

Πειραματική μοντελοποίηση ομόρρους  
ανεμογεννητριών με χρήση διάτρητων  
δίσκων.



Τομέας: Ρευστών

Επιβλέπων: Βασίλειος Ριζιώτης, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα 2023



Υπεύθυνη δήλωση για λογοκλοπή και για κλοπή πνευματικής ιδιοκτησίας:

Έχω διαβάσει και κατανοήσει τους κανόνες για τη λογοκλοπή και τον τρόπο σωστής αναφοράς των πηγών που περιέχονται στον οδηγό συγγραφής Διπλωματικών Εργασιών. Δηλώνω ότι, από όσα γνωρίζω, το περιεχόμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι προϊόν δικής μου εργασίας και υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποίησα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτή τη Διπλωματική εργασία είναι του συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Σκεντέρ Μουρατάι

## Περίληψη.

Η μειωμένη ταχύτητα και η αυξημένη ένταση της τύρβης σε σχέση με την θεωρητικά αδιατάρακτη ροή είναι χαρακτηριστικά της ροής που λειτουργεί μια ανεμογεννήτρια όταν βρίσκεται στον ομόρροο μιας άλλης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μειωμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και την αυξημένη μηχανική καταπόνηση της κατασκευής. Στο παρελθόν έχουν διεξαχθεί αρκετές μελέτες για την κατανόηση αυτού του φαινομένου, τόσο αριθμητικές όσο και πειραματικές.

Στην παρούσα εργασία εξετάζονται πειραματικά τα χαρακτηριστικά της ροής κατάντη δυο διάτρητων δίσκων όταν αυτοί βρίσκονται σε δυο διαφορετικές συνθήκες ροής εισόδου, μαζί με τα χαρακτηριστικά του ομόρροου ενός μοντέλου στραμμένου κατά τον κατακόρυφο άξονα. Παρόμοιοι δίσκοι χρησιμοποιούνται συχνά ως φυσικά μοντέλα για την προσομοίωση δίσκων ορμής ανεμογεννητριών. Ο ένας δίσκος αποτελείται από ένα ομοιόμορφο πλέγμα που εκτείνεται σε όλη του τη διατομή ενώ ο άλλος έχει μη ομοιόμορφο σχέδιο που διαμορφώνεται από τοποθετημένες ακτινικά ράβδους που ενώνονται μεταξύ τους με δακτυλίους. Οι μετρήσεις έγιναν με χρήση θερμού νήματος σε αποστάσεις εύρους από τρεις έως οχτώ διαμέτρους κατάντη του δίσκου.

Τα αποτελέσματα έδειξαν για τον ομοιόμορφο δίσκο ότι η ένταση της τύρβης κατάντη του δίσκου τροφοδοτείται κυρίως από τις δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ των διατμητικών στρωμάτων, που είναι ανάλογες της παραγωγής της ταχύτητας. Οι μεγαλύτερες τιμές της παραγωγής της ταχύτητας παρατηρούνται στα άκρα του ομόρροου, αυτό είναι εντονότερο για τη περίπτωση της στρωτής ροής. Η κατανομή της έντασης τύρβης παρουσιάζει δυο μέγιστα στα σημεία εκεί που η παράγωγος της ταχύτητας είναι μέγιστη επιβεβαιώνοντας τα προηγούμενα. Η κατανομή της ταχύτητας έχει σταθερή τιμή στο ενδιάμεσο τμήμα του ομόρροου λόγω της ομοιομορφίας του δίσκου.

Από την άλλη για τον μη ομοιόμορφο δίσκο η ένταση της τύρβης κατάντη τροφοδοτείται κυρίως από τη ροή του ρευστού εντός των οπών της διατομής του και λόγω της ακτινικής ανομοιομορφίας επιτυγχάνονται σταθερά επίπεδα τύρβης στο ενδιάμεσο τμήμα του ομόρροου, η κατανομή της ταχύτητας και στη στρωτή και στη τυρβώδη ροή ακολουθεί κωδωνοειδή κατανομή, ο ρυθμός μείωσης της ταχύτητας είναι λιγότερο έντονος, και ο ομόρροος εξελίσσεται πιο γρήγορα με τη χρήση αυτού του δίσκου.

Στην περίπτωση του στραμμένου μοντέλου ο ομόρροος εμφανίζει ασυμμετρία που συμφωνεί με την κατεύθυνση της στροφής. Τα αποτελέσματα διασταυρώθηκαν με παρόμοια που υπήρχαν στη βιβλιογραφία και φαίνεται να συμφωνούν.



## Abstract

The decrease in wind velocity and the higher turbulence intensity, when contrasted with the theoretically undisturbed flow, characterize the operating conditions of a wind turbine located in the wake of another turbine. These conditions lead to a reduction in electricity production and an increase in mechanical stress on the structure. Extensive research, both numerical and experimental, has been conducted in the past to gain insight into this phenomenon.

In this study, the flow characteristics within the wake of two perforated disks under various inlet flow conditions are experimentally examined, as well as the characteristics of the wake of a yawed model. Similar disks are frequently used as physical models for simulating the actuator disks of wind turbines. One disk is composed of a uniform mesh that extends across its entire cross-section, while the other showcases a non-uniform design formed by radially arranged rods connected by rings. Measurements were conducted using hot-wire anemometry at distances ranging from three to eight disk diameters downstream.

The results indicate that, for the uniform disk, turbulence intensity within the wake is primarily driven by forces generated between the shear layers, which are proportional to the velocity gradient. The highest velocity gradient values are observed at the edges of the wake, especially in the case of a laminar inflow. The turbulence intensity distribution exhibits two maxima at points where the velocity gradient is highest, confirming the previous findings. The velocity distribution remains relatively constant in the central part of the wake due to the disk's uniformity. On the other hand, for the non-uniform disk, turbulence intensity within the wake is primarily driven by the fluid flow through the holes in its cross-section, and due to the radial non-uniformity, stable turbulence levels are achieved in the central part of the wake, both in the turbulent and flat inflow. The velocity distribution follows a Gaussian profile, and the rate of velocity reduction is less pronounced. The wake develops more rapidly when using this disk.

In the case of the yawed model, the wake appears to exhibit asymmetry in relation to its rotation. The outcomes were cross-referenced with the available literature and seem to align.

## Ευχαριστίες

Με την εκπόνηση της Διπλωματικής Εργασίας, ολοκληρώνονται οι σπουδές μου στη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (Ε.Μ.Π). Με την αφορμή αυτή, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους εκείνους που στάθηκαν δίπλα μου και με στήριξαν σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, τον κ. Βασίλειο Ριζιώτη, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, αναθέτοντάς μου την διεκπεραίωση της παρούσας εργασίας. Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επίκουρο καθηγητή Μανωλέσο Μαρίνο για το ενδιαφέρον του, τις πολύτιμες συμβουλές και την καθοδήγηση που μου παρείχε. Επίσης, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες προς τον υποψήφιο διδάκτορα Κωνσταντίνο Κελλάρη για την αμέριστη βοήθειά του στην εκτέλεση των πειραμάτων.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους φίλους που με στηρίζανε σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου με κάθε τρόπο όσο δύσκολο και να ήταν αυτό.

## Περιεχόμενα

1.	Εισαγωγή .....	1
1.1	Κίνητρο. ....	1
1.2	Δομή εργασίας.....	2
1.3	Προηγούμενες μελέτες.....	3
1.3.1	Γένεση τύρβης. ....	3
1.3.2	Μοντελοποίηση με χρήση διάτρητου δίσκου.....	4
1.4	Στόχοι.....	4
2.	Πειραματικές Μέθοδοι.....	6
2.1	Περιγραφή Αεροσήραγγας.....	6
2.2	Πειραματική διάταξη.....	9
2.3	Κατασκευή πλέγματος.....	14
2.4	Μέτρηση πίεσης. ....	16
2.5	Μέτρηση ταχύτητας. ....	18
2.5.1	Μέθοδος μέτρησης με χρήση θερμού νήματος. ....	18
2.5.2	Διόρθωση Θερμοκρασίας.....	19
2.6	Πρωτόκολλο διαδικασίας μέτρησης και βαθμονόμησης. ....	21
2.7	Έλεγχος και διόρθωση ροής εισόδου.....	24
3.	Αποτελέσματα. ....	27
3.1	Συνθήκες εισόδου με και χωρίς παθητικό πλέγμα. ....	27
3.2	Ομόρρους μοντέλων σε στρωτή ροή. ....	29
3.3	Ομόρρους μοντέλων σε τυρβώδη ροή.....	32
3.4	Ομόρρους μοντέλων σε τυρβώδη ροή με στροφή κατά τον κατακόρυφο άξονα. ....	34
3.5	Λοξότητα και κύρτωση ταχύτητας. ....	38
4.	Σύγκριση με τη βιβλιογραφία. ....	42
4.1	Σύγκριση αποτελεσμάτων Ε.Μ.Π. και πανεπιστημίου Oldenburg. ....	42
4.1.1	Σύγκριση με στρωτή ροή εισόδου.....	42
4.1.2	Σύγκριση με τυρβώδη ροή εισόδου. ....	43
4.2	Σύγκριση αποτελεσμάτων Ε.Μ.Π. και Ν.Τ.Ν.Ο.....	44
4.2.1	Σύγκριση με χρήση ομοιόμορφου δίσκου. ....	45
4.2.2	Σύγκριση με χρήση μη ομοιόμορφου δίσκου. ....	47
5.	Συμπεράσματα. ....	49
	Bibliography .....	50
6.	Παράρτημα .....	53

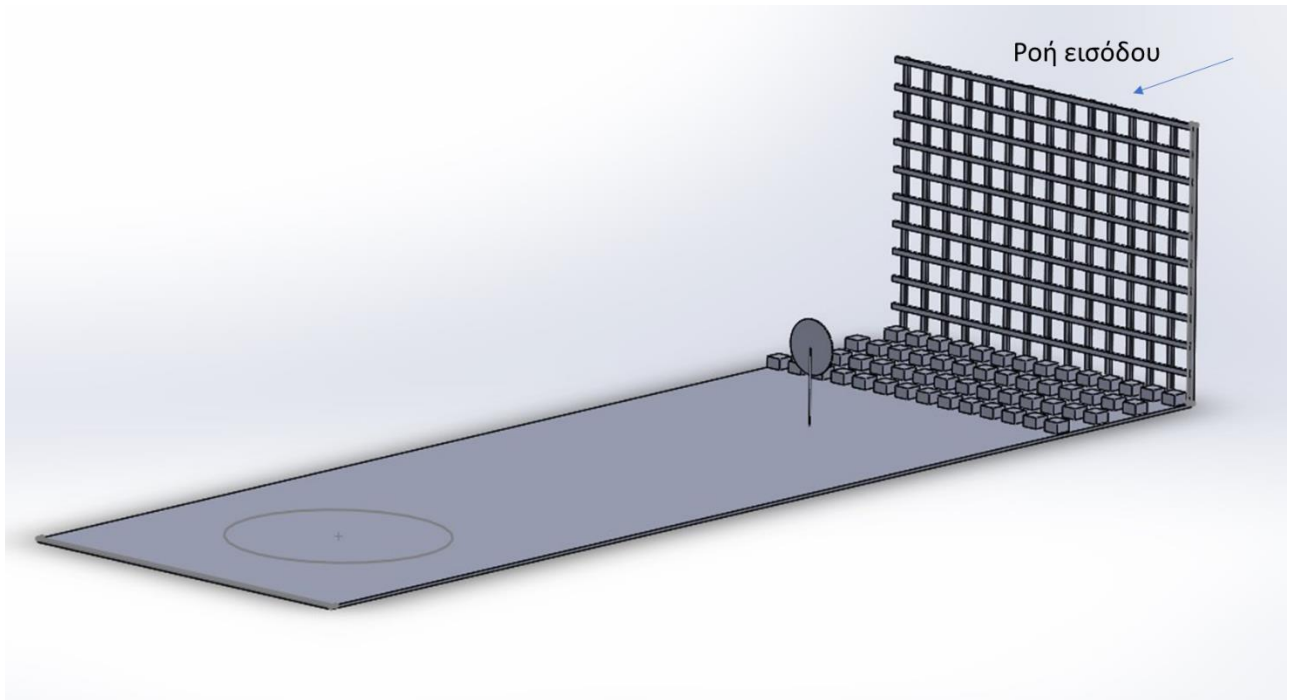


## 1.1 Κίνητρο.

Η αύξηση της ενεργειακής κρίσης καθώς και η περιβαλλοντική ρύπανση οδηγεί σε ολοένα και μεγαλύτερη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω ΑΠΕ [1], με τα αιολικά συστήματα να αποτελούν μια από τις πιο εμπορευματοποιημένες επιλογές. Η μέγιστη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, συνεπώς και η εγκατάσταση περισσότερων ανεμογεννητριών εντός του αιολικού πάρκου αποτελούν κύριο στόχο κατά τον σχεδιασμό του. Υπάρχει ένα όριο που υφίσταται σε αυτή τη διαδικασία, διότι ο όμορος που δημιουργείται κατά την λειτουργία των ανεμογεννητριών έχει ως αποτέλεσμα την άμεση μείωση της παραγωγής ισχύος αλλά και μεγαλύτερη δυναμική καταπόνηση στις ανεμογεννήτριες που λειτουργούν εντός του ομόρρου μιας άλλης (ή συνδυασμό άλλων) [2]. Ως εκ τούτου είναι απαραίτητο να μελετηθεί και να γίνει κατανοητή η συμπεριφορά του ομόρρου που αναπτύσσεται, ώστε να εκτιμηθεί η απαραίτητη απόσταση που πρέπει να υπάρχει μεταξύ των ανεμογεννητριών.

Στην περίπτωση ενός μεγάλου αιολικού πάρκου ο ακριβής υπολογισμός της αλληλεπίδρασης των ανεμογεννητριών είναι δύσκολος, καθώς πρόκειται για ένα σύνθετο και μη γραμμικό φαινόμενο. Αυτό που γίνεται είναι η μοντελοποίηση του προβλήματος είτε υπολογιστικά [3], είτε πειραματικά. Στα πλαίσια μιας πειραματικής μελέτης οι παράμετροι που πρέπει να επιλεγθούν με προσοχή είναι το μοντέλο που θα προσομοιώνει την ανεμογεννήτρια καθώς και τα χαρακτηριστικά της ροής που θα διεξαχθεί το πείραμα. Για την επιλογή του μοντέλου στη βιβλιογραφία προτείνεται η χρήση περιστρεφόμενης ανεμογεννήτριας υπό κλίμακα της πραγματικής [4] ή κάποιας γεωμετρίας σταθερού διάτρητου δίσκου [5]. Τα χαρακτηριστικά της ροής εντός της άδειας αεροσήραγγας είναι συγκεκριμένα, η διαμόρφωση τους σύμφωνα με τις απαιτήσεις κάθε εφαρμογής επιτυγχάνεται συνήθως με τη προσθήκη στοιχείων γένεσης τύρβης [6] (Σχήμα 1-1). Σε αυτή την εργασία θα γίνει πειραματική μελέτη με την χρήση δυο διάτρητων δίσκων σε δυο διαφορετικές συνθήκες ροής εισόδου.

Μέρος των αποτελεσμάτων θα χρησιμοποιηθούν για τη συμμετοχή του Ε.Μ.Π. στον δεύτερο γύρο του “Round-robin tests of porous disc models” που ως στόχο έχει τη γεφύρωση των αποτελεσμάτων μεταξύ διαφορετικών εγκαταστάσεων σε ένα πείραμα με πιο αντικειμενικές συνθήκες έντασης τύρβης αδιατάρακτης ροής από αυτές του πρώτου γύρου. [7].



**Σχήμα 1-1** Πειραματική διάταξη με τοποθετημένα στοιχεία γένεσης τύρβης και διάτρητο δίσκο.

## 1.2 Δομή εργασίας.

Η παρούσα εργασία απαρτίζεται από πέντε βασικά κεφάλαια:

- Κεφάλαιο 1.

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η εισαγωγή της διπλωματικής εργασίας. Αρχικά παρουσιάζεται το κίνητρο για τη σύνταξη της, γίνεται ανασκόπηση σε προηγούμενες μελέτες και τέλος περιγράφεται ο σκοπός της.

- Κεφάλαιο 2.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στις πειραματικές μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν. Συγκεκριμένα περιγράφεται η εγκατάσταση, η διάταξη, η κατασκευή του πλέγματος που χρησιμοποιήθηκε για τη γένεση τύρβης. Παρουσιάζεται το πρωτόκολλο που ακολουθήθηκε κατά την διάρκεια των μετρήσεων γίνεται αναφορά στις μεθόδους μέτρησης πίεσης και ταχύτητας και τέλος παρουσιάζονται ορισμένα αποτελέσματα μετρήσεων με άδεια αεροσήραγγα.

- Κεφάλαιο 3.

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων από όλες τις μετρήσεις. Πρώτα φαίνονται τα αποτελέσματα που μετρήθηκαν έχοντας συνθήκες στρωτής ροής εισόδου, σε απόσταση 4D και 8D κατάντη των δίσκων, στη συνέχεια τα αντίστοιχα αποτελέσματα με τυρβώδη ροή εισόδου έχοντας τοποθετήσει το πλέγμα δηλαδή. Τέλος φαίνονται οι μετρήσεις των δύο δίσκων όταν βρίσκονται υπό κλήση από την κύρια κατεύθυνση της ροής με γωνία  $\beta=0^\circ$  και  $30^\circ$  και απόσταση 3D και 6D.

- Κεφάλαιο 4.

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων με αντίστοιχα που βρέθηκαν στην βιβλιογραφία. Συγκρίνονται οι κατανομές ταχύτητας και έντασης τύρβης κατάντη δυο διάτρητων δίσκων (Σχήμα 2-10) με στρωτή αλλά και τυρβώδη ροή εισόδου.

- Κεφάλαιο 5.

Αυτό είναι το τελευταίο κεφάλαιο της εργασίας και παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν.

### 1.3 Προηγούμενες μελέτες.

#### 1.3.1 Γένεση τύρβης.

Η ένταση της τύρβης της ροής εντός της αεροσήραγγας είναι ένα χαρακτηριστικό που διαμορφώνεται ανάλογα με τις απαιτήσεις που υπάρχουν. Οι κύριες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία τύρβης είναι παρεμβατικές, δηλαδή τοποθετούνται αντικείμενα εντός της αεροσήραγγας, συνήθως τέτοια στοιχεία είναι οβελίσκοι, συστοιχία από μικρούς κύβους συνδυασμός αυτών [6], [8] ή με χρήση πλέγματος στην είσοδο της ροής [9].

Σε έρευνα που μελετήθηκαν 4 συμμετρικά πλέγματα διαφορετικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών προέκυψε το συμπέρασμα ότι το πεδίο της ροής είναι ισοτροπικό και ομογενές σε απόσταση μικρότερη από αυτή που μέχρι τώρα προτείνεται στη βιβλιογραφία [10], στην ίδια έρευνα για πρώτη φορά μελετήθηκε η επίδραση της διαπλάτυνσης της διατομής στο σημείο μέτρησης από αυτή της εισόδου της ροής, το συμπέρασμα ήταν η αύξηση της έντασης τύρβης και του ολοκληρωματικού μήκους κατάντη του πλέγματος με μικρή επίδραση στην ανισοτροπία και στο ενεργειακό φάσμα της ροής. Σε άλλη μελέτη φάνηκε η επίδραση της συμμετρίας της γεωμετρίας του πλέγματος, με ένα συμμετρικό πλέγμα να έχει μικρότερα επίπεδα τύρβης από το μη συμμετρικό [11]. Τέλος σε έρευνα που έγινε για την μελέτη του ομόρρου κατάντη διάτρητων δίσκων σε στρωτή ροή εισόδου και σε ροή αυξημένης έντασης τύρβης, λόγω προσθήκης παθητικού πλέγματος τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το έλλειμμα ταχύτητας κατάντη των δίσκων που βρισκόντουσαν στη τυρβώδη ροή ήταν μικρότερο σε σχέση με αυτό που πρόκυπτε από τη στρωτή ροή [2].

### 1.3.2 Μοντελοποίηση με χρήση διάτρητου δίσκου.

Η χρήση δίσκων για την προσομοίωση μιας ανεμογεννήτριας έναντι ενός περιστρεφόμενου μοντέλου είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιείται αρκετά. Σε έρευνα όπου συγκρίθηκαν αποτελέσματα μεταξύ ενός περιστρεφόμενου μοντέλου 2 πτερυγίων και 5 διάτρητων δίσκων ίδιας διαμέτρου αλλά διαφορετικού σχεδίου και στερεότητας (2 ομοιόμορφοι δίσκοι στερεότητας 40% και 60 % και 3 μη ομοιόμορφοι στερεότητας 35%, 40%, 60%), παρατηρήθηκε ότι ο δίσκος με την μεγαλύτερη στερεότητα είχε σημαντική μείωση ταχύτητας στον ομόρρο, ενώ στο δίσκο με τη μικρότερη η διαφορά ήταν αμελητέα. Αυτός που προσέγγιζε καλύτερα το στρεφόμενο μοντέλο από άποψης μέσης τιμής ταχύτητας εντός του ομόρρο και συντελεστή οπισθέλκουσας φάνηκε να είναι ο μη ομοιόμορφος δίσκος στερεότητας 35. Τέλος η ένταση της πυκνότητας στροβηλότητας στις ακμές του ομόρρο είναι αυξημένη σε όλες τις περιπτώσεις [12]. Όταν συγκρίνονται ένας διάτρητος δίσκος και ένα στρεφόμενο μοντέλο ανεμογεννήτριας, δεδομένου ότι έχουν την ίδια πτώση ταχύτητας εντός του ομόρρο, και έχοντας υψηλά επίπεδα τύρβης στη ροή εισόδου τα χαρακτηριστικά της ροής (ένταση τύρβης, λοξότητα, κύρτωση, ολοκληρωματικό μήκος) σε απόσταση μεγαλύτερη από 3 D κατάντη είναι παρόμοια [13]. Όσον αφορά τις ασυμμετρίες της ροής κανένας από τους διάτρητους-συμμετρικούς δίσκους δεν μπόρεσε να τις αναπαράγει [2]. Παρόλο που έχουν διεξαχθεί αρκετά πειράματα για την μοντελοποίηση των ανεμογεννητριών με χρήση διάτρητων δίσκων η επαναληψιμότητα μεταξύ διαφορετικών πειραματικών εγκαταστάσεων που διενεργήθηκε το ίδιο πείραμα έδειξε αποτελέσματα που είχαν μεταξύ τους διαφορές [7]. Πρέπει να γίνουν παραπάνω μελέτες με τη χρήση δίσκων ώστε να προκύψουν αντικειμενικά συμπεράσματα.

## 1.4 Στόχοι.

Ο στόχος της παρούσας εργασίας είναι η διεξαγωγή πειραμάτων με χρήση δύο διαφορετικών διάτρητων δίσκων υπό δύο διαφορετικές κατευθύνσεις ροής, και η συμμετοχή στο δεύτερο γύρο του “Round-robin tests of porous disc models”. Βασικοί στόχοι που τέθηκαν προς επίτευξη κατά την εκπόνηση της παρούσας εργασίας ήταν:

- Η μέτρηση του ελλείμματος ταχύτητας του ομόρρο.
  - Μετρήθηκε η τιμή της ταχύτητας της ροής με ανεμομετρία θερμού νήματος (hot wire method) – σταθερής θερμοκρασίας (CTA), σε ένα εύρος θέσεων ώστε να είναι δυνατό να απεικονιστεί η πλήρως ανεπτυγμένη κατανομή της ταχύτητας πίσω από τους δίσκους σε κάθε περίπτωση που εξετάστηκε.
- Η σύγκριση των αποτελεσμάτων.

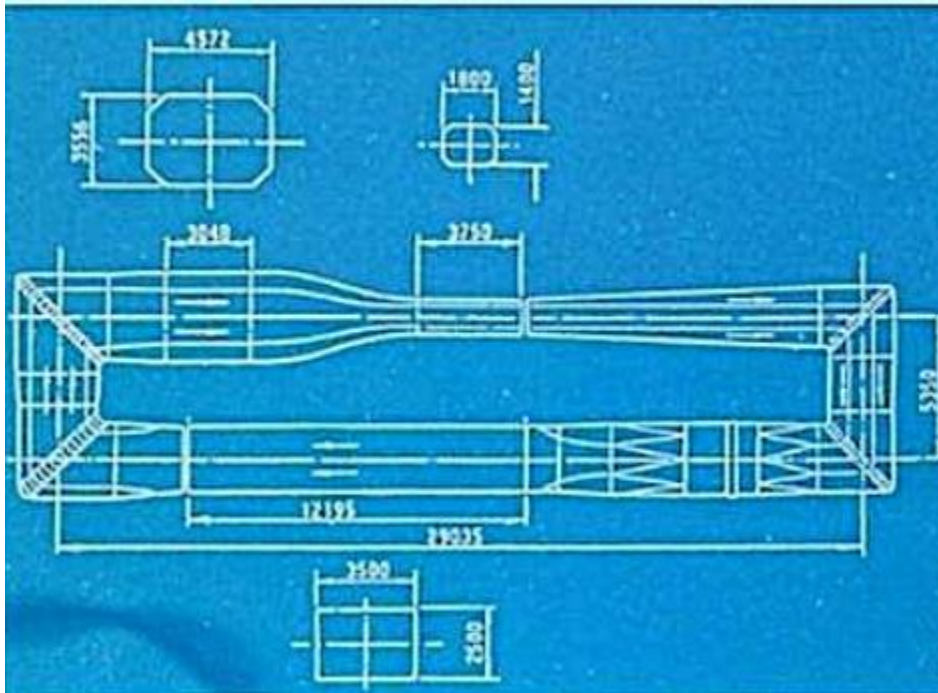
Τα αποτελέσματα που συλλέχθηκαν συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα που υπήρχαν από παρόμοια πειράματα που έχουν διεξαχθεί σε άλλες εγκαταστάσεις.

- Η πειραματική μελέτη σε στροφή κατά τον κατακόρυφο άξονα. Το πείραμα με τον ομοιόμορφο δίσκο να έχει κλήση από τη κύρια κατεύθυνση της ροής είναι ένα από τα λίγα που βρίσκονται στη βιβλιογραφία ενώ με τον συγκεκριμένο μη ομοιόμορφο δίσκο είναι το πρώτο μέχρι τώρα.

## 2. Πειραματικές Μέθοδοι.

### 2.1 Περιγραφή Αεροσήραγγας

Η αεροσήραγγα του Ε.Μ.Π. όπου πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα είναι κλειστού τύπου, χαμηλής ταχύτητας (υποηχητική), συνολικής περιμέτρου 32 m και περιλαμβάνει 3 χώρους δοκιμής έναν μικρό, έναν μεσαίο και έναν πιο μεγάλο όπως φαίνεται και από το σκαρίφημα στο Σχήμα 2-1. Πρόκειται για εγκατάσταση υψηλής ακρίβειας μετρήσεων και είναι κατάλληλη για μεγάλο εύρος πειραματικών εφαρμογών [14]. Είναι εξοπλισμένη με κινητήρα συνολικής ισχύος 300 kW (Σχήμα 2-5) [15], ο οποίος συνδέεται με περιστρεφόμενη πτερωτή 8 πτερυγίων και μια ακίνητη πτερωτή 7 πτερυγίων (Σχήμα 2-4).



Σχήμα 2-1- Σκαρίφημα Αεροσήραγγας ΕΜΠ [14].

Η μεγάλη διατομή έχει διαστάσεις πλάτους 4.5m και ύψους 3.5m, αναπτύσσει μέγιστη ταχύτητα ροής 9.5m/s. Εφαρμογές που περιλαμβάνουν μικρές προπέλες, μοντέλα ανεμογεννητριών ή ανεμιστήρες εξετάζονται εκεί.

Η μεσαία διατομή όπου και πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα για τη παρούσα εργασία (Σχήμα 2-2, Σχήμα 2-3), έχει διαστάσεις πλάτους 3.5m, ύψους 2.5m, μήκους 12m και αναπτύσσει μέγιστη ταχύτητα ροής 17m/s με μέση ένταση τύρβης 1.95%. Είναι εξοπλισμένη με ηλεκτρικά ελεγχόμενη περιστρεφόμενη βάση (turn table) και μηχανισμό τραβέρσας 3 κυρίων κατευθύνσεων. Είναι κατάλληλη για βιομηχανικές εφαρμογές, όπως

οπτικοποίηση της ροής και εκτίμηση των αεροδυναμικών δυνάμεων που ασκούνται σε κτιριακές κατασκευές και άλλα.

Η μικρή διατομή έχει διαστάσεις πλάτους 1.8 m και ύψους 1.4 m και αναπτύσσει μέγιστη ταχύτητα ροής 60m/s με επίπεδο τύρβης 0.2%. Είναι εξοπλισμένο με 6 στοιχεία ισορροπίας υψηλής ακρίβειας για μετρήσεις αεροδυναμικών φορτίων. Είναι κατάλληλη για δοκιμές αεροτομών 2D, μοντέλα αεροσκαφών και άλλα [14] .

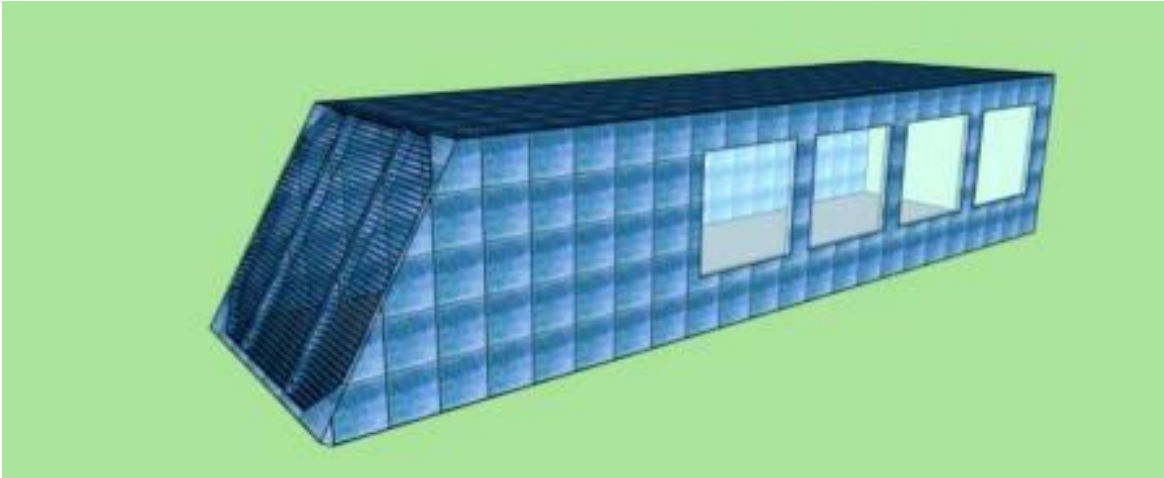
Διατομή δοκιμών	Πλάτος [m]	Μήκος [m]	Μέγιστη ταχύτητα [m/sec]
Μεγάλη	4,5	3,5	9,5
Μεσαία	3,5	2,5	17
Μικρή	1,8	1,4	60

**Πίνακας 1 - Χαρακτηριστικά διατομών αεροσήραγγας.**

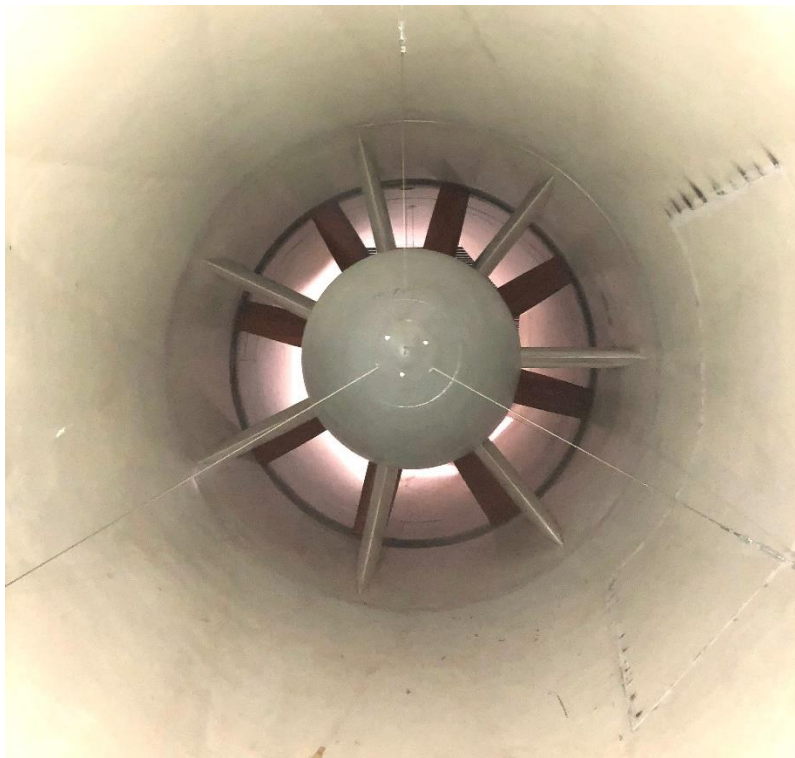


**Σχήμα 2-2- Μεσαία διατομή αεροσήραγγας.**





Σχήμα 2-3- Τρισδιάστατο σχέδιο μεσαίας διατομής αεροσήραγγας [16].



Σχήμα 2-4- Κινούμενη πτερωτή 8 πτερυγίων και στάτορας 7 πτερυγίων.





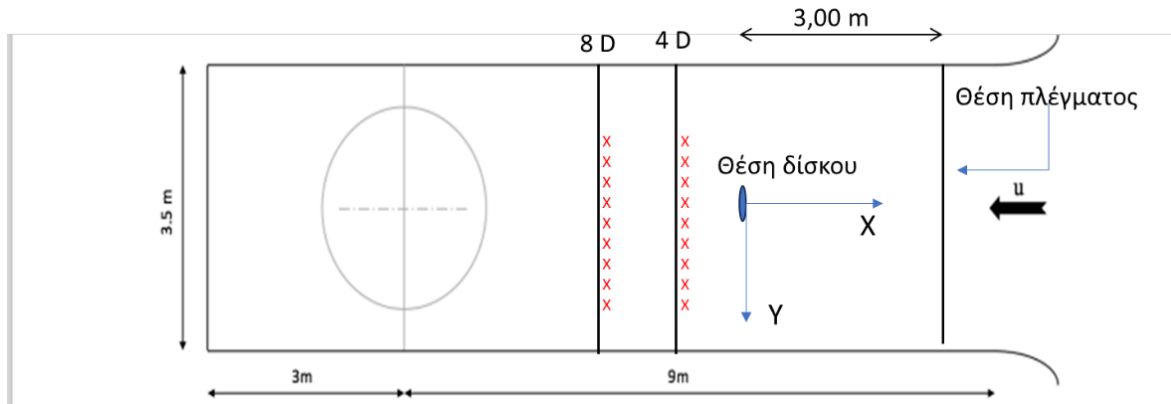
Σχήμα 2-5 – Ηλεκτρικός κινητήρα ισχύος 300 ίππων [Hp].

## 2.2 Πειραματική διάταξη.

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από δύο διάτρητους δίσκους (Σχήμα 2-10) που εναλλάσσονταν, το πλέγμα γένεσης τύρβης (Σχήμα 2-12), δύο σωλήνες Pitot για τη μέτρηση της πίεσης της ροής (Σχήμα 2-14), ένα θερμοστοιχείο για την ένδειξη της θερμοκρασίας στο χώρο δοκιμών, τον αισθητήρα θερμού νήματος και τη βάση στήριξης του (Σχήμα 2-17, Σχήμα 2-18), το σύστημα της τραβέρσας που έχει δυνατότητα κίνησης στους 3 άξονες και την περιστρεφόμενη τράπεζα. Για την καταγραφή των τιμών πίεσης και ταχύτητας χρησιμοποιείται δυναμικό μανόμετρο, αναλογοψηφιακός μετατροπέας, πηγή ρεύματος (2 μπαταρίες 12 V) (Σχήμα 2-11), την συσκευή IFA 300 και έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή (Σχήμα 2-9).

Σε όλες τις συνθήκες εργασίας που θα παρουσιαστούν, η μέθοδος και η διαδικασία της μέτρησης δεν αλλάζει. Αυτό που μεταβάλλεται και διαφοροποιεί τη μια πειραματική διάταξη από την άλλη είναι τα αντικείμενα και η θέση τους εντός της αεροσήραγγας, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 2.

Για την σωστή αναφορά των θέσεων της μέτρησης αλλά και τον μετρητικών στοιχείων εντός της αεροσήραγγας κρίνεται απαραίτητο ο ορισμός ενός συστήματος συντεταγμένων. Ορίζεται καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων με αρχή των αξόνων όπως φαίνεται από το Σχήμα 2-6.

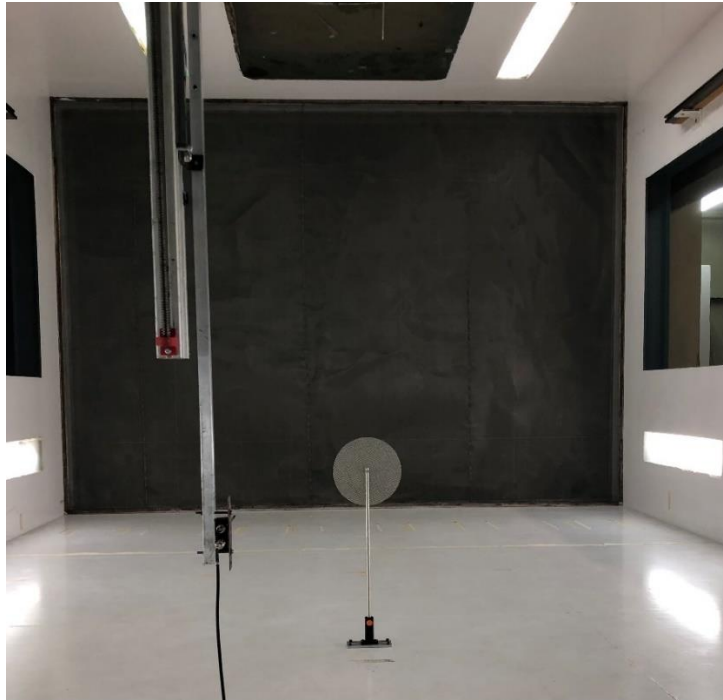


Σχήμα 2-6- Ενδεικτικά σημεία μέτρησης ταχύτητας.

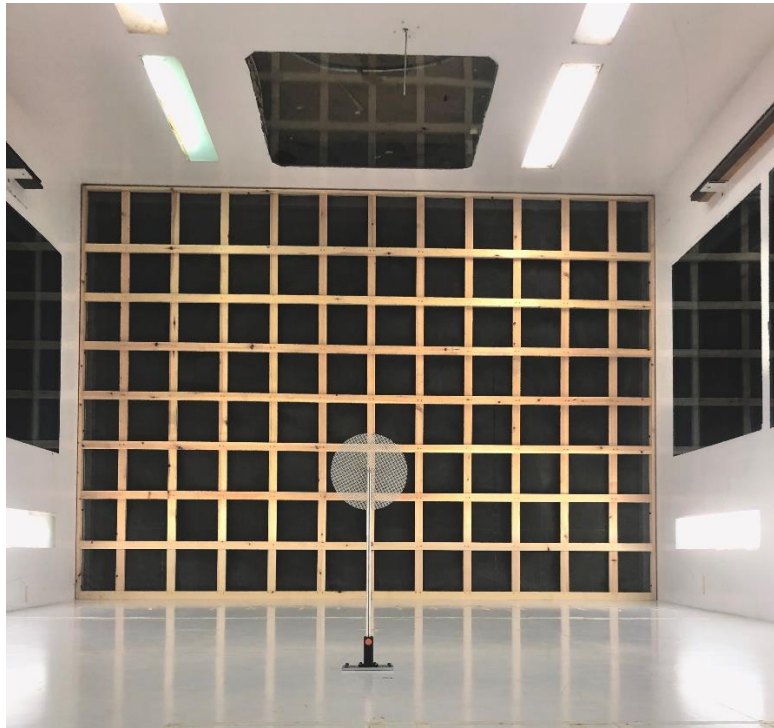
Μέσον ρύθμισης χαρακτηριστικών ροής εισόδου:	Μοντέλο:	Θέση τοποθέτησης μοντέλου:	Θέσεις και ευρος μέτρησης:	Επιπλέον πληροφορίες:
<b>Στρωτή ροή εισόδου.</b>				
-	-	-	$x=0, z=51 \text{ cm}, y=\pm 1.5 D$	Μέτρηση σε άδεια αεροσήραγγα / Βήμα μέτρησης 0.1D
Σίτα	Ομοιόμορφος δίσκος	$x=0, y=0$	$x=-4D, z=51 \text{ cm}, y=\pm 1.5 D$ $x=-8D, z=51 \text{ cm}, y=\pm 1.5 D$	Βήμα μέτρησης 0.1D
Σίτα	Μη ομοιόμορφος δίσκος	$x=0, y=0$	$x=-4D, z=51 \text{ cm}, y=\pm 1.5 D$ $x=-8D, z=51 \text{ cm}, y=\pm 1.5 D$	Βήμα μέτρησης 0.1D
Σίτα	Ομοιόμορφος δίσκος	$x=0, y=0$	$x=-3D, z=51 \text{ cm}, y=\pm 1.2 D$ $x=-5D, z=51 \text{ cm}, y=\pm 1.2 D$	Βήμα μέτρησης 0.2D
Σίτα	Μη ομοιόμορφος δίσκος	$x=0, y=0$	$x=-3D, z=51 \text{ cm}, y=\pm 1.2 D$ $x=-5D, z=51 \text{ cm}, y=\pm 1.2 D$	Βήμα μέτρησης 0.2D
<b>Τυρβώδης ροή εισόδου.</b>				
Σίτα και Παθητικό πλέγμα	Ομοιόμορφος δίσκος	$x=0, y=0$	$x=-4D, z=51 \text{ cm}, y=\pm 1.5 D$ $x=-8D, z=51 \text{ cm}, y=\pm 1.5 D$	Βήμα μέτρησης 0.1D
Σίτα και Παθητικό πλέγμα	Μη ομοιόμορφος δίσκος	$x=0, y=0$	$x=-4D, z=51 \text{ cm}, y=\pm 1.5 D$ $x=-8D, z=51 \text{ cm}, y=\pm 1.5 D$	Βήμα μέτρησης 0.1D
Σίτα και Παθητικό πλέγμα	Ομοιόμορφος δίσκος	$x=-6m, y=0$	$x=-6.6m, z=51 \text{ cm}, y=\pm 1.5 D$ $x=-7.2m, z=51 \text{ cm}, y=\pm 1.5 D$	Γωνία μοντέλου ως προς τη κατεύθυνση της ροής $0^\circ, 30^\circ$ / Βήμα μέτρησης 0.1D
Σίτα και Παθητικό πλέγμα	Μη ομοιόμορφος δίσκος	$x=-6m, y=0$	$x=-6.6m, z=51 \text{ cm}, y=\pm 1.5 D$ $x=-7.2m, z=51 \text{ cm}, y=\pm 1.5 D$	Γωνία μοντέλου ως προς τη κατεύθυνση της ροής $0^\circ, 30^\circ$ / Βήμα μέτρησης 0.1D

Πίνακας 2 - Περιγραφή διαφορετικών διατάξεων για τη μέτρηση των χαρακτηριστικών της ροής.

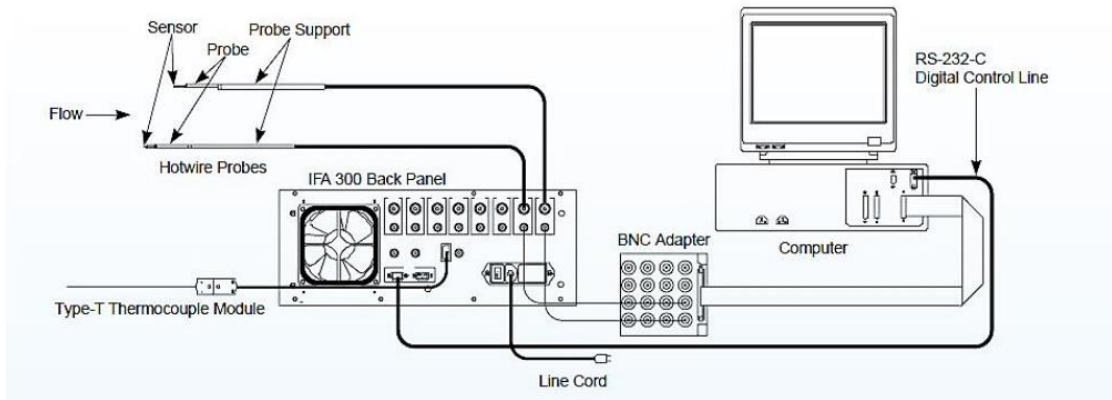
Στο Σχήμα 2-7 Σχήμα 2-8 φαίνονται οι πειραματικές διατάξεις που προσομοιώνουν τη στρωτή και τυρβώδη ροή αντίστοιχα με χρήση ομοιόμορφου δίσκου.



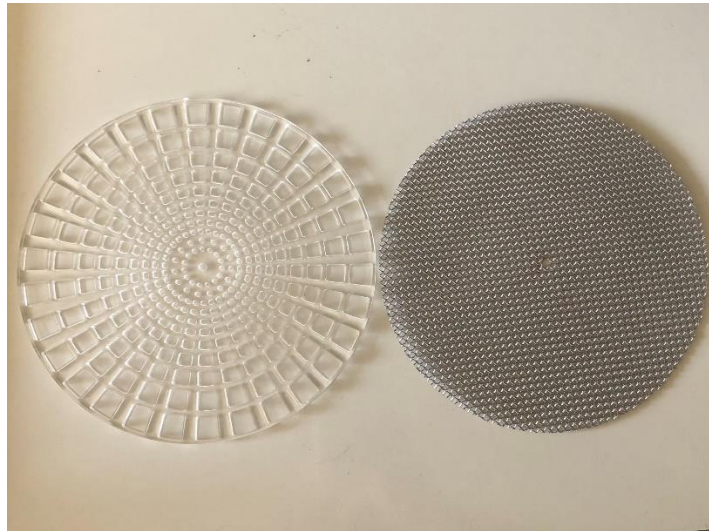
**Σχήμα 2-7- Διατάξη με ομοιόμορφο μοντέλο χωρίς πλέγμα γένεσης τύρβης.**



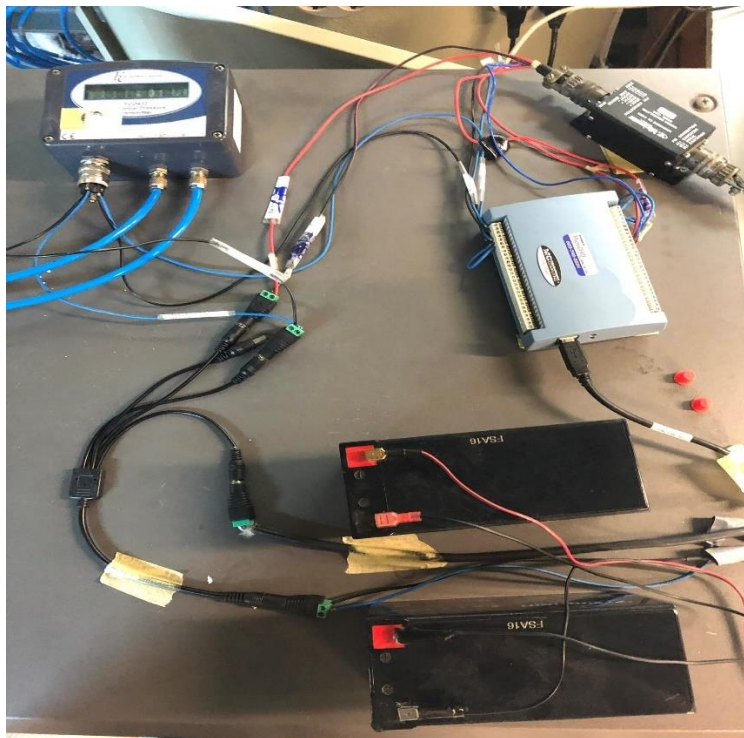
Σχήμα 2-8-Διάταξη με ομοιόμορφο μοντέλο με πλέγμα γένεσης τύρβης.



Σχήμα 2-9 Διάταξη συσκευής θερμού νήματος IFA300 [17].



Σχήμα 2-10 – Μορφή διάτρητων δίσκων διαμέτρου 0.2 m.



Σχήμα 2-11 – Διαφορικό μανόμετρο (πάνω αριστερά) , αναλογοψηφιακός μετατροπέας (πάνω δεξιά), μπαταρίες (κάτω δεξιά).



## 2.3 Κατασκευή πλέγματος

Σημαντικό για τις εργαστηριακές εφαρμογές εντός της αεροσήραγγας είναι η δυνατότητα δημιουργίας τύρβης στη ροή όπου τα στατιστικά χαρακτηριστικά της είναι γνωστά και ελεγχόμενα. Βασική μέθοδος που επιτυγχάνεται αυτό είναι με χρήση παθητικού πλέγματος στην είσοδο της αεροσήραγγας. Η χρήση αυτού του πλέγματος προκαλεί τη δημιουργία τύρβης και ως επακόλουθο τη μείωση του πεδίου πίεσης, επιτυγχάνοντας χαρακτηριστικά ροής διαφορετικά από αυτά της ομοιόμορφης ροής εισόδου. Όσο η ροή εξελίσσεται υφίσταται μια αλληλουχία από μεταβάσεις, αρχικά στρόβιλοι διαχέονται κατάντη των δοκών του πλέγματος όπου γρήγορα αναπτύσσονται ώστε να δημιουργήσουν ένα πλήρως ανεπτυγμένο τυρβώδες πεδίο ροής. Το τυρβώδες πεδίο στη συνέχεια επηρεάζεται από τη μείωση της τύρβης, οδηγώντας τελικά στην επικράτηση βραδέων περιστρεφόμενων στροβίλων που κυριαρχούν στη διαμόρφωση των χαρακτηριστικών της τυρβώδους ροής [9]. Η συμπεριφορά αυτή είναι όμοια για διαφορετικούς τύπους πλεγμάτων όπως [18]:

- Πλέγμα από συστοιχία τετραγωνικών διατομών με τετράπλευρες δοκούς.
- Πλέγμα από συστοιχία τετραγωνικών διατομών με κυκλικές δοκούς.
- Πλέγμα με παράλληλα διατεταγμένες τετράπλευρες δοκούς
- Πλέγμα με παράλληλα διατεταγμένες κυκλικές δοκούς
- Διάτρητες επιφάνειες.

Στην βιβλιογραφία εντοπίζεται ένα μεγάλο εύρος από υλικά, μεγέθη και σχήματα για τις δοκούς που διαμορφώνουν το πλέγμα. Υποστηρίζεται ότι οι κυκλικές ράβδοι εμφανίζουν μια εξάρτηση από τον αριθμό Reynolds, σε αντίθεση με τις τετραγωνικές ράβδους. Αυτό συμβαίνει λόγω του μήκους αποκόλλησης και της μορφής του ομόρρου για κυλίνδρους για δεδομένη ροή και υλικό [19]. Ενώ στις τετράγωνες ράβδους που η αποκόλληση συμβαίνει στις γωνίες η μεταβλητότητα του ομόρρου είναι περιορισμένη [20].

Οι κύριες παράμετροι σχεδιασμού ενός πλέγματος είναι η απόσταση μεταξύ των μέσων δύο διαδοχικών ράβδων  $M$ , η κατάντη απόσταση από το πλέγμα όπου πραγματοποιούνται οι μετρήσεις  $x$  και το πλάτος της δοκού  $b$ . Μια ένδειξη για την επιλογή του  $M$  είναι βάσει του εμπειρικού τύπου:

$$M = \frac{L}{8} \quad (1)$$

όπου,  $L$  είναι η διάσταση μήκους της διατομής αεροσήραγγας [21]. Ο λόγος  $b/M$  μπορεί να επιλεγεί βάσει του ορισμού της οπισθέλκουσας του πλέγματος:

$$c_D = \frac{\frac{b}{M} * (2 - \frac{b}{M})}{(1 - \frac{b}{M})^4} \quad (2)$$

Συνιστάται το  $c_D$  να βρίσκεται μεταξύ των τιμών 3 και 4 [22]. Η οπισθέλκουσα του πλέγματος είναι συνδεδεμένη με το πορώδες του υλικού  $\beta$  μέσω της σχέσης:

$$\beta = \left(1 - \frac{b}{M}\right)^2 \quad (3)$$

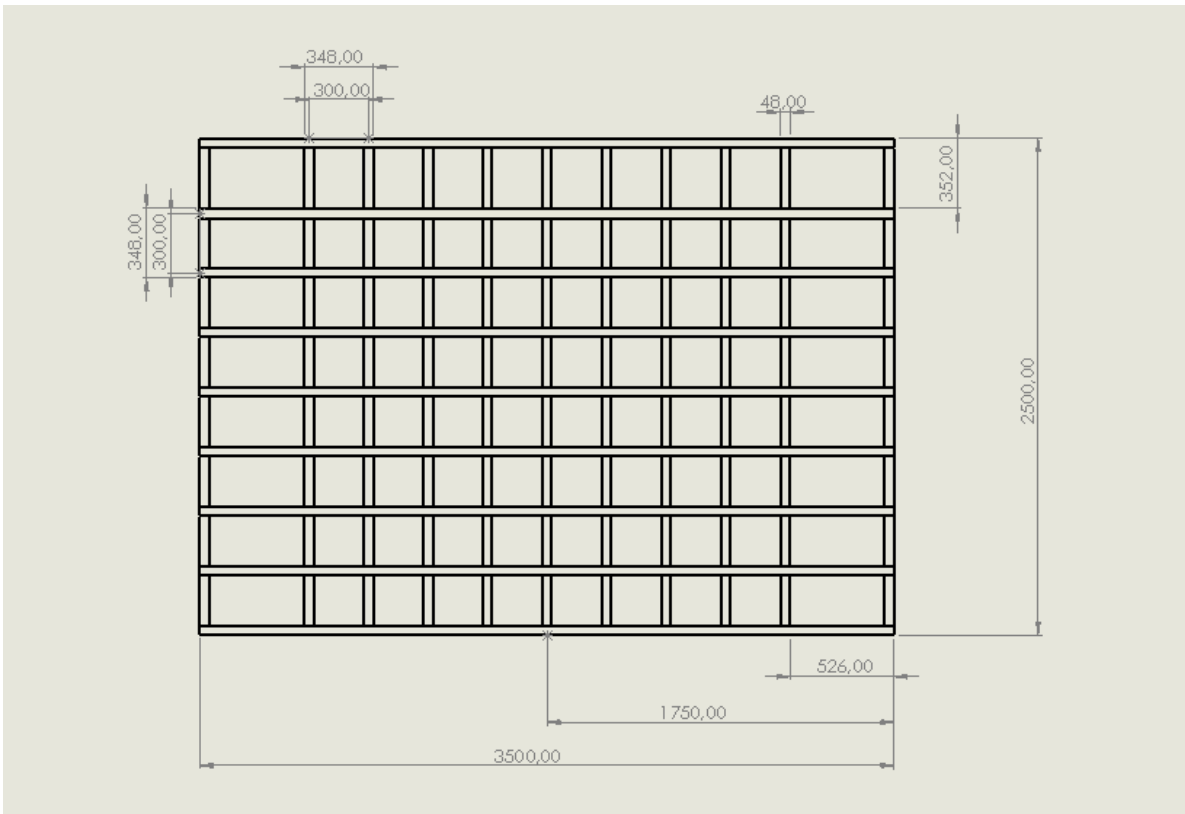
Επιθυμητή είναι μια τιμή τουλάχιστον 0.5 για το  $\beta$  [20]. Βάσει των σχέσεων (2) και (3) τα ανάλογα μεγέθη που προκύπτουν για το πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε είναι :

$$M = 0,438 \text{ m}$$

$$c_D = 0,5913$$

$$\beta = 0,8464$$

Για την παρούσα διπλωματική εργασία δε χρησιμοποιήθηκαν οι εμπειρικές σχέσεις (1),(2),(3) για τη διαστασιολόγηση καθώς ήταν προκαθορισμένη η γεωμετρία του πλέγματος. Χρησιμοποιήθηκαν ξύλινες ράβδοι διατομής 24 mm x 48 mm και μήκους 2,5 m και 3,5 m αντίστοιχά του μήκους και του ύψους της μεσαίας διατομής της αεροσήραγγας, η σύνδεση τους έγινε με απλές βίδες. Στο μέσο του χώρου τοποθετήθηκε κατακόρυφα μια δοκός ώστε ο πύργος του μοντέλου να βρίσκεται κατάντη, η απόσταση μεταξύ των δοκών ήταν  $M=0,3$  m οριζόντια και κατακόρυφα μέχρις ότου καλυφθεί όλη η διατομή (Σχήμα 2-12). Η προσθήκη του πλέγματος φαίνεται να αυξάνει την ένταση τύρβης στην άδεια αεροσήραγγα κατά 5.88 % περισσότερο.



Σχήμα 2-12 – Σχέδιο πλέγματος γένεσης τύρβης.

## 2.4 Μέτρηση πίεσης.

Στο Σχήμα 2-14 φαίνεται ο σωλήνας Pitot που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις των πειραμάτων στην παρούσα εργασία. Ένας σωλήνας Pitot αποτελείται από δύο ομοαξονικούς κυλίνδρους, ο ένας είναι κλειστός από τη μια πλευρά και έχει μια μικρή ανοιχτή διατομή από την άλλη που κοιτάει προς τη ροή, ο άλλος κύλινδρος είναι κλειστός με πολύ μικρές οπές σε κατάλληλες γωνίες ως προς τη διεύθυνση της ροής. Στην πρώτη περιοχή μετρείται η δυναμική πίεση και στη δεύτερη η στατική (Σχήμα 2-13). Οι δύο θάλαμοι δεν έρχονται σε επαφή, η διαφορά της πίεσης μεταξύ τους ισούται με την δυναμική πίεση.

Με τη χρήση ενός σωλήνα Pitot είναι δυνατό να μετρηθεί και η ταχύτητα του ρευστού μέσω της σχέσης:

$$V = k * \sqrt{\frac{2 * \Delta p}{\rho}} \quad (4)$$

Όπου :

$\Delta p$  : Η δυναμική πίεση του ρευστού [Pa]

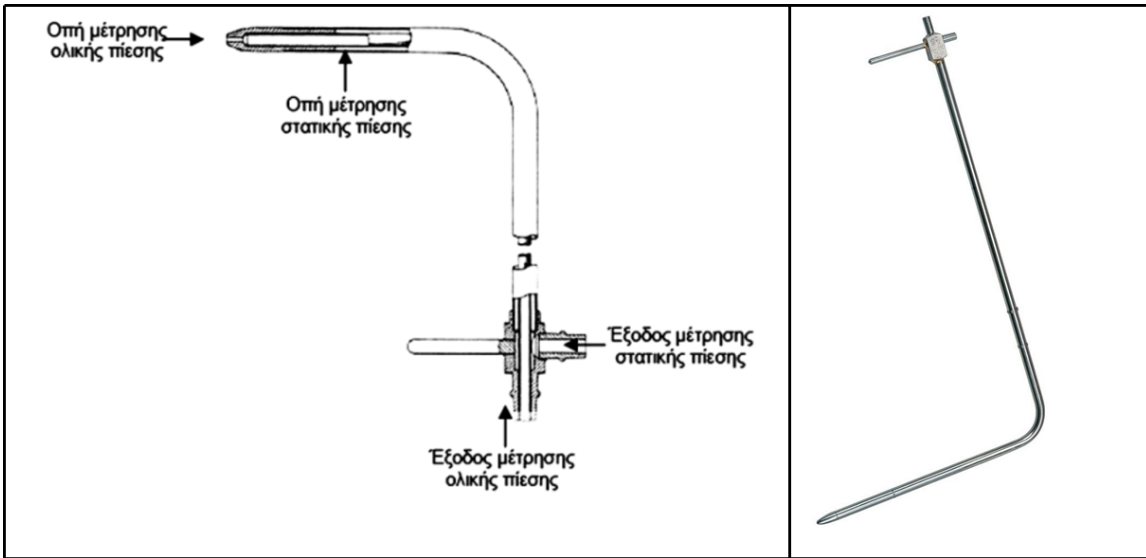


$K$  : σταθερά που ορίζεται μέσω της βαθμονόμησης του οργάνου

$V$  : Ταχύτητα του ρευστού [m/sec]

$\rho$ : πυκνότητα του ρευστού. [kg/m<sup>3</sup>]

Για αποτελέσματα με καλύτερη στατιστική ακρίβεια θα πρέπει η διεύθυνση του σωλήνα να είναι όσο το δυνατό παράλληλα με τη ροή και να μην παρεμβάλλονται κοντά στον σωλήνα μη αεροδυναμικά σώματα. Η απόσταση όπου ένα σώμα μπορεί να επηρεάσει τις μετρήσεις εξαρτάται από το χαρακτηριστικό μήκος του σωλήνα.



Σχήμα 2-13 - Σωλήνες Pitot.



Σχήμα 2-14 – Σωλήνες Pitot εντός της εγκατάστασης.

Για την μέτρηση της πίεσης της ροής εντός της αεροσήραγγας χρησιμοποιήθηκαν 2 σωλήνες Pitot (Σχήμα 2-14), ένας κατά τη βαθμονόμηση που ήταν τοποθετημένος δίπλα στον αισθητήρα του θερμού νήματος και ένας στο πάνω μέρος της αεροσήραγγας κατά τη μέτρηση που μετρούσε την αδιατάραχτη ροή (free flow).

## 2.5 Μέτρηση ταχύτητας.

### 2.5.1 Μέθοδος μέτρησης με χρήση θερμού νήματος.

Η αρχή λειτουργίας της μέτρησης ταχύτητας ρευστού, με χρήση θερμού νήματος με τη μέθοδο σταθερής θερμοκρασίας βασίζεται στη ψύξη λόγω συναγωγής κατά τη ροή του ρευστού σε ένα θερμό σώμα. Με αυτή τη μέθοδο υπολογίζεται η τιμή της ταχύτητας σε κάποια θέση, και προκύπτουν χρονοσειρές ταχύτητας, στο Σχήμα 2-15 φαίνεται σχηματικά αυτή η διαδικασία. Η μεταφορά θερμότητας μέσω συναγωγής  $Q$  από ένα καλώδιο είναι συνάρτηση της ταχύτητας της ροής  $U$  και εκφράζεται από τη σχέση (5)

$$Q = (T_w - T_a) * A_w * h = A + B * U^n \quad , n \approx 0.5 \quad (5)$$

Όπου

$T_w$ : Θερμοκρασία νήματος [K].

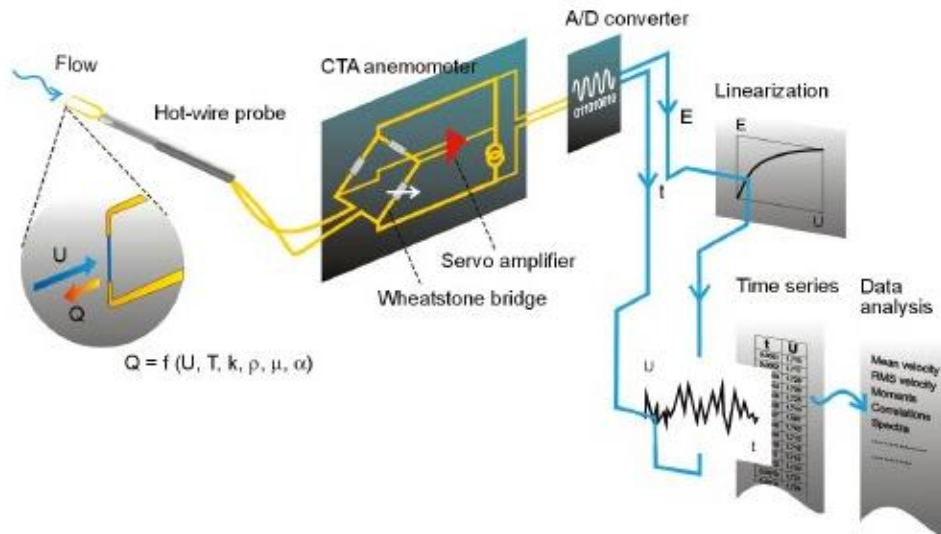
$T_a$ : Θερμοκρασία περιβάλλοντος [K].

$A_w$ : Διατομή νήματος [ $m^2$ ].

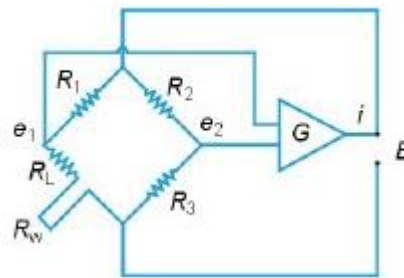
$h$ : Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας [ $W/m^2 * K$ ].

Τα  $A$  και  $B$  είναι σταθερές που προκύπτουν από την βαθμονόμηση.

Το νήμα πρακτικά είναι μια αντίσταση  $R_w$  όπου που είναι συνδεδεμένη με μια γέφυρα Wheatstone και θερμαίνεται από μια πηγή ρεύματος. Ένας σερβοενισχυτής διατηρεί τη γέφυρα σε ισορροπία ελέγχοντας το ρεύμα στον αισθητήρα ώστε η αντίσταση  $R_w$  (συνεπώς και η θερμοκρασία) να παραμένει σταθερή, ανεξάρτητα από την ψύξη λόγω της ροής του ρευστού. Η σύνδεση τους φαίνεται στο Σχήμα 2-16. Η τάση της γέφυρας  $E$  αντιπροσωπεύει τη μεταφορά θερμότητας άρα και της ταχύτητας η σχέση που συνδέει αυτά τα μεγέθη είναι η καμπύλη βαθμονόμησης. Η απόκριση στις διακυμάνσεις της ροής είναι πολύ γρήγορη [23].



Σχήμα 2-15 – Διάταξη Θερμού νήματος [23].



Σχήμα 2-16 - Κύκλωμα μονάδας ελέγχου θερμού νήματος σταθερής θερμοκρασίας [23].

### 2.5.2 Διόρθωση Θερμοκρασίας.

Μια παράμετρος που επηρεάζει αυτή τη μέθοδο είναι η θερμοκρασία του περιβάλλοντος που διεκπεραιώνονται τα πειράματα, μέσα στη μέρα μπορεί να μεταβληθεί αρκετά, για αυτό προτείνεται να γίνεται διόρθωση θερμοκρασίας στην τιμή της τάσης E. Η πιο συνηθής μορφή διόρθωσης δίνεται από τη σχέση (6) [24].

$$E_{,r} = E * \sqrt{\frac{T_w - T_r}{T_w - T_a}} \quad (6)$$

Όπου:

$E_r$  : Διορθωμένη τιμή τάσης [V].

E : Τιμή τάσης γέφυρας [V].

$T_w$  : Θερμοκρασία νήματος [K].

$T_r$  : Θερμοκρασία στην οποία πραγματοποιήθηκε η βαθμονόμηση [K].

$T_\alpha$  : θερμοκρασία περιβάλλοντος [K].

Η διόρθωση που προτείνεται [25], υποθέτει γραμμική σχέση μεταξύ της αντίστασης R και της θερμοκρασίας T.

$$R = R_r(1 + \alpha(T - T_r)) \quad (7)$$

$\alpha$  : σταθερά θερμοκρασίας της αντίστασης [1/K]

Η διορθωμένη τάση δίνεται από τη σχέση (10):

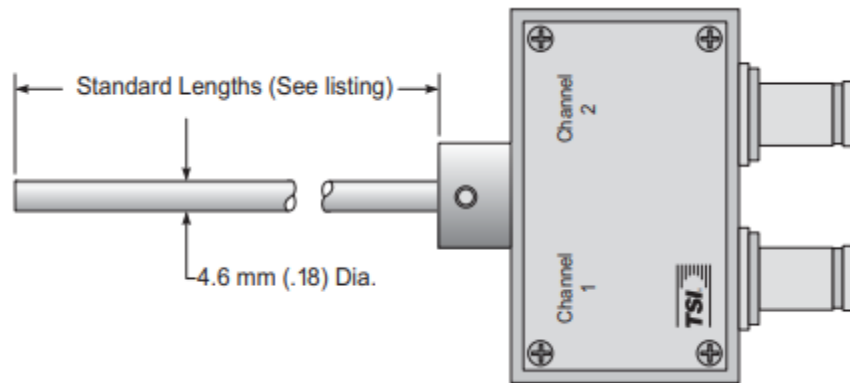
$$\frac{E^2}{R} = \frac{k * Nu}{d} * A * \Delta T \quad (8)$$

$$\Delta T = T_w - T_\alpha \quad (9)$$

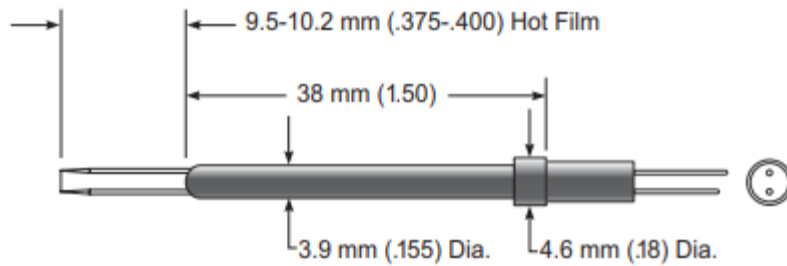
$$Nu = h * \frac{d}{k} \quad (10)$$

$$k = 418.4 * (5.75 * 10^{-5} * (1 + 0.00317T - 0.0000021T^2)) \quad (11)$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω εφαρμόζεται διόρθωση θερμοκρασίας στη τιμή της τάσης της γέφυρας και με τις νέες τιμές γίνεται η παρεμβολή ώστε να προκύψει η καμπύλη βαθμονόμησης.



Σχήμα 2-17 – Σχέδιο βάσης στήριξης αισθητήρα θερμού νήματος από κατάλογο [26].



Σχήμα 2-18 – Σχέδιο αισθητήρα θερμού νήματος από κατάλογο κατασκευαστή [26].

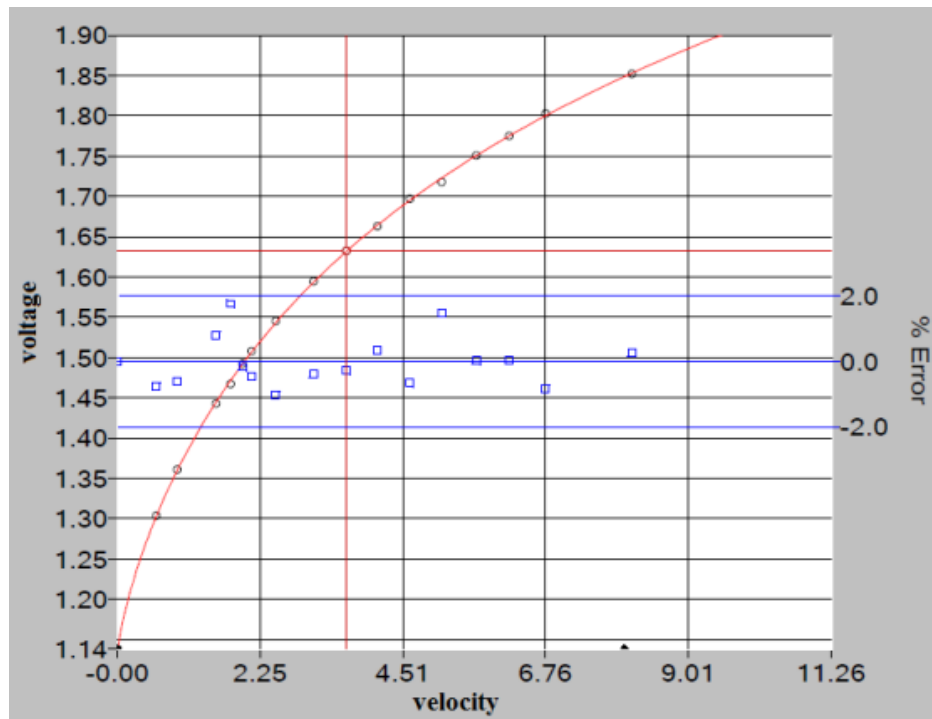
## 2.6 Πρωτόκολλο διαδικασίας μέτρησης και βαθμονόμησης.

Η βαθμονόμηση του θερμού νήματος είναι η διαδικασία κατά την οποία αντιστοιχείται χειροκίνητα η τιμή της ταχύτητας ροής στην τάση εξόδου της γέφυρας του IFA 300 μια συγκεκριμένη στιγμή. Η συχνότητα που πρέπει να γίνεται αυτή η διαδικασία συνήθως εξαρτάται από της αλλαγές στην πειραματική εγκατάσταση (λ.χ. προσθήκη ή αφαίρεση αντικειμένων) ή από την αλλαγή των συνθηκών του περιβάλλοντος όπως θερμοκρασία ή υγρασία ή ακόμα και από τις επικαθίσεις σκόνης πάνω στον αισθητήρα. Κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων για την παρούσα εργασία η διαδικασία αυτή γινόταν κάθε μέρα όταν ήταν να ληφθούν μετρήσεις.

Το εύρος ταχύτητας που πραγματοποιήθηκε η βαθμονόμηση ήταν 2-10 m/sec, προκυμμένου να υπολογίζεται η τιμή της ταχύτητας για να προστεθεί αυτή χειροκίνητα στο λογισμικό του Thermal-Pro χρησιμοποιήθηκε ο σωλήνας Pitot ο οποίος βρίσκεται πολύ κοντά με τη βάση του θερμού νήματος όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2-20. Τα δύο μετρητικά όργανα ήταν τοποθετημένα στο ίδιο ύψος με αυτό του πύργου του μοντέλου. Αναλυτικότερα λαμβανόταν μια μέση τιμή δυναμικής πίεσης από τον σωλήνα και από εκεί υπολογίζεται μέσω της σχέσης (4) η μέση ταχύτητα του ρευστού. Στο τέλος γινόταν παρεμβολή στα ζεύγη σημείων τάσης – ταχύτητας με πολυώνυμο 4<sup>ου</sup> βαθμού και προκύπτει η καμπύλη βαθμονόμησης (Σχήμα 2-19). Αυτό που επιχειρήθηκε αρχικά ήταν η αντιστοίχιση των στροφών του κινητήρα με τη μέση τιμή της ταχύτητας της ροής, ώστε να προκύψει μια σχέση στροφών-ταχύτητας. Αυτό που παρατηρήθηκε όμως ήταν ότι από μέρα σε μέρα αυτή η αντιστοιχία διέφερε και ότι η σχέση δεν ήταν γραμμική, οπότε αποφασίστηκε η μέση τιμή της ταχύτητας για την βαθμονόμηση να λαμβάνεται κάθε φορά από την ένδειξη του Pitot.

Η σχέση (12) δίνει την ταχύτητα  $U$  για δεδομένη τάση γέφυρας  $E$  με τους συντελεστές  $\alpha_i$  ( $i=1,2,3,4$ ) να μεταβάλλονται κάθε φορά που γίνεται εκ νέου βαθμονόμηση.

$$U = \alpha_0 + \alpha_1 * E + \alpha_2 * E^2 + \alpha_3 * E^3 + \alpha_4 * E^4 \quad (12)$$



Σχήμα 2-19 – Καμπύλη βαθμονόμησης.



Σχήμα 2-20 – Θέση μετρητικών κατά την βαθμονόμηση.

Οι προδιαγραφές της βαθμονόμησης :

- Εύρος ταχύτητας  $2 - 10 \frac{m}{sec}$ .
- Συχνότητα δειγματοληψίας 20 kHz.
- Φίλτρο χαμηλής περατότητας 10 kHz.
- Διάρκεια μέτρησης 20 δευτερόλεπτα.
- Χρήση 4<sup>ης</sup> τάξης πολυωνύμου παρεμβολής για τη βαθμονόμηση.
- Χρήση διόρθωσης θερμοκρασίας [25].
- Τιμές ταχύτητας βαθμονόμησης  $V_{calibration} = (2, 2.2, 2.5, 2.9, 3.5, 4.1, 4.8, 5.6, 6.5, 7.5, 8.6, 10)$  [m/sec].

Οι μετρήσεις έγιναν με χρήση δύο διάτρητων δίσκων διαμέτρου 0,2 m που τοποθετήθηκαν σε έναν πύργο ύψους 0,5 m. Συγκεκριμένα το πρωτόκολλο της μέτρησης:

- Απόσταση μέτρησης -4 D , -8 D, -6m κατά τον άξονα x
- Εύρος μέτρησης  $\pm 1,5 D$  με βήμα 0,1 D κατά τον άξονα y
- Συχνότητα δειγματοληψίας 20 kHz.
- Φίλτρο χαμηλής περατότητας 10 kHz.
- Διάρκεια μέτρησης 120 δευτερόλεπτα.
- Αριθμός Reynolds = 80.000 (ή U= 6 m/sec)

$$Re = \frac{u * L}{\nu} \quad (13)$$

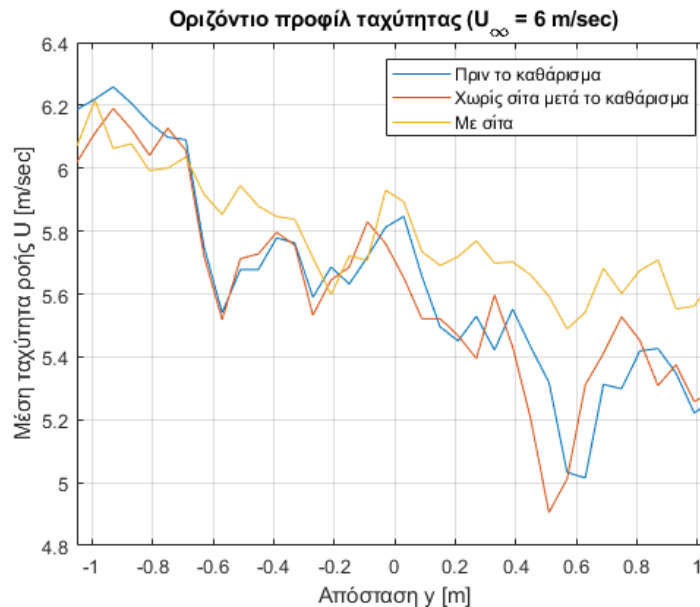
Όπου:

- u(m/s), είναι η μέση ταχύτητα του ρευστού.
- L (m), είναι το χαρακτηριστικό μήκος του αντικειμένου.
- ν (m<sup>2</sup>/s), είναι το κινηματικό ιξώδες του ρευστού .

## 2.7 Έλεγχος και διόρθωση ροής εισόδου.

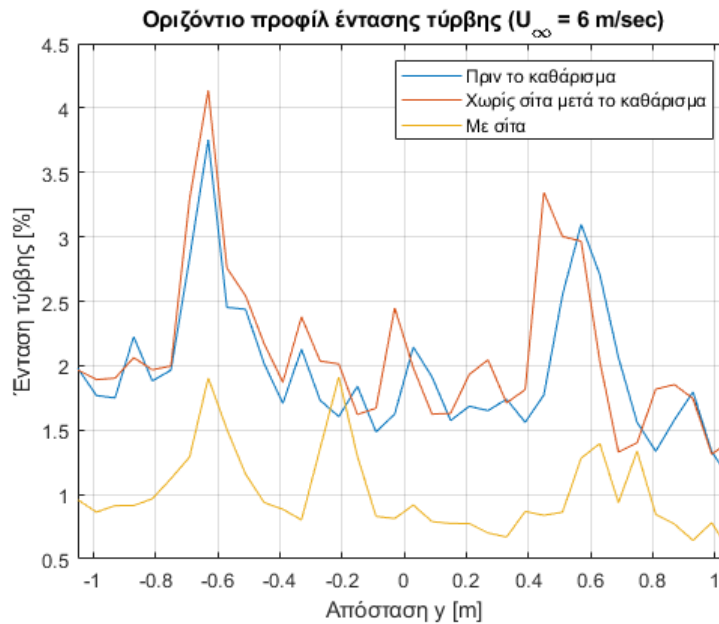
Πριν ληφθούν οι πρώτες μετρήσεις με τη χρήση των μοντέλων μετρήθηκε η οριζόντια κατανομή της ταχύτητας με άδεια αεροσήραγγα. Ο λόγος που γίνεται αυτό είναι πρώτων για να υπάρχει μια βάση σύγκρισης ώστε να εντοπιστούν οι διαφορές της ροής λόγω των αντικειμένων που τοποθετούνται εντός, δεύτερον για να επιβεβαιωθεί η ακεραιότητα της διαδικασίας μέτρησης με βάση τα θεωρητικά αποτελέσματα.

Όπως φαίνεται από το Διάγραμμα 1, υπάρχει ασυμμετρία στη τιμή της μέσης ταχύτητας από τη μία πλευρά της αεροσήραγγας στην άλλη, για την διόρθωση αυτού παρατηρήθηκε ότι το πλέγμα που βρίσκεται ανάμεσα στην πτερωτή και την μεσαία διατομή είχε αρκετές επικαθήσεις από μικρά λύματα, οπότε έγινε προσπάθεια καθαρισμού του. Τα αποτελέσματα δεν άλλαξαν σημαντικά όπως φαίνεται και από το Διάγραμμα 1. Αυτό που έγινε στη συνέχεια για την αποκατάσταση της συμμετρίας, ήταν η προσθήκη επιπλέον σίτας στην είσοδο της ροής. Αυτό που συνέβη ήταν η πτώση πίεσης και συνεπώς η αλλαγή του σημείου λειτουργίας του κινητήρα από τις 575 στις 620 στροφές προκυμμένου να επιτευχθεί ταχύτητα αδιατάρακτης ροής  $U_{\infty}=6\text{m/sec}$ , και χαμηλότερα επίπεδα τύρβης. Σε όλες τις περιπτώσεις η κατανομή της ταχύτητας ακολουθεί παρόμοια συμπεριφορά χαρακτηριστικό που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η κλίση της ταχύτητας είναι χαρακτηριστικό της αεροσήραγγας.



**Διάγραμμα 1 - Συγκριτικές κατανομές ταχύτητας στη θέση του μοντέλου σε άδεια αεροσήραγγα.**





**Διάγραμμα 2 - Συγκριτικές κατανομές έντασης τύρβης στη θέση του μοντέλου σε άδεια αεροσήραγα.**

Η κατανομή της κινητικής ενέργειας στο πεδίο της συχνότητας δίνεται από το φάσμα ενεργειακής πυκνότητας  $S_u$  (σχέση 14), το οποίο μπορεί να συχτηθεί και με το φάσμα Von Karman (σχέση 15)

$$S_u(y, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \overline{u'(y, t)u'(y, t + \tau)} e^{-i2\pi f\tau} d\tau \quad (14)$$

$$\frac{S_{u(f)} * f}{\sigma_u^2} = \frac{4f_n}{(1 + 70.78f_n^2)^{\frac{5}{6}}} \quad (15)$$

$$f_n = f \frac{L_u(y)}{u(y)} \quad (16)$$

$$L_u(y) = \frac{u(y)}{\sigma_u^2(y)} \int_{-\infty}^{+\infty} \overline{u'(y, t)u'(y, t + \tau)} d\tau \quad (17)$$

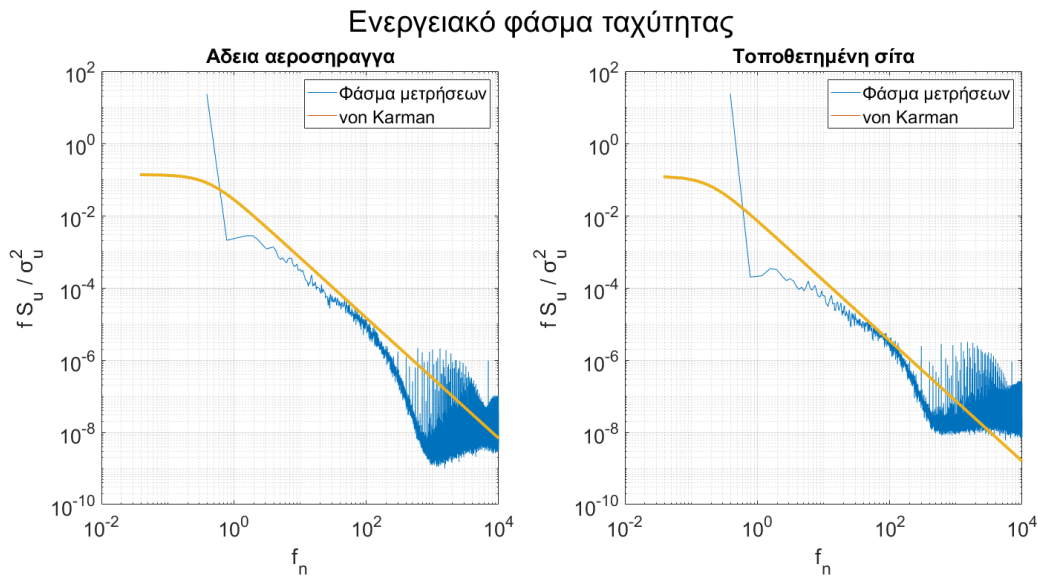
$L_u$ : Ολοκληρωματικό μήκος [mm].

$\sigma_u^2$ : Τυπική απόκλιση

$f$ : Συχνότητα δειγματοληψίας 20 kHz.

$f_n$ : Αδιαστατοποιημένη συχνότητα  $f$ .

Στο Διάγραμμα 3 φαίνεται το φάσμα της χρονοσειράς ταχύτητας σε άδεια αεροσήραγγα στο σημείο τοποθέτησης του μοντέλου σε ύψος 50 cm (ύψος πύργου) με και χωρίς την τοποθέτηση της σίτας. Τα φάσματα υπολογίστηκαν με την μέθοδο του Welch [27], χωρίστηκε το σήμα με τρόπο τέτοιο ώστε κάθε μέρος να περιέχει  $2^{19}$  μετρήσεις η επικάλυψη που χρησιμοποιήθηκε ήταν 50%. Η χρονοσειρά της άδειας αεροσήραγγας πριν το καθάρισμα παραλήφθηκε διότι τα αποτελέσματα της ήταν παρόμοια με αυτά μετά του καθαρίσματος. Παρατηρείται ότι το ενεργειακό φάσμα ταχύτητας στη περίπτωση της τοποθετημένης σίτας είναι χαμηλότερο από αυτό χωρίς. Τα δεδομένα φαίνεται να ταιριάζουν με το φάσμα Von Karman .



**Διάγραμμα 3 - Φάσμα ενέργειας της ταχύτητας στο ύψος του πύργου του μοντέλου.**

### 3. Αποτελέσματα.

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τα πειράματα που διενεργήθηκαν στην αεροσήραγγα του Ε.Μ.Π. Χρησιμοποιούνται διαγράμματα που απεικονίζουν την κατανομή της αδιάστατης μέσης ταχύτητας ροής  $\left(\frac{U}{U_{\infty}}\right)$  και έντασης τύρβης  $\left(TI = \frac{\sigma_u}{U}\right)$ , για τις διαφορετικές περιπτώσεις μελέτης όπως στρωτή ή τυρβώδη ροή εισόδου και στροφή ως προς τον κατακόρυφο άξονα. Η στρωτή ροή εισόδου πρόκειται για την περίπτωση όπου είναι τοποθετημένη στην είσοδο της ροής μόνο η σίτα, ενώ στη τυρβώδη ροή προστίθεται επιπλέον και το παθητικό πλέγμα γένεσης τύρβης.

- $U$  : Μέση τιμή ταχύτητας ρευστού σε ένα σημείο [m/s].
- $U_{\infty}$  : Ταχύτητα αδιατάρακτης ροής [m/s].
- $\sigma_u$  : Τυπική απόκλιση μέσης τιμής ταχύτητας ρευστού [m/s].

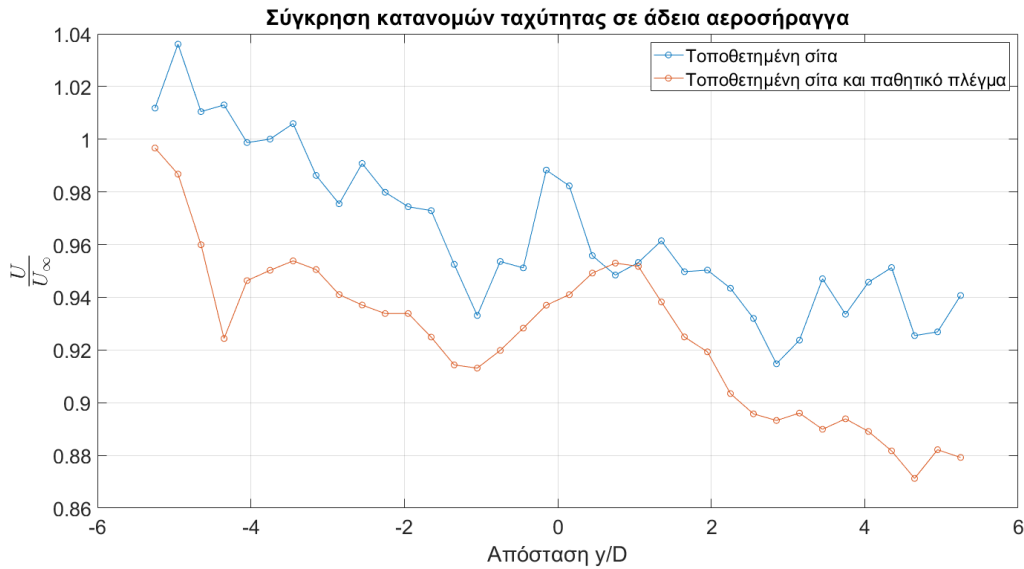
#### 3.1 Συνθήκες εισόδου με και χωρίς παθητικό πλέγμα.

Στο Διάγραμμα 4 φαίνεται η οριζόντια κατανομή της ταχύτητας σε άδεια αεροσήραγγα σε ένα εύρος  $\pm 5D$  (κατά τη κατεύθυνση  $y$ ) στη θέση του μοντέλου ( $x=0$ ) και ύψος ίδιο με αυτό του πύργου του μοντέλου ( $z=51$  cm) στις δύο διαφορετικές συνθήκες ροής εισόδου. Παρατηρείται μια ασυμμετρία από την μια πλευρά στην άλλη 13,22% για τη στρωτή ροή και 14,46% όπως υπολογίζεται από τη σχέση 18 για το εύρος μέτρησης  $\pm 5,5D$ , όμως στη περιοχή όπου θα πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις  $\pm 15D$  αυτή η ασυμμετρία περιορίζεται στα 5,89% για τη στρωτή ροή και 4,38%. Για τους σκοπούς της παρούσας διπλωματικής εργασίας αυτές οι τιμές θεωρούνται αποδεκτές.

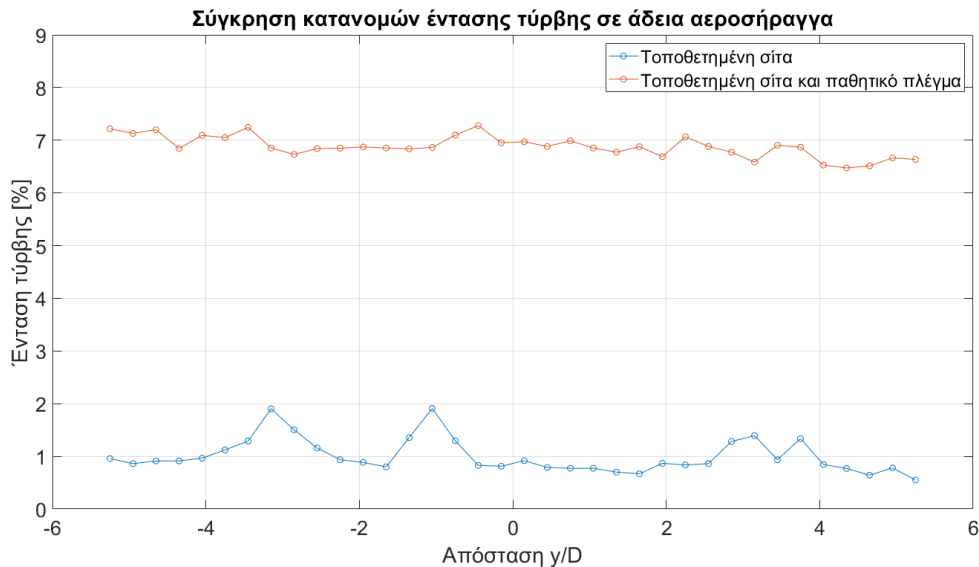
Στο Διάγραμμα 5 η ασυμμετρία στην ένταση τύρβης είναι εμφανώς μικρότερη. Επιβεβαιώνεται η χρησιμότητα του παθητικού πλέγματος καθώς φαίνεται ξεκάθαρα η αύξηση της έντασης τύρβης της ροής. Συγκεκριμένα χωρίς το πλέγμα επιτυγχάνεται 1% ένταση τύρβης ενώ με τη προσθήκη του πλέγματος 7,2% σύμφωνα με τη σχέση 19.

$$U_{assymetry} = \frac{U_{max} - U_{min}}{U_{min}} * 100 \quad (18)$$

$$TI_{assymetry} = \frac{TI_{max} - TI_{min}}{TI_{min}} * 100 \quad (19)$$

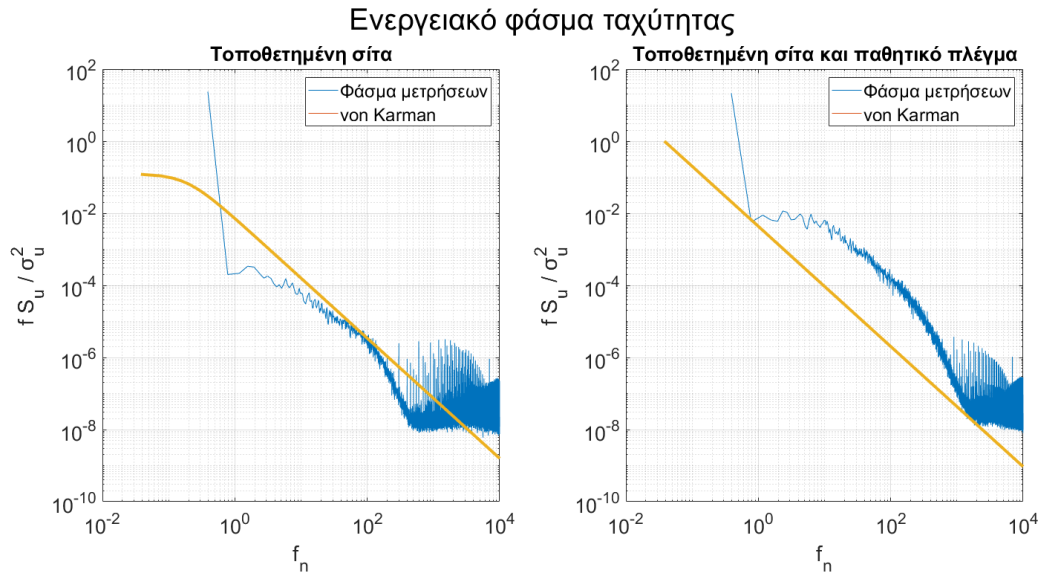


**Διάγραμμα 4 - Σύγκριση οριζόντιων κατανομών ταχύτητας σε άδεια αεροσήραγγα.**



**Διάγραμμα 5 - Σύγκριση οριζόντιων κατανομών έντασης τύρβης σε άδεια αεροσήραγγα.**

Στο Διάγραμμα 6 στη περίπτωση που είναι τοποθετημένη μόνο η σίτα φαίνεται ότι το φάσμα von Karman προσεγγίζει φάσμα της χρονοσειράς, συγκεκριμένα στο διάστημα συχνοτήτων  $f_n$  από 4 ως 140 έχουν την ίδια κλήση. Για τη περίπτωση που είναι τοποθετημένο και το παθητικό πλέγμα το εύρος που η κλήση της χρονοσειράς ταυτίζεται με τη κλήση του φάσματος von Karman ελαττώνεται σε εύρος  $f_n$  43 έως 95. Στη περίπτωση τοποθέτησης πλέγματος η ένταση του φάσματος για την περίπτωση των χαμηλών συχνοτήτων είναι υψηλότερη από τη σηματοδοτεί την παρουσία μεγάλων στροβίλων [28].



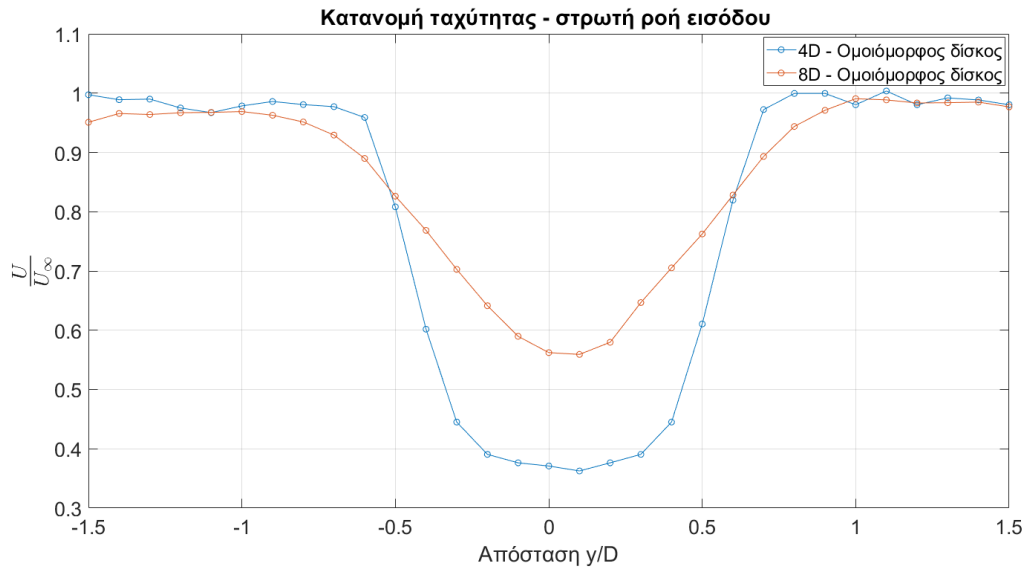
**Διάγραμμα 6 - Φάσμα ενέργειας της ταχύτητας στο ύψος του πύργου του μοντέλου.**

### 3.2 Ομόρρους μοντέλων σε στρωτή ροή.

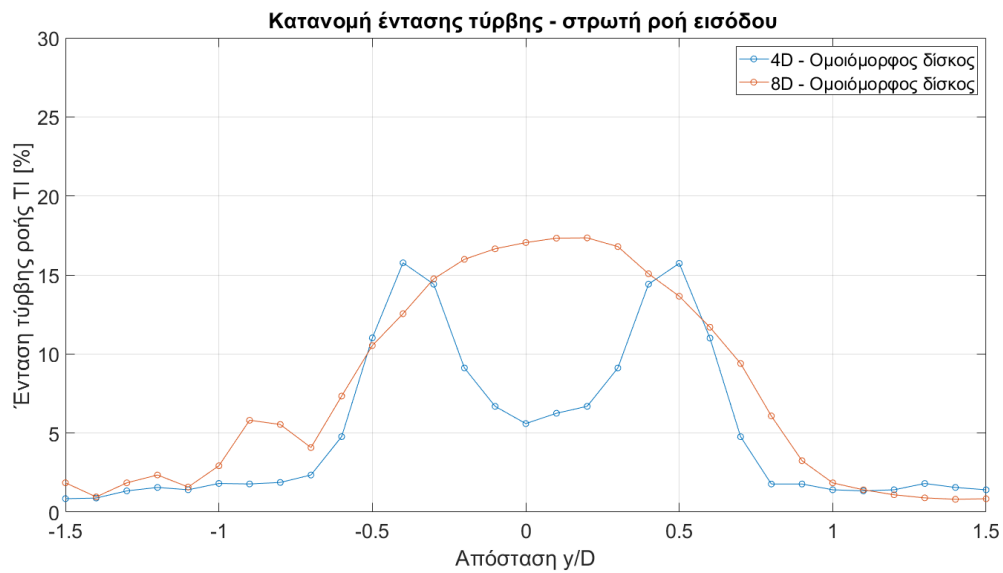
Η κατανομή της ταχύτητας κατάντη των δίσκων εν γένει ακολουθεί μια καμπανοειδή μορφή. Στο Διάγραμμα 7 για τον ομοιόμορφο δίσκο παρατηρείται ο μεγαλύτερος ρυθμός μείωσης της ταχύτητας, η κλήση αυτή είναι πιο έντονη σε απόσταση 4D κατάντη, διότι στα 8D λόγω μεγαλύτερης ανάμειξης ελαττώνεται. Επίσης στα 8D παρατηρείται μια περιοχή σταθερής ταχύτητας που οφείλεται στην ομοιομορφία του δίσκου. Για τον μη ομοιόμορφο δίσκο η κατανομή της ταχύτητας όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 9 είναι πιο πλατιά, η μείωση της ταχύτητας γίνεται με μικρότερο ρυθμό με μέγιστο το κέντρο του δίσκου.

Η κατανομή της έντασης τύρβης για τον ομοιόμορφο δίσκο έχει δύο ακμές στα άκρα του ομόρρου όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 8 για την απόσταση 4D, αυτό συμβαίνει διότι η μεγάλη κλήση του ελλείμματος ταχύτητας σε αυτά τα σημεία προκαλεί μεγάλες διαφορές στα διατμητικά στρώματα του ρευστού και άρα η παραγωγή τύρβης λόγω διάτμησης είναι μέγιστη, σε αντίθεση με το κέντρο του δίσκου που δεν υπάρχει κλήση ταχύτητας παρατηρείται ελάχιστη τιμή της έντασης τύρβης. Για τον μη ομοιόμορφο δίσκο η κατανομή της έντασης τύρβης στα 4D παρουσιάζει μια κωδωνοειδή κατανομή (Διάγραμμα 9) αποτέλεσμα της ανομοιομορφίας της διατομής του δίσκου. Στα 8D και για τους δύο δίσκους η ένταση τύρβης λόγω ανάμειξης έχει μικρότερες τιμές.

**Αποτελέσματα με χρήση ομοιόμορφου δίσκου:**

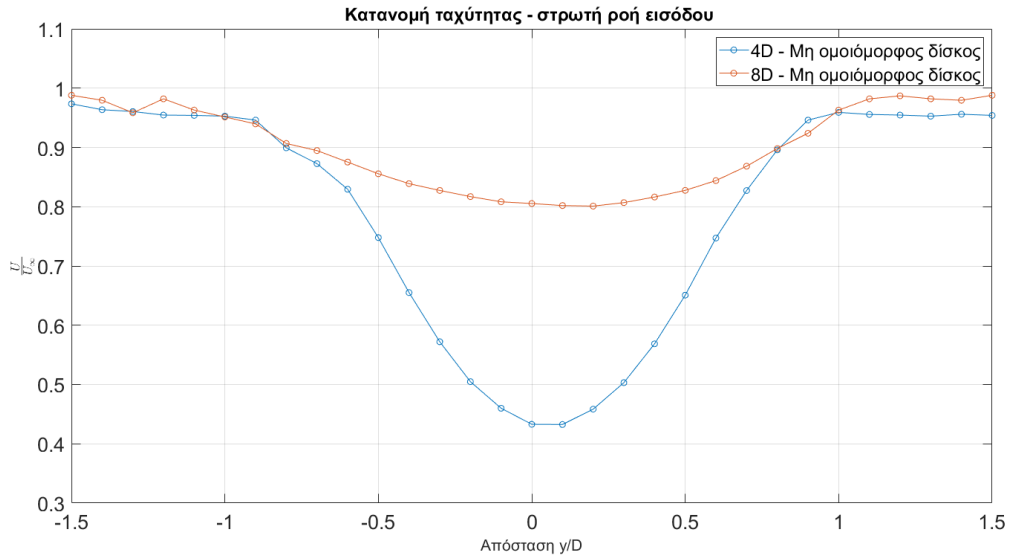


**Διάγραμμα 7 - Κατανομή ταχύτητας κατάντη ομοιόμορφου δίσκου σε στρωτή ροή εισόδου.**

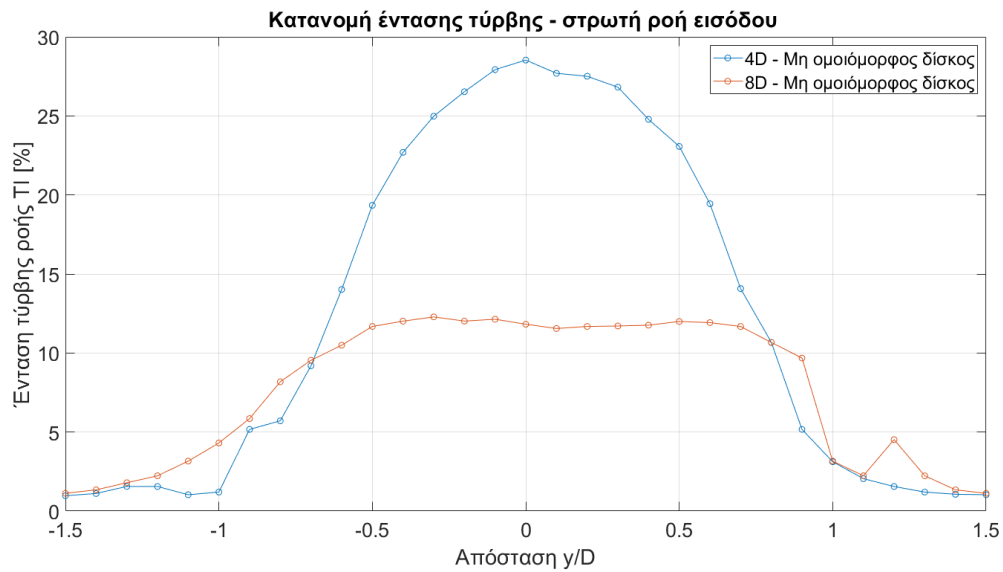


**Διάγραμμα 8 - Κατανομή έντασης τύρβης κατάντη ομοιόμορφου δίσκου σε στρωτή ροή εισόδου.**

**Αποτελέσματα με χρήση μη ομοιόμορφου δίσκου:**



**Διάγραμμα 9 - Κατανομή ταχύτητας κατάντη μη ομοιόμορφου δίσκου σε στρωτή ροή εισόδου.**



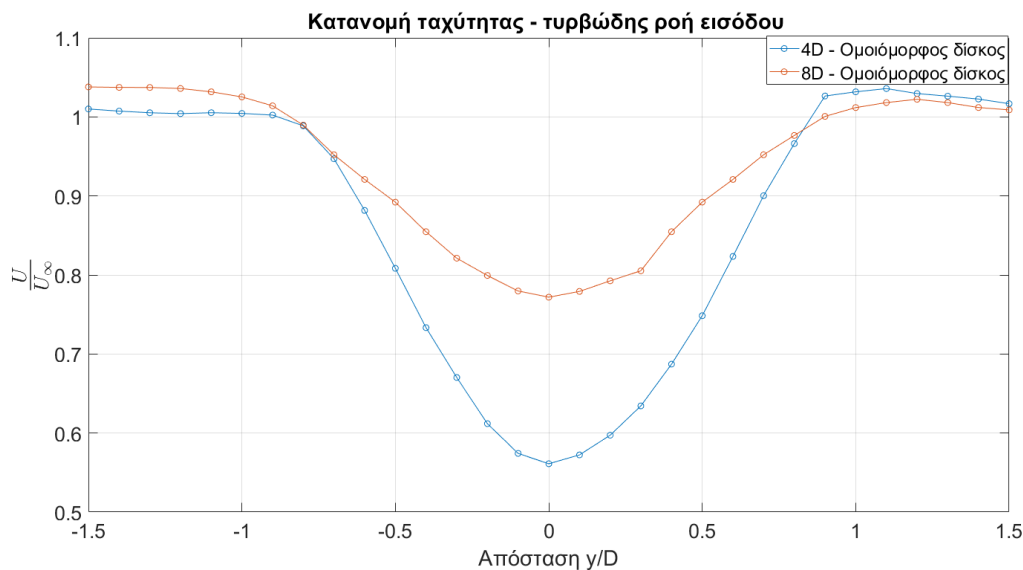
**Διάγραμμα 10 - Κατανομή έντασης τύρβης κατάντη μη ομοιόμορφου δίσκου σε στρωτή ροή εισόδου.**

### 3.3 Ομόρρους μοντέλων σε τυρβώδη ροή

Όταν η ένταση τύρβης της ροής εισόδου αυξάνεται αυτό που παρατηρείται για τον ομοιόμορφο δίσκο είναι ότι ο ρυθμός μείωσης της ταχύτητας γίνεται μικρότερος και η μορφή της κατανομής είναι πιο μυτερή και στη συνέχεια στα 8D αυτό φαίνεται να εξομαλύνεται (Διάγραμμα 11). Αυτό που παρατηρείται και στους δύο δίσκους ξανά είναι ότι ο ρυθμός μείωσης της ταχύτητας ελαχιστοποιείται όσο αυξάνεται η απόσταση μέτρησης κατάντη.

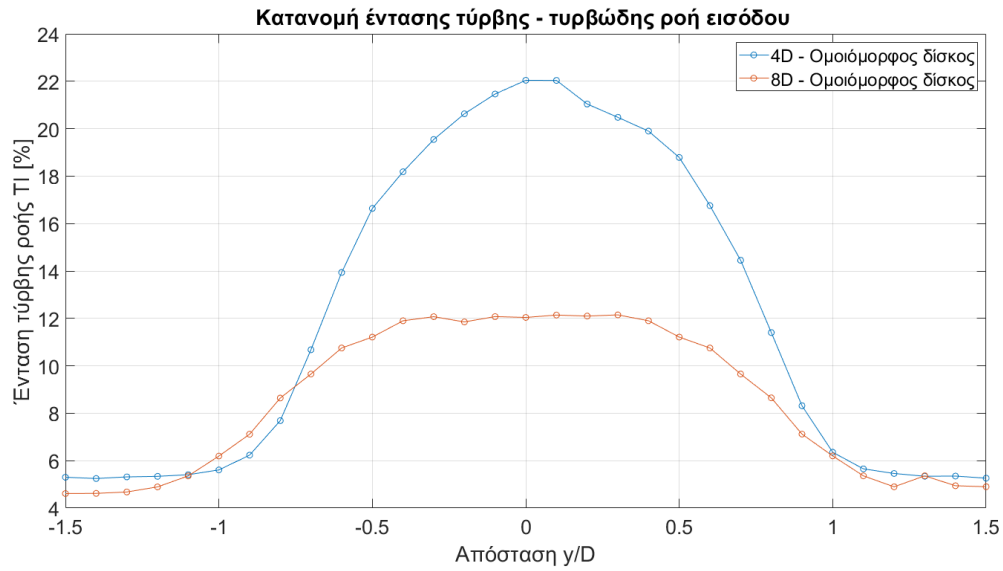
Για τον μη ομοιόμορφο δίσκο παρατηρείται ότι στην απόσταση 4D η ένταση τύρβης είναι μικρότερη για τη τυρβώδη ροή εισόδου από ότι για τη στρωτή όμως στην απόσταση 8D η διαφορά αυτή δεν εντοπίζεται, επίσης η κατανομή της έντασης τύρβης παρουσιάζει μια επίπεδη περιοχή. Για τον ομοιόμορφο δίσκο στα 4D δεν παρατηρούνται οι δύο ακμές αυτό συμβαίνει εξαιτίας της υψηλότερης τύρβης στη ροή εισόδου που οδηγεί σε εντονότερη ανάμειξη. Στα 8D και ο ομοιόμορφος δίσκος παρουσιάζει την επίπεδη περιοχή.

**Αποτελέσματα με χρήση ομοιόμορφου δίσκου:**



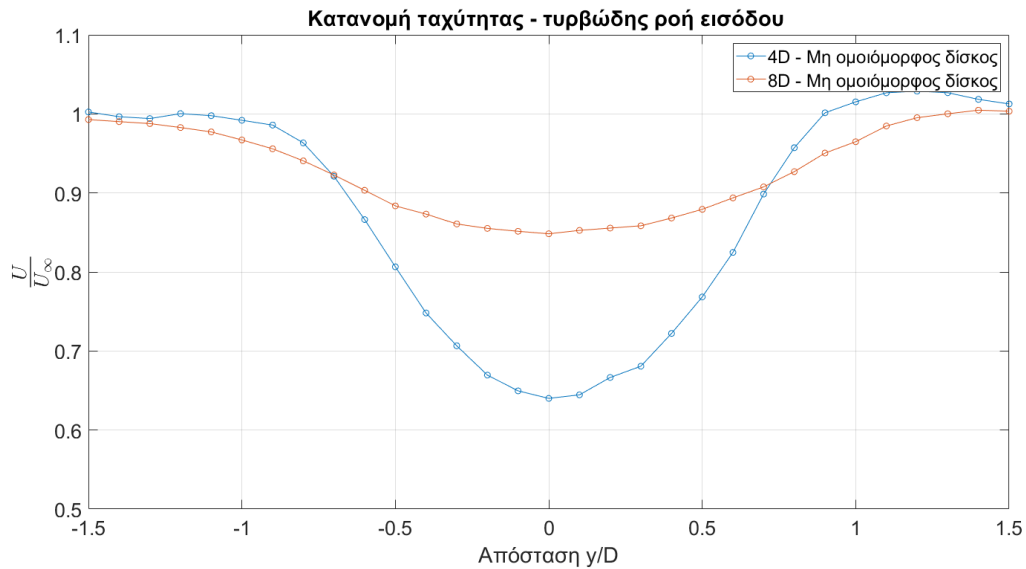
**Διάγραμμα 11 - Κατανομή ταχύτητας κατάντη ομοιόμορφου δίσκου σε τυρβώδη ροή εισόδου.**



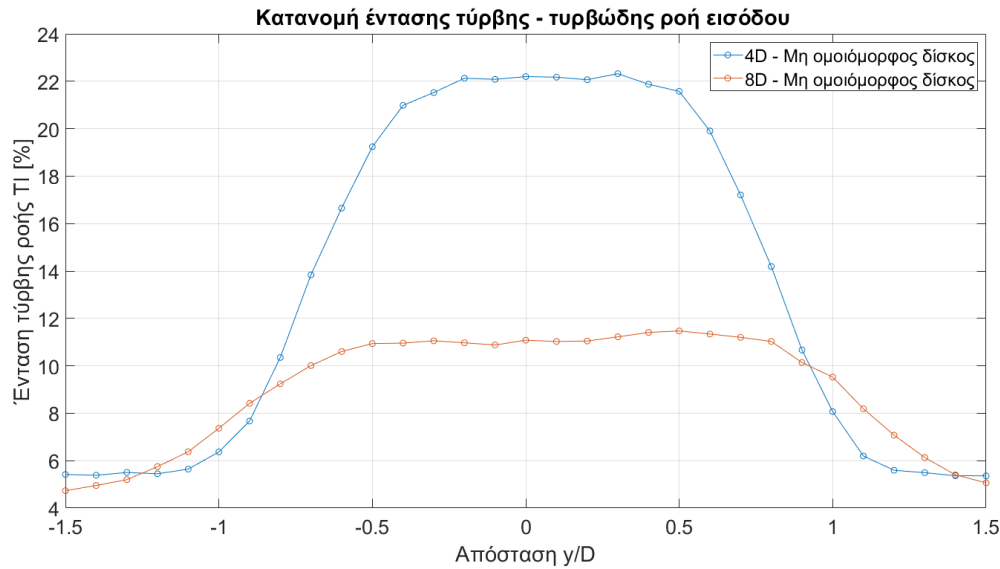


**Διάγραμμα 12 - Κατανομή έντασης τύρβης κατάντη ομοιόμορφου δίσκου σε τυρβώδη ροή εισόδου.**

**Αποτελέσματα με χρήση μη ομοιόμορφου δίσκου:**



**Διάγραμμα 13- Κατανομή ταχύτητας κατάντη μη ομοιόμορφου δίσκου σε τυρβώδη ροή εισόδου.**



**Διάγραμμα 14 - Κατανομή έντασης τύρβης κατάντη μη ομοιόμορφου δίσκου σε τυρβώδη ροή εισόδου.**

### 3.4 Ομόρρους μοντέλων σε τυρβώδη ροή με στροφή κατά τον κατακόρυφο άξονα.

Οι μετρήσεις σε αυτή τη περίπτωση έγιναν με χρήση του μη ομοιόμορφου δίσκου, με τυρβώδη ροή εισόδου, στη θέση της περιστρεφόμενης τράπεζας που απέχει -9 m από την είσοδο της ροής, σε εύρος  $\pm 1,5D$  στο ύψος του πύργου του μοντέλου ( $z=51\text{cm}$ ) σε απόσταση 3D και 6D, με στροφή του μοντέλου κατά τον κατακόρυφο άξονα  $30^\circ$  ωρολογιακά. Η κατανομή της ταχύτητας και της έντασης τύρβης στη περίπτωση όπου το μοντέλο είναι στραμμένο παρουσιάζουν και τα δυο κλήση ίδιας φοράς χαρακτηριστικό που συμφωνεί και με την βιβλιογραφία [29] όμως έχουν μικρότερες τιμές από αυτές που προέκυψαν από παρόμοιο πείραμα [11] όπως φαίνεται στον Πίνακας 3. Παρατηρείται ότι το πλάτος της κατανομής της έντασης τύρβης μικραίνει όταν το μοντέλο είναι στραμμένο.

Η κλήση της κατανομής του ομόρρου (γωνία  $\chi$ ) δίνεται από τη σχέση (20)

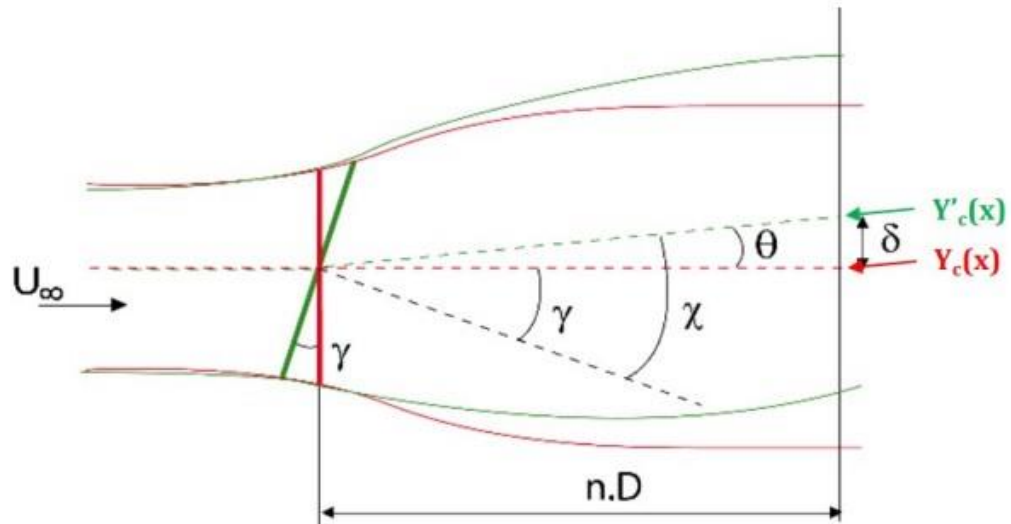
$$\chi = \gamma + \theta = \gamma + \tan^{-1}\left(\frac{\delta}{N \cdot D}\right) \quad (20)$$

Στο Σχήμα 3-1 φαίνονται σχηματικά τα μεγέθη που περιγράφονται στη σχέση (20)

Ο υπολογισμός της απόκλισης (γωνία  $\delta$ ) προϋποθέτει την γνώση των κέντρων των κατανομών ταχύτητας στη περίπτωση που δεν υπάρχει κλήση  $\gamma_c$  και στην περίπτωση κλήσης  $\gamma=30^\circ \gamma_c'$ .

Το κέντρο του ομόρρου ορίζεται με τη μέθοδο υπολογισμού του κέντρου μάζας [30] όπως φαίνεται στη σχέση 21.

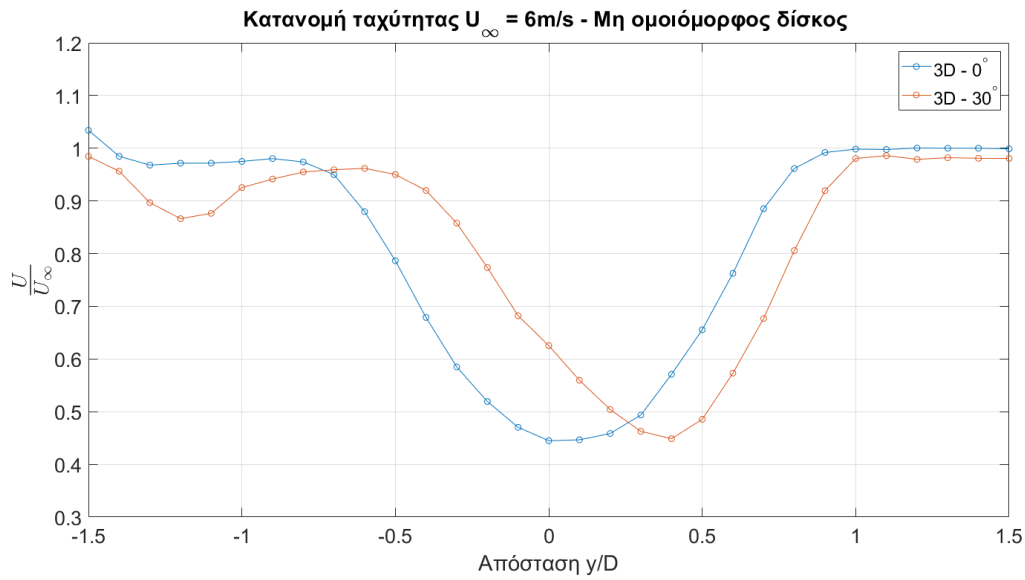
$$Y_c = \frac{\int_{x_{min}}^{x_{max}} xy(x)dx}{\int_{x_{min}}^{x_{max}} y(x)dx} \quad (21)$$



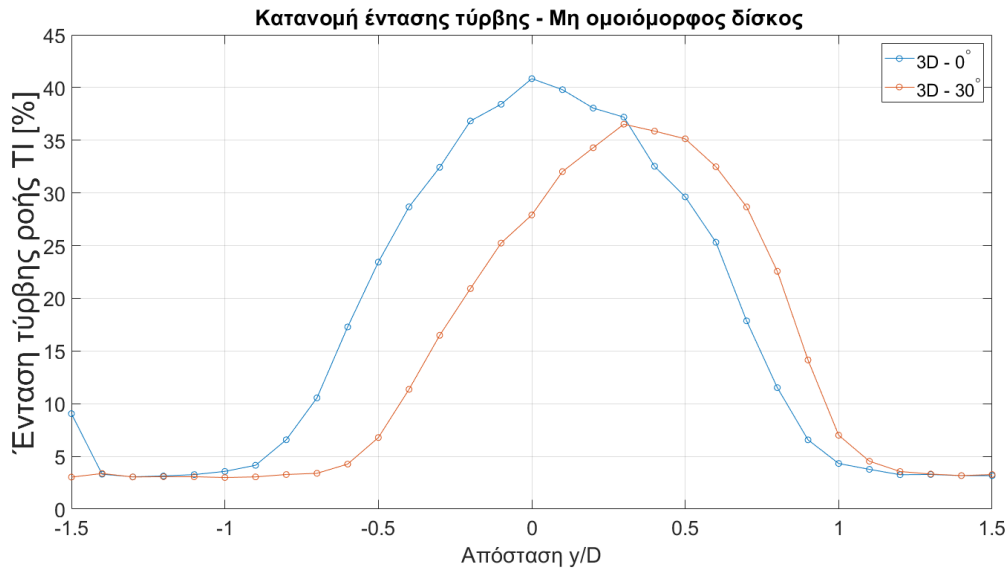
Σχήμα 3-1 Σχηματική αναπαράσταση κλήσης ομόρρους χ, γωνία στροφής δίσκου γ και γωνία απόκλισης του ομόρρου [31].

γ [°]	n.D [-]	γωνία κλήσης χ [°] Ε.Μ.Π.	Διαφορά κέντρων κατανομών ταχύτητας γ <sub>c</sub> -γ <sub>c'</sub> Ε.Μ.Π. [-]	γωνία απόκλισης δ [°] Ε.Μ.Π.	γωνία απόκλισης δ [°] Ν.Τ.Ν.Υ.
0	3	0,00	0	0,00	0,29
30	3	29,52	-0,024	-0,45	-2,99
0	6	0,00	0	0,00	0,24
30	6	29,64	-0,034	-0,32	-2,36

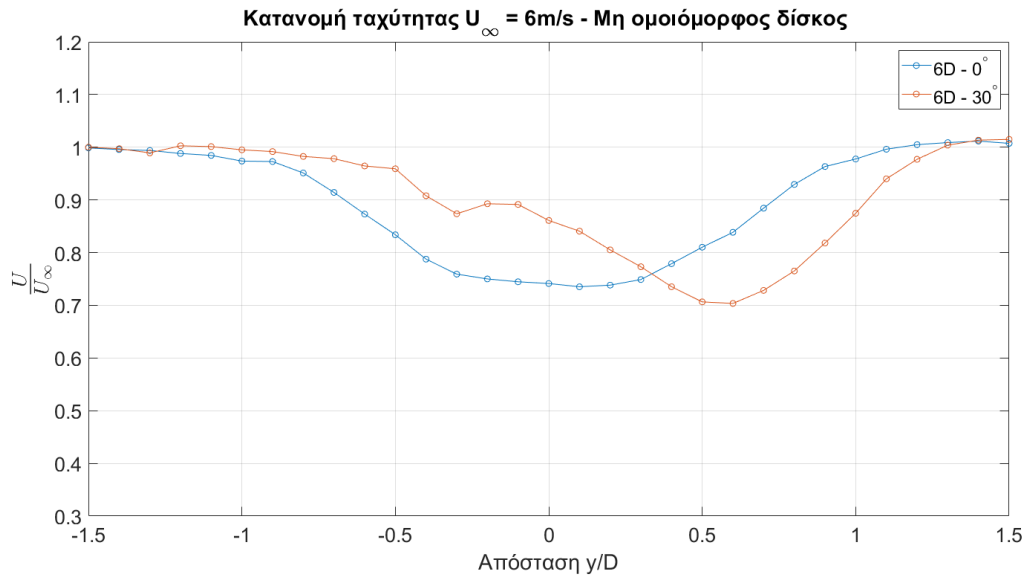
Πίνακας 3 – Γωνίες απόκλισης ομόρρου μη ομοιόμορφου δίσκου.



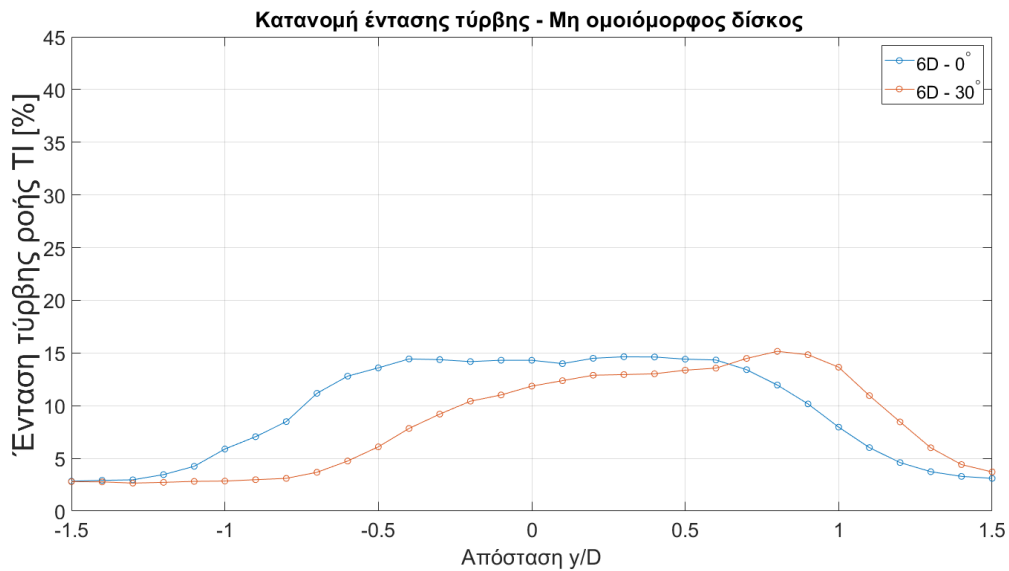
**Διάγραμμα 15 - Κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 3D κατόντη μη ομοιόμορφου δίσκου περιστρεφόμενου κατά τον κατακόρυφο του άξονα.**



**Διάγραμμα 16 - Κατανομή έντασης τύρβης σε απόσταση 3D κατόντη μη ομοιόμορφου δίσκου περιστρεφόμενου κατά τον κατακόρυφο του άξονα.**



**Διάγραμμα 17 - Κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 6D κατάντη μη ομοιόμορφου δίσκου περιστρεφόμενου κατά τον κατακόρυφο του άξονα.**



**Διάγραμμα 18 - Κατανομή έντασης τύρβης σε απόσταση 6D κατάντη μη ομοιόμορφου δίσκου περιστρεφόμενου κατά τον κατακόρυφο του άξονα.**

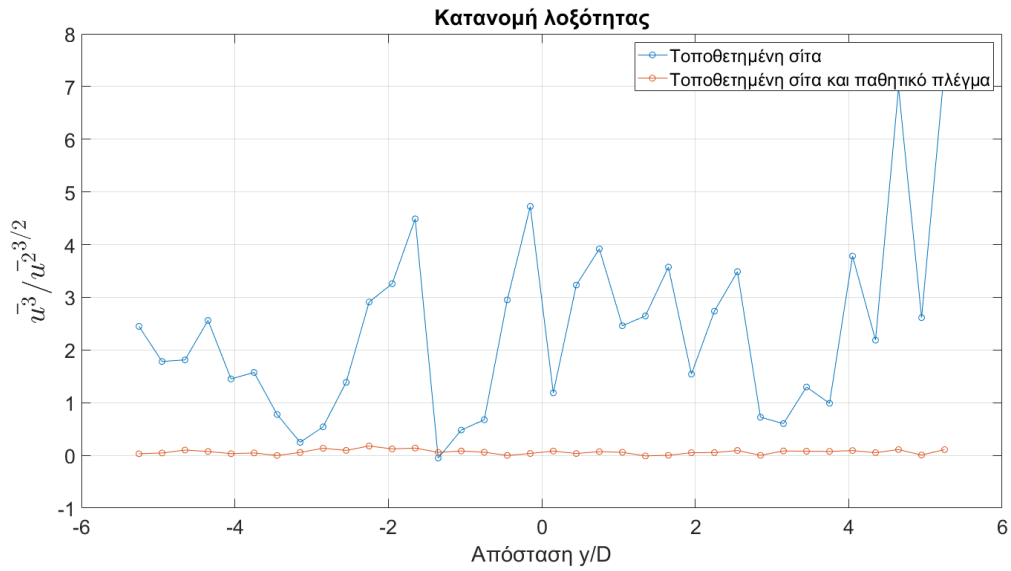
### 3.5 Λοξότητα και κύρτωση ταχύτητας.

Η κατανόηση της κατανομής ταχύτητας στην τυρβώδη ροή είναι σημαντική. Με τη χρήση στατιστικών μεγεθών υψηλότερης τάξης, όπως η λοξότητα και η κύρτωση μπορεί να προκύψουν χρήσιμα αποτελέσματα [28]. Η λοξότητα  $\overline{u^3}/\overline{u^2}^{\frac{3}{2}}$  είναι μια μέτρηση ποσοτικοποίησης της ασυμμετρίας εντός της κατανομής της ταχύτητας. Σε περίπτωση που η λοξότητα είναι θετική σημαίνει ότι η κατανομή πάει προς τα δεξιά, ενώ για αρνητικές τιμές προς τα αριστερά, στη περίπτωση συμμετρικής κατανομής η λοξότητα ισούται με μηδέν. Η κύρτωση  $\overline{u^4}/\overline{u^2}^2$  ή επιπεδότητα περιγράφει την κατανομή της τυρβώδης ταχύτητας. Υψηλότερες τιμές κύρτωσης συνεπάγονται έντονες ουρές στη κατανομή. Μια κατανομή Gauss έχει κύρτωση ίση με 3 και λοξότητα ίση με 0.

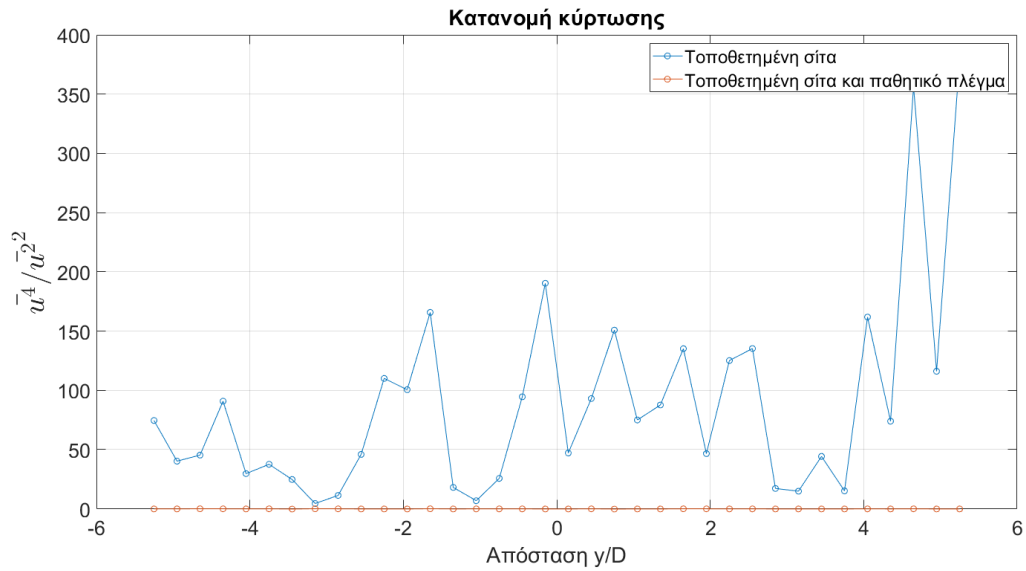
Στο Διάγραμμα 19 και Διάγραμμα 20 φαίνονται οι κατανομές λοξότητας και κύρτωσης σε μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε άδεια αεροσήραγγα στην περίπτωση που ήταν τοποθετημένη στη ροή εισόδου σίτα και επιπλέον παθητικό πλέγμα. Στη πρώτη περίπτωση φαίνονται οι θετικές διακυμάνσεις στη τιμή της λοξότητας και το αντίστοιχο αποτυπώνεται στη κατανομή της κύρτωσης, στο Διάγραμμα 21 φαίνεται ποιοτικά και επιβεβαιώνονται τα χαρακτηριστικά που έχει η κατανομή της ταχύτητας στο κέντρο της διατομής για συγκεκριμένες τιμές λοξότητας και κύρτωσης.

Στο Διάγραμμα 22 και Διάγραμμα 23 φαίνονται οι κατανομές λοξότητας και κύρτωσης για όλες τις κατάντι θέσεις που πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις. Αρχικά για την περίπτωση των κατανομών λοξότητας, σε όλες τις περιπτώσεις η απόλυτη τιμή λαμβάνει μικρότερες τιμές στο κέντρο του ομόρρου, ενώ στις άκρες του έχει μέγιστες αρνητικές τιμές. Διακρίνεται επιπλέον στις τελευταίες μετρήσεις των κατανομών, στα σημεία όπου η πτώση ταχύτητας είναι μηδενική, ότι η λοξότητα λαμβάνει πάλι μικρές θετικές τιμές. Για την περίπτωση των κατανομών κύρτωσης παρατηρούνται υψηλά επίπεδα κύρτωσης στις άκρες του ομόρρου σε όλες τις θέσεις. Στην περίπτωση του μη ομοιόμορφου δίσκου η τιμές της κύρτωσης είναι μεγαλύτερες από τον ομοιόμορφο δείχνοντας ότι εντός του ομόρρου του προηγούμενου δίσκου συμβαίνουν πιο έντονες πτώσεις ταχύτητας.

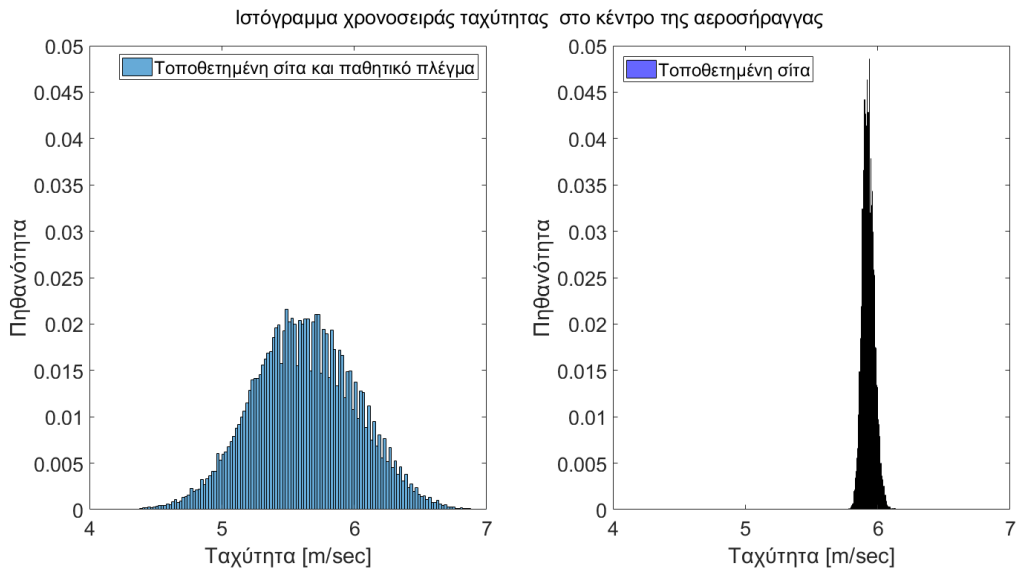
Παραπάνω πληροφορίες για την λοξότητα και την κύρτωση των μετρήσεων μπορούν να βρεθούν στο Παράρτημα.



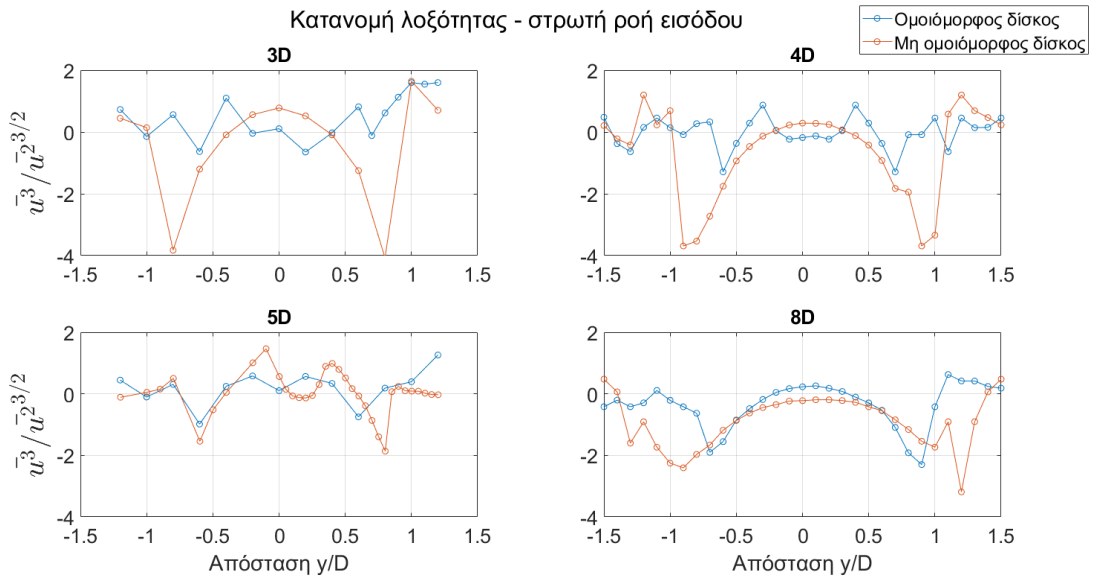
**Διάγραμμα 19 – Κατανομή λοξότητας της ροής εισόδου.**



**Διάγραμμα 20 - Κατανομή κύρτωσης της ροής εισόδου.**

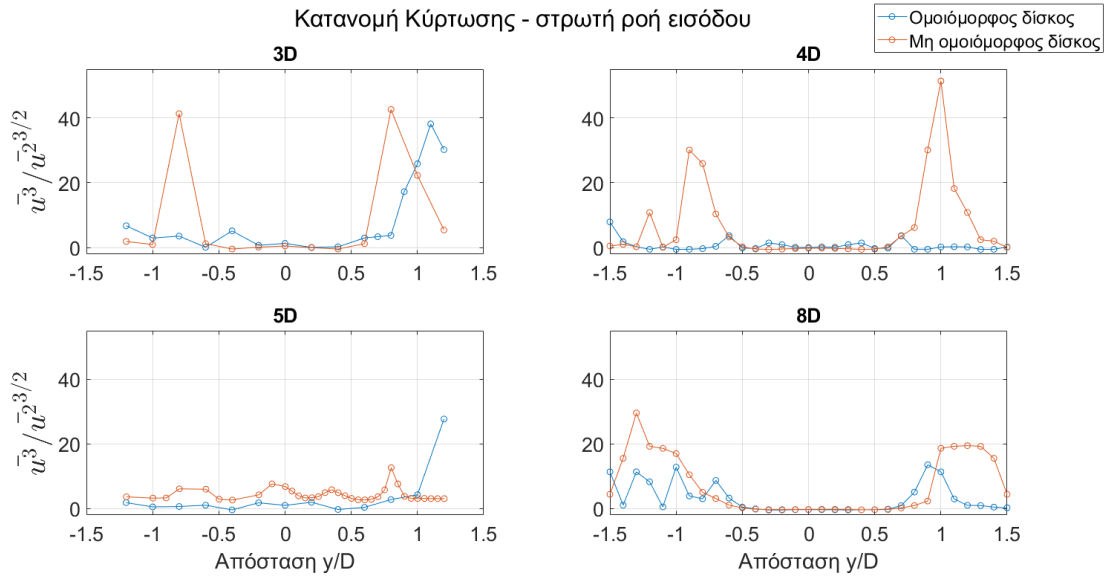


Διάγραμμα 21 – Ιστόγραμμα ταχυτήτων ροής εισόδου.



Διάγραμμα 22 – Κατανομές λοξότητας σε όλες τις κατάντι θέσεις μέτρησης.





**Διάγραμμα 23– Κατανομές κύρτωσης σε όλες τις κατόντι θέσεις μέτρησης.**

## 4. Σύγκριση με τη βιβλιογραφία.

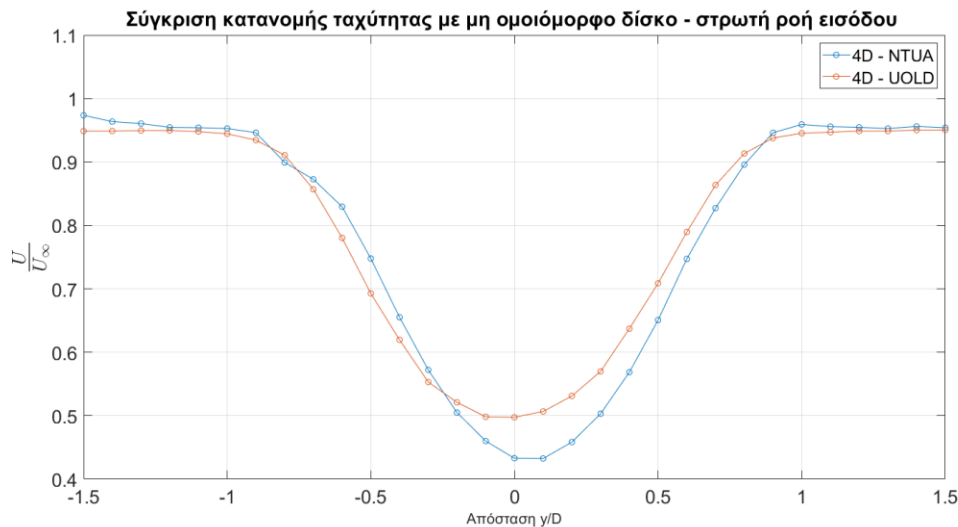
### 4.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων Ε.Μ.Π. και πανεπιστημίου Oldenburg.

Τα πειράματα διεξήχθησαν στο ForWind, στο Πανεπιστήμιο του Oldenburg, εντός του κλειστού τμήματος δοκιμής της μεγάλης αεροσήραγγας που διαθέτει το πανεπιστήμιο μήκους 30 m και διατομής 3m x 3m. Τα επίπεδα τύρβης της στρωτής ροής εισόδου είναι 0,4% [32] ενώ για τη τυρβώδη ροή χρησιμοποιείται παρόμοιο παθητικό πλέγμα. Το πρωτόκολλο που ακολουθήθηκε ήταν το ίδιο με αυτό του Ε.Μ.Π.

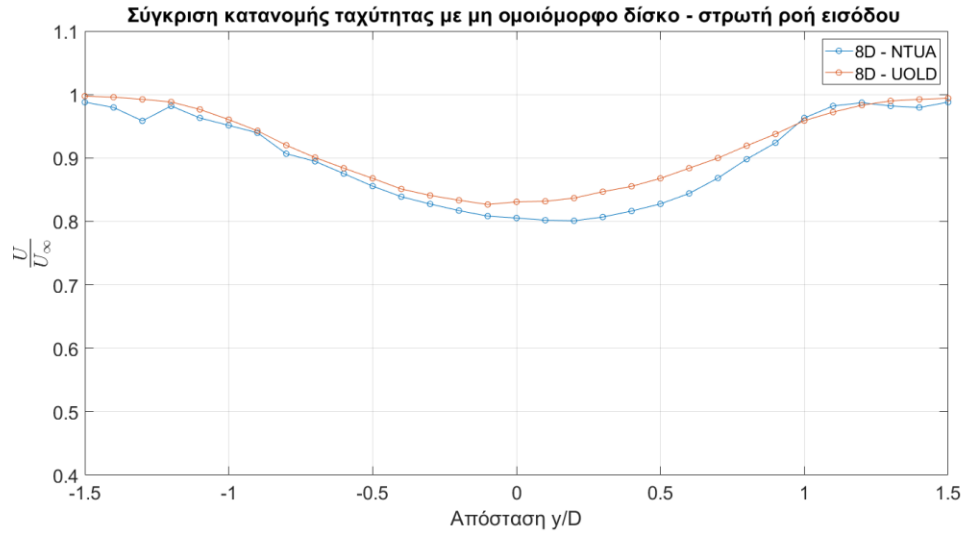
Για τη στρωτή ροή εισόδου τα αποτελέσματα του Ε.Μ.Π. πετυχαίνουν μεγαλύτερη μείωση ταχύτητας στο κέντρο του μη ομοιόμορφου δίσκου, συγκεκριμένα στα 4D επιτυγχάνεται 15% μεγαλύτερη μείωση ενώ στα 8D αυτό το μέγεθος μειώνεται στα 3.16%. Η μορφή των κατανομών είναι παρόμοια και έχουν και τα δύο παρόμοια ασυμμετρία.

Για τη τυρβώδη ροή στα 4D το πανεπιστήμιο του Oldenburg επιτυγχάνει μεγαλύτερη μείωση ταχύτητας στο κέντρο του δίσκου κατά 4,83% ενώ στα 8D τα αποτελέσματα σχεδόν ταυτίζονται.

#### 4.1.1 Σύγκριση με στρωτή ροή εισόδου.

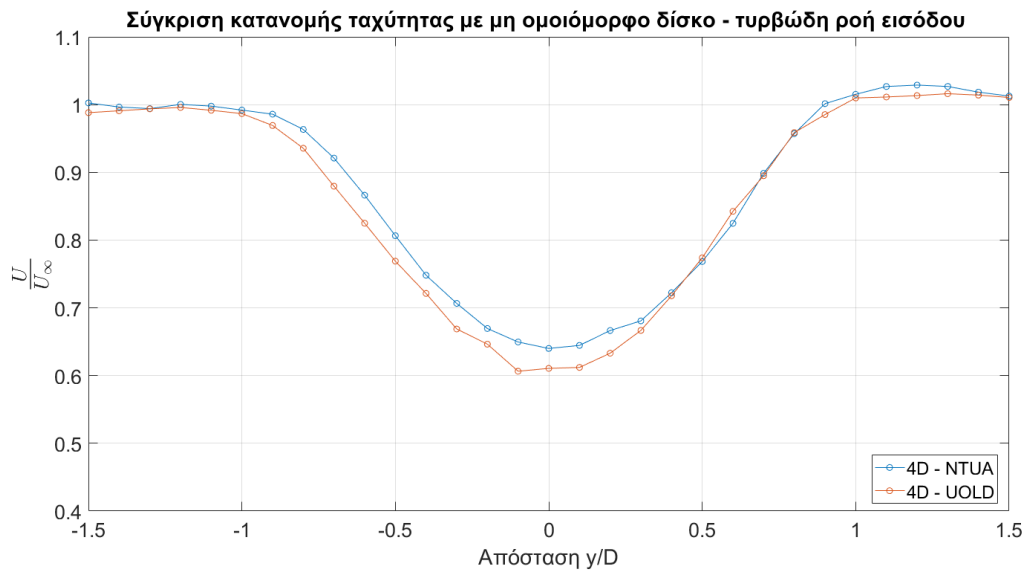


Διάγραμμα 24 - Σύγκριση κατανομής ταχύτητας με στρωτή ροή εισόδου, μεταξύ πειραμάτων του Ε.Μ.Π. και του πανεπιστημίου Oldenburg σε απόσταση 4D κατάντη.

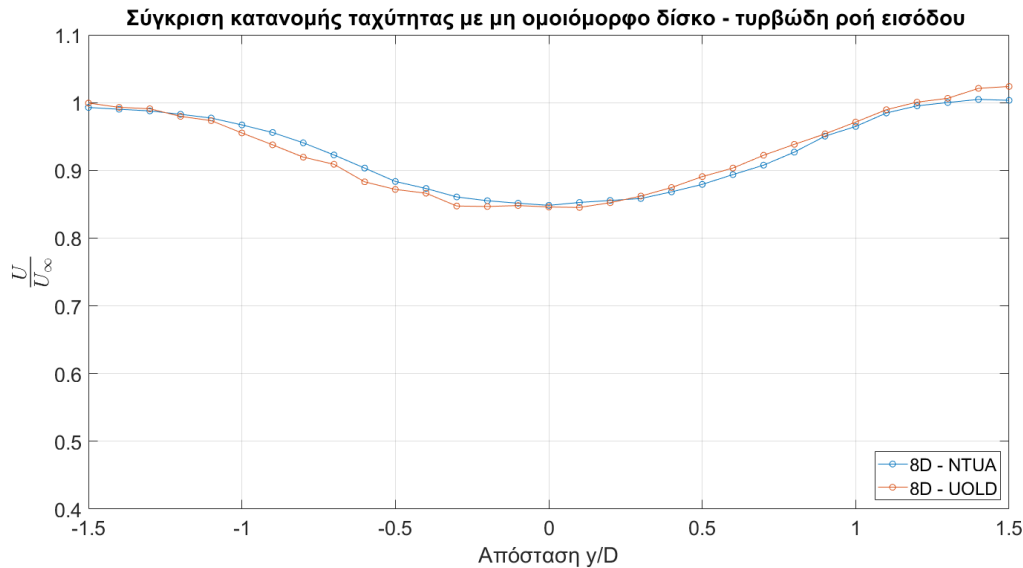


Διάγραμμα 25 - Σύγκριση κατανομής ταχύτητας με στρωτή ροή εισόδου, μεταξύ πειραμάτων του Ε.Μ.Π. και του πανεπιστημίου Oldenburg σε απόσταση 8D κατόντη.

4.1.2 Σύγκριση με τυρβώδη ροή εισόδου.



Διάγραμμα 26 - Σύγκριση κατανομής ταχύτητας με τυρβώδη ροή εισόδου, μεταξύ πειραμάτων του Ε.Μ.Π. και του πανεπιστημίου Oldenburg σε απόσταση 4D κατόντη.



**Διάγραμμα 27 - Σύγκριση κατανομής ταχύτητας με τυρβώδη ροή εισόδου, μεταξύ πειραμάτων του Ε.Μ.Π. και του πανεπιστημίου Oldenburg σε απόσταση 8D κατάντη.**

## 4.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων Ε.Μ.Π. και Ν.Τ.Ν.Υ.

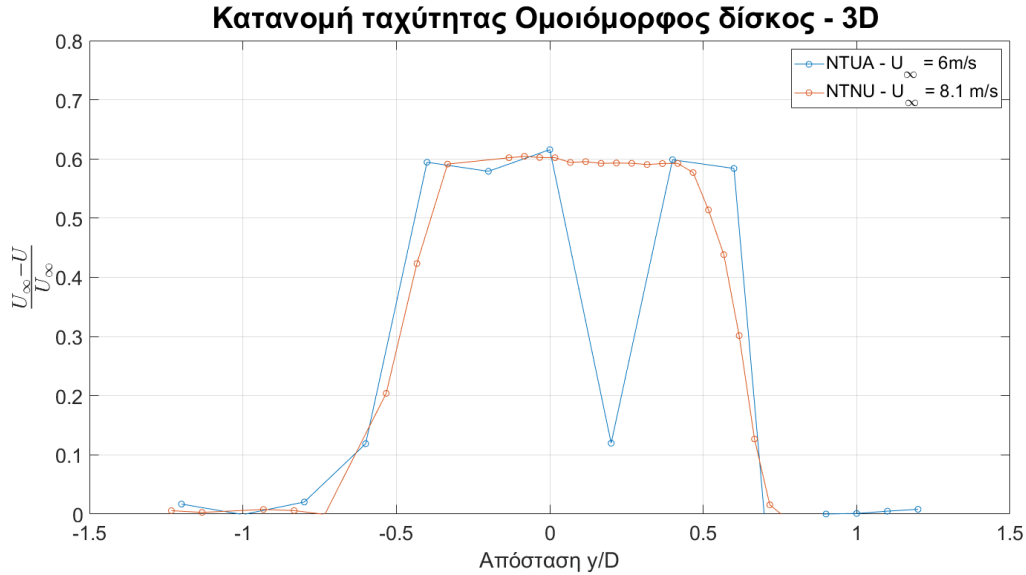
Τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις προέκυψαν με στρωτή ροή εισόδου, χρησιμοποιήθηκαν παρόμοιοι δίσκοι (με μικρές διαφορές στον μη ομοιόμορφο), ο αριθμός Reynolds διαφέρει  $Re_{N.T.N.U.} = 10^5$  ( $U_\infty = 8.1$  m/s) και  $Re_{N.T.U.A.} = 8 \cdot 10^4$  ( $U_\infty = 6$  m/s), το εύρος μέτρησης είναι  $\pm 1,2D$  σε απόσταση 3D και 5D κατάντη.

Για τον ομοιόμορφο δίσκο σε απόσταση 3D και 5D σύμφωνα με το (Διάγραμμα 28, Διάγραμμα 30) επιβεβαιώνεται η μεγάλη μεταβολή της ταχύτητας στις άκρες του ομόρρου και στη συνέχεια υπάρχει περιοχή όπου η τιμή της ταχύτητας γίνεται σταθερή λόγω της ομοιομορφίας του δίσκου. Για τη κατανομή της έντασης τύρβης παρατηρούνται και εδώ οι δύο ακμές στην άκρη του ομόρρου, με τις τιμές του Ν.Τ.Ν.Υ. να είναι μεγαλύτερες λόγω μεγαλύτερο αριθμού Re και στη συνέχεια στο μέσον του ομόρρου οι τιμές λαμβάνουν μικρή τιμή.

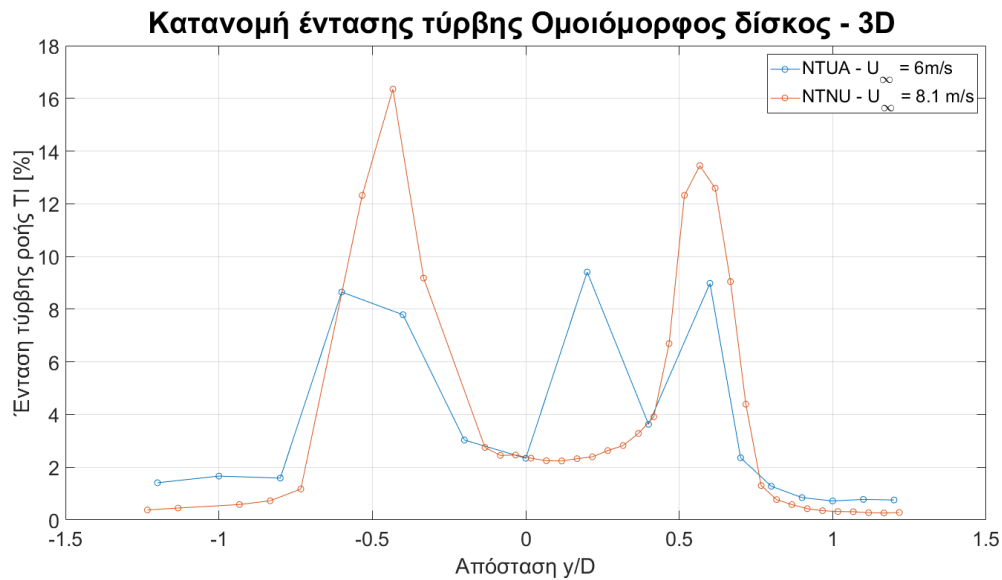
Για τον μη ομοιόμορφο δίσκο παρατηρείται ότι στην απόσταση 5D η κατανομή έντασης τύρβης έχει μια περιοχή σταθερής τιμής (Διάγραμμα 35), σε σύγκριση με το Διάγραμμα 10 όπου στα 4D για τον ίδιο δίσκο αυτή η περιοχή δεν ήταν ορατή, αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ανάμεσα σε αυτή την απόσταση γίνεται αυτή η μετάβαση. Γενικότερα παρατηρούνται τα ίδια χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν και στο κεφάλαιο 3.2.

Το σημείο (0.2, 0.12) στο Διάγραμμα 28 και το αντίστοιχο σημείο (0.2, 9,41) στο Διάγραμμα 29 δε θεωρούνται έγκυρα.

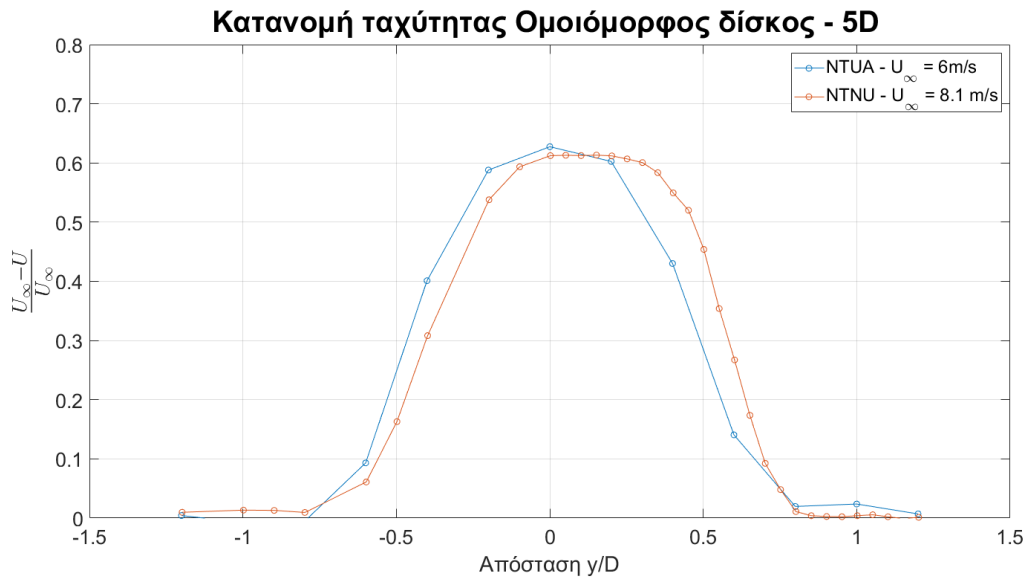
#### 4.2.1 Σύγκριση με χρήση ομοιόμορφου δίσκου.



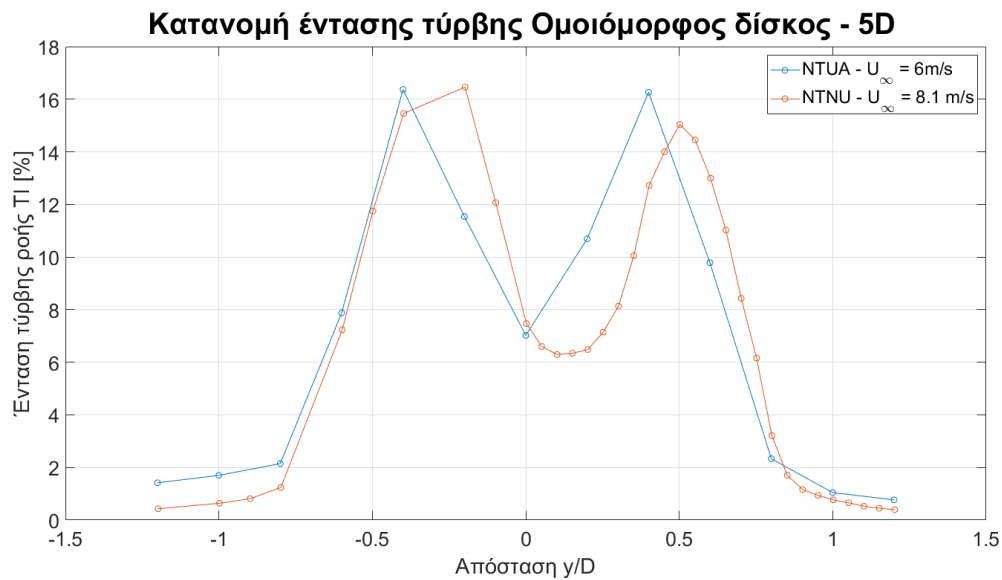
**Διάγραμμα 28 – Σύγκριση κατανομής ταχύτητας με χρήση ομοιόμορφου δίσκου, μεταξύ πειραμάτων του Ε.Μ.Π. και του Ν.Τ.Ν.Υ. σε απόσταση 3D κατάντη.**



**Διάγραμμα 29 - Σύγκριση κατανομής έντασης τύρβης με χρήση ομοιόμορφου δίσκου, μεταξύ πειραμάτων του Ε.Μ.Π. και του Ν.Τ.Ν.Υ. σε απόσταση 3D κατάντη.**

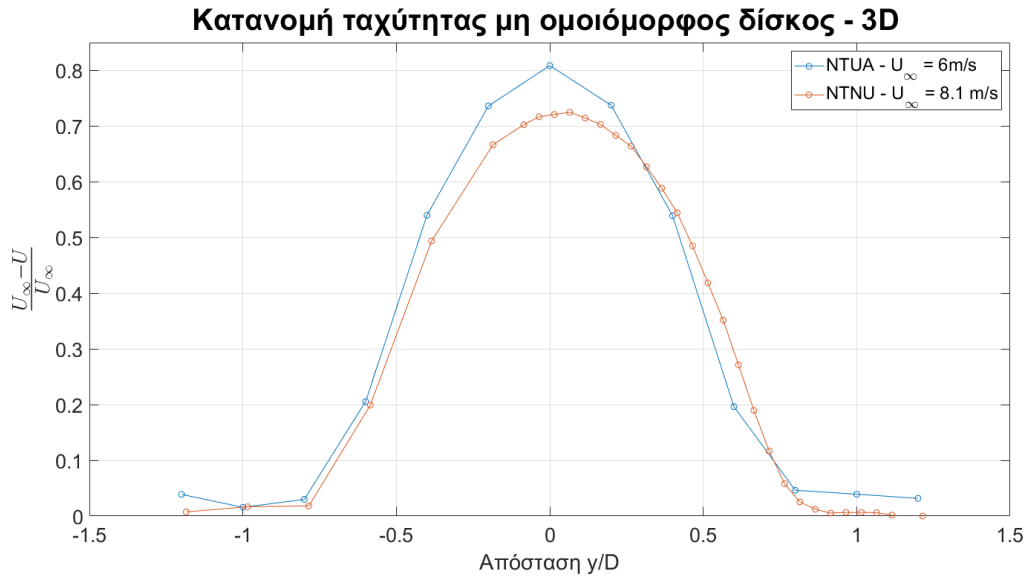


**Διάγραμμα 30** - Σύγκριση κατανομής ταχύτητας με χρήση ομοιόμορφου δίσκου, μεταξύ πειραμάτων του Ε.Μ.Π. και του Ν.Τ.Ν.Υ. σε απόσταση 5D κατόντη.

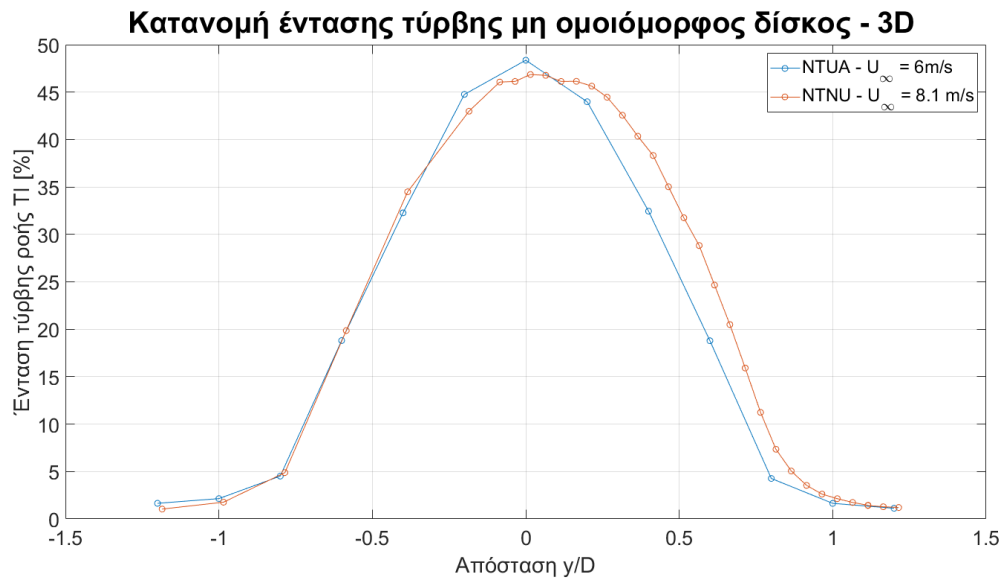


**Διάγραμμα 31** – Σύγκριση κατανομής έντασης τύρβης με χρήση ομοιόμορφου δίσκου, μεταξύ πειραμάτων του Ε.Μ.Π. και του Ν.Τ.Ν.Υ. σε απόσταση 5D κατόντη.

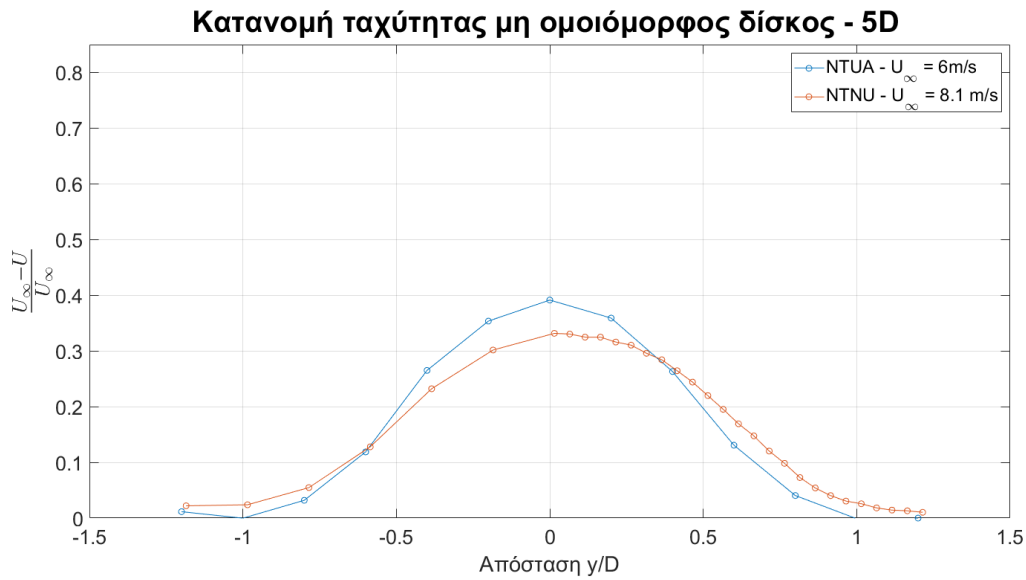
4.2.2 Σύγκριση με χρήση μη ομοιόμορφου δίσκου.



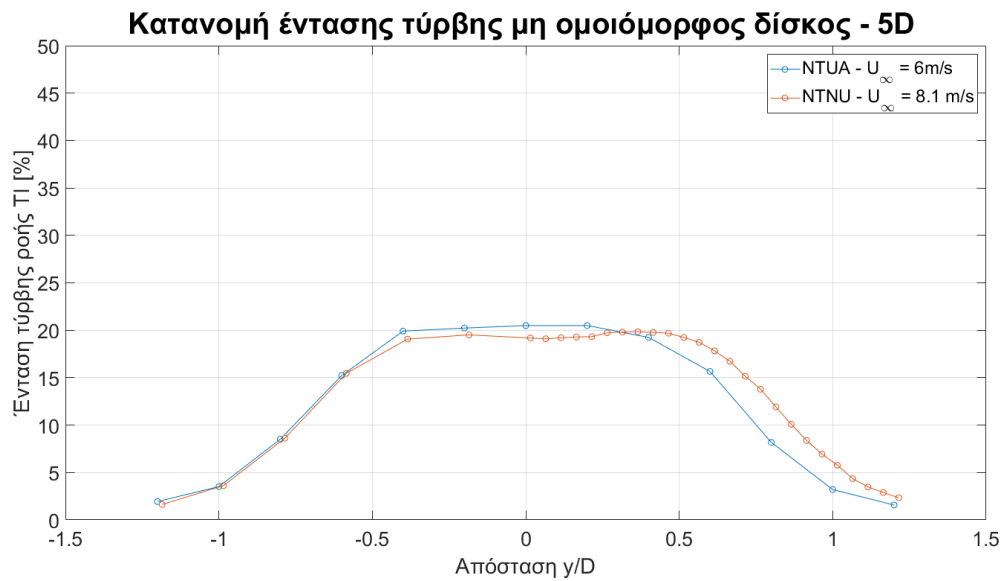
Διάγραμμα 32 – Σύγκριση κατανομής ταχύτητας με χρήση μη ομοιόμορφου δίσκου, μεταξύ πειραμάτων του Ε.Μ.Π. και του Ν.Τ.Ν.Υ. σε απόσταση 3D κατάντη.



Διάγραμμα 33 - Σύγκριση κατανομής έντασης τύρβης με χρήση μη ομοιόμορφου δίσκου, μεταξύ πειραμάτων του Ε.Μ.Π. και του Ν.Τ.Ν.Υ. σε απόσταση 3D κατάντη.



Διάγραμμα 34 - Σύγκριση κατανομής ταχύτητας με χρήση μη ομοιόμορφου δίσκου, μεταξύ πειραμάτων του Ε.Μ.Π. και του Ν.Τ.Ν.Υ. σε απόσταση 5D κατόντη.



Διάγραμμα 35 – Σύγκριση κατανομής έντασης τύρβης με χρήση ομοιόμορφου δίσκου, μεταξύ πειραμάτων του Ε.Μ.Π. και του Ν.Τ.Ν.Υ. σε απόσταση 5D κατόντη.



## 5. Συμπεράσματα.

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται πειραματικά η επίδραση της τύρβης της ροής εισόδου στον ομόρρου που παράγεται τόσο από έναν ομοιόμορφο όσο και από έναν μη ομοιόμορφο διάτρητο δίσκο, καθώς και τα χαρακτηριστικά του ομόρρου όταν το μοντέλο περιστρέφεται κατά τον κατακόρυφο άξονα.

Και για τις δύο συνθήκες ροής εισόδου η κατανομή ταχύτητας έχει μια ελαφριά μεταποίηση προς τις θετικές τιμές της κατεύθυνσης  $y$  σε όλες τις μετρήσεις κατόπιν των δίσκων, αυτό οφείλεται στην ασυμμετρία που υπάρχει και μετρήθηκε στην άδεια αεροσήραγγα. Για τον μη ομοιόμορφο δίσκο η κατανομή του ελλείματος της ταχύτητας παρουσιάζει μια κωδωνοειδή κατανομή ανεξαρτήτως της έντασης τύρβης στην ροή.

Για τον ομοιόμορφο δίσκο επιτυγχάνεται μεγαλύτερη μείωση ταχύτητας στη στρωτή ροή και με μεγαλύτερο ρυθμό στις άκρες του ομόρρου, και αυτό έχει ως αποτέλεσμα στην κατανομή της έντασης τύρβης να εμφανίζονται δύο άκρες ως μέγιστες τιμές. Αυτές οι άκρες δεν εμφανίζονται σε καμία από τις περιπτώσεις όπου η ροή ήταν πιο τυρβώδης, και αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η ανάμειξη της τύρβης για τον ομοιόμορφο δίσκο δεν εξαρτάται από τη τύρβη εντός του ομόρρου αλλά από τη τύρβη της ροής εισόδου και τις δυνάμεις μεταξύ των διατμητικών στρωμάτων. Τέλος το οριζόντιο τμήμα στον ομόρρου στη στρωτή ροή είναι αποτέλεσμα της ομοιομορφίας του δίσκου που λειτουργεί με τον ίδιο τρόπο που λειτούργησε η σίτα στην είσοδο της ροής (δηλαδή ομογενοποιεί τη ροή), αυτό το χαρακτηριστικό λόγω ανάμειξης χάνεται σε μεγαλύτερες αποστάσεις κατόπιν του δίσκου.

Για τον μη ομοιόμορφο δίσκο αυτό που παρατηρείται και για τις δύο συνθήκες ροής εισόδου είναι ότι η εξέλιξη της τύρβης εντός του ομόρρου είναι πιο έντονη από αυτή του ομοιόμορφου. Αυτή η διαφορά οφείλεται στην παραγωγή τύρβης λόγω της ροής του αέρα εντός των οπών στη διατομή του δίσκου, με αυτό το τρόπο ο ομόρρους αναπτύσσεται πλήρως από τα 5D κιάλας. Η αύξηση της έντασης τύρβης της ροής από την άλλη οδηγεί σε μικρότερα ελλείματα ταχύτητας από αυτά που υπάρχουν στον ομοιόμορφο. Η κατανομή της ταχύτητας είναι κωδωνοειδής λόγω της ακτινικής ανομοιομορφίας της διατομής του δίσκου.

Τα αποτελέσματα από τα πειράματα με στροφή κατά τον κατακόρυφο άξονα έδειξαν ότι η σκόπιμη στροφή του μοντέλου αλλάζει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ομόρρου. Συγκεκριμένα με στροφή  $30^\circ$  επιτυγχάνεται απόκλιση του κέντρου της κατανομής ταχύτητας  $0,5^\circ$  κατά την κατεύθυνση στροφής. Τα αποτελέσματα αυτά είναι λιγότερα ενθαρρυντικά, για τη περιστροφή του μοντέλου ως τεχνική προσανατολισμού του ομόρρου, για την επίτευξη μικρότερων απωλειών ταχύτητας κατόπιν του δίσκου, από αυτά που φαίνονται στη βιβλιογραφία.

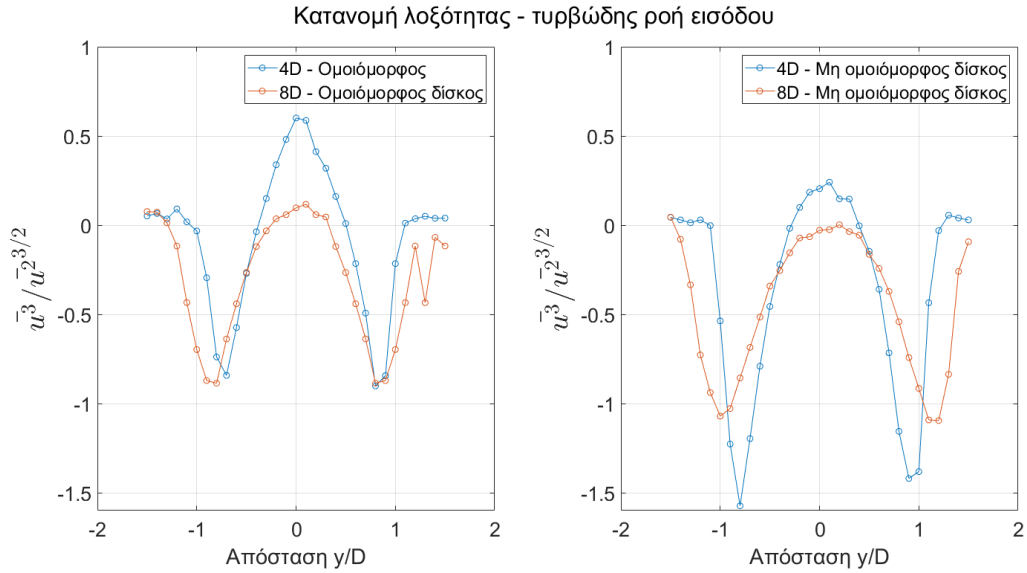
## Bibliography

- [1] Mark Hutchinson, Feng Zhao, "GWEC | GLOBAL WIND REPORT," 2023.
- [2] Magnus K. Vinnes, Stefano Gambuzza, Bharathram Ganapathisubramani, et al, "The far wake of porous disks and a model wind turbine: Similarities and differences assessed by hot-wire anemometry," *Renewable and Sustainable Energy*, p. 18, 2022.
- [3] B. Sanderse, S. P. van der Pijl and B. Koren, "Review of computational fluid dynamics for wind," *Wiley Online Library*, p. 21, 2011.
- [4] Yaling Chen a, Binliang Lin, Jie Lin, Shujie Wang b, "Experimental study of wake structure behind a horizontal axis tidal," *ELSEVIER*, p. 15, 2017.
- [5] Juliaan Bossuyt, Charles Meneveau and Johan Meyers<sup>1</sup>, "Effect of layout on asymptotic boundary layer regime in deep wind farms," *PHYSICAL REVIEW FLUIDS*, p. 28, 2018.
- [6] Wei Tian, Ahmet Ozbay, Hui Hu, "A wind tunnel study of wind loads on a model wind turbine in atmospheric boundary layer winds," *ELSEVIER*, p. 10, 2018.
- [7] S. Aubrun, M. Bastankhah , R.B. Cal , B. Conan , R.J. Hearst , D. Hoek , M. Hölling , M. Huang , C. Hur , B. Karlsen , I. Neunaber , M. Obligado , J. Peinke , M. Percin , L. Sætran , P Schito , B. Schliffke, D. Sims-Williams , O. Uzol , M.K. Vinnes, "Round-robin tests of porous disc models," *Journal of Physics: Conference Series*, p. 11, 2019.
- [8] Wei Yang, Meng Yu , Bowen Yan , Guoqing Huang , Qingshan Yang , Senqin Zhang , Tianhao Hong , Xu Zhou and Xiaowei Deng, "Wind Tunnel Tests of Wake Characteristics for a Scaled Wind Turbine Model Based on Dynamic Similarity," *Energies*, p. 17, 2022.
- [9] G. Vita, "Generating turbulence in Wind tunnel," 2016.
- [10] Giulio Vita , Hassan Hemida , Thomas Andrienne , Charalampos . Baniotopoulos, "Generating atmospheric turbulence using passive grids in an expansion test section of a wind tunnel," *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, p. 14, 2018.
- [11] Jan Bartl, Franz Mühle, Jannik Schottler, Lars Sætran, Joachim Peinke, Muyiwa Adaramola and Michael Hölling, "Wind tunnel experiments on wind turbine wakes in yaw: effects of inflow turbulence and shear," Copernicus Publications on behalf of the European Academy of Wind Energy, 2018.

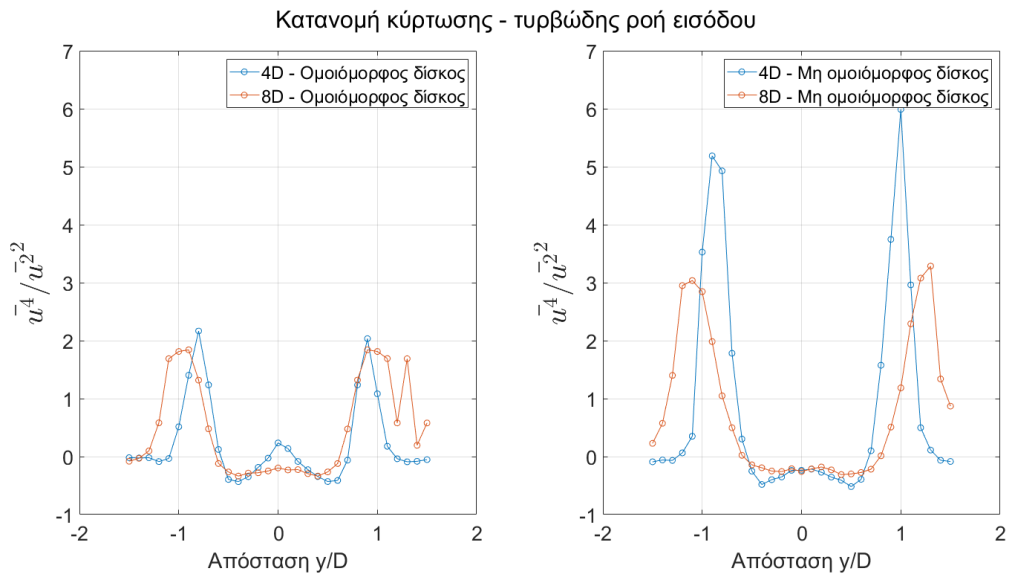
- [12] Sanne de Jong Helvig, Magnus K. Vinnes , Antonio Segalini , Nicholas A. Worth , R. Jason Hearst, "A comparison of lab-scale free rotating wind turbines and actuator disks," *ELSEVIER*, p. 14, 2021.
- [13] S. Aubrun, S. Loyer , P.E. Hancock , P. Hayden, "Wind turbine wake properties: Comparison between a non-rotating simplified wind turbine model and a rotating model," *ELSEVIER*, p. 8, 2013.
- [14] Laboratory of Aerodynamics, "Laboratory of Aerodynamics," [Online]. Available: <http://www.aerolab.mech.ntua.gr/>.
- [15] M. Manolesos, "Experimental and computational study of three-dimensional separation and its control using passive vortex generators," (Ph.D. thesis), Athens, 2013.
- [16] Z. Xing., "Passive Simulation of ABL in a 3.5x2.5m Experimental Wind Tunnel.Master Thesis. China-EU Institute for Clean and Renewable Energy.," 2015.
- [17] K. Scientific, "THERMAL ANEMOMETRY ELECTRONICS, SOFTWARE AND ACCESSORIES," 2013.
- [18] P. Roach, "The generation of nearly isotropic turbulence by means of grids.," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, pp. 82-89, 1987.
- [19] P.W. Bearman , T. Morel, "Effect of free stream turbulence on the flow around bluff bodies," in *Aerospace Science*, 1983, pp. 97-123.
- [20] Y. Nakamura, "Bluff-body aerodynamics and turbulence," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, pp. 65-78, December 1993.
- [21] B. Vickery, "fluctuating lift and drag on a long cylinder of square cross-section in a smooth and in a turbulent stream," *Fluid Mech.*, pp. 48-494, 1966.
- [22] A. Laneville, *Effects of Turbulence on Wind-induced Vibrations of Bluff Cylinders*, 1973.
- [23] D. DYNAMIC, "Measurement Principles of CTA," [Online]. Available: <https://www.dantecdynamics.com/solutions/fluid-mechanics/constant-temperature-anemometry-cta/measurement-principles-of-cta/>.
- [24] H. Bruun, *Hot-wire Anemometry*, Oxford: Oxford University Press, 1995.
- [25] Marcus Hultmark , Alexander J Smits, "Temperature corrections for constant temperature and constant current hot-wire anemometers.," *ResearchGate*, p. 5, 2010.

- [26] TSI THERMAL ANEMOMETRY PROBES, "TSI," 2013. [Online]. Available: [https://tsi.com/getmedia/2e3fafd5-8037-40a9-aa38-4fa05a1d3ef3/Hotwire\\_Catalog\\_2980465?ext=.pdf](https://tsi.com/getmedia/2e3fafd5-8037-40a9-aa38-4fa05a1d3ef3/Hotwire_Catalog_2980465?ext=.pdf).
- [27] P. Welch, The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms., 1967.
- [28] John W. Kurelek , Alexander Piqué, Marcus Hultmark, "Performance of the porous disk wind turbine model at a high Reynolds number: Solidity distribution and length scales effects.," *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, p. 6, 2023.
- [29] Michael F. Howland, Juliaan Bossuyt, Luis A. Martínez-Tossas, Johan Meyers , Charles Meneveau, "Wake structure in actuator disk models of wind turbines in yaw under uniform inflow conditions," *Journal of Renewable Sustainable Energy*, 2016.
- [30] Michael F Howland, Juliaan Bossuyt, Luis A Mart´inez-Tossas, Johan Meyers, and Charles Meneveau., "Wake structure in actuator disk models of wind turbines in yaw under uniform inflow conditions.," *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2016.
- [31] S Macr`i, O Coupiac, N Girard, Annie Leroy, and S Aubrun, "Experimental analysis of the wake dynamics of a modelled wind turbine during yaw manoeuvres.," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1037, 2018.
- [32] Lars Krogera, Joeri Frederikb, Jan-Willem van Wingerdenb, Joachim Peinke and Michael Hollinga, "Generation of user defined turbulent inflow conditions by an active grid for validation experiments," *Journal of Physics*, 2018.
- [33] de Karman T., Howarth L., "On the Statistical Theory of Isotropic Turbulence," *The royal Society*, p. 24, 6 November 1937.

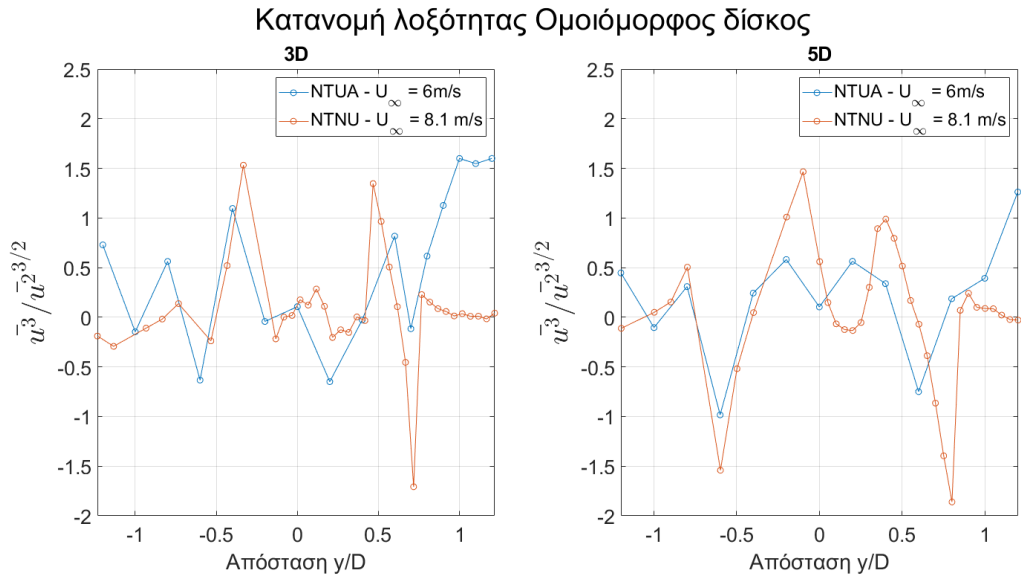
## 6. Παράρτημα



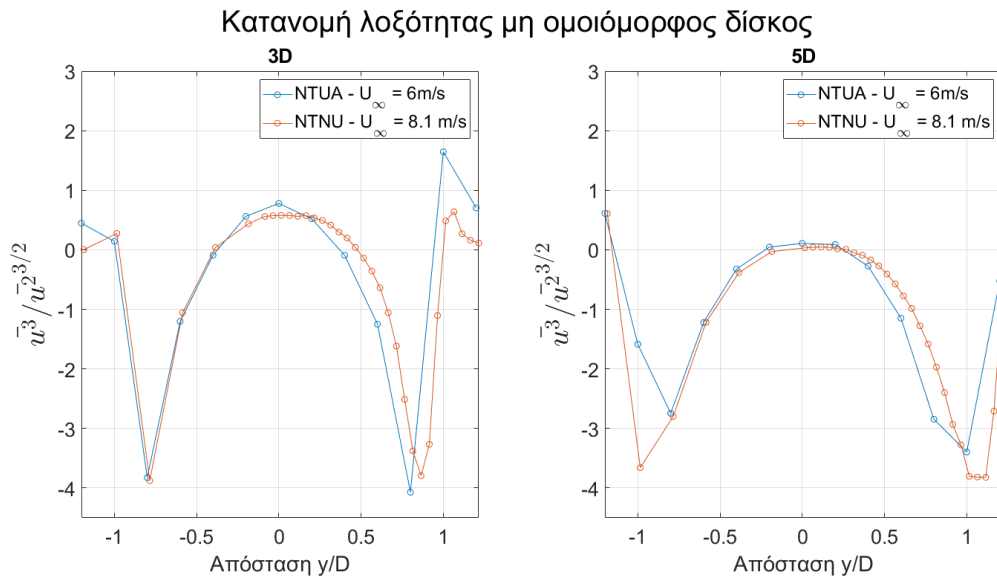
**Διάγραμμα 36– Κατανομή λοξότητας για τυρβώδη ροή εισόδου.**



**Διάγραμμα 37– Κατανομή κύρτωσης για τυρβώδη ροή εισόδου.**

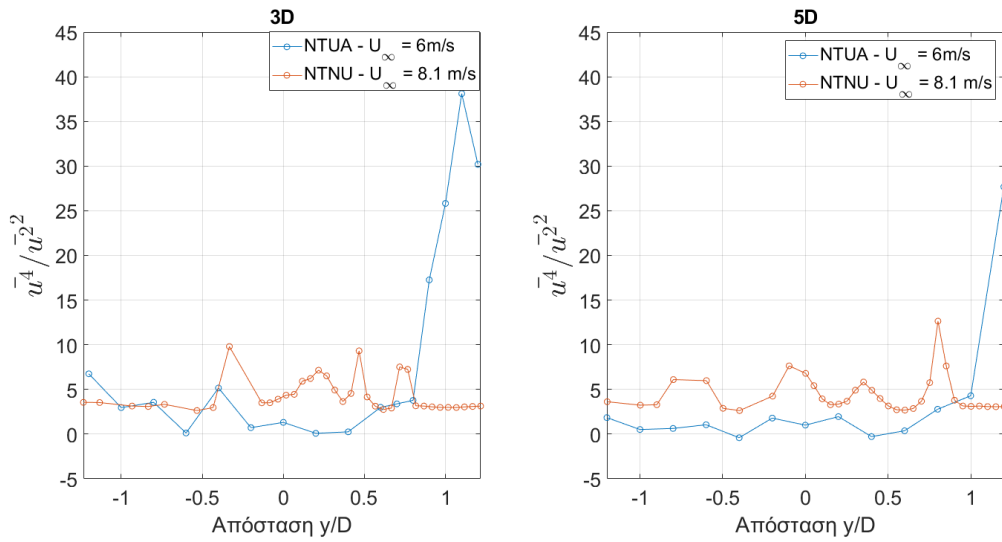


**Διάγραμμα 38 – Κατανομή λοξότητας με χρήση ομοιόμορφου δίσκου σε ομοιόμορφη ρή εισόδου.**



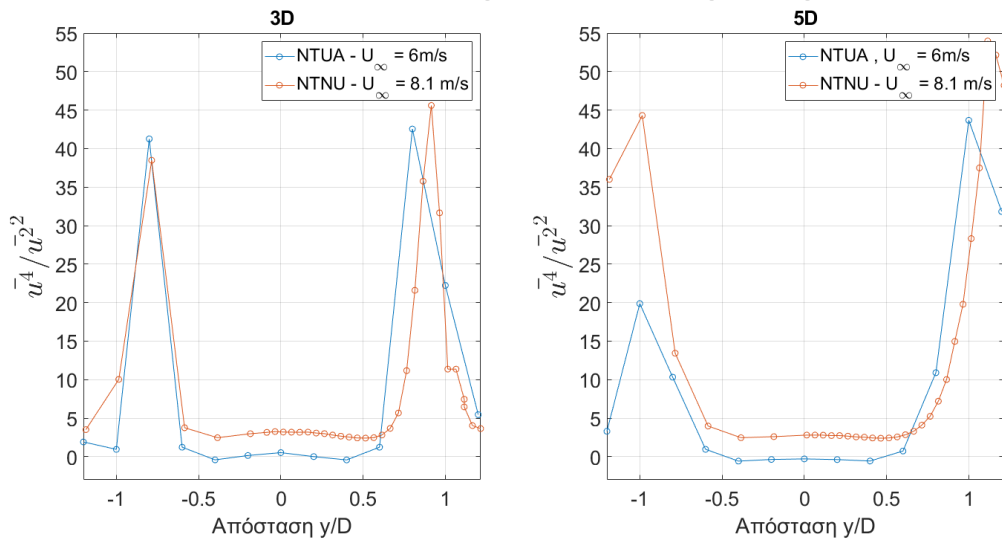
**Διάγραμμα 39– Κατανομή λοξότητας με χρήση μη ομοιόμορφου δίσκου σε ομοιόμορφη ρή εισόδου.**

Κατανομή κύρτωσης Ομοιόμορφος δίσκος



Διάγραμμα 40– Κατανομή κύρτωσης με χρήση ομοιόμορφου δίσκου σε ομοιόμορφη ροή εισόδου.

Κατανομή κύρτωσης μη ομοιόμορφος δίσκος



Διάγραμμα 41– Κατανομή κύρτωσης με χρήση μη ομοιόμορφου δίσκου σε ομοιόμορφη ροή εισόδου.