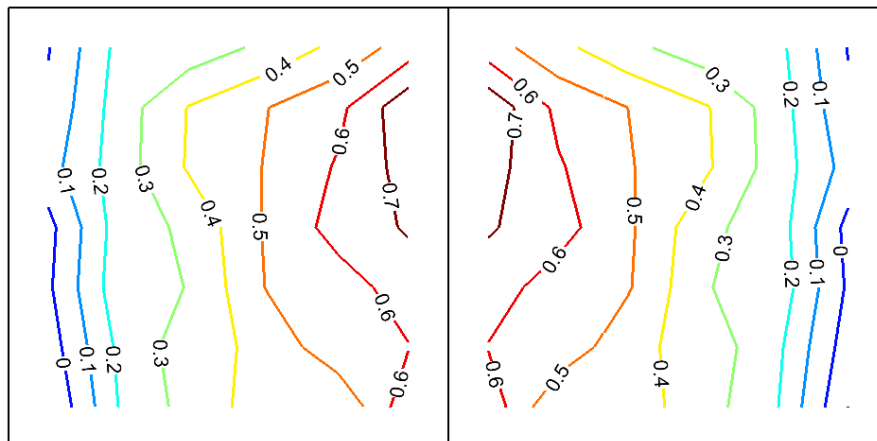


Σχήμα 5.62: Κατανομή συντελεστή πίεσης προσήνεμων επιφανειών για σενάριο 11

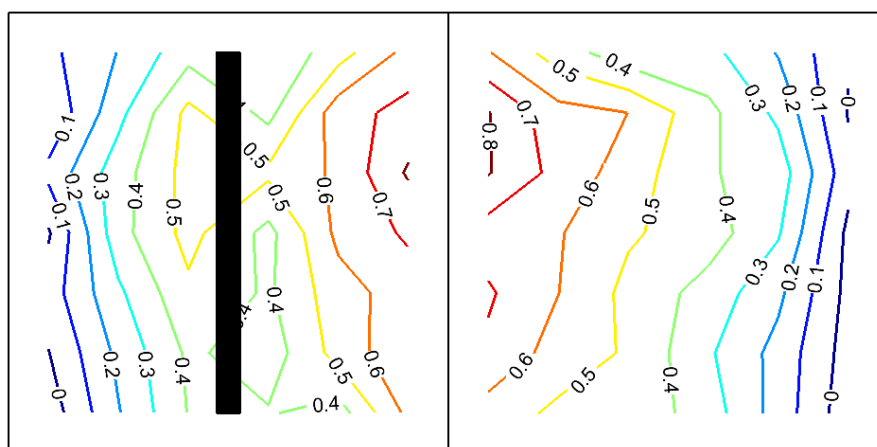


Σχήμα 5.63: Κατανομή συντελεστή πίεσης προσήνεμων επιφανειών για σενάριο 12

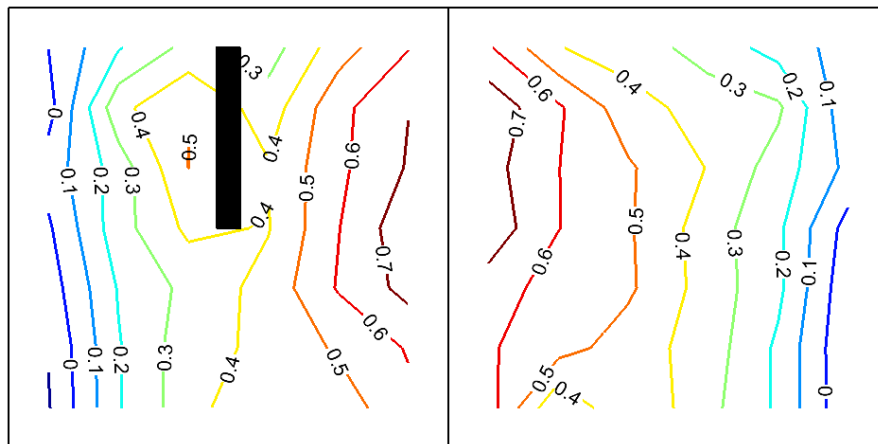
- Για Β οριακό στρώμα:



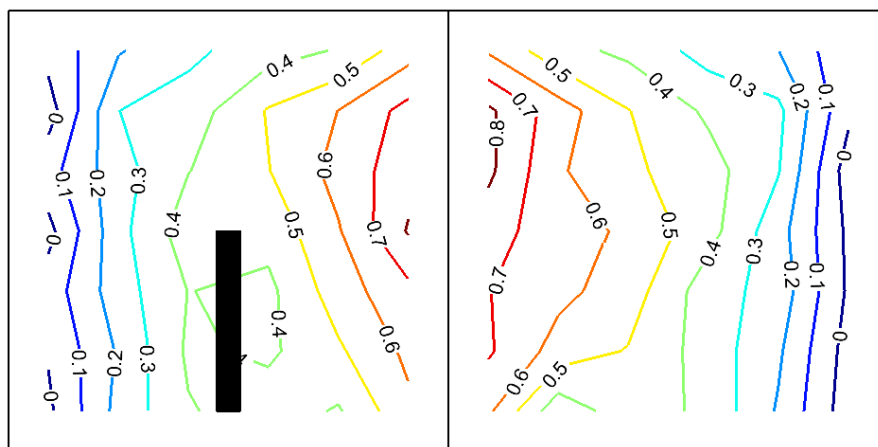
Σχήμα 5.64: Κατανομή συντελεστή πίεσης προσήνεμων επιφανειών για σενάριο 13



Σχήμα 5.65: Κατανομή συντελεστή πίεσης προσήνεμων επιφανειών για σενάριο 14



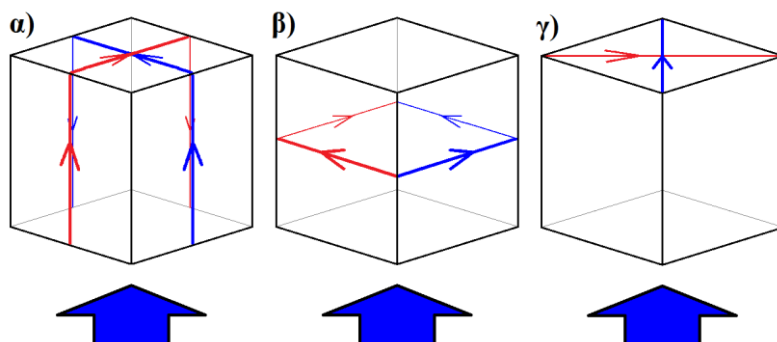
Σχήμα 5.66: Κατανομή συντελεστή πίεσης προσήνεμων επιφανειών για σενάριο 15



Σχήμα 5.67: Κατανομή συντελεστή πίεσης προσήνεμων επιφανειών για σενάριο 16

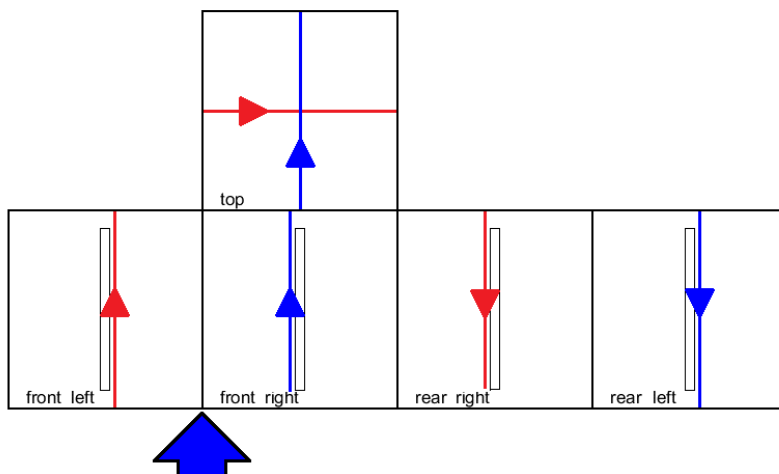


Για την σύγκριση των σεναρίων, απεικονίζονται οι συντελεστές πίεσεων κατά τις διαδρομές για 45 μοίρες (Σχήμα 5.68).



**Σχήμα 5.68:** Διαδρομές απεικόνισης για 45 μοίρες γωνία. α) κατακόρυφη διαδρομή μέσων, μια για κάθε πλευρά αν είναι μη-συμμετρική ροή, β) οριζόντια διαδρομή, μια για κάθε πλευρά αν είναι μη-συμμετρική ροή και γ) διαδρομές διαγώνιων οροφής

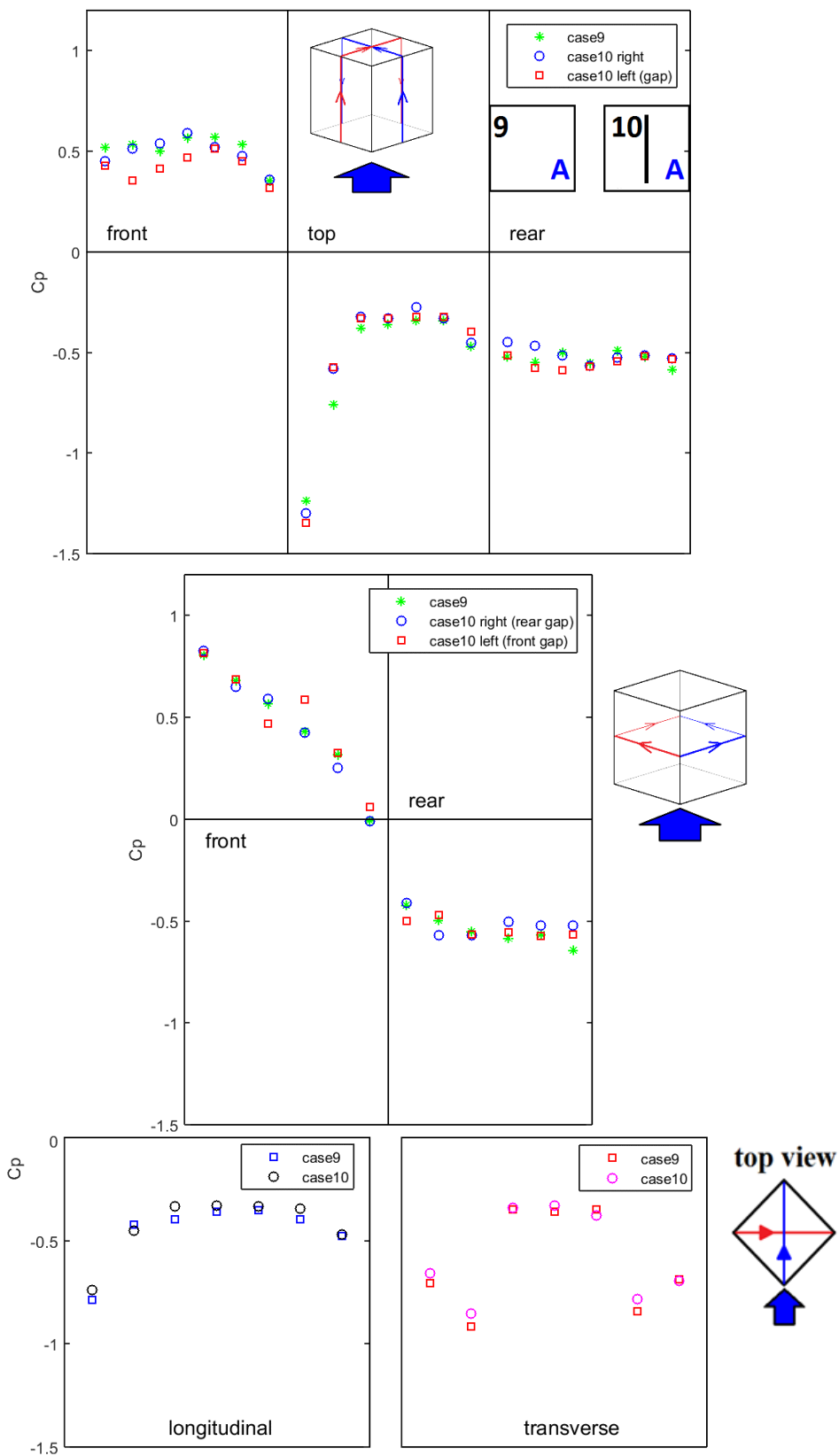
Ομοίως με την κάθετη ροή λαμβάνονται οι κατακόρυφες ακριβώς δίπλα από το άνοιγμα, λόγω παρουσίας του ανοίγματος. Έτσι για τις κατακόρυφες διαδρομές στο Σχήμα 5.68α αντιστοιχούν οι διαδρομές όπως φαίνονται στο Σχήμα 5.69.



**Σχήμα 5.69:** Διαδρομές για κατακόρυφη διαδρομή (Σχήμα 5.68α) λόγω ανοιγμάτων του κύβου

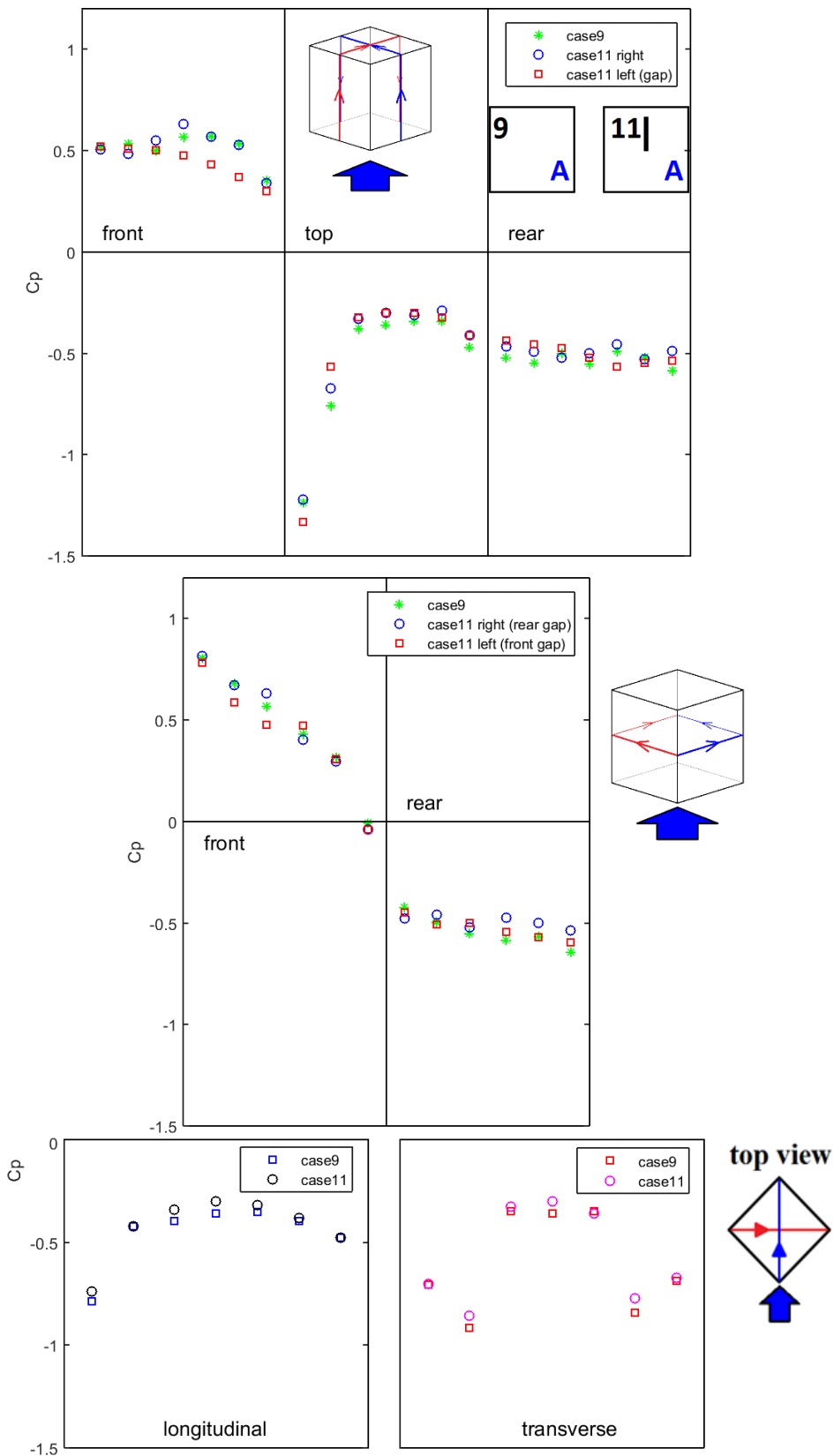
Στη συνέχεια απεικονίζονται οι κατανομές πίεσης κατά τις διαδρομές για 45 μοίρες. Στο υπόμνημα το gap υποδηλώνει την διαδρομή που παρεμβάλλονται ανοίγματα, για διαδρομές στο Σχήμα 5.68α. Front gap υποδηλώνει άνοιγμα στην εμπρός επιφάνεια, rear gap στην πίσω επιφάνεια, για διαδρομές στο Σχήμα 5.68β. Για την επάνω επιφάνεια, για σύγκριση σεναρίων με ανοίγματα, η εγκάρσια διαγώνιος ξεκινά από ακμή που η εμπρός επιφάνεια έχει άνοιγμα και καταλήγει σε ακμή όπου η πίσω επιφάνεια έχει άνοιγμα.

- Σύγκριση κλειστού κύβου και κύβου με πλήρη ανοίγματα για Α οριακό στρώμα



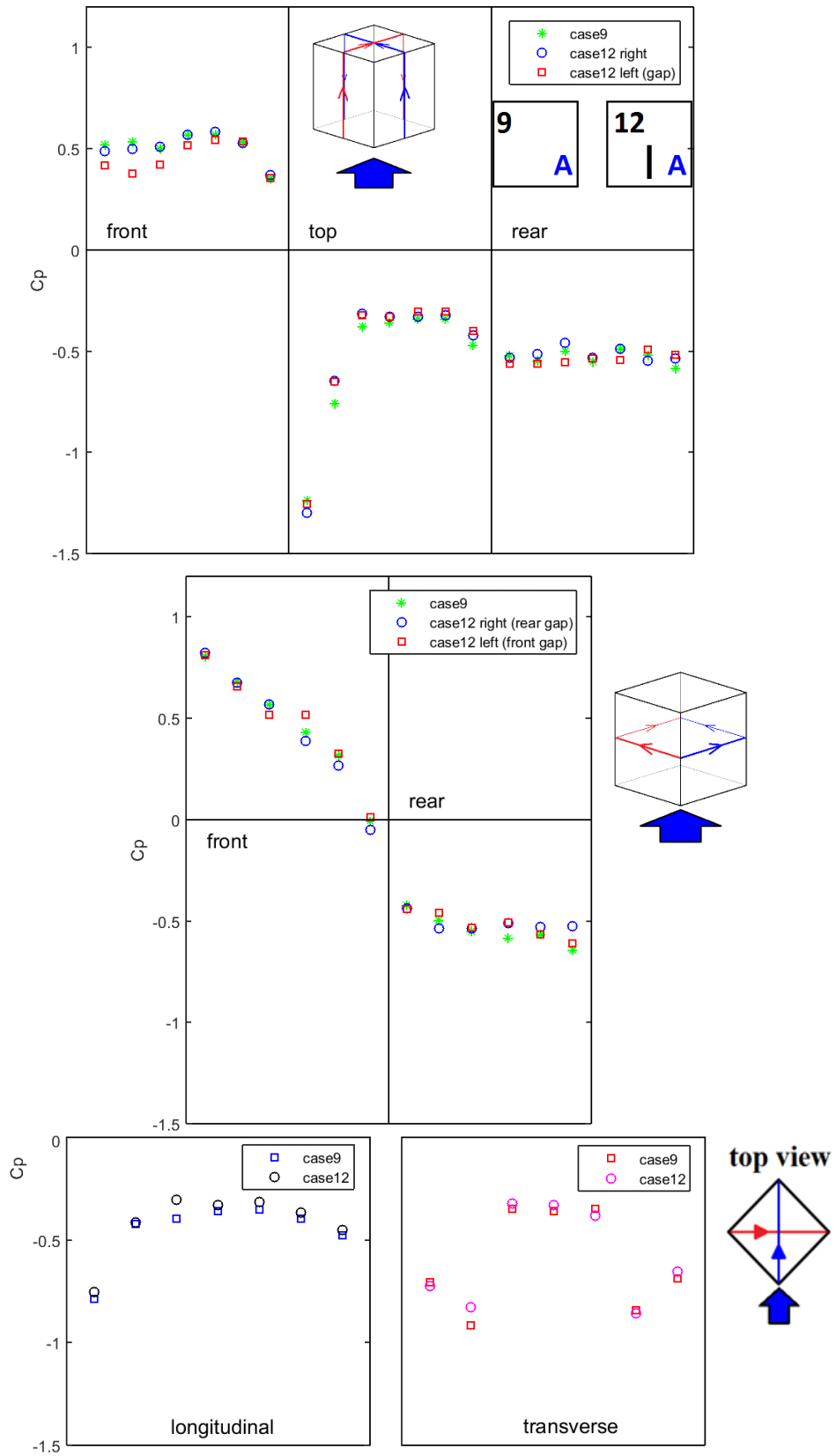
Σχήμα 5.70: Σύγκριση σεναρίων 9 και 10

- Σύγκριση κλειστού κύβου και κύβου με επάνω ανοίγματα για Α οριακό στρώμα



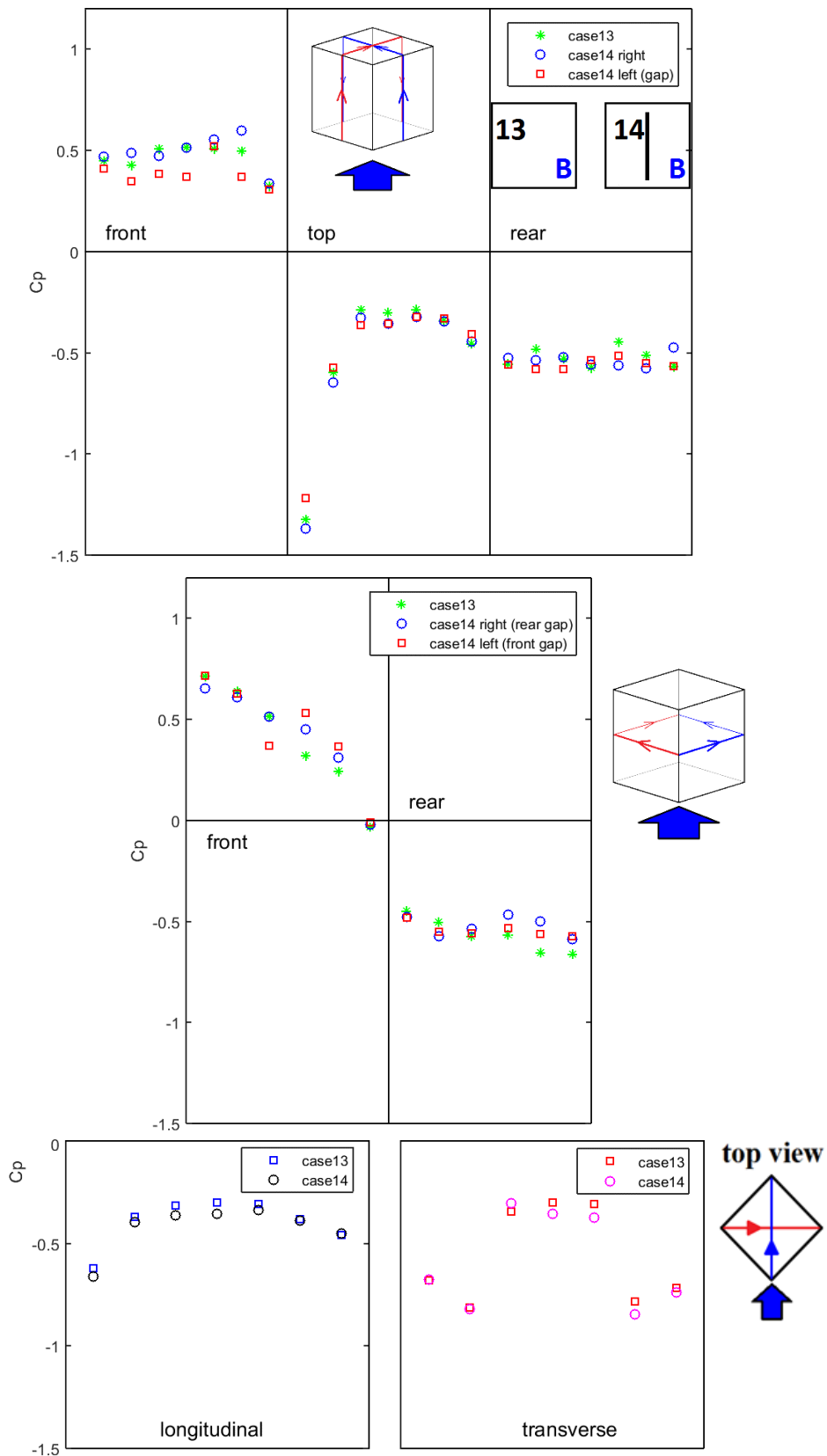
Σχήμα 5.71: Σύγκριση σεναρίων 9 και 11

- Σύγκριση κλειστού κύβου και κύβου με κάτω ανοίγματα για Α οριακό στρώμα



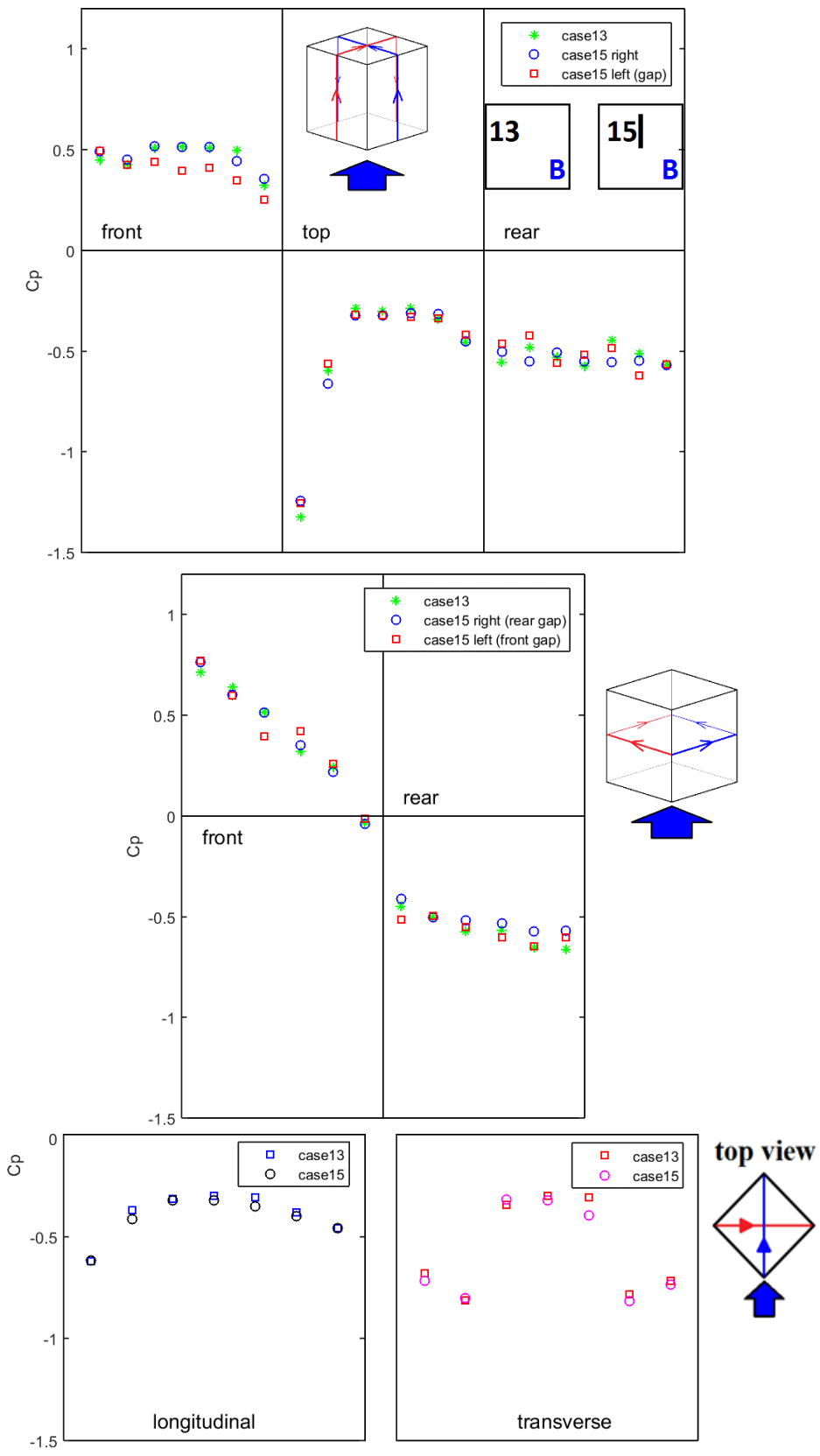
Σχήμα 5.72: Σύγκριση σεναρίων 9 και 12

- Σύγκριση κλειστού κύβου και κύβου με πλήρη ανοίγματα για Β οριακό στρώμα



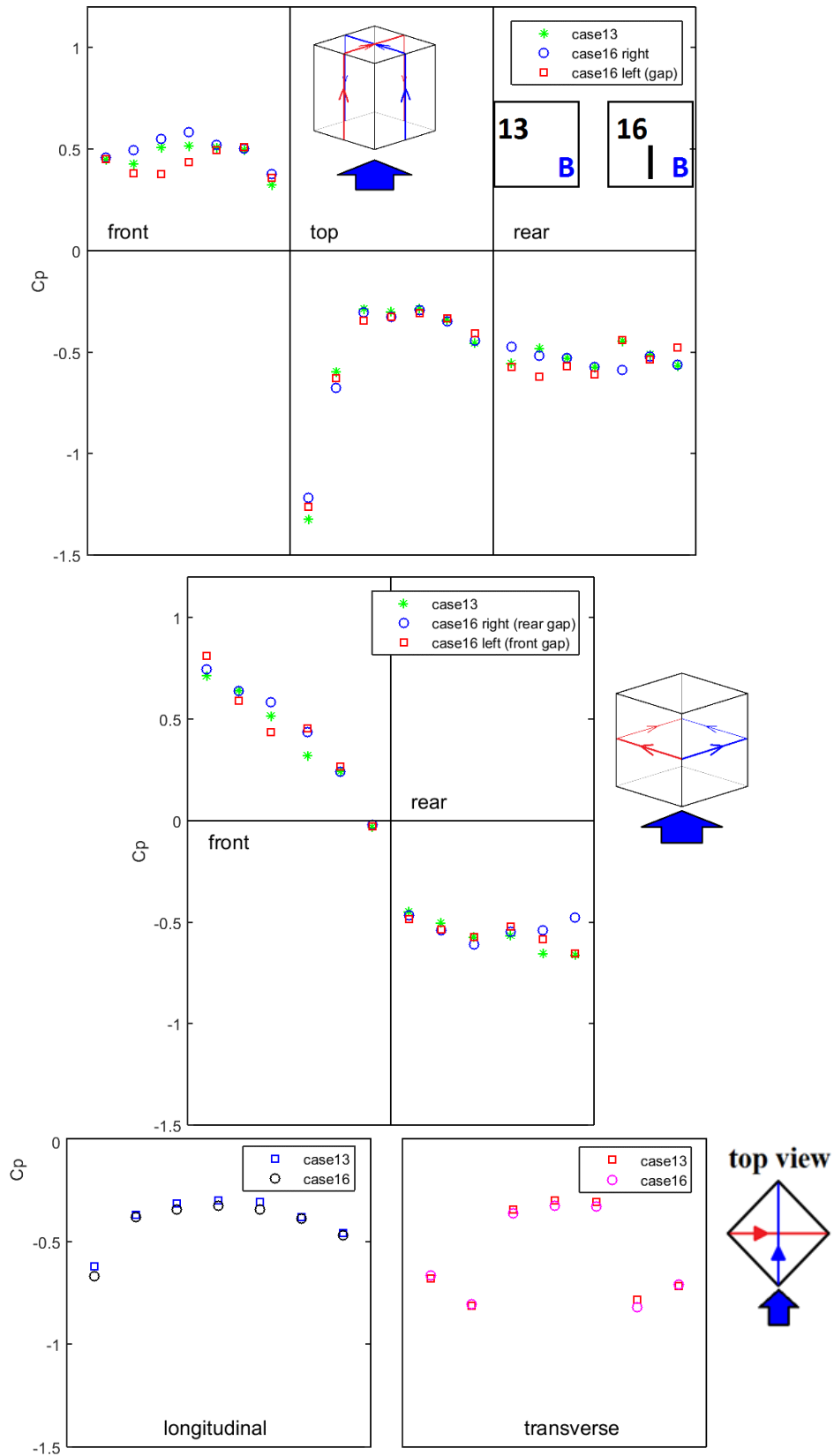
Σχήμα 5.73: Σύγκριση σεναρίων 13 και 14

- Σύγκριση κλειστού κύβου και κύβου με επάνω ανοίγματα για Β οριακό στρώμα



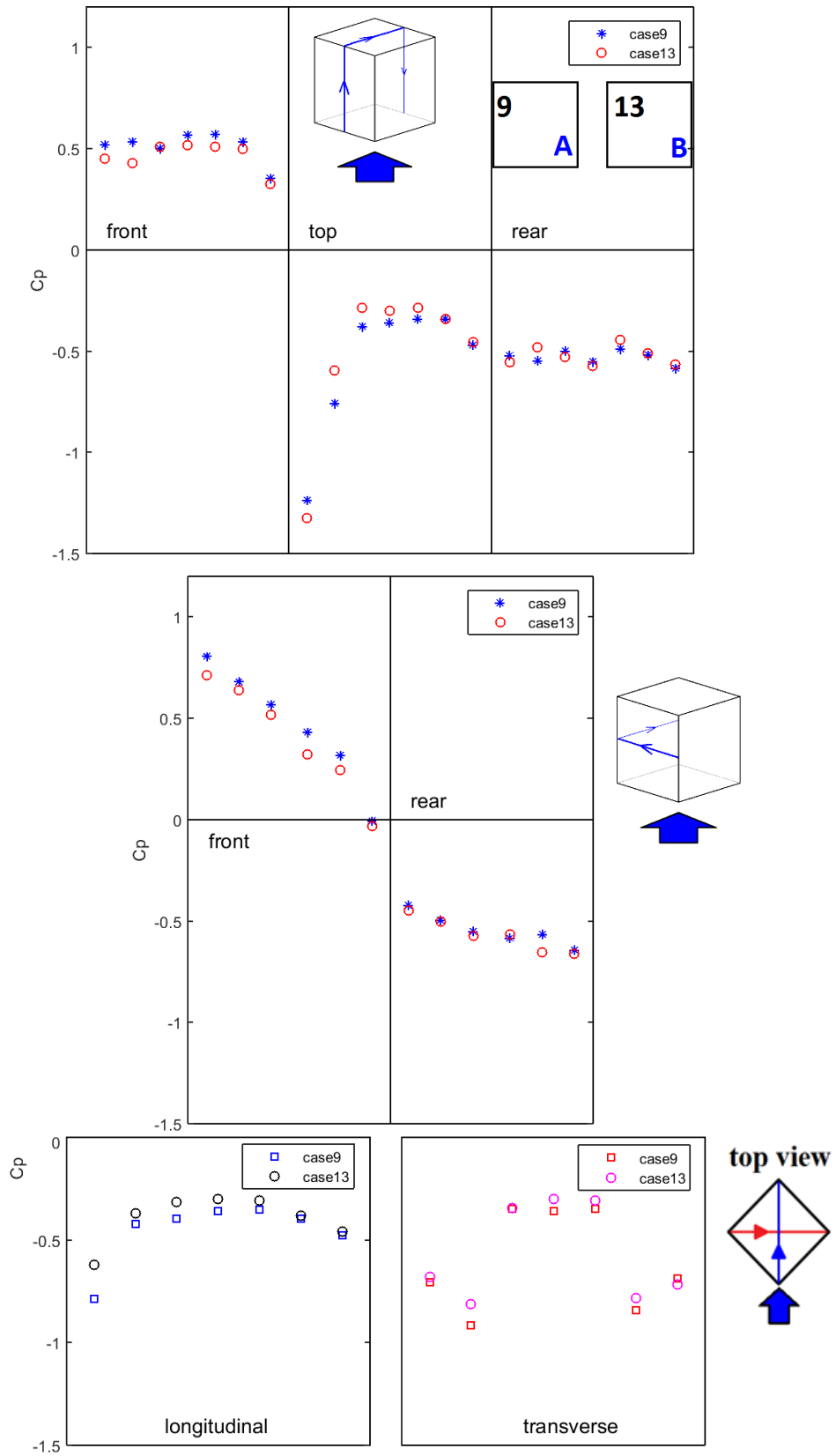
Σχήμα 5.74: Σύγκριση σεναρίων 13 και 15

- Σύγκριση κλειστού κύβου και κύβου με κάτω ανοίγματα για Β οριακό στρώμα



Σχήμα 5.75: Σύγκριση σεναρίων 13 και 16

- Σύγκριση κλειστού κύβου για τα δύο οριακά στρώματα



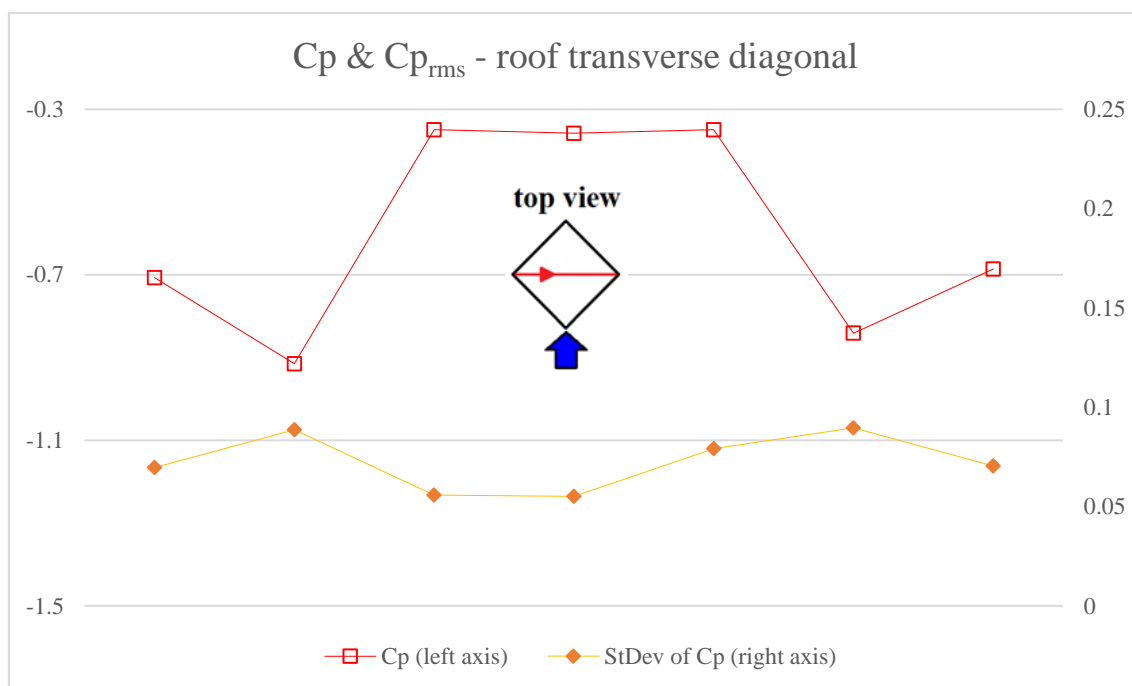
Σχήμα 5.76: Σύγκριση σεναρίων 9 και 13



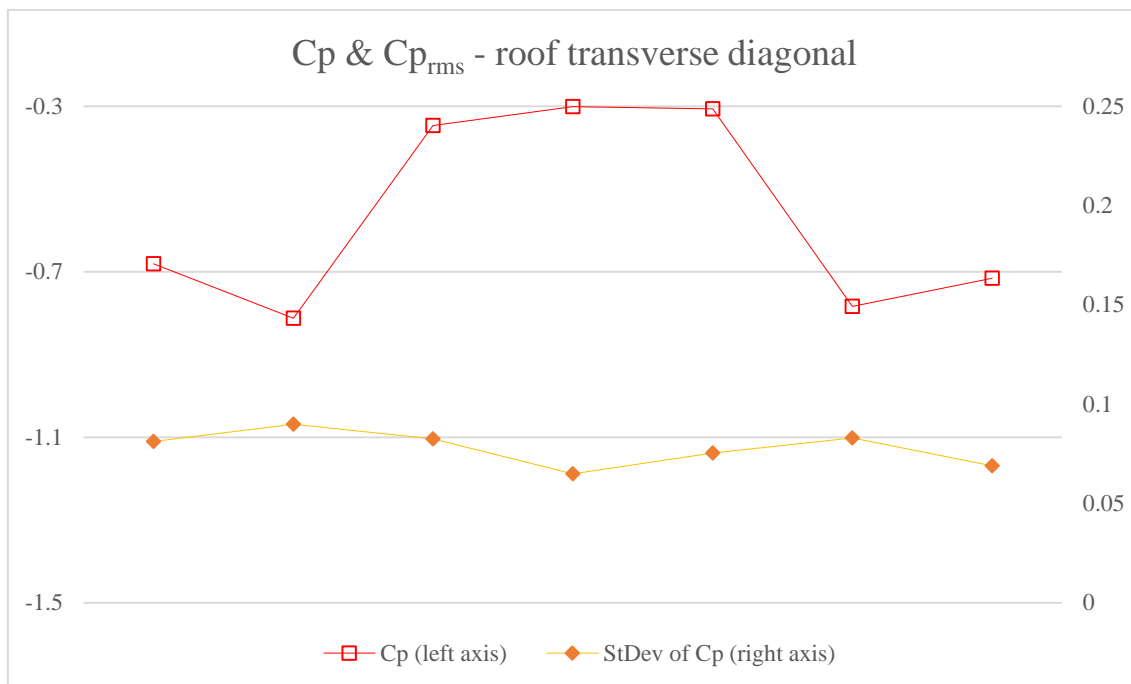
Παρατηρείται μικρή αλλά διακριτή μεταβολή της κατανομής πίεσης γύρω από τα ανοίγματα στις ανάντι πλευρές. Ο σχηματισμός των κωνοειδών στροβίλων στην οροφή καθώς και η σχεδόν ομοιόμορφη πίεση στις κατάντι πλευρές παραμένουν σχεδόν ανεπηρέαστες από τη παρουσία των ανοιγμάτων.

Η επίδραση του οριακού στρώματος φαίνεται ότι είναι μικρότερη περιοριζόμενη κυρίως στη βάση των ανάντι πλευρών και στις ανάντι ακμές (Σχήμα 5.76). Αντίθετα, η παρουσία των ανοιγμάτων επηρεάζει εδώ σε μεγαλύτερο βαθμό και για τα δύο οριακά στρώματα (Σχήμα 5.70, Σχήμα 5.71, Σχήμα 5.72, Σχήμα 5.73, Σχήμα 5.74, Σχήμα 5.75). Είναι ενδιαφέρον να παρατηρήσει κανείς ότι στη περίπτωση αυτή οι μετρήσεις στις ανάντι πλευρές χωρίς τη παρουσία ανοίγματος (9 και 13) σχεδόν συμπίπτουν με αυτές στη συμπαγή πλευρά των περιπτώσεων όπου υπάρχει άνοιγμα στην άλλη ανάντι πλευρά (10, 11, 12, 14, 15, 16 right sides). Η παρουσία του ανοίγματος εξασθενίζει τις υψηλές πιέσεις στη βάση της ανάντι πλευράς και σε μεγάλο μέρος αυτής μέχρι περίπου το μισό ύψος της. Αντίθετα, στις κατάντι πλευρές όπου τα ανοίγματα βρίσκονται κάτω από τις περιοχές πλευρικών αποκολλήσεων, η παρουσία των ανοιγμάτων δεν επηρεάζει σημαντικά.

Η παρουσία των κωνοειδών στροβίλων είναι εμφανής στις εγκάρσιες διαγώνιους των οροφών με την πτώση της πίεσης στα άκρα σε σχέση με το κέντρο. Ενδιαφέρον έχει η απεικόνιση της πίεσης εγκάρσιας διαγώνιου μαζί με την τυπική απόκλιση της πίεσης. Ενδεικτικά απεικονίζονται για τα σενάρια 9 και 13 (Σχήμα 5.77, Σχήμα 5.78).



Σχήμα 5.77: Μέσος συντελεστής πίεσης και τυπική απόκλιση συντελεστή πίεσης για την εγκάρσια διαγώνιο της οροφής, για το σενάριο 9



**Σχήμα 5.78:** Μέσος συντελεστής πίεσης και τυπική απόκλιση συντελεστή πίεσης για την εγκάρσια διαγώνιο της οροφής, για το σενάριο 13

Από την μέση πίεση είναι εμφανής η υποπίεση κοντά στα άκρα, που υποδηλώνει την παρουσία των κωνοειδών στροβίλων.

Επίσης εμφανής είναι και η μικρή αύξηση της τυπικής απόκλισης στην θέση των στροβίλων που υποδηλώνει την ταλάντευση τους.

### 5.3 Αβεβαιότητα μετρήσεων

#### 5.3.1 Μέτρηση κατατομής ταχυτήτων ΑΟΣ

Η αβεβαιότητα της μέσης τιμής της ταχύτητας σε ένα συγκεκριμένο ύψος  $z$ , υπολογίζεται από την σχέση:

$$dU = \sqrt{B_u^2 + \left(t \frac{u_{rms}}{\sqrt{N}}\right)^2} \quad (5.20)$$

όπου  $B_u$  το συστηματικό σφάλμα,  $t$  ο συντελεστής της κατανομής student,  $u_{rms}$  η τυπική απόκλιση της ταχύτητας και  $N$  ο αριθμός των ανεξάρτητων, μεταξύ τους, τιμών.

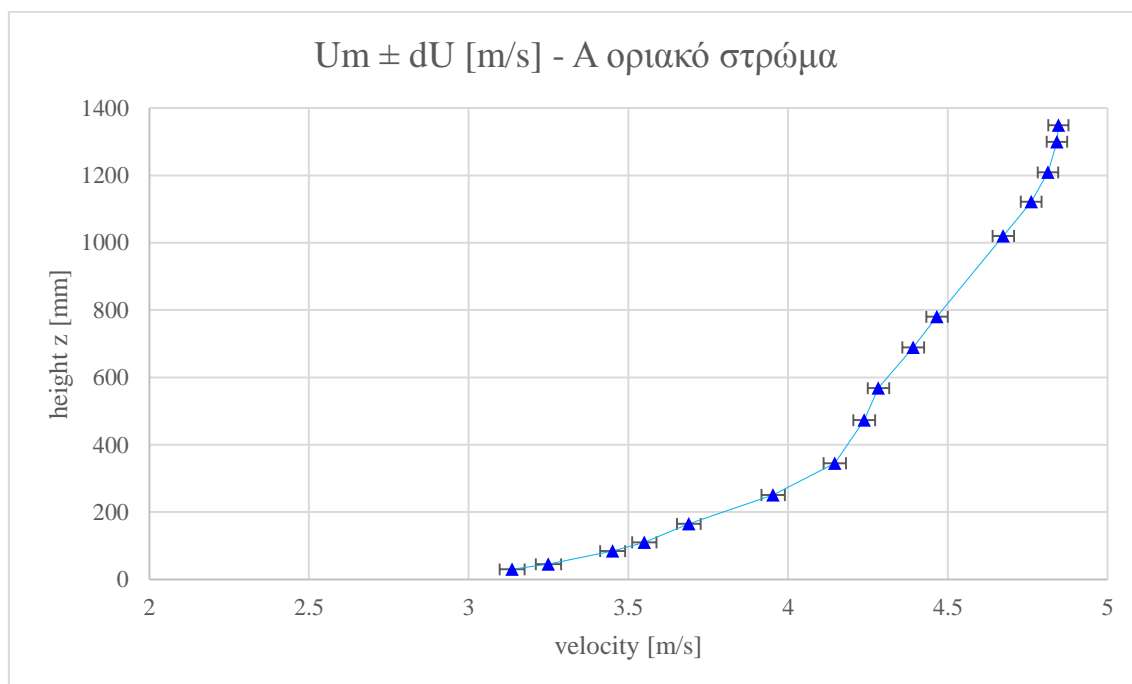
Το συστηματικό σφάλμα  $B_u$  προκύπτει από το μέσο τετραγωνικό σφάλμα βαθμονόμησης του θερμού νήματος (Σχήμα 5.1). Δηλαδή  $B_u^2 = \text{MSE} = 0.00097 \text{ [m}^2/\text{s}^2]$

Ο συντελεστής της κατανομής student, για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% και βαθμό ελευθερίας μεγαλύτερο του 500, προκύπτει  $t = 1.96$ .

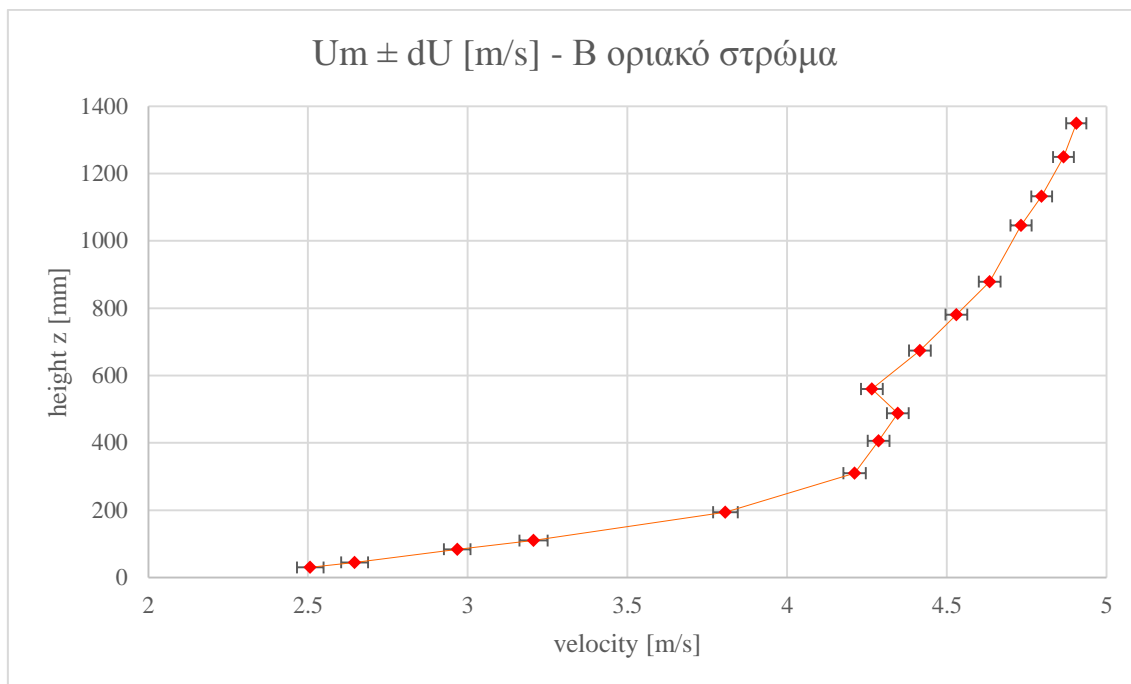
Ο αριθμός  $N$  των ανεξάρτητων μεταξύ τους, σημείων υπολογίζεται μέσω της ολοκληρωτικής κλίμακας τύρβης  $Tu_x$ .

$$N = T_{sampling}/Tu_x \quad (5.21)$$

όπου  $T_{sampling}$  είναι ο συνολικός χρόνος της κάθε μέτρησης, δηλαδή περίπου 105 sec.



Σχήμα 5.79: Περιοχή μέσων τιμών ταχύτητας για κάθε ύψος για το Α οριακό στρώμα



Σχήμα 5.80: Περιοχή μέσων τιμών ταχύτητας για κάθε ύψος για το Β οριακό στρώμα

Επομένως για κάθε ύψος προκύπτει η αβεβαιότητα της μέσης τιμής και απεικονίζεται με error bars για κάθε κατατομή οριακού στρώματος (Σχήμα 5.79, Σχήμα 5.80).

Σε ποσοστιαία μεγέθη η αβεβαιότητα ξεκινά από τιμές τάξεως του 0.6% στο ύψος του οριακού στρώματος και αυξάνεται, καθώς μειώνεται το ύψος, και λαμβάνει τιμές έως 1.26% για το Α οριακό στρώμα και 1.67% για το Β οριακό στρώμα, οι οποίες τιμές προκύπτουν στην κατώτατη θέση ύψους.

Το συστηματικό σφάλμα είναι ελάχιστο κυρίαρχο αλλά ίδια τάξη μεγέθους με το σφάλμα μέτρησης.

### 5.3.2 Μέτρηση κατανομής πιέσεων στην επιφάνεια του κύβου

Η αβεβαιότητα της μέσης τιμής της πίεσης, υπολογίζεται από την σχέση:

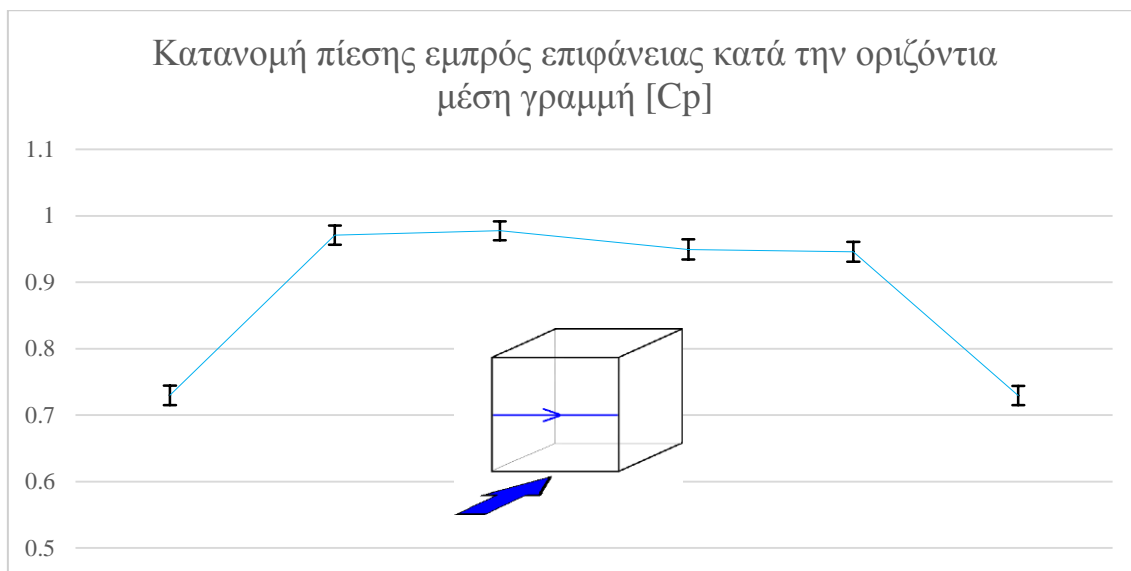
$$dP = t \frac{P_{rms}}{\sqrt{N}} \quad (5.22)$$

όπου  $t$  ο συντελεστής της κατανομής student,  $P_{rms}$  η τυπική απόκλιση της πίεσης και  $N$  ο αριθμός των ανεξάρτητων, μεταξύ τους, τιμών.

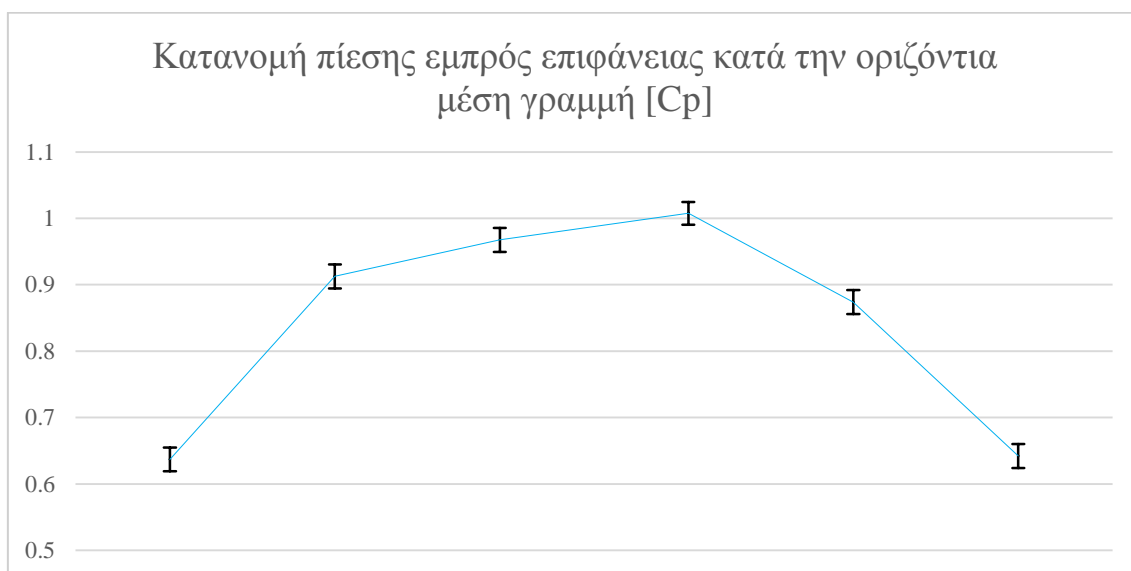
Ο αριθμός των ανεξάρτητων μεταξύ τους σημείων, υποθέτουμε ότι είναι ίσος με τον αριθμό όλων των σημείων  $N = 500$ , εφόσον η συχνότητα δειγματοληψίας (50Hz) είναι σχετικά μικρή. Αυτό ίσως δεν είναι απόλυτα ορθό αλλά δίνει μια πρώτη εκτίμηση.

Ο συντελεστής της κατανομής student, για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% και βαθμό ελευθερίας 500, προκύπτει  $t = 1.96$ .

Έτσι η αβεβαιότητα της μέσης τιμής απεικονίζεται με error bars. Για τα σενάρια της κάθετης ροής που υπήρχε αμφιβολία για την συμμετρία (Σχήμα 5.29, Σχήμα 5.30, Σχήμα 5.31, Σχήμα 5.34) μπορεί να εξεταστεί αν είναι εντός ορίων σφάλματος, με την απεικόνιση του συντελεστή πίεσης εμπρός επιφάνειας κατά την οριζόντια μέση γραμμή.



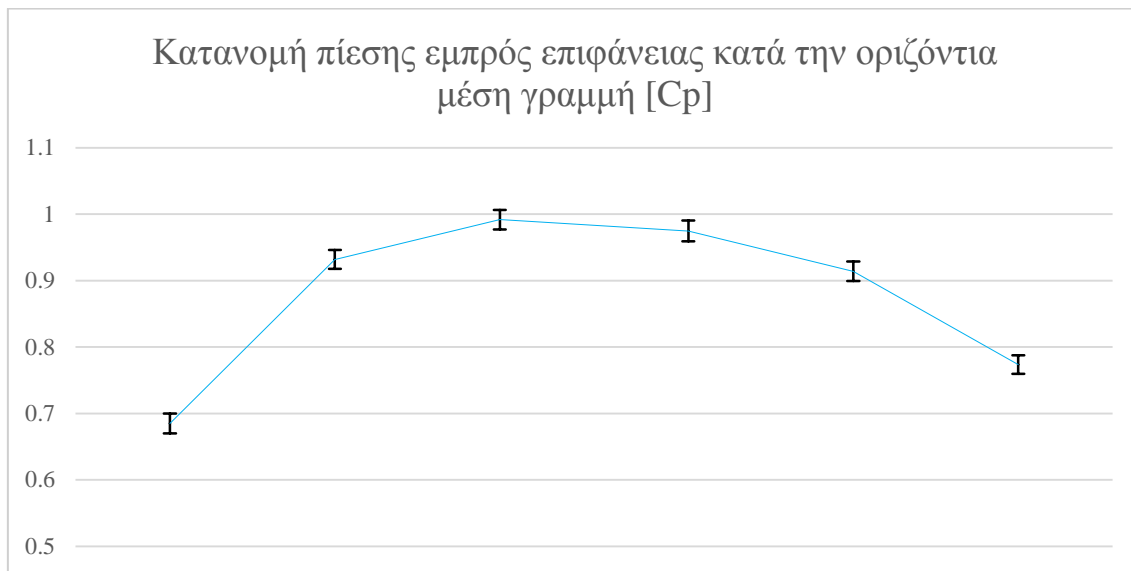
**Σχήμα 5.81:** Περιοχή εμπιστοσύνης του συντελεστή πίεσης εμπρός επιφάνειας κατά την οριζόντια μέση γραμμή, για το σενάριο 3 (Α οριακό στρώμα-επάνω άνοιγμα).



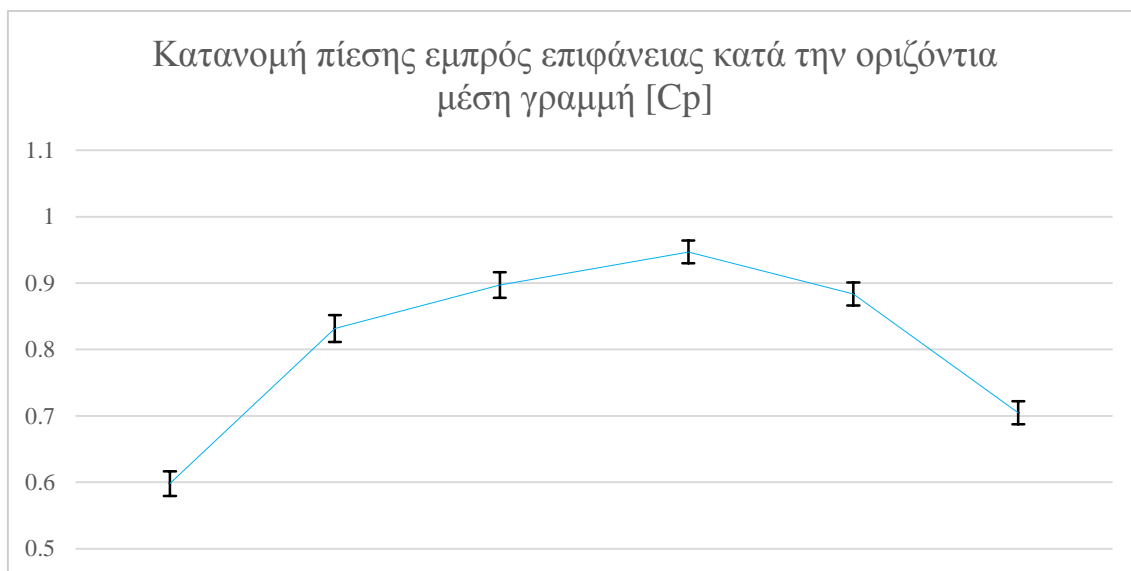
**Σχήμα 5.82:** Περιοχή εμπιστοσύνης του συντελεστή πίεσης εμπρός επιφάνειας κατά την οριζόντια μέση γραμμή, για το σενάριο 5 (Β οριακό στρώμα-κλειστός κύβος).

Για τα σενάρια 3 και 5 (Σχήμα 5.81, Σχήμα 5.82) η πίεση φαίνεται να είναι στατιστικά συμμετρική για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%.

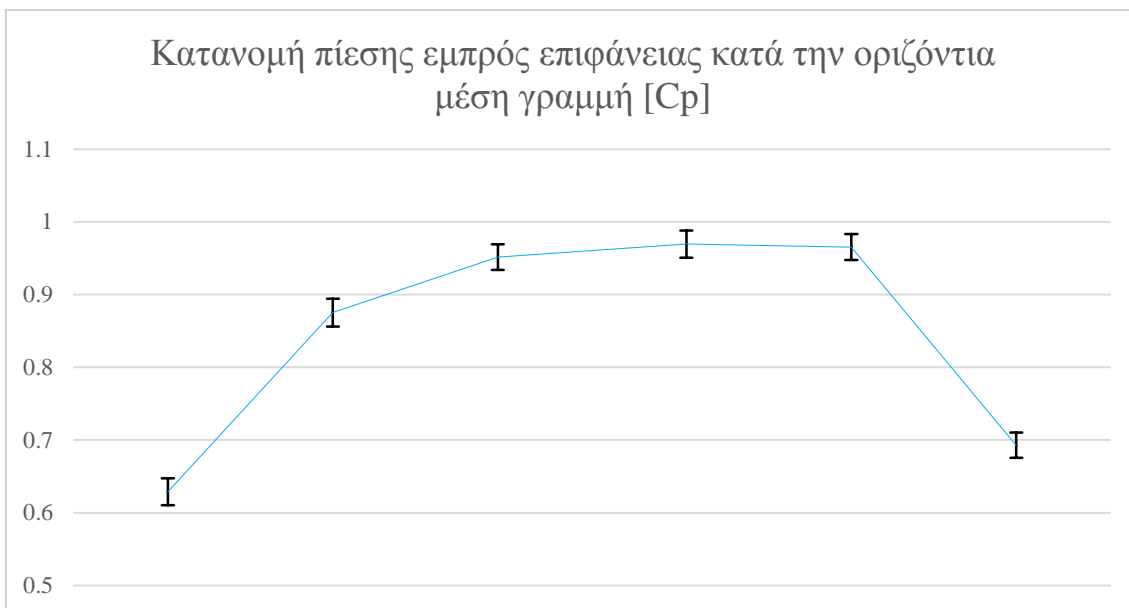
Ενώ για τα σενάρια 4,7,8 (Σχήμα 5.83, Σχήμα 5.84, Σχήμα 5.85) φαίνεται να υπάρχει ελαφρά ασυμμετρία, το οποίο είναι και αναμενόμενο [89].



**Σχήμα 5.83:** Περιοχή εμπιστοσύνης του συντελεστή πίεσης εμπρός επιφάνειας κατά την οριζόντια μέση γραμμή, για το σενάριο 4 (Α οριακό στρώμα-κάτω άνοιγμα).



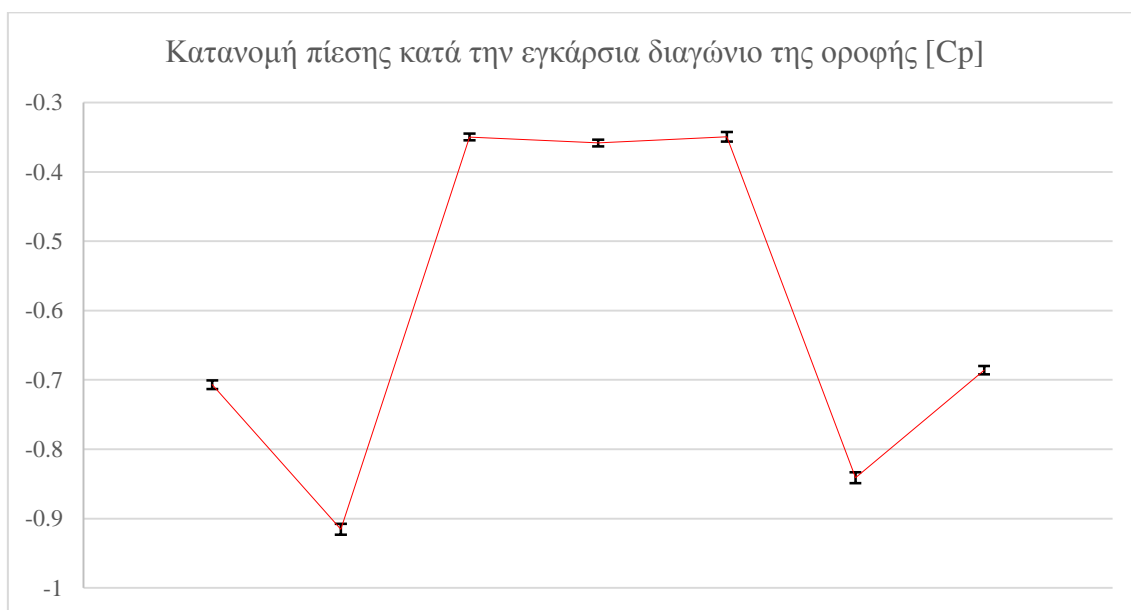
**Σχήμα 5.84:** Περιοχή εμπιστοσύνης του συντελεστή πίεσης εμπρός επιφάνειας κατά την οριζόντια μέση γραμμή, για το σενάριο 7 (Β οριακό στρώμα-επάνω άνοιγμα).



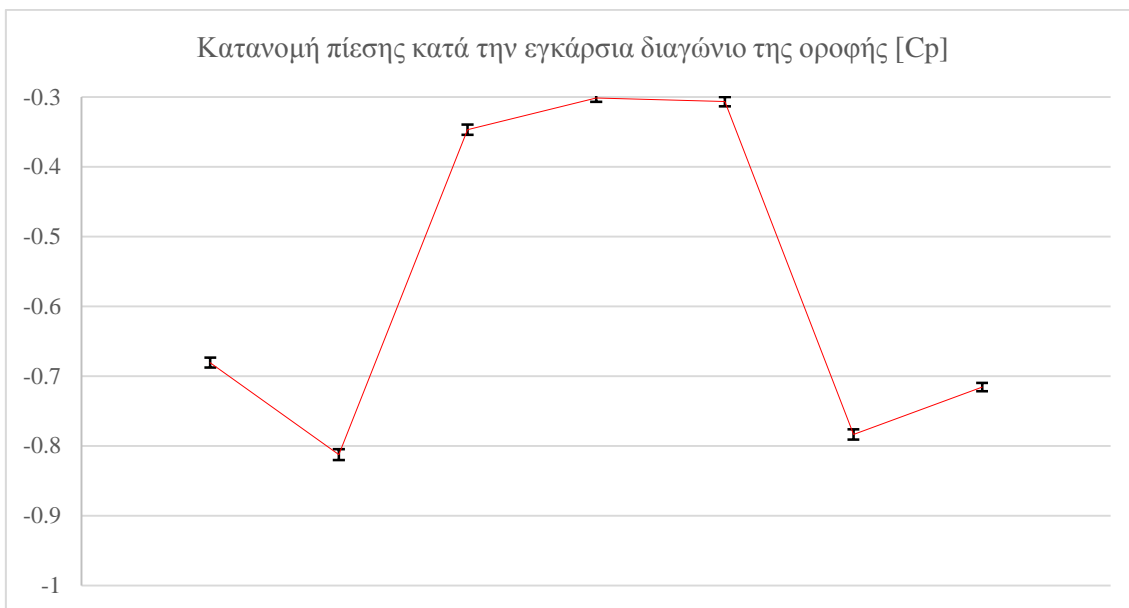
**Σχήμα 5.85:** Περιοχή εμπιστοσύνης του συντελεστή πίεσης εμπρός επιφάνειας κατά την οριζόντια μέση γραμμή, για το σενάριο 8 (B οριακό στρώμα-κάτω άνοιγμα).

Για την περίπτωση των 45 μοιρών για τα σενάρια 9 και 13 έγινε η υπόθεση συμμετρικής ροής, έτσι μπορεί να εξεταστεί αν είναι στατιστικά συμμετρική μέσω της εγκάρσιας διαγώνιου της οροφής.

Και για τα δύο αυτά σενάρια (Σχήμα 5.86, Σχήμα 5.87) φαίνεται να υπάρχει ελαφρά ασυμμετρία, το οποίο είναι και αναμενόμενο [89].



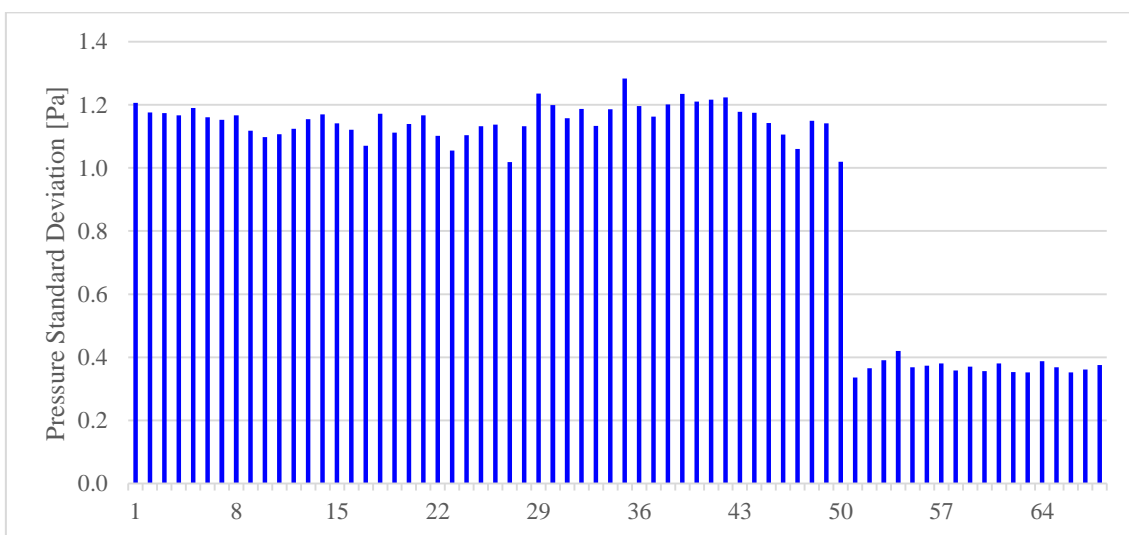
**Σχήμα 5.86:** Περιοχή εμπιστοσύνης του συντελεστή πίεσης επάνω επιφάνειας κατά την εγκάρσια διαγώνιο, για το σενάριο 9 (A οριακό στρώμα-κλειστός κύβος)



**Σχήμα 5.87:** Περιοχή εμπιστοσύνης του συντελεστή πίεσης επάνω επιφάνειας κατά την εγκάρσια διαγώνιο, για το σενάριο 13 (B οριακό στρώμα-κλειστός κύβος)

Αξίζει να αναφερθεί ότι το σφάλμα μετρήσεων της πίεσης του κύβου συνιστάται κυρίως από ηλεκτρικό θόρυβο.

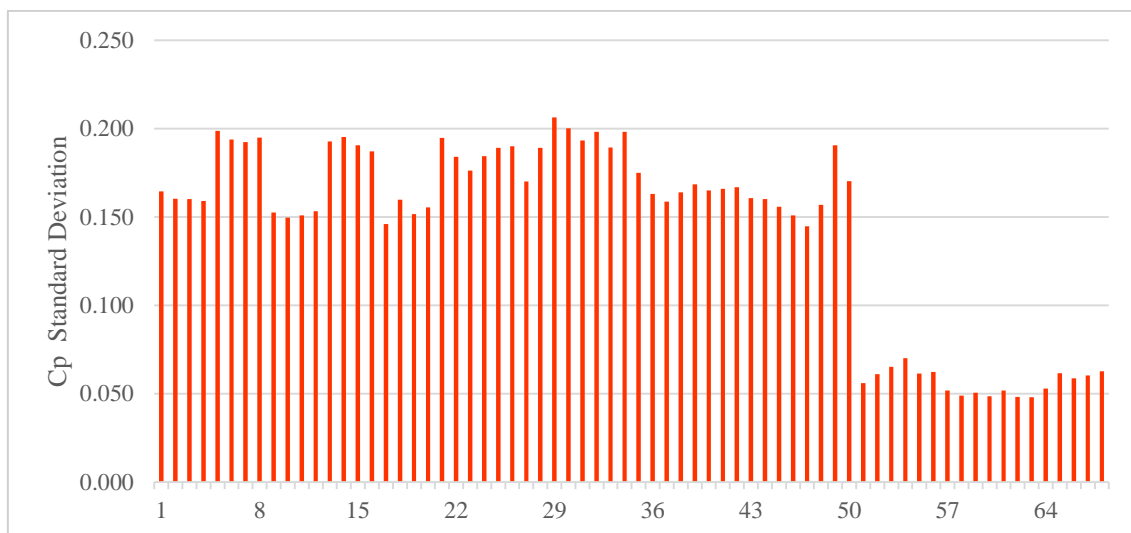
Κατά την μέτρηση μιας επιφάνειας στον κύβο, λαμβανόταν μια μέτρηση πριν και μια μέτρηση μετά, χωρίς ροή. Αυτές οι μετρήσεις γίνονταν με συχνότητα δειγματοληψίας 50Hz για περίοδο 10sec, όπως δηλαδή η μέτρηση του κάθε καναλιού.



**Σχήμα 5.88:** Τυπικές αποκλίσεις της πίεσης, χωρίς ροή (πριν από κάθε μέτρηση), όπου είναι έντονη η παρουσία θορύβου. Οριζόντιος άξονας είναι ο αύξων αριθμός της μέτρησης.



Η τυπική απόκλιση της χρονοσειράς της πίεσης λαμβάνει σημαντικές τιμές, ανεξαρτήτως του γεγονότος ότι δεν υπάρχει ροή (Σχήμα 5.88), τιμές τάξεως του 1.1 Pascal. Και διαιρώντας με την αντίστοιχη δυναμική πίεση για κάθε οριακό στρώμα, προκύπτει η τυπική απόκλιση του συντελεστή πίεσης  $C_p$  (Σχήμα 5.89), και είναι της τάξεως 0.15 με 0.20 το οποίο είναι σημαντικό στις παρούσες μετρήσεις.

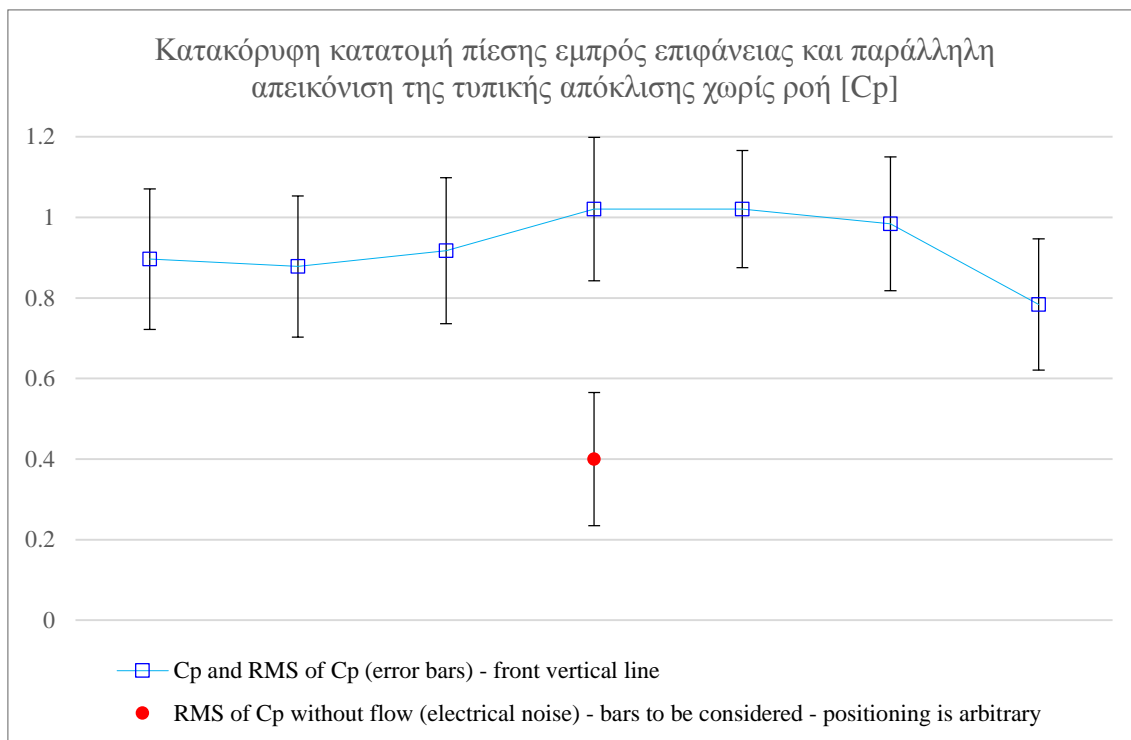


**Σχήμα 5.89:** Τυπικές αποκλίσεις του  $C_p$ , χωρίς ροή (πριν από κάθε μέτρηση), όπου είναι έντονη η παρουσία θορύβου. Οριζόντιος άξονας είναι ο αύξων αριθμός της μέτρησης.

Χαρακτηριστικό στα διαγράμματα είναι η πτώση του ηλεκτρικού θορύβου από την μέτρηση 52 και έπειτα. Αυτό προέκυψε διότι η τροφοδοσία του εξοπλισμού έγινε μέσω UPS, έπειτα από απρόσμενη διακοπή ηλεκτρικού ρεύματος. Έτσι σε τροφοδοσία μέσω UPS ο ηλεκτρικός θόρυβος είναι της τάξεως των 0.4 Pascal ή συντελεστή πίεσης 0.06.

Για να αποτυπωθεί η σημαντικότητα του ηλεκτρικού θορύβου που εισέρχεται στα δεδομένα, χαρακτηριστικά απεικονίζεται η κατατομή του συντελεστή πίεσης εμπρός επιφάνειας, του σεναρίου 1, με μπάρες αβεβαιότητας τις τυπικές αποκλίσεις των σημείων, και παράλληλα απεικονίζεται με μπάρα αβεβαιότητας η τυπική απόκλιση της πίεσης που καταγράφεται χωρίς ροή, πριν από την μέτρηση (περίπου ίδια είναι και μετά την μέτρηση).

Στην απεικόνιση (Σχήμα 5.90) η τοποθέτηση του σημείου που απεικονίζεται ο ηλεκτρικός θόρυβος, είναι αυθαίρετο.



**Σχήμα 5.90:** Πίεση και μπάρες που απεικονίζουν την τυπική απόκλιση για κατακόρυφη εμπρός μέση γραμμή, για το σενάριο 1, και μπάρες τυπικής απόκλισης χωρίς ροή, όπου είναι έντονη η παρουσία θορύβου (η τοποθέτηση του σημείου στο διάγραμμα είναι αυθαίρετη)

# Κεφάλαιο 6

## *Συμπεράσματα και σχόλια*

### **6.1 Συμπεράσματα**

Εξετάστηκε πειραματικά η κατανομή επιφανειακής πίεσης σε κυβικής μορφή σώμα επί στερεής επιφάνειας, όταν αυτό εκτίθεται σε ροή. Παράμετροι ήταν η μορφή του ανάντι οριακού στρώματος της ροής, ο προσανατολισμός του σώματος ως προς τη ροή και η παρουσία ανοιγμάτων σε κάθετες πλευρές του κύβου. Δόθηκε έμφαση στη προσομοίωση ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος και στον προσδιορισμό της κλίμακας αναλογίας του σώματος με βάση το χαρακτηριστικό μήκος τραχύτητας της επιφάνειας, το ύψος του οριακού στρώματος και της ολοκληρωτικής κλίμακας μήκους της τύρβης. Η κλίμακα αναλογίας που επιτεύχθηκε ήταν 1:400.

Από τα αποτελέσματα προέκυψε ευαισθησία κατανομής πίεσης κυρίως της ανάντι πλευράς του κύβου στη μορφή του οριακού στρώματος όταν ο προσανατολισμός του ως προς τη ροή ήταν 0 μοίρες (ανάντι επιφάνεια κάθετη στη ροή). Η παρουσία των ανοιγμάτων στη περίπτωση αυτή είχε μικρή επίδραση. Για προσανατολισμό 45 μοιρών ως προς τη ροή, η επίδραση του οριακού στρώματος φαίνεται να είναι μικρότερη αλλά η επίδραση των ανοιγμάτων στις ανάντι πλευρές γίνεται πιο έντονη. Η ανομοιομορφία με την οποία επηρεάζουν τα ανοίγματα τις επιφανειακές κατανομές πίεσης μπορεί να έχει σημαντικές επιπτώσεις στον τρόπο με τον οποίο υπολογίζονται οι παράγοντες για τον αερισμό και τη διείδυση αέρα σε κτήρια.

### **6.2 Προσωπική συμβολή**

#### **6.2.1 Για την προσομοίωση ΑΟΣ**

Προετοιμασία διατάξεων, βαθμονόμηση και μέτρηση κατατομών ταχύτητας (Σχήμα 4.24, Σχήμα 4.17) με ανεμόμετρο θερμού νήματος (IFA 300, ThermalPro). τοποθέτηση των οβελίσκων και των στοιχείων τραχύτητας για την προσομοίωση του ΑΟΣ (Σχήμα 4.12, Σχήμα 4.13)

Κατά την διαδικασία της μέτρησης του ΑΟΣ, η αλλαγή του ύψους μέτρησης του θερμού νήματος πραγματοποιούνταν χειροκίνητα με παρέμβαση εντός της σήραγγας, εφόσον διακόπτονταν η ροή.

Η επεξεργασία των μετρήσεων του ΑΟΣ και η απεικόνιση αυτών, πραγματοποιήθηκε με την χρήση των λογισμικών Microsoft Excel και MATLAB, όπου αναπτύχθηκαν υπολογιστικά φύλλα και κώδικες αντίστοιχα. Δηλαδή για τις κατατομές μέσω των ταχυτήτων και την προσαρμογή τους στους αντίστοιχους νόμους, τις κατατομές έντασης της τύρβης, τις συναρτήσεις αυτοσυσχέτισης, τις κατατομές ολοκληρωτικής κλίμακας χρόνου και μήκους, τις κατατομές κλίμακας προσομοίωσης και τα φάσματα ενέργειας των χρονοσειρών, διαστατά και αδιάστατα.

## 6.2.2 Για την μέτρηση του κύβου

Κατασκευή τετράγωνης ξύλινης βάσης για τον κύβο από κόντρα πλακέ, ώστε να τοποθετηθεί σε υπάρχον άνοιγμα στην περιστρεφόμενη τράπεζα (Σχήμα 4.31, Σχήμα 4.38).

Προετοιμασία και συνδεσμολογία της διάταξης μέτρησης της πίεσης (Σχήμα 4.32). Οδήγηση των καναλιών από κάτω και εκτός σήραγγας (Σχήμα 4.37).

Καταγραφή δεδομένων μέσω του λογισμικού LabView. Ανάπτυξη κώδικα σε περιβάλλον MATLAB για την επεξεργασία των αρχείων και την απεικόνιση των συντελεστών πίεσεων, δηλαδή για την απεικόνιση με ισοβαρείς καμπύλες και την απεικόνιση κατά τις διαδρομές. Για την απεικόνιση λοιπών διαγραμμάτων του συντελεστή πίεσης, δημιουργήθηκαν υπολογιστικά φύλλα σε περιβάλλον Microsoft Excel.

## 6.3 Σχόλια και μελλοντικές προτάσεις

### 6.3.1 Για την προσομοίωση ΑΟΣ

Για την μέτρηση του ΑΟΣ μέσω θερμού νήματος, ήταν αναγκαία η διακοπή της ροής και επέμβαση εντός της σήραγγας, για την μέτρηση σε νέα θέση ύψους. Αυτό εκτός από την μεγάλη χρονική καθυστέρηση που εισέφερε, ίσως επηρέαζε και την επαναληψιμότητα σε κάποιο βαθμό. Οπότε θεωρείται απαραίτητη η επιδιόρθωση του μηχανισμού της τραβέρσας, ώστε να είναι δυνατή η αδιάκοπη μέτρηση, με τάχιστη μετακίνηση και ίσως πιο μικρά βήματα ύψους, ώστε να επιτευχθεί μεγαλύτερη ανάλυση της κατατομής, και με μεγαλύτερη ακρίβεια θέσης λόγω βηματικών κινητήρων.

Ενδιαφέρον θα είχε η μέτρηση της κατατομής της ταχύτητας  $u$ , και σε άλλες θέσεις εντός της σήραγγας, δηλαδή μετακίνηση κατά  $x$  (κατά μήκος της ροής) και μετακίνηση κατά  $y$  (δηλαδή κατά το πλάτος της σήραγγας), πράγμα που με τον μηχανισμό της τραβέρσας είναι σχετικά εύκολο. Έτσι, κατά  $x$ , θα μελετηθεί η ανάπτυξη του οριακού στρώματος κατά μήκος και κατά  $y$ , η ομοιομορφία του οριακού στρώματος κατά πλάτος.

Η συσκευή IFA300 του θερμού νήματος μπορεί να υποστηρίξει την μέτρηση του ανέμου και στις άλλες δύο συνιστώσες, την  $v$  (κατά  $y$ ) και την  $w$  (κατά  $z$ ), με την

κατάλληλη βάση του αισθητήρα (probe support), αλλά και αισθητήρα (probe). Έτσι θα απεικονίζονταν οι κατατομές σε αυτές τις συνιστώσες του ανέμου. Επίσης γνωρίζοντας τις χρονοσειρές σε αυτές τις συνιστώσες μπορούν να υπολογιστούν και επιπλέον χαρακτηριστικά του ανέμου, όπως οι τάσεις Reynolds.

Με μέτρηση της διάτμησης του εδάφους, θα μπορούσε να υπολογιστεί η ταχύτητα τριβής και να επιβεβαιώσει την προκύπτουσα ταχύτητα τριβής από την προσαρμογή των δεδομένων της μέσης ταχύτητας.

Η συντελεστής κλίμακα προσομοίωσης δεν είναι σταθερός καθ' ύψος. Ίσως τελικά, η διερεύνηση νέων ειδών γεννητριών τύρβης, να είναι απαραίτητος για την επίτευξη της σταθερότητας, τουλάχιστον για ύψη κοντά στην επιφάνεια του εδάφους.

### 6.3.2 Για την μέτρηση του κύβου

Για την κατανομή της πίεσης ενδιαφέρον θα είχε η τυπική απόκλιση. Η τυπική απόκλιση μετρήθηκε στο παρόν πείραμα, αλλά ο ηλεκτρικός θόρυβος ήταν κυρίαρχος στην τυπική απόκλιση και απρόβλεπτος και έτσι ήταν αδύνατο να εξαχθούν συμπεράσματα. Η απομόνωση της ηλεκτρικής τροφοδότησης ίσως καταφέρει να μειώσει μέρος του θορύβου.

Μέτρηση της πίεσης στις συμμετρικές επιφάνειες, που ήταν αδύνατο να πραγματοποιηθεί, για την επιβεβαίωση ή όχι της συμμετρικής κατανομής.

Τα συνολικά κανάλια του κύβου ήταν 91 (42 για κάθετη επιφάνεια + 49 για οροφή), ο σαρωτής πίεσης FCS421 υποστηρίζει 60 κανάλια. Αυτό σημαίνει ότι για να γίνει η μέτρηση ενός σεναρίου, θα έπρεπε κάποια στιγμή να διακοπεί για αρκετό χρονικό διάστημα, για την αλλαγή συνδέσεων των καναλιών στον σαρωτή. Π.χ. πραγματοποιούνταν για τις πλευρικές επιφάνειες πρώτα και στο τέλος για την οροφή. Αυτό ίσως επηρεάζει την επαναληψιμότητα της ροής. Έτσι ένας σαρωτής με περισσότερα κανάλια θα ήταν ιδανικός.

Το ιδανικό θα ήταν ένας κύβος με οπές καθ' όλη την επιφάνεια του και όπως και ένας σαρωτής πίεσης με υποστήριξη του αριθμού των καναλιών. Έτσι με ακριβή τοποθέτηση του κύβου, θα γινόταν μέτρηση χωρίς διακοπή της ροής για την περιστροφή της τράπεζας. Με αυτό θα εκμηδενίζονταν η αβεβαιότητα στην γωνία περιστροφής της τράπεζας και η αβεβαιότητα για την επαναληψιμότητα της ροής.

Ενδιαφέρον θα είχε το φάσμα των χρονοσειρών της πίεσης, ιδίως στην οροφή για την εξέταση των κωνικών στροβίλων. Για να είναι πραγματοποιήσιμο αυτό όμως, απαιτείται ιδιαίτερος εξοπλισμός που θα βρίσκεται ακριβώς κάτω από τον κύβο, που το καθιστά δύσκολο. Αυτή η προϋπόθεση είναι απαραίτητη διότι το μεγάλο μήκος των καναλιών σε συνδυασμό με την σχετικά μικρή διάμετρο τους, δρα ως χαμηλοπερατό φίλτρο, προς το μανόμετρο.

Θα έχει ενδιαφέρον η κατανομή της πίεσης και με διάφορους άλλους συνδυασμούς όπως π.χ. εμπρός επάνω άνοιγμα και πίσω κάτω άνοιγμα. Επίσης και ροή υπό διαφορετικές γωνίες όπως π.χ. 15, 22.5, 30 μοιρών.

Τέλος η απεικόνιση της ροής με μέθοδο καπνικού συστήματος ή μέσω της μεθόδου PIV θα επιβεβαιώνει την θεώρηση για την επίδραση στο σχηματιζόμενο πεταλοειδή στρόβιλο στη βάση της ανάντι πλευράς, με τη παρουσία των ανοιγμάτων, όπου τον εξασθενίζει διοχετεύοντας παροχή και διά του εσωτερικού του κύβου.

## Βιβλιογραφία

- [1] ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΠΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗ: Σημειώσεις, των Δ.Σ. Μαθιουλάκη, Ι.Σ. Αναγνωστόπουλου και Δ.Γ. Τουζόπουλου, 2005
- [2] Cóstola, D.; Blocken, B.; Ohba, M.; Hensen, J.L.M. (2010) Uncertainty in airflow rate calculations due to the use of surface-averaged pressure coefficients. *Energy Build*, 42, 881–888.
- [3] K. Nozawa, T. Tamura, Large eddy simulation of the flow around a low-rise building immersed in a rough-wall turbulent boundary layer, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 90 (2002) 1151-1162
- [4] Castro I. and Robins A., (1977), The flow around a surface mounted cube in uniform and turbulent streams. *J. Fluid Mech.*, Vol. 79, No. 2, pp. 307-335.
- [5] Kawai H, Nishimura G., (1996), Characteristics of fluctuating suction and conical vortices on a flat roof in oblique flow. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* Vol 60, pp. 211-225.
- [6] Kawai H., (2002), Local peak pressure and conical vortex on building. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, Vol 90, pp. 251-263.
- [7] Marwood R. and Wood C.J., (1997), Conical vortex movement and its effect on roof pressures, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, Vol. 69-71, pp. 589-595.
- [8] Tieleman, H. and Akins, R., (1996), The effect of Incident Turbulence on the Surface Pressures of Surface Mounted Prisms, *J. Fluids and Structures*, Vol. 10, 367-393.
- [9] Tieleman H., Ge Z., Hajj M., Reinhold T., (2003), Pressures on a surface-mounted rectangular prism under varying incident turbulence, *J. Wind engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 91, pp. 1095-1115.
- [10] Van Moeseke G., Gratia E., Reiter S., De Herde A. (2005) Wind pressure distribution influence on natural ventilation for different incidences and environment densities. *Energy Build*, 37, 878–889.
- [11] Syrios K., Hunt G.R., (2008) Passive air exchanges between building and urban canyon via openings in a single façade. *Int. J. Heat Fluid Flow*, 29, 364–373
- [12] Γιώργος Μπεργελές, Ανεμοκινητήρες (Αθήνα: ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΣΥΜΕΩΝ, 2005)
- [13] Π. Κατσαφάδος, Η. Μαυροματίδης, (2015), Εισαγωγή στη Φυσική της Ατμόσφαιρας και την Κλιματική Αλλαγή, ISBN: 978-960-603-053-6
- [14] Coolgeography.co.uk. (2017). Atmospheric Structure. [online] Available at: <http://www.coolgeography.co.uk/A-level/AQA/Year%2013/Weather%20and%20climate/Structure/Atmospheric%20layers.htm>. [Accessed 11 Jan. 2017].

- [15] Robinson, H. (2017). Temperature, Heat, and Energy Transfer. [online] Slideshare.net. Available at: [http://www.slideshare.net/muguu\\_908/temperatureheat-and-energy-transfer-presentation-604276](http://www.slideshare.net/muguu_908/temperatureheat-and-energy-transfer-presentation-604276). [Accessed 11 Jan. 2017].
- [16] Earthobservatory.nasa.gov. (2017). Climate and Earth's Energy Budget : Feature Articles. [online] Available at: <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/EnergyBalance/page2.php> [Accessed 11 Jan. 2017].
- [17] Μπεργελές, Γεώργιος. Πηγές, διασπορά και έλεγχος ατμοσφαιρικής ρύπανσης / Γιώργος Μπεργελές. - 1η έκδ. - Αθήνα : Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ
- [18] Κέντρο Περιβαλλοντικής Εκπαίδευσης Μακρινίτσας Πήλιου, Εισαγωγή στην μετεωρολογία, Δεκέμβριος 2007, ISBN: 978-960-98043-5-6
- [19] Physicalgeography.net. (2017). 7(n) Forces Acting to Create Wind. [online] Available at: <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/7n.html> [Accessed 11 Jan. 2017].
- [20] Α. Ζερβός, Γ. Κάραλης, (2009), Σημειώσεις αιολικής ενέργειας
- [21] Commons.wikimedia.org. (2017). File:Diurnal wind change in coastal area.png - Wikimedia Commons. [online] Available at: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Diurnal\\_wind\\_change\\_in\\_coastal\\_area.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Diurnal_wind_change_in_coastal_area.png) [Accessed 11 Jan. 2017].
- [22] North G.R., Pyle J.A., Zhang F., Encyclopedia of Atmospheric Sciences, Elsevier Science, vol. 1-6 (2014), pp. 245
- [23] Raible, C., Leuenberger, M., Joos, F. and Stocker, T. (2017). Introduction to Climate and Environmental Physics HS 2014 Lecture III. [online] documentslide.com. Available at: <http://documentslide.com/documents/introduction-to-climate-and-environmental-physics-hs-2014-lecture-iii-christoph.html> [Accessed 11 Jan. 2017].
- [24] Cimms.ou.edu. (2017). hodographs. [online] Available at: <http://www.cimms.ou.edu/~doswell/hodographs/hodographs.html>
- [25] Burton W V. Wind tunnel simulation of an atmospheric boundary layer. Texas Tech University, 2001.
- [26] Simiu, E. and Scanlan, R. Wind Effects on Structures (3rd edition). John Wiley & Sons, Inc., New York, N.Y., 1996
- [27] Stevenson T. "Report on the simultaneous observations of the force of the wind at different heights above the ground." J Scot. Met. Soc. 5, 348-351, 1880
- [28] Hellman G., "Uber die Bewegung der Luft in den untersten Schichten der Atmosphäre" Meteorol. Z., 34 (1916) 273.
- [29] Cook, N.J. The Designer's Guide to Wind Loading of Building Structures, BRE, Garston, UK, 1985



- [30] Rockets to Sprockets. (2017). The Issue with "Cross Winds" in Wind Tunnels - Rockets to Sprockets. [online] Available at: <http://rockets2sprockets.com/issue-cross-winds-wind-tunnels> [Accessed 11 Jan. 2017].
- [31] F. Bañuelos - Ruedas, et al., (2011). Methodologies Used in the Extrapolation of Wind Speed Data at Different Heights and Its Impact in the Wind Energy Resource Assessment in a Region, Wind Farm - Technical Regulations, Potential Estimation and Siting Assessment, InTech, DOI: 10.5772/20669
- [32] Sutton O. G. Atmospheric Turbulence. Methuen, London, 1949.
- [33] Fisher B., J. Kukkonen, M. Piringer, M.W. Rotach and M. Schatzmann, 2005: 'Meteorology applied to urban air pollution problems: concepts from COST 715', Atmos. Chem. Phys. Discuss., 5, 7903-7927
- [34] Stangroom P., 2004: 'CFD Modelling of wind flow over terrain', PhD thesis, University of Nottingham
- [35] Garratt, J.R. The Atmospheric Boundary Layer, Cambridge University Press, New York, NY, 1992.
- [36] Engineering Sciences Data Unit (1974/1975); ESDU Data Item No. 75001; Characteristics of Atmospheric Turbulence Near the Ground; ESDU: London, UK.
- [37] Zhou Xing. Passive Simulation of ABL in a 3.5x2.5m Experimental Wind Tunnel. Master Thesis. China-EU Institute for Clean and Renewable Energy. 2015
- [38] P. K. Kundu, I. M. Cohen, Chapter 13 - Turbulence, In Fluid Mechanics (Second Edition), Academic Press, Boston, 2002, pp. 496-554
- [39] Counihan, J. "Adiabatic Atmospheric Boundary Layers: A Review and Analysis of Data from the Period 1880-1972." Atmospheric Environment 9 (1975): 871-905.
- [40] ESDU (1974). "Characteristics of atmospheric turbulence near the ground. Part 2: single point data for strong winds (neutral atmosphere)", Engineering Sciences Data Unit 74031
- [41] R. Dutta, F. Wang, Bradley F. Bohlmann, K. A. Stelson, Analysis of Short-Term Energy Storage for Midsize Hydrostatic Wind Turbine, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Volume 136, Issue 1, 2013
- [42] Mechanics of Turbulence. (2017). Length and Time Scales of Turbulence - Mechanics of Turbulence. [online] Available at: <http://www.mechturb.com/turbulence/length-and-time-scales-of-turbulence> [Accessed 11 Jan. 2017].
- [43] Koutselakis P (2011) Experimental Study of Surface Pressure Distribution on a Cubic Building Model. Diploma Thesis. Dept. Mechanical Engineering, University of Western Macedonia.

- [44] S. Krajnovic, L. Davidson, FLOW AROUND A THREE-DIMENSIONAL BLUFF BODY, 9TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FLOW VISUALISATION, 2000
- [45] Researchgate.net. (2017). [online] Available at: [https://www.researchgate.net/profile/Lei\\_Wang102/publication/271720849/figure/fig1/AS:295042452344836@1447355010728/Fig-1\\_big.png](https://www.researchgate.net/profile/Lei_Wang102/publication/271720849/figure/fig1/AS:295042452344836@1447355010728/Fig-1_big.png) [Accessed 11 Jan. 2017].
- [46] YouTube. (2017). Flow past a surface-mounted cube. [online] Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=51SvDKv7sTg> [Accessed 11 Jan. 2017].
- [47] Martinuzzi R. and Tropea C., The flow around surface-mounted prismatic obstacle placed in a fully developed channel flow, *J. Fluids Eng.*, 115 (1993) 85-92.
- [48] H. Nakamura et al., Local heat transfer around a wall-mounted cube at 45° to flow in a turbulent boundary layer, *Int. J. Heat and Fluid Flow*, 24 (2003) 807–815
- [49] 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
- [50] Ogawa et al., Field and wind tunnel study of the flow and diffusion around a model cube- II. Nearfield and cube surface flow and concentration patterns, *Atmospheric Environment*, Vol. 17, Issue 6, 1983, pp. 1161-1171
- [51] Liet.ntua.gr. (2017). [online] Available at: [http://www.liet.ntua.gr/images/images\\_research/CFD-oblique%20cube.gif](http://www.liet.ntua.gr/images/images_research/CFD-oblique%20cube.gif) [Accessed 11 Jan. 2017].
- [52] H. Kawai, Structure of conical vortices related with suction fluctuation on a flat roof in oblique smooth and turbulent flows, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 69 (1997) 579-588
- [53] H.C. Lim et al., Flow around a cube in a turbulent boundary layer: LES and experiment, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 97 (2009) 96–109
- [54] W.D. Baines, Effects of velocity distribution on wind loads and flow patterns on buildings, *Wind Effects Build. Struct.*, 1 (1965) 198-225
- [55] J. Counihan, An experimental investigation of the wake behind a two-dimensional block and behind a cube in a simulated boundary layer flow, *CEGB Lab. Note RD/L/N 115/71*, 1971
- [56] R. Lemberg, On the wakes behind bodies in a turbulent boundary layer, Ph.D. Thesis, University of Western Ontario, 1973.
- [57] I.P. Castro and A.G. Robins, The effect of a thick incident boundary layer on the flow around a small surface mounted cube, *Central Electricity Generating Board Research Laboratories Rep. CERL R/M/N795*, 1975.
- [58] H. Sakamoto and M. Arie, Flow around a cubic body immersed in a turbulent boundary layer, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 9 (1982) 275-293

- [59] A. Hunt, Wind tunnel measurements of surface pressures on cubic building models at several scales, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 10 (1982) 137-163
- [60] P. J. Richards, R. P. Hoxey, L. J. Short, Wind pressures on a 6m cube, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 89 (2001) 1553-1564
- [61] H. Cheng et al., Flow over cube arrays of different packing densities, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 95 (2007) 715-740
- [62] Lopes, M.F.P., Glória Gomes, M. and Ferreira, J. G. (2008), SIMULATION OF THE ATMOSPHERIC BOUNDARY LAYER FOR MODEL TESTING IN A SHORT WIND TUNNEL. *Experimental Techniques*, 32: 36–43.
- [63] S. A. Zaki et al., Experimental study of wind-induced ventilation in urban building of cube arrays with various layouts, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 103 (2012) 31-40
- [64] Hee-Chang Lim et al., Study on the surface pressure distribution of cubes in cross-wind arrays, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 133 (2014) 18-26
- [65] D. Vasilic-Melling, Three-dimensional turbulent flow past rectangular bluff bodies, Ph.D. Thesis, University of London, Imperial College, 1976.
- [66] S. Murakami, A. Mochida, 3-D numerical simulation of airflow around a cubic model by means of the k- $\epsilon$  model, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 31 (1988) 283-303.
- [67] S. Murakami, A. Mochida and K. Hibi, Three-dimensional numerical simulation of air flow around a cubic model by means of large eddy simulation, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 25 (1987) 291-305.
- [68] F. Baetke, H. Werner, NUMERICAL SIMULATION OF TURBULENT FLOW OVER SURFACE-MOUNTED OBSTACLES WITH SHARP EDGES AND CORNERS, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 35 (1990) 129-147.
- [69] M. Manolesos, Experimental and Computational Study of Three-Dimensional Separation and Separation Control using Passive Vortex Generators (Ph.D. thesis), NTUA, Athens (2013)
- [70] J. Blessmann, The boundary layer TV-2 wind tunnel of the UFRGS, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 10 (1982) 231-248
- [71] M. Schatzmann, J. Donat, S. Hendel, G. Krishan, Design of a low-cost stratified boundary-layer wind tunnel, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 54/55 (1995) 483-491
- [72] N. J. Cook, WIND-TUNNEL SIMULATION OF THE ADIABATIC ATMOSPHERIC BOUNDARY LAYER BY ROUGHNESS, BARRIER AND MIXING DEVICE METHODS, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 3 (1978) 157-176
- [73] Irwin, H. (1981). The design of spires for wind simulation. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 7(3), 361-366.

- [74] M.E. De Bortoli, B. Natalini, M.J. Paluch, M.B. Natalini, Part-depth wind tunnel simulations of the atmospheric boundary layer, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 90 (2002) 281–291
- [75] H. Kozmar, An alternative approach to experimental simulation of wind characteristics in urban environments, *Procedia Environmental Sciences*, 4 (2011) 43-50
- [76] Counihan J., AN IMPROVED METHOD OF SIMULATING AN ATMOSPHERIC BOUNDARY LAYER IN A WIND TUNNEL, *Atmospheric Environment Pergamon Press* 1969. Vol. 3, pp. 197-214
- [77] Counihan, J., “Simulation of an Adiabatic Urban Boundary Layer in a Wind Tunnel,” *Atmospheric Environment* 7:673–689 (1973).
- [78] H. Kozmar, Physical modeling of complex airflows developing above rural terrains, *Environmental Fluid Mechanics*, 12(3),209-225 (2012)
- [79] R.W. Macdonald, R.F. Griffiths, D.J. Hall, An improved method for the estimation of surface roughness of obstacle arrays, *Atmospheric Environment*, Volume 32, Issue 11, 1 June 1998, Pages 1857-1864
- [80] Gartshore, I.S., and de Cross, K.A., “Roughness Element Geometry Required for Wind Tunnel Simulations of the Atmospheric Wind,”—*Transactions of the ASME*, New York, *Journal of Fluids Engineering* 99:480-485 (1977)
- [81] Wooding R.A. Bradley E.F. & Marshall J.K., Drag due to regular arrays of roughness elements of varying geometry, *Boundary-Layer Meteorology*, 5:285-308 (1973)
- [82] <http://www.windengineering.byg.dtu.dk>. (2017). Wind Tunnel Testing - CEAero. [online] Available at: <http://www.windengineering.byg.dtu.dk/research/wind-tunnel-testing>. [Accessed 11 Jan. 2017].
- [83] Wind tunnel studies of buildings and structures[C]. American Society Civil Engineers, 1999
- [84] 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
- [85] Kanoglu, M. (2017). Chapter 8 INTERNAL FLOW Copyright © The McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display. *Fluid Mechanics: Fundamentals and*. - ppt download. [online] Slideplayer.com. Available at: <http://slideplayer.com/slide/4895958> [Accessed 11 Jan. 2017].
- [86] Anon, (2017). [online] Available at: <http://wolfweb.unr.edu/homepage/greiner/teaching/MECH322Instrumentation/Labs/Lab%2011%20Karmon%20Vortex/TSI%20Thermal%20Anemometry-Catalog-1.pdf> [Accessed 11 Jan. 2017].

---

[87] Samdukhitech.co.kr. (2017). SAMDUK HI-TECH. [online] Available at: <http://www.samdukhitech.co.kr/htm/productDetail.asp?productNumber=98> [Accessed 11 Jan. 2017].

[88] Hölscher, N. & Niemann, H-J., (1998), Towards quality assurance for wind tunnel tests: A comparative testing program of the Windtechnologische Gesellschaft, J. Wind. Eng. Ind. Aerodyn. 74-76, 599-608, 1998.

[89] Lim, H. C., Castro, I. P., & Hoxey, R. P. (2007). Bluff bodies in deep turbulent boundary layers: Reynolds-number issues. Journal of Fluid Mechanics, 571, 97-118.