

**Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών**



***Μετρήσεις, απεικόνιση και πειραματική
αξιολόγηση του πεδίου ροής στο χώρο δοκιμών
της αεροσήραγγας του Εργαστηρίου Σύνθεσης
Ενεργειακών Συστημάτων του ΕΛ.ΜΕ.ΠΑ***

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Εισηγητής: Μετζάκης Εμμανουήλ (ΑΜ 6297)

Επιβλέπων: Κονταξάκης Κωσταντίνος

Ηράκλειο 2023

Σκοπός-Αντικείμενο

Το αντικείμενο της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η καταγραφή και η ανάλυση του πεδίου ροής του ανέμου της αεροσήραγγας του Εργαστηρίου αιολικής ενέργειας του ΕΛΜΕΠΑ. Ο βασικός στόχος αποτελεί η ανάλυση των ποιοτικών χαρακτηριστικών του πεδίου ροής της αεροσήραγγας και η αξιολόγηση των ενδεχόμενων βελτιώσεων που μπορεί να απαιτηθούν. Επιπλέον άλλος ένας στόχος αποτελεί ο προσδιορισμός των παραμέτρων και των συνθηκών που εφαρμόζονται στο πεδίο δοκιμών της αεροσήραγγας.

Περίληψη Πτυχιακής

Στο πρώτο κεφάλαιο της πτυχιακής εργασίας γίνεται εισαγωγή σε βασικές έννοιες της ρευστομηχανικής και στους μεθόδους περιγραφής των πεδίων ροής. Ενώ παράλληλα γίνεται αναφορά στη θεωρία για την ροή των ρευστών και τα είδη που την αποτελούν. Έπειτα εξετάστηκαν τα ιστορικά στοιχεία και η πρώτη εμφάνιση της αεροσήραγγας. Στη συνέχεια, αναλύθηκαν οι όροι της αεροσήραγγας και τα κύρια μέρη που αυτή αποτελείται. Επιπλέον γίνεται περιγραφή των τεχνικών χαρακτηριστικών της αεροσήραγγας του εργαστηρίου και του εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε. Ενώ αναφέρεται η διαδικασία βελτιστοποίησης της ροής του ανέμου με την τοποθέτηση πανιών στον χώρο αποκατάστασης της αεροσήραγγας. Παράλληλα περιγράφεται λεπτομερώς η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε. Τέλος παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων της ταχύτητας ανέμου και της τύρβης, ενώ γίνονται προτάσεις βελτιστοποίησης της μετρητικής διάταξης.

Λέξεις Κλειδιά: Αεροσήραγγα, μέτρηση ταχύτητας ανέμου, μέτρηση τύρβης, προφίλ ανέμου, βαθμονόμηση αισθητήριων, πεδίο ροής, διάγραμμα Kolmogorov.

Scope

The subject of this thesis is the recording and analysis of the wind flow field of the wind tunnel of the H.M.U Wind Energy and Power Systems Synthesis Laboratory. The main objective is to analyze the qualitative characteristics of the wind tunnel flow field and to evaluate the potential improvements that may be required. In addition, another objective is to determine the parameters and conditions applied in the wind tunnel's test field.

Abstract

In the first chapter of the thesis, an introduction is made to the basic concepts of fluid mechanics and the methods of describing flow fields. While at the same time reference is made to the theory of fluid flow and the types that make it up. Then the historical evidence and the first appearance of the wind tunnel are examined. Then, the terms of the wind tunnel and the main parts of which it is composed were analyzed. In addition, the technical characteristics of the laboratory's wind tunnel and the equipment used are described. While the process of optimizing the wind flow by placing fabric in the wind tunnel's rectification area is mentioned. At the same time, the experimental procedure followed is described in detail. Finally, the results of the wind speed and turbulence measurements are presented, while suggestions are made to optimize the measurement layout.

Keywords: Wind tunnel, wind speed measurement, turbulence measurement, wind profile, sensor calibration, flow field, Kolmogorov diagram

Περιεχόμενα

| | |
|---|----|
| Σκοπός-Αντικείμενο..... | 1 |
| Περίληψη Πτυχιακής..... | 1 |
| Λέξεις Κλειδιά..... | 1 |
| SCOPE..... | 2 |
| ABSTRACT..... | 2 |
| Keywords..... | 2 |
| 1. Βασικές Έννοιες Ρευστομηχανικής..... | 6 |
| 1.1 Εισαγωγή..... | 6 |
| 1.1 Μέθοδοι περιγραφής πεδίων ροής..... | 7 |
| 1.2 Είδη Ροής Ρευστών..... | 7 |
| 1.3 Αριθμός Reynolds..... | 8 |
| 2. Χαρακτηριστικά Αεροσηράγγων..... | 10 |
| 2.1 Ιστορική Αναδρομή στις Αεροσήραγγες..... | 10 |
| 2.2 Τι είναι η Αεροσήραγγα..... | 11 |
| 2.3 Διάκριση Αεροσηράγγων..... | 12 |
| 2.4 Υπερηχητικές Αεροσήραγγες..... | 12 |
| 2.5 Υποχητικές Αεροσήραγγες..... | 13 |
| 2.6 Τα κύρια μέρη που αποτελείτε μια αεροσήραγγα..... | 14 |
| 3. Περιγραφή Αεροσήραγγας Εργαστηρίου..... | 17 |
| 4. Συστήματα Μετρήσεων Αεροσήραγγας..... | 24 |
| 4.1 Σωλήνας Pitot-Static..... | 25 |
| 4.2 Διαφορικός αισθητήρας πίεσης (Differential pressure transmitter HD408T)..... | 26 |
| 4.3 Ανεμομετρία θερμού σύρματος Hot-Wire..... | 27 |
| 5. Διαδικασία Τοποθέτησης Πανιών στον Χώρο Αποκατάστασης της Αεροσήραγγας..... | 28 |

| | |
|--|----|
| 5.1 Διαδικασία τοποθέτησης πανιών..... | 31 |
| 6. Βαθμονόμηση Αισθητήριων Αέρα..... | 33 |
| 6.1 Τι είναι η βαθμονόμηση..... | 33 |
| 6.2 Προετοιμασία βαθμονόμησης..... | 33 |
| 6.3 Διαδικασία βαθμονόμησης..... | 34 |
| 6.4 Προβολή δεδομένων βαθμονόμησης..... | 34 |
| 7. Πειραματική Διαδικασία..... | 37 |
| 7.1 Πρότυπο μέτρησης..... | 37 |
| 8. Γραφήματα Απεικόνισης Πεδίου Ροής..... | 42 |
| 8.1 Γραφήματα απεικόνισης κανονικοποιημένου πεδίου ροής για απόσταση 0cm από το ακροφύσιο..... | 42 |
| 8.2 Γραφήματα απεικόνισης κανονικοποιημένου πεδίου ροής για απόσταση 15cm από το ακροφύσιο. | 44 |
| 8.3 Γραφήματα απεικόνισης κανονικοποιημένου πεδίου ροής για απόσταση 30cm από το ακροφύσιο. | 46 |
| 8.4 Γραφήματα απεικόνισης κανονικοποιημένου πεδίου ροής για απόσταση 45cm από το ακροφύσιο. | 47 |
| 8.5 Γραφήματα απεικόνισης κανονικοποιημένου πεδίου ροής για απόσταση 60cm από το ακροφύσιο. | 50 |
| 9. Τύρβη..... | 52 |
| 9.1 Τι είναι η τύρβη ή τυρβώδης ροή..... | 52 |
| 9.2 Υπολογισμό Τύρβης..... | 53 |
| 10. Γραφήματα Απεικόνισης Τύρβης..... | 54 |
| 10.1 Γραφήματα απεικόνισης της επι % τύρβης για απόσταση 0cm από το ακροφύσιο. | 54 |
| 10.2 Γραφήματα απεικόνισης της επι % τύρβης για απόσταση 15cm από το ακροφύσιο..... | 56 |
| 10.3 Γραφήματα απεικόνισης της επι % τύρβης για απόσταση 30cm από το ακροφύσιο. | 57 |

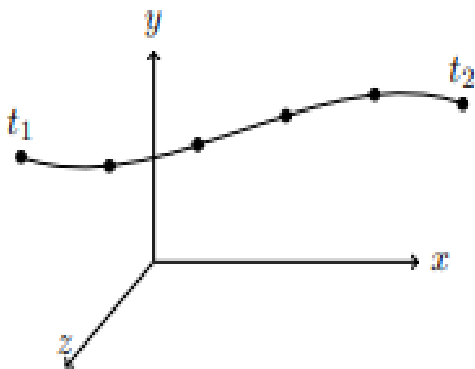
| | |
|---|----|
| 10.4 Γραφήματα απεικόνισης της επι % τύρβης για απόσταση 45cm από το ακροφύσιο. | 60 |
| 10.5 Γραφήματα απεικόνισης της επι % τύρβης για απόσταση 60cm από το ακροφύσιο. | 62 |
| 11. Γραφήματα ταχύτητας ανέμου σε οριζόντια και κατακόρυφη τομή..... | 64 |
| 11.1 Γραφήματα απεικόνισης ταχύτητας ανέμου σε κατακόρυφη τομή A-A, στο $X=0$ για απόσταση 0-60cm. | 64 |
| 11.2 Γραφήματα απεικόνισης ταχύτητας ανέμου σε οριζόντια τομή B-B, $Y=0$ για απόσταση 0-60cm..... | 67 |
| 12. Διάγραμμα Kolmogorov..... | 70 |
| 12.1 Ιστορικά στοιχεία..... | 70 |
| 12.2 Ο Νόμος του Kolmogorov $-5/3$ | 71 |
| 12.3 Εφαρμογή του νόμου Kolmogorov στην Αεροσήραγγα του εργαστήριου..... | 72 |
| 13. Συμπεράσματα-Παρατηρήσεις..... | 73 |
| 13.1 Συμπεράσματα από τα γραφήματα της ταχύτητας ανέμου..... | 73 |
| 13.2 Συμπεράσματα από τα γραφήματα τύρβης..... | 75 |
| 14. Προτάσεις Βελτίωσης..... | 78 |
| 15. Βιβλιογραφία..... | 79 |

1. Βασικές Έννοιες Ρευστομηχανικής

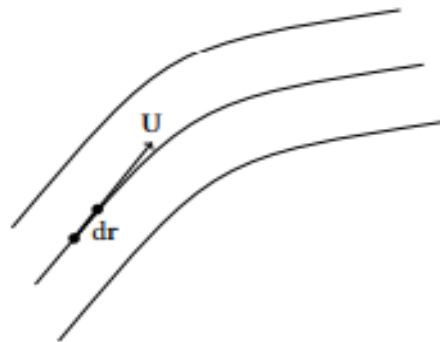
1.1 Εισαγωγή

Ρευστό ονομάζουμε την ουσία οποία παραμορφώνεται συνεχώς όταν υπόκειται σε διατρητική τάση. Η διαδικασία αυτή της συνεχούς παραμόρφωσης των ρευστών ονομάζεται ροή. Ονομάζουμε τότε πεδίο ροής εκείνη την περιοχή του χώρου μέσα στην οποία λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της ροής και στην οποία σε κάθε σημείο της όλα τα φυσικά μεγέθη που την περιγράφουν έχουν συγκεκριμένη τιμή.

Ακόμα ως τροχιά ορίζεται εκείνη η καμπύλη που σχηματίζει ένα ροϊκό στοιχείο καθώς αυτό κινείται μέσα στο πεδίο ροής από μία αρχική χρονική στιγμή t_1 σε μία τελική χρονική στιγμή t_2 . Ενώ η φανταστική γραμμή η οποία έχει την ιδιότητα σε κάθε σημείο την να έχει εφαπτόμενο το διάνυσμα της ταχύτητας ονομάζεται γραμμή ροής



Εικόνα 1: Τροχιά ροϊκού στοιχείου.



Εικόνα 2: Γραμμές Ροής σε πεδίο.

1.1 Μέθοδοι περιγραφής πεδίων ροής

Η μαθηματική έκφραση των πεδίων ροής εξαρτάται από το σύστημα αναφοράς ως προς το οποίο ανάγεται η κίνηση του ρευστού. Το σύστημα αυτό μπορεί να είναι ακίνητο (ακίνητος παρατηρητής) ή να κινείται (κινούμενος παρατηρητής) ως προς το θεωρούμενο πεδίο. Η μέθοδος περιγραφής των πεδίων ροής ως προς ακίνητο σύστημα αναφοράς ονομάζεται *μέθοδος Euler* και εκείνη ως προς κινούμενο σύστημα *μέθοδος Lagrange*.

Μέθοδος Lagrange

Κατά τη μέθοδο Lagrange ο παρατηρητής παρακολουθεί την κίνηση ενός συγκεκριμένου σωματιδίου ρευστού και περιγράφει τις μεταβολές των ιδιοτήτων του καθώς αυτό κινείται μέσα στο πεδίο ροής. Κατά τη διάρκεια της κίνησης του, το σωματίδιο μπορεί να παραμορφώνεται αλλά η ποσότητα και τα μόρια του ρευστού

που το αποτελούν παραμένουν τα ίδια. Η μέθοδος αυτή αποτελεί την κύρια μέθοδο περιγραφής της κίνησης των στερεών σωμάτων. Ενώ στην Μηχανική ρευστών έχει εφαρμογή σε ορισμένα ειδικά προβλήματα ροής, όπως είναι π.χ η κίνηση σταγόνων υγρού ή φυσαλίδων αερίου σε ετερογενή μείγματα ρευστών.

Μέθοδος Euler

Κατά τη μέθοδο Euler, ο παρατηρητής εστιάζει την προσοχή του σε ένα ορισμένο σημείο ή σε μια ορισμένη περιοχή του χώρου σταθερού όγκου και εξετάζει τις μεταβολές των ιδιοτήτων του ρευστού στην περιοχή αυτή, καθώς η τελευταία καταλαμβάνεται συνεχώς από διαφορετικά σωματίδια ρευστού. Όποτε αυτή η μέθοδος βοηθάει να μάθουμε την τιμή ενός ορισμένου φυσικού μεγέθους σε κάποιο σημείο του πεδίου ροής.

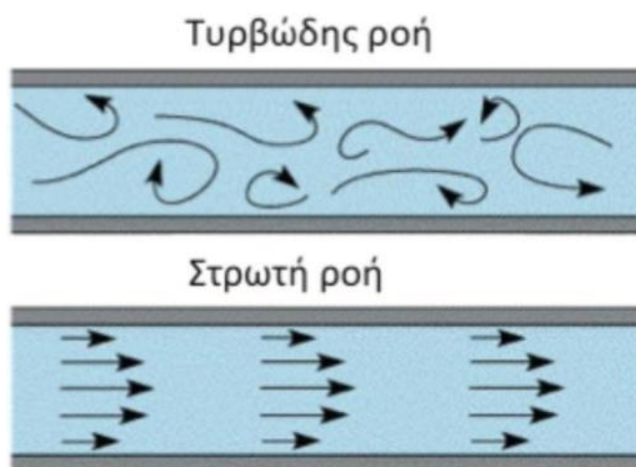
1.2 Είδη Ροής Ρευστών

Ιδανική Ροή: Ονομάζεται η ροή που στο εσωτερικό της δεν ασκούνται τριβές ή άλλου είδους δυνάμεις. Τα ρευστά που την πραγματοποιούν ονομάζονται *Ιδανικά Ρευστά* που τα οποία έχουν και μηδενικό ιξώδες.

Πραγματική Ροή: Είναι η ροή στην οποία αρκούνται διατρητικές τάσης και τριβές μεταξύ των μορίων και των τοιχωμάτων. Τα ρευστά αυτά ονομάζονται *Πραγματικά Ρευστά* και τα συναντάμε στην φύση.

Στρωτή ή Ομαλή ροή: Λέγεται η ροή εκείνη που τα σωματίδια του ρευστού κινούνται ομαλά και παράλληλα μεταξύ τους σε στοιβάδες και υπάρχει μοριακή μεταφορά ορμής και θερμότητας μεταξύ των στρωμάτων του ρευστού.

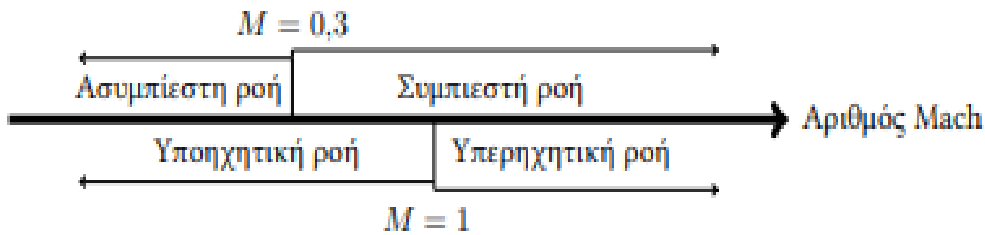
Τυρβώδη ή Στροβιλώδης Ροή: Ονομάζεται η ροή εκείνη κατά την οποία οι ροϊκές γραμμές έχουν την μορφή ακανόνιστων χασοτικών καμπυλών και η μεταφορά μάζας ορμής και ενέργειας επιτυγχάνεται μεταξύ διαφορετικών περιοχών ροής.



Εικόνα 3: Αναπαράσταση για την τυρβώδη και στρωτή ροή.

Ασυμπίεστη Ροή: Ονομάζεται η ροή ρευστού (πραγματικού ή ιδανικού) κατά την οποία οι μεταβολές της πυκνότητας σε όλη την έκταση του πεδίου ροής είναι αμελητέες.

Συμπιεστή Ροή: Ονομάζεται η ροή κατά της οποίες η μεταβολές της πυκνότητας είναι σημαντικές. Τα φαινόμενα αυτά εμφανίζονται όταν μεταβάλλεται η ταχύτητα του ρευστού σε υψηλές ταχύτητες (0,3Mach).



Εικόνα 4: Διάκριση ροής σύμφωνα με την τιμή του αριθμού Mach.

1.3 Αριθμός Reynolds

Ο Osborne Reynolds ήταν ο πρώτος ερευνητής που ασχολήθηκε συστηματικά με τη μελέτη της ροής ρευστών σε αγωγούς κυκλικής διατομής. Ο Reynolds κατάφερε μέσα από πειράματα να διασαφηνίσει πλήρως τα δύο είδη ιξώδους ροής και να παρουσιάσει τη βασική παράμετρο η οποία φέρει και το όνομά του (Αριθμός Reynolds, Re) ως κριτήριο που χαρακτηρίζει το είδος της ροής.

Για ροή σε αγωγούς κυκλικής διατομής, ο αριθμός Reynolds της ροής δίνεται από τη σχέση:

$$Re = \frac{\rho * u * d}{\mu}$$

Όπου d είναι η εσωτερική διάμετρος του αγωγού, ρ η πυκνότητα, μ το δυναμικό ιξώδες και u η μέση ταχύτητα του ρευστού. Αν ο λόγος μ/ρ αντικατασταθεί με το κινηματικό ιξώδες ν , ο αριθμός Reynolds γράφεται:

$$Re = \frac{u * d}{\nu}$$

Ο αριθμός Reynolds εκφράζει το λόγο των δυνάμενων αδράνειας προς τις δυνάμεις τριβής που ασκούνται στο ρευστό.

Η ροή μετατρέπεται από στρωτή σε τυρβώδη όταν ο αριθμός Reynolds αποκτήσει μια κρίσιμη τιμή Re_{cr} , η οποία είναι γνωστή ως κρίσιμος αριθμός Reynolds. Για ροή σε αγωγό, ο κρίσιμος αριθμός Reynolds εξαρτάται από την τραχύτητα των εσωτερικών τοιχωμάτων του αγωγού και κυρίως από τις αρχικές διαταραχές της ροής (δηλαδή της διαταραχές που συμβαίνουν κατά την είσοδο του ρευστού στον αγωγό). Σε αγωγούς η ροή μετατρέπεται από στρωτή σε τυρβώδη για αριθμούς Reynolds με τιμές ανάμεσα σε 2000 και 4000. Στην πράξη θεωρείται πως η ροή μεταβαίνει από στρωτή σε τυρβώδη όταν ο αριθμός Reynolds ξεπεράσει την τιμή 2320 δηλαδή:

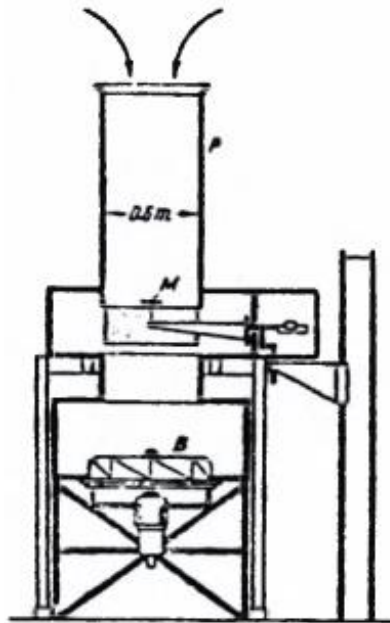
$$Re_{Cr} = 2320.$$

2. Χαρακτηριστικά Αεροσηράγγων

2.1 Ιστορική Αναδρομή στις Αεροσήραγγες

Ιστορικά αυτός που ασχολήθηκε συστηματικά με τα προβλήματα που δημιουργούσε ο άνεμος στα κτίρια ήταν Γάλλος μηχανικός Gustave Eiffel που, μετά την ανέγερση τον ομώνυμου πύργου στο Παρίσι, στράφηκε αποκλειστικά στην Αεροδυναμική. Αργότερα στις αρχές τον αιώνα μας, αρχή της εποχής του αεροπλάνου και αύξηση της ταχύτητας των τραίνων και των αυτοκινήτων δημιούργησαν τις αιτίες και τις βάσεις για την ανάπτυξη της επιστήμης της Αεροδυναμικής. Βέβαια, δεν είναι εύκολο να ονομάσουμε κάποιον ερευνητή “πατέρα” της Αεροδυναμικής, αλλά στους πρώτους αξιόλογους επιστήμονες και ερευνητές πρέπει να αναφέρουμε, εκτός από τον Eiffel, τους αδελφούς Wright, τον Joukowski, τον Prandtl, τον Stanton.

Πρώτος κατασκευαστής αεροσήραγγας θεωρείται συνταγματάρχης Renard το 1896 [Pankhurst & Holder 1965], αλλά οι βασικές αρχές για την κατασκευή και λειτουργία των σύγχρονων αεροσηράγγων εφαρμόστηκαν λίγα χρόνια αργότερα. Έτσι, πρώτη αεροσήραγγα κατασκευάστηκε από τον T.E. Stanton στο Εθνικό Εργαστήριο Φυσικής στο Λονδίνο το 1903. Στην αεροσήραγγα αυτή που φαίνεται στο Σχήμα 5 αέρας αναρροφιόταν από έναν ανεμιστήρα μέσω του σωλήνα και στη συνέχεια έρεε γύρω από το δοκιμαζόμενο μοντέλο Μ. Στο σημείο αυτό, σωλήνας διευρυνόταν, σχηματίζοντας ένα μεγάλο δοχείο μέσα στο οποίο υπήρχε ένας πολύ ευαίσθητος ζυγός.



Εικόνα 5: Η πρώτη αεροσήραγγα του T.E. Stanton (Pope&Harper 1966).

2.2 Τι είναι η Αεροσήραγγα

Μια αεροσήραγγα είναι ένα εργαλείο που χρησιμοποιείται στην αεροδυναμική έρευνα για να μελετήσει τις επιπτώσεις του αέρα που κινείται γύρω από τα στερεά αντικείμενα. Μια αεροσήραγγα αποτελείται από ένα σωληνοειδές πέρασμα με το υπό δοκιμή αντικείμενο τοποθετημένο στη μέση. Ο αέρας κινείται κατά μήκος του αντικειμένου μέσω ενός ισχυρού συστήματος ανεμιστήρων ή άλλων μέσων. Το υπό δοκιμή αντικείμενο, που συχνά ονομάζεται μοντέλο αεροσήραγγας, είναι εξοπλισμένο με κατάλληλους αισθητήρες για τη μέτρηση των αεροδυναμικών δυνάμεων, της κατανομής πίεσης ή άλλων αεροδυναμικών χαρακτηριστικών.



Εικόνα 6: Αεροσήραγγα της NASA με μοντέλο αεροπλάνου προς εξέταση.

2.3 Διάκριση Αεροσηράγγων

Οι αεροσήραγγες, συνήθως, ταξινομούνται με τα ακόλουθα τρία κριτήρια:

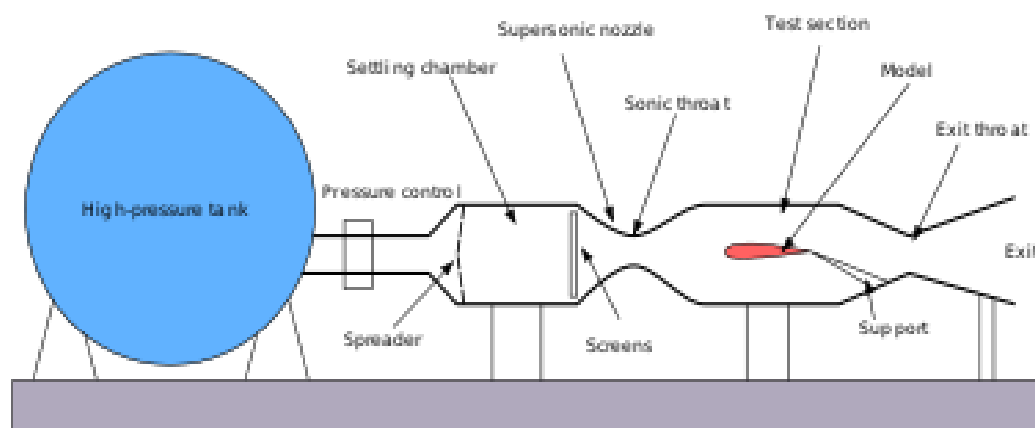
- i) Την ταχύτητα της ροής στον θάλαμο μετρήσεων.
- ii) Το είδος του θαλάμου μετρήσεων.
- iii) Αν είναι ανοιχτού ή κλειστού κυκλώματος

Ως προς την ταχύτητα, αυτές μπορούν να διακριθούν σε:

- i) Χαμηλών υποηχητικών ταχυτήτων ($U < 60$ έως 70 m/s).
- ii) Υψηλών υποηχητικών ταχυτήτων ($0,2 < M < 0,9$)
- iii) Διηχητικές ($0,9 < M < 1,2$).
- iv) Υπερηχητικές ($1,2 < M < 5$)
- v) Υπέρ-υπερηχητικές ($5 < M$)

2.4 Υπερηχητικές Αεροσήραγγες

Υπερηχητική Αεροσήραγγα ονομάζεται γιατί παράγει υπερηχητικές ταχύτητες ($1,2 < M < 5$). Ο αριθμός και η ροή των Mach καθορίζονται από τη γεωμετρία του ακροφυσίου της αεροσήραγγας. Μπορούμε να μεταβάλουμε τον αριθμό των Reynolds αλλάζοντας την πυκνότητα στο θάλαμο αποκατάστασης. Η ισχύς που απαιτείται για τη λειτουργία μιας υπερηχητικής αεροσήραγγας είναι τεράστια, της τάξης των 50 MW ανά τετραγωνικό μέτρο εμβαδού διατομής του τμήματος δοκιμής. Για αυτό το λόγο, οι περισσότερες αεροσήραγγες ανέμου λειτουργούν κατά διαστήματα χρησιμοποιώντας ενέργεια αποθηκευμένη σε δεξαμενές υψηλής πίεσης.

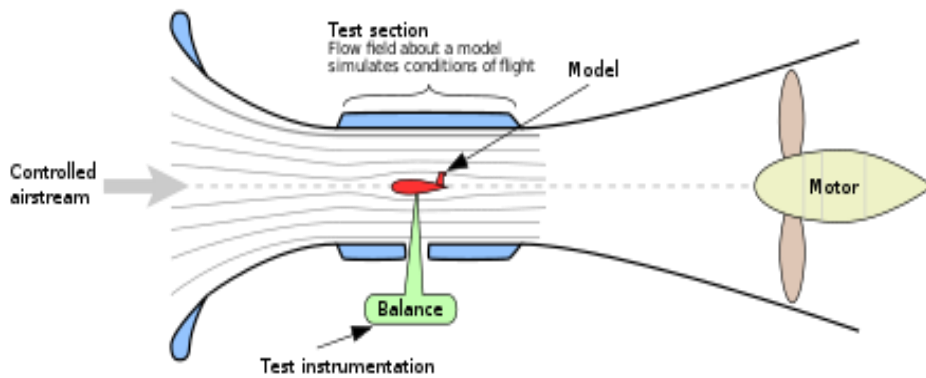


Εικόνα 7: Υπερηχητική αεροσήραγγα.

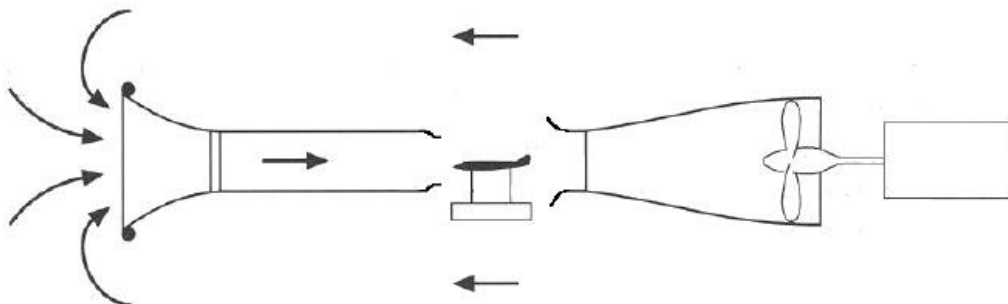
2.5 Υποηχητικές Αεροσήραγγες

Οι υποηχητικές αεροσήραγγες χρησιμοποιούνται για ταχύτητες ($\sim 134\text{m/s}$, $M=0,40$). Ενώ χωρίζονται σε δύο κατηγορίες σε ανοικτού και κλειστού κύκλου με την πρώτη να είναι ο πιο απλό και διαδεδομένος τρόπος. Οι αεροσήραγγες που έχουν διατομή θαλάμου από 60 τετραγωνικά εκατοστά και κάτω, είναι κυρίως ανοικτού κυκλώματος γνωστή ως (Eiffel). Σε αντίθεση με τις μεγάλες υποηχητικές αεροσήραγγες που είναι κλειστού τύπου (close circuit).

- Μια αεροσήραγγα χαρακτηρίζεται ανοικτού κυκλώματος όταν τροφοδοτείται από αέρα του περιβάλλοντος και αυτός κάνοντας ευθύγραμμη κίνηση βγαίνει πάλι στο περιβάλλον.
- Οι αεροσήραγγες ανοικτού κυκλώματος χωρίζονται, σε αυτές που έχουν ανοικτό και σε αυτές με κλειστό χώρο δοκιμών (opencircuit – closedjet και opencircuit-openjet).

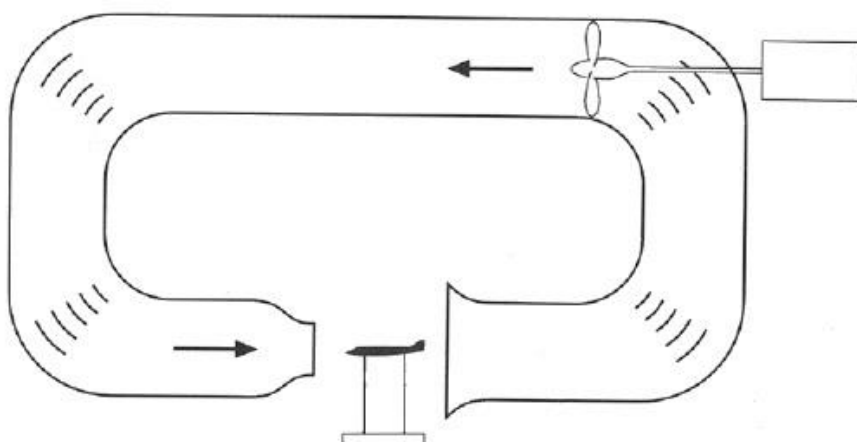


Εικόνα 8: Αεροσήραγγα ανοικτού κυκλώματος με κλειστό χώρο δοκιμών.

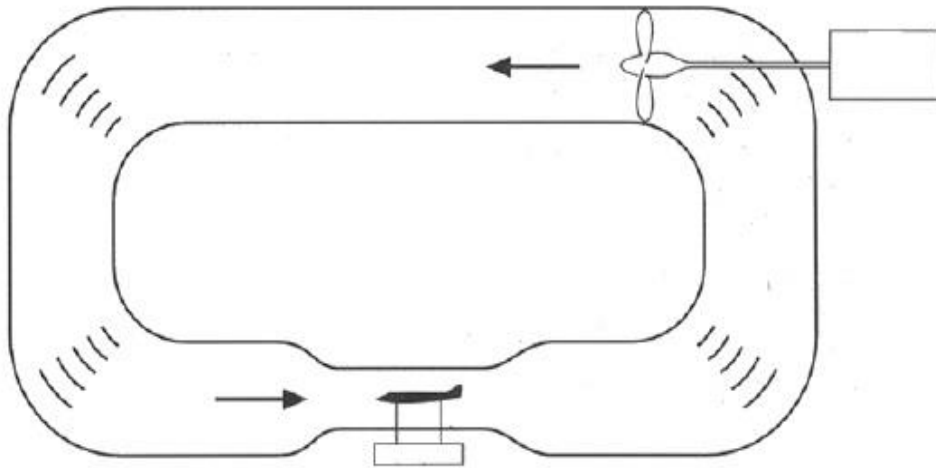


Εικόνα 9: Αεροσήραγγα ανοικτού κυκλώματος με ανοικτό χώρο δοκιμών.

Παράλληλα υπάρχουν και οι αεροσήραγγες με κλειστό κύκλωμα αέρος (close-circuit) στις οποίες ο αέρας κινείται μέσα σε ένα βρόγχο. Η κατηγορία αυτή είναι γνωστή ως (Prandtl/ Gottinger type). Επίσης και σε αυτή τη κατηγορία υπάρχουν διακρίσεις σύμφωνα με τον χώρο δοκιμών. Οι αεροσήραγγες με κλειστό κύκλωμα αέρος διακρίνονται σε ανοικτού και κλειστού χώρου δοκιμών close-circuit openjet αντίστοιχα close-circuit closejet.



Εικόνα 10: Αεροσήραγγα κλειστού κυκλώματος με ανοικτό χώρο δοκιμών.

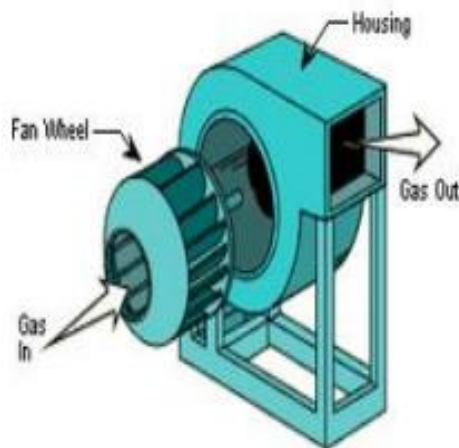


Εικόνα 11: Αεροσήραγγα κλειστού κυκλώματος με κλειστό χώρο δοκιμών.

2.6 Τα κύρια μέρη που αποτελείται μια αεροσήραγγα

Ανεμιστήρας:

Ο ανεμιστήρας μιας αεροσήραγγας (γενικά αποδεκτός είναι ένας αξονικός ανεμιστήρας και πιο συγκεκριμένα τύπου έλικας) θα πρέπει να βρίσκεται όσο το δυνατόν πιο μακριά από τον θάλαμο μετρήσεων έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται η επίδραση της τύρβης που αυτός παράγει στον θάλαμο μετρήσεων. Το μέγεθος του ανεμιστήρα αποτελεί μια κρίσιμη επιλογή καθώς ένας μικρός ανεμιστήρας είναι χαμηλής απόδοσης ενώ σε έναν μεγάλο παρουσιάζεται το φαινόμενο του πτερυγισμού των πτερυγίων του με αποτέλεσμα την απόκτηση ενός «παλλόμενου» ροϊκού πεδίου. Ο ανεμιστήρας συνήθως τοποθετείται σε εκείνο το τμήμα της αεροσήραγγας όπου η εγκάρσια διατομή του είναι 1.5 έως 2 φορές την διατομή του θαλάμου μετρήσεων.



(α)

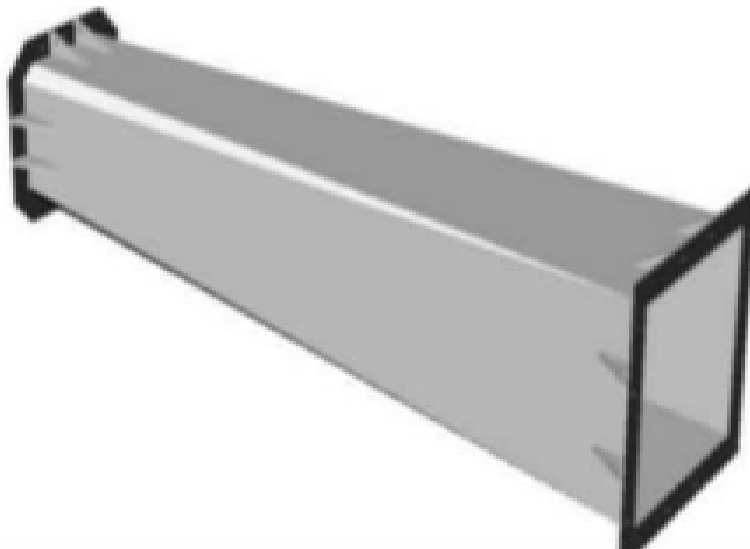


(β)

Εικόνα 12: (α) Ανεμιστήρας φυγοκεντρικού τύπου (β) Ανεμιστήρας αξονικού τύπου

Διαχύτης:

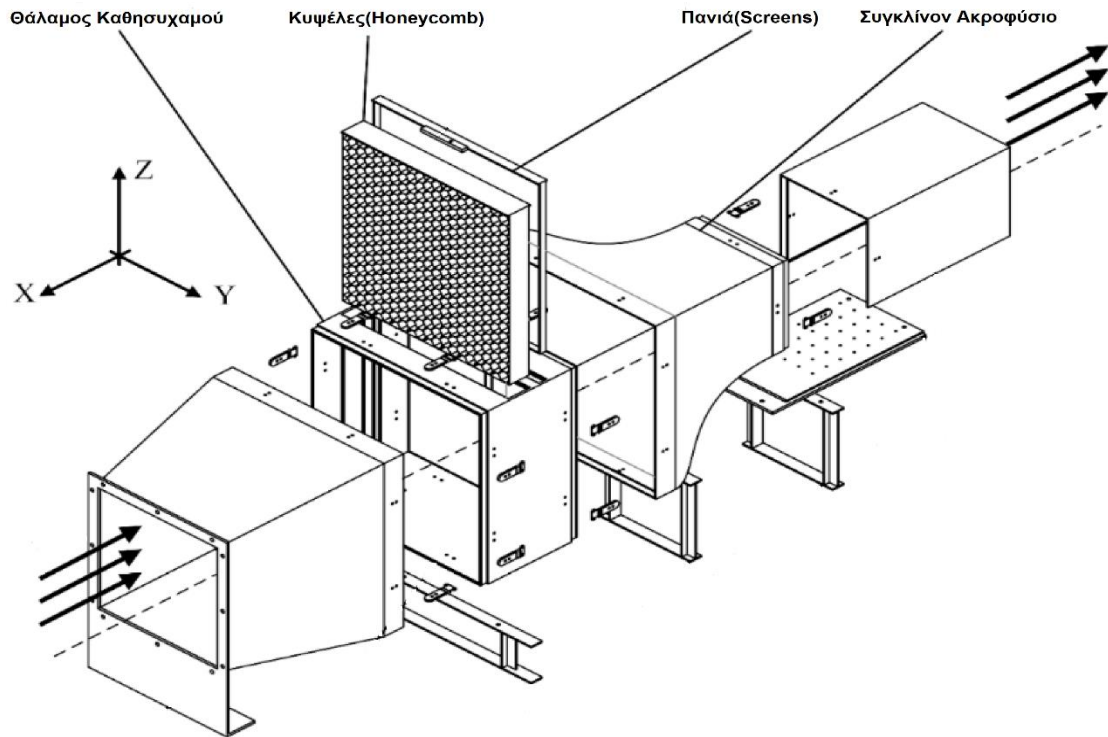
Οι διαχύτες στις υποηχητικές αεροσήραγγες χρησιμοποιούνται για την επιβράδυνση της ροής (δηλαδή την μετατροπή της δυναμικής πίεσης σε στατική) με κύριες απαιτήσεις την ελαχιστοποίηση των ενεργειακών απωλειών και την διατήρηση της ομοιομορφίας του ροϊκού πεδίου. Με ένα γενικό κανόνα να λέει ότι η γωνία που θα πρέπει να έχει ο διαχύτης να είναι από 5-10 μοίρες με την επικρατέστερη επιλογή να είναι οι 7 μοίρες.



Εικόνα 13: Κώνος διάχυσης.

Θάλαμος καθυσυχασμού:

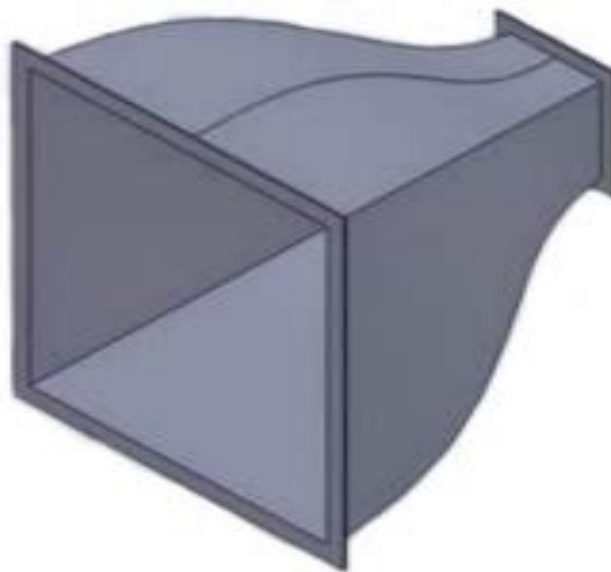
Το τμήμα αυτό της αεροσήραγγας που περιλαμβάνει τις κυψελίδες και τα πλέγματα καλείται θάλαμος καθυσυχασμού της ροής ή θάλαμος εξομαλύνσεως της ροής (settling chamber). Η τοποθέτηση κυψελίδων ή πλεγμάτων ή και των δύο μαζί αποσκοπεί την βελτίωση της ποιότητας της ροής που εισέρχεται στο ακροφύσιο και κατά συνέπεια στον θάλαμο μετρήσεων. Πιο συγκεκριμένα οι κυψελίδες μειώνουν τις ακανόνιστες ή άτακτες διευθύνσεις κίνησης του ροϊκού πεδίου οδηγώντας αυτό κατά διεύθυνση παράλληλη προς τον διαμήκη άξονα της αεροσήραγγας ενώ ταυτόχρονα αποκόπτουν τους μεγάλους δυναμικούς στροβίλους (δίνες) του προσπίπτοντος ροϊκού πεδίου σε μικρότερους οι οποίοι μπορούν να αποσβεσθούν ταχύτερα από τους αρχικούς προσπίπτοντος ροϊκού πεδίου σε μικρότερους οι οποίοι μπορούν να αποσβεσθούν ταχύτερα από τους αρχικούς.



Εικόνα 14: Θάλαμος καθησυχασμού.

Ακροφύσιο:

Ακροφύσιο είναι το τμήμα εκείνο της αεροσήραγγας στο οποίο η ταχύτητα της ροής επιταχύνεται κατά συνεχή τρόπο από τον θάλαμο καθησυχασμού της ροής μέχρι τον θάλαμο μετρήσεων και ταυτόχρονα δίνει μια ομοιόμορφη κατανομή της ταχύτητας στην έξοδό του.



Εικόνα 15: Συγκλίνων ακροφύσιο.

3. Περιγραφή Αεροσήραγγας Εργαστηρίου

Η αεροσήραγγα του Εργαστηρίου αιολικής ενέργειας είναι ανοικτού τύπου με ανοικτό χώρο δοκιμών. Η διατομή του ακροφυσίου εξόδου είναι 650mm ύψος και 650mm πλάτος. Η γεωμετρία και η διαστάσεις (σε χιλιοστά) φαίνονται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 16: Σκαρίφημα της αεροτομής του εργαστηρίου.



Εικόνα 17: Η αεροσήραγγα του εργαστηρίου.

Τα τμήματα της αεροσήραγγας του εργαστηρίου αιολικής ενέργειας από τα οποία αποτελείται είναι:

1. **Τον ανεμιστήρα** που πρόκειται για μια φυγοκεντρική αντλία, τύπου NICOTRA VRE ADH 710R με ισχύ 14,7kW, διαστάσεων 850x850 με παροχή 45000 m³/h

και ονομαστικές στροφές 850rpm. Η οποία περιστρέφεται με τη βοήθεια ενός τριφασικού κινητήρα 18,5kW. Παράλληλα ο κινητήρας ελέγχεται από ένα inverter που μέσω της συχνότητας του τις στροφές του κινητήρα.



Εικόνα 18: Ο φυγοκεντρικός ανεμιστήρας μαζί με τον κινητήρα.

Η λειτουργία του κινητήρα ελέγχεται από ένα **inverter** SIEMENS 6SE6430-2UD31-8DA0. Ο inverter τροφοδοτείται με 380-480V \pm 10%, με συχνότητα 47-63Hz, η ροπή ισχύς 18,5KW με υπερφόρτωση 110% 60s, 140% 3s. Οι παράμετροι που τοποθετήθηκαν για την σωστή λειτουργία του inverter είναι οι εξής:

| Κωδικός Παραμέτρου | Περιγραφή Παραμέτρου | Επιλογή Παραμέτρου | Σελίδα στο εγχειρίδιο οδηγιών |
|---------------------------|---|---------------------------|--------------------------------------|
| P0003 | User access level: 1 Standard 2 Extended 3 Expert | 1 | 25 |
| P0004 | Parameter filter: 0 All parameters 2 Inverter 3 Motor 4 Speed sensor | 0 | 25 |
| P0010 | Commissioning parameter filter: 0 Ready 1 Quick commissioning | 1 | 27 |

| | | | |
|-------|--|----------|----|
| | 30 Factory setting | | |
| P0100 | Europe/North America: 0 Europe (kW) frequency default 50Hz 1 North America (hp) frequency default 60Hz 2 North America (KW) frequency default 60Hz | 0 | 42 |
| P0205 | Inverter application: 0 Constant torque 1 Variable torque | 1 | 45 |
| P0300 | Select motor voltage: 1 Asynchronous motor 2 Synchronous motor | 1 | 50 |
| P0304 | Rated motor voltage | 400V | 51 |
| P0305 | Rated motor current | 35 | 52 |
| P0307 | Rated motor power | 18.5Kw | 52 |
| P0307 | Rated motor cosPhi | 0.82 | 53 |
| P0309 | Rated motor efficiency | 0.75% | 53 |
| P0310 | Rated motor frequency | 50 Hz | 53 |
| P0311 | Rated motor speed | 1465 RPM | 53 |
| P0335 | Motor cooling: 0 Self-cooled: Using shaft mounted fan attached to the motor. 1 Force-cooled: Using a separately cooling fan 2 Self-cooled and internal fan 3 Force-cooled and internal fan | 0 | 55 |
| P0640 | Motor overload factor | 150% | 74 |
| P0700 | Selection of command source: 0 Resets the digital to the factory default setting 1 BOP (drive inverter keypad) 2 Terminal strip 4 USS on BOP link 5 USS on COM link 6 CB on COM link | 2 | 75 |

| | | | |
|-------|--|------|-----|
| P0757 | Value X1 (V) | 0 | 89 |
| P0758 | Value Y1 (%) | 0 | 90 |
| P0759 | Value X2 (V) | 10 | 91 |
| P0760 | Value Y2 (%) | 140 | 91 |
| P1000 | Selection of frequency setpoint: 1 Motorized potentiometer setpoint 2 Analog input 3 Fixed frequency setpoint 4 USS on BOP link 5 USS on COM link 6 CB on COM link 7 Analog input 2 | 2 | 110 |
| P1080 | Min frequency | 0 Hz | 127 |
| P1082 | Max frequency | 70Hz | 128 |
| P1120 | Ramp-up time | 10 | 131 |
| P1121 | Ramp-down time | 10 | 132 |
| P1135 | OFF 3 ramp-down time | 5 | 135 |
| P1300 | Control mode: 0 V/F with linear characteristic 1 V/F with FCC 2 V/F with parabolic characteristic 3 V/F with programmable characteristic 5 V/F for textile applications 6 V/F with FCC for textile applications 19 V/F control with independent voltage setpoint 20 Sensorless Vector control | 0 | 153 |
| P1500 | Selection of torque setpoint 0 No main setpoint 2 Analog setpoint 4 USS on BOP link 5 USS on COM link 6 CB on COM link 7 Analog setpoint 2 | 0 | 173 |
| P1910 | Select motor data identification | 0 | 180 |

| | | | |
|-------|--|----|-----|
| P2000 | Reference frequency | 80 | 192 |
| P3900 | End of quick commissioning: 0 No quick commissioning 1 Motor calculation and reset of all of the other parameters 2 Motor calculation and reset of the I/O setting to the factory setting 3 Only motor calculation. The other parameters are not reset. | 1 | 257 |

Πίνακας 1: Παράμετροι λειτουργίας inverter



Εικόνα 19: Ο inverter μαζί με τον γενικό διακόπτη.

2. Το επόμενο τμήμα είναι ο **κώνος διάχυσης** που έχει σαν σκοπό την μείωση της ταχύτητας της ροής και να βοηθάει το ρευστό να εξέλθει από την αεροσήραγγα χωρίς να δημιουργείται επιστροφή και δίνες. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του είναι το πλάτος 3.5m ενώ η κλίση είναι $7,44^\circ$ για να μην διαχωρίζονται απότομα τα οριακά στρωματά.



Εικόνα 20:Τμήμα κώνου διάχυσης της αεροσήραγγας.

3. Τον **χώρο αποκατάστασης** από όπου από στροβιλώδης η ροή γίνεται στρωτή. Αυτό στην αεροσήραγγα επιτυγχάνεται με την χρήση πανιών και κυψελών (Honeycombs).



Εικόνα 21:Τμήμα του χώρου αποκατάστασης της αεροσήραγγας.



Εικόνα 22:Τμήμα των κυψελών της αεροσήραγγας.

4. Ο σκοπός του **συγκλίνοντος ακροφυσίου** είναι να πάρει μεγάλο όγκο αέρα ταχύτητας και να τον μειώσει σε μικρό όγκο αέρα υψηλής ταχύτητας χωρίς να δημιουργήσει αναταράξεις

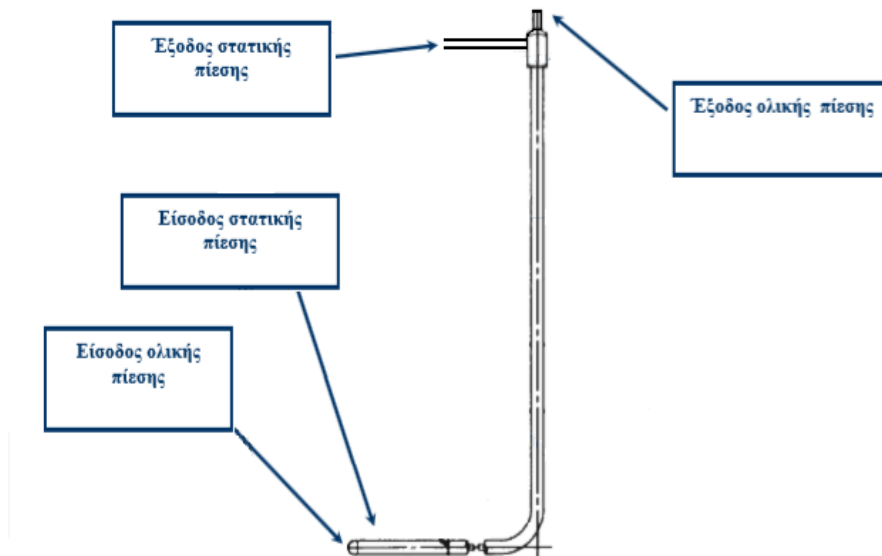


Εικόνα 23:Τμήμα του συγκλίνοντος ακροφυσίου της αεροσήραγγας.

4. Συστήματα Μετρήσεων Αεροσήραγγας

4.1 Σωλήνας Pitot-Static

Ένα μέσο μέτρησης ταχύτητας σε στρωτή ροή είναι ο μανομετρικός σωλήνας Pitot-static που αποτελεί ένα από τους πιο φθηνούς και ακριβείς τρόπους μετρήσεως μέσης ταχύτητας ροής ρευστών. Πρόκειται για ένα σωλήνα στον οποίο η μύτη του είναι διαμορφωμένη σε σχήμα σφαίρας και στο κέντρο του υπάρχει μια οπή για την μέτρηση της ολικής πίεσης (P_o). Ενώ η στατική πίεση (P_{stat}) μετριέται με μία σειρά οπών στην περιφέρεια του σωλήνα. Για την σωστή μέτρηση της ταχύτητας σε ένα σημείο θα πρέπει ο σωλήνας να είναι τοποθετημένος παράλληλα στην διεύθυνση της ροής.



Εικόνα 24: Σωλήνας Pitot-static.

Η λειτουργία του σωλήνα Pitot-Static βασίζεται στην εξίσωση του Bernoulli για ασυμπίεστο ρευστό χωρίς απώλειες, δηλαδή:

$$P_o = P_{static} + (\rho V^2) / 2$$

Όπου: P_o : Ολική πίεση

P_{static} : Στατική πίεση

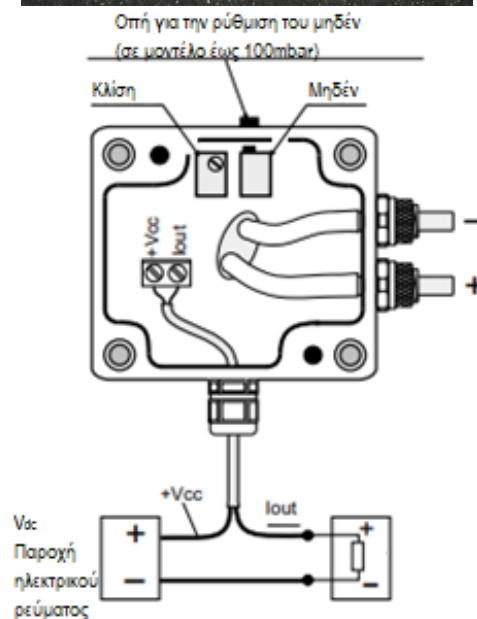
V : Τιμή της ταχύτητα

ρ : Πυκνότητα του ρευστού.

Μέτρηση επομένως των πιέσεων P_o και P_{static} μαζί με γνώση της πυκνότητας ρ σε κάθε σημείο και αντικατάσταση στην παραπάνω εξίσωση θα δώσει το μέγεθος της ταχύτητας στο σημείο της μέτρησης.

4.2 Διαφορικός αισθητήρας πίεσης (Differential pressure transmitter HD408T)

Ο διαφορικός αισθητήρας ατμοσφαιρικής πίεσης χρησιμοποιείται για να μετατρέπει την πίεση που μετράμε από τα pitot-static σε αναλογική έξοδο. Χρησιμοποιούνται σε όλες τις εφαρμογές παρακολούθησης της ροής “μη” διαβρωτικών αερίων. Ο αισθητήρας αυτός, παρέχει στο χρήστη σταθερές, αλλά και εξαιρετικής ακρίβειας μετρήσεις, για την εφαρμοζόμενη διαφορική πίεση. Παράλληλα το σήμα εξόδου που δίνει ο αισθητήρας ρυθμίζεται έτσι ώστε να παρέχει ρεύμα εξόδου γραμμικά ανάλογο της εφαρμοζόμενης διαφορικής πίεσης.



Εικόνα 25: Διαφορικός αισθητήρας πίεσης HD408T

4.3 Ανεμομετρία θερμού σύρματος Hot-Wire

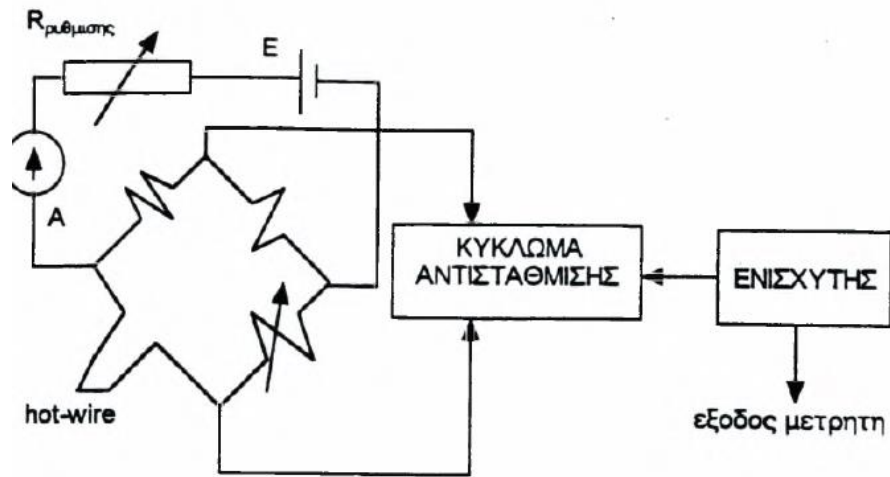
Η Ανεμομετρία θερμού σύρματος (Hot Wire Anemometry) κυρίως χρησιμοποιείται για μετρήσεις σε ροές αέρα και αποτελείται από αισθητήρες με ένα ή και περισσότερα σύρματα τα οποία θερμαίνονται με ηλεκτρικό ρεύμα και συμπεριφέρονται ως αντιστάσεις. Η λειτουργία του βασίζεται στην μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης του υλικού, από το οποίο είναι κατασκευασμένος ο αισθητήρας, με τη θερμοκρασία Σε περιβάλλοντα όπου η πίεση, η θερμοκρασία καθώς και η σύσταση του ρευστού παραμένουν σταθερά, τότε ο μόνος παράγοντας μεταβολής της ωμικής αντίστασης του σύρματος (λόγω μεταφοράς θερμότητας) είναι η ταχύτητα του ανέμου.



Εικόνα 26: Ανεμομετρία θερμού σύρματος (Hot Wire Anemometry).

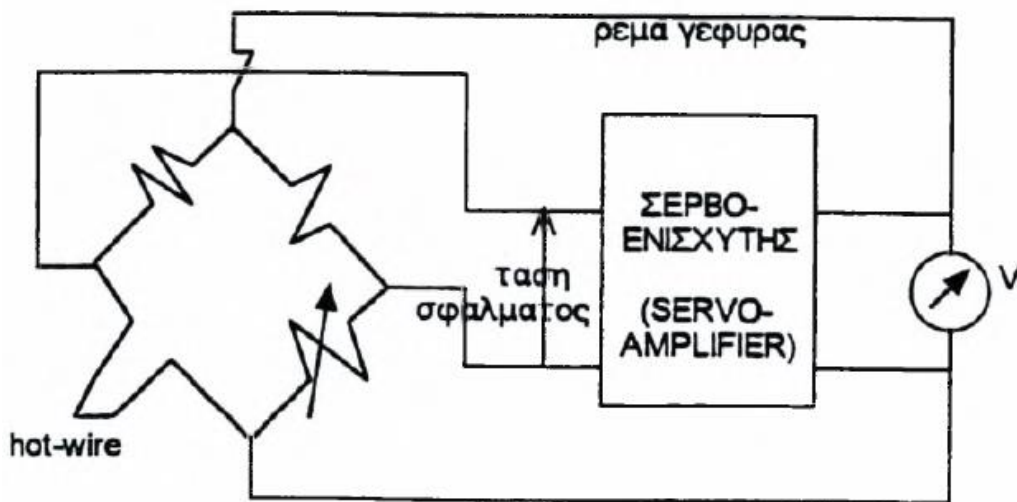
Βασικά πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι η μεγάλη απόκριση, η μηχανική ευστάθεια, η εφαρμογή της χωρίς τη χρήση τροχοδεικτικών σωματιδίων και το σχετικά χαμηλό κόστος. Αντίθετα, η παρεμβατικότητα του στη ροή, η ευαισθησία στις συνθήκες περιβάλλοντος, η αδυναμία προσέγγισης ροών με ανακυκλοφορία και η έμμεση εκτίμηση του πεδίου ταχύτητας συνιστούν βασικά μειονεκτήματα της μεθόδου.

Ανάλογα με τον τρόπο που ελέγχεται το ηλεκτρικό ρεύμα που θερμαίνει τον αισθητήρα, διακρίνονται δύο καταστάσεις λειτουργίας του ανεμομέτρου θερμικού νήματος. Όπως φαίνεται και στην (εικόνας 26), η πρώτη περίπτωση είναι η λειτουργία με σταθερό ρεύμα. Στην πρώτη περίπτωση, το ανεμόμετρο σταθερού ρεύματος χρησιμοποιείται βασικά για μετρήσεις θερμοκρασίας, καθώς σταθερό ρεύμα μικρής τάσης εφαρμόζεται στο νήμα.



Εικόνα 27: Ανεμόμετρο σταθερού ρεύματος

Στην δεύτερη περίπτωση, το ανεμόμετρο σταθερής θερμοκρασίας χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά για μετρήσεις ταχύτητας, εξαιτίας της μεγάλης απόκρισης συχνότητας που παρουσιάζει σε σχέση με το ανεμόμετρο σταθερού ρεύματος.



Εικόνα 28: Ανεμόμετρο σταθερής θερμοκρασία.

5. Διαδικασία Τοποθέτησης Πανιών στον Χώρο Αποκατάστασης της Αεροσήραγγας

Στην αεροσήραγγα του εργαστηρίου μετά από μετρήσεις που έγιναν παρατηρήθηκε ότι η ποιότητα της ροής του αέρα δεν ήταν η επιθυμητή. Αυτό οφειλόταν στο γεγονός ότι στον χώρο αποκατάστασης ήταν τοποθετημένη μόνο η κυψέλες, με συνέπεια να υπάρχει στροβιλώδης ροής στην έξοδο της αεροσήραγγας. Για την λύση στο πρόβλημα κρίθηκε αναγκαίο η τοποθέτηση τριών πανιών στον χώρο αποκατάστασης, για να βοηθήσουν στην μείωση των αξονικών στροβιλισμών και στην επίτευξη μιας πιο ομοιόμορφης ταχύτητας. Μετά από ερευνά και δοκιμές που έγιναν τα πανιά που επιλέχθηκαν να μπουν στην αεροσήραγγα είναι η εξής:

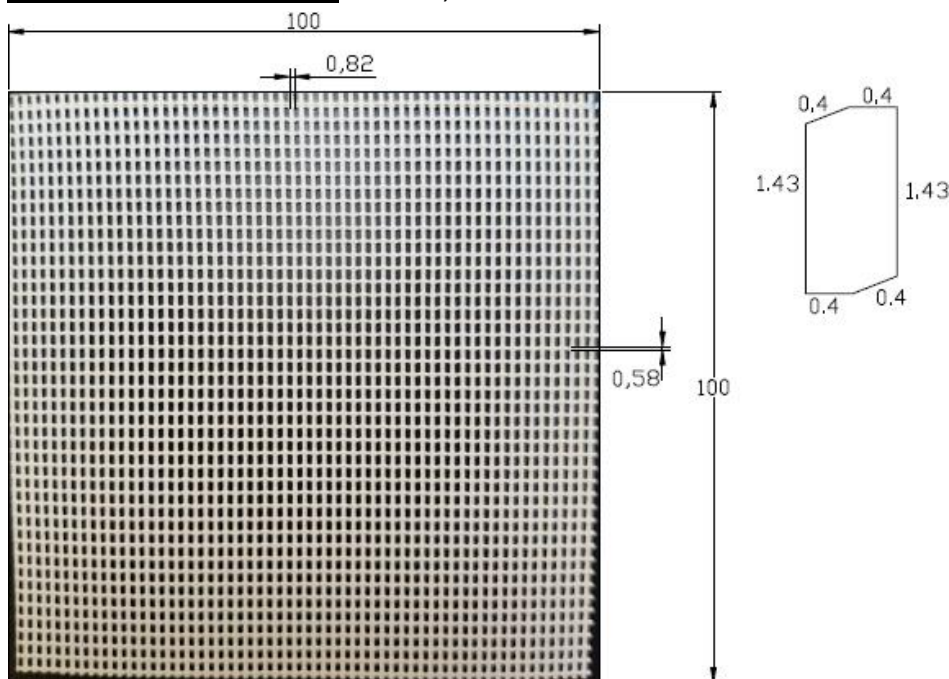
Πανί 1: Το υλικό κατασκευής: PVC

Διάσταση πανιού: Π1755mm x M1755mm

Εμβαδόν πανιού: $3,080025 \times 10^6 \text{mm}^2$

Εμβαδόν οπής: $1,144 \text{mm}^2$

Συνολικό εμβαδών οπών: $883.705,98 \text{mm}^2$



Εικόνα 29: Δείγμα από το πανί 1 μαζί με τις διαστάσεις της οπής.

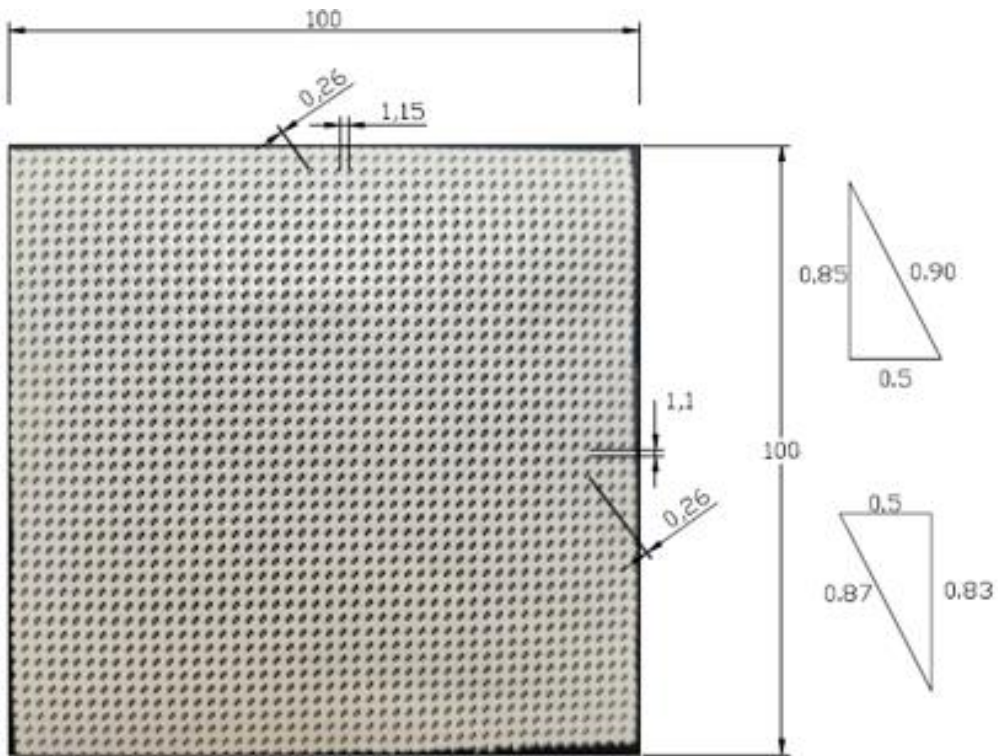
Πανί 2: Υλικό κατασκευής: Polyester coated+PVC

Διάσταση πανιού: Π1755mm x M1755mm

Εμβαδόν πανιού: $3,080025 \times 10^6 \text{mm}^2$

Εμβαδόν οπής: $0,425 \text{mm}^2$

Συνολικό εμβαδών οπών: $264.551,04 \text{mm}^2$



Εικόνα 30: Δείγμα από το πανί 2 μαζί με τις διαστάσεις της οπής.

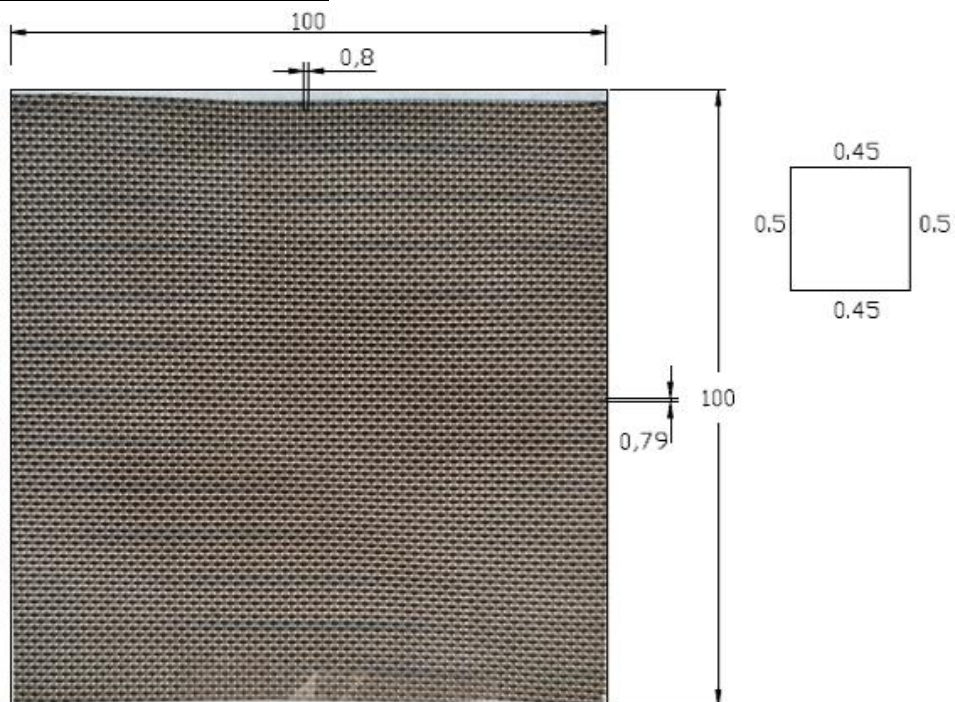
Πανί 3: Υλικό κατασκευής: Ύφασμα μεγάλης αντοχής

Διάσταση πανιού: Π1755mm x Μ1755mm

Εμβαδόν πανιού: $3,080025 \times 10^6 \text{mm}^2$

Εμβαδόν οπής: $0,225 \text{mm}^2$

Συνολικό εμβαδών οπών: $631.405,12 \text{mm}^2$



Εικόνα 31: Δείγμα από το πανί 3 μαζί με τις διαστάσεις της οπής.

5.1 Διαδικασία τοποθέτησης πανιών

Ο χώρος αποκατάστασης της αεροσήραγγας αποτελείται από τέσσερα κομμάτια (Εικόνα 32) που συνδέονται μεταξύ του με κοχλίες. Στα τρία πρώτα τμήματα τοποθετούνται τα πανιά και στο τέταρτο τμήμα η κυψέλη.



Εικόνα 32: Τα τέσσερα τμήματα που αποτελείται χώρος αποκατάστασης αεροσήραγγας.

Η διαδικασία της τοποθέτησης των πανιών ξεκινάει με το λύσιμο των κοχλιών στα τρία κομμάτια που θα μπουν τα πανιά. Μετά με την βοήθεια της γερανογέφυρας του εργαστηρίου κατέβασα τα κομμάτια στο έδαφος για να είναι ευκολότερη η τοποθέτηση των πανιών. Έπειτα τοποθέτησα με πινέζες το πανί πάνω στο πλαίσιο έτσι ώστε να μετρήσω και να κόψω το περισσευούμενο πανί. Στη συνέχεια κάρφωσα το πανί πάνω στο πλαίσιο με δυο σειρές από γαντζάκια συρραπτικού και συγχρόνως προσπαθούσα να το τεντώσω όσο τον δυνατό περισσότερο μπορούσα έτσι ώστε να μην παραμορφωθεί όταν θα δεχτεί μεγάλες πιέσεις στις υψηλές ταχύτητες.

Για την καταγραφή των θέσεων των πανιών στην αεροσήραγγα ονομάτισα τα τρία κομμάτια με τα τρία πρώτα γράμματα της αλφάβητου (Α,Β,Γ) και τα λατινικά νούμερα (I,II) για τις δυο πλευρές. Οι θέσεις που βρίσκονται τα πανιά είναι οι εξής: **Πανί 1=> Α I**, **Πανί 2=> Β II**, **Πανί 3=>Γ I**.



Εικόνα 33: Τα πλαίσια που τοποθετήθηκαν τα πανιά.

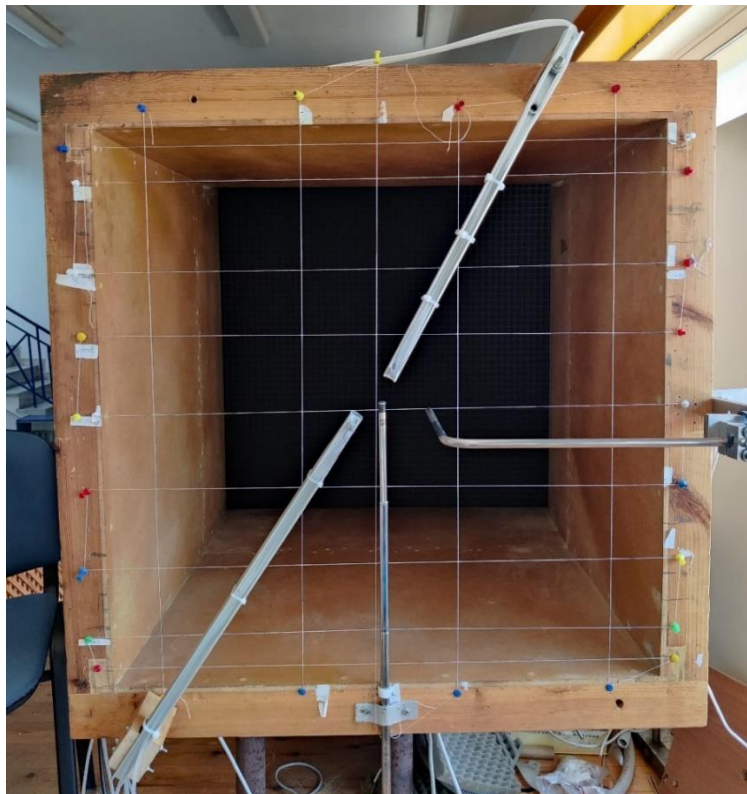
6. Βαθμονόμηση Αισθητήριων Αέρα

6.1 Τι είναι η βαθμονόμηση

Ως βαθμονόμηση ορίζεται η ανάπτυξη μιας αξιόπιστης και ιχνηλάσιμης σχέσης ανάμεσα στο σήμα εισόδου και στο σήμα εξόδου ενός αισθητήρα, υπό την προϋπόθεση ότι όλες οι παράμετροι και οι συνθήκες μέτρησης, εκτός από την μετρούμενη (εδώ η ταχύτητα), παραμένουν συνεχώς σταθερές. Κάποιες φορές ένα όργανο απαιτείται να επαναβαθμονομηθεί ως αποτέλεσμα της διακρίβωσης που του έγινε εφόσον διαπιστωθεί σημαντική απόκλιση των μετρήσεών του.

6.2 Προετοιμασία βαθμονόμησης

Αρχικά καθαρίστηκαν οι αισθητήρες με πεπιεσμένο αέρα για να φύγουν σκόνες και ακαθαρσίες που είχαν εισχωρήσει μέσα στα σωληνάκια και τα pitot. Έπειτα ετοιμάστηκε η διάταξη των αισθητήρων, όπως φαίνεται στην παρακάτω (εικόνα 34) με όλα τα pitot να τοποθετήθηκαν σε απόσταση 10cm μεταξύ τους. Επιπλέον για κάθε αισθητήρα δόθηκε ένα όνομα (Archanes, Bianos, Candanos, Dicky) για την ευκολότερη κατανόηση καταγραφή των μετρήσεων. Το αισθητήριο Hotwire που βρίσκεται στο κέντρο της εξόδου της αεροσήραγγας βοηθάει σαν όργανο διακρίβωσης και πιστοποίησης της βαθμονόμησης. Τέλος ελέγχθηκαν αν υπάρχουν διαρροές στα σωληνάκια των αισθητηρίων.



Εικόνα 34: Διάταξη αισθητήρων στην έξοδο του κέντρου της αεροσήραγγας.

6.3 Διαδικασία βαθμονόμησης

Αρχικά οι αισθητήρες που βαθμονόμηση είχαν την ιδιαιτερότητα ότι ήταν διαφορετικοί δηλαδή μετρούσαν ατμοσφαιρική πίεση (10mbar-2bar), όπου μετά από μια διαδικασία κυκλωμάτων στην έξοδο το μετέτρεπαν σε mAmber. Οπότε για την διαδικασία της καταγραφής χρειάστηκε να χρησιμοποιήσω ένα πρόγραμμα κατασκευασμένο σε πλατφόρμα LabView το WT-Measurement, κατασκευασμένο από τον Επικ. Καθηγητή κ. Παπαδάκη Νίκο. Το πρόγραμμα είναι κατασκευασμένο να καταγράφει το σήμα που εξάγουν οι αισθητήρες (mAmber), το οποίο μετά από μια επεξεργασία το μετέτρεπε σε (volt) γιατί βοηθούσε στη καλύτερη ανάλυση των δεδομένων. Έπειτα τις μετρήσεις που κατέγραφε τις αποθήκευε σε ένα επεξεργάσιμο φύλλο εργασίας.

Η διαδικασία της βαθμονόμησης ξεκινάει ως εξής:

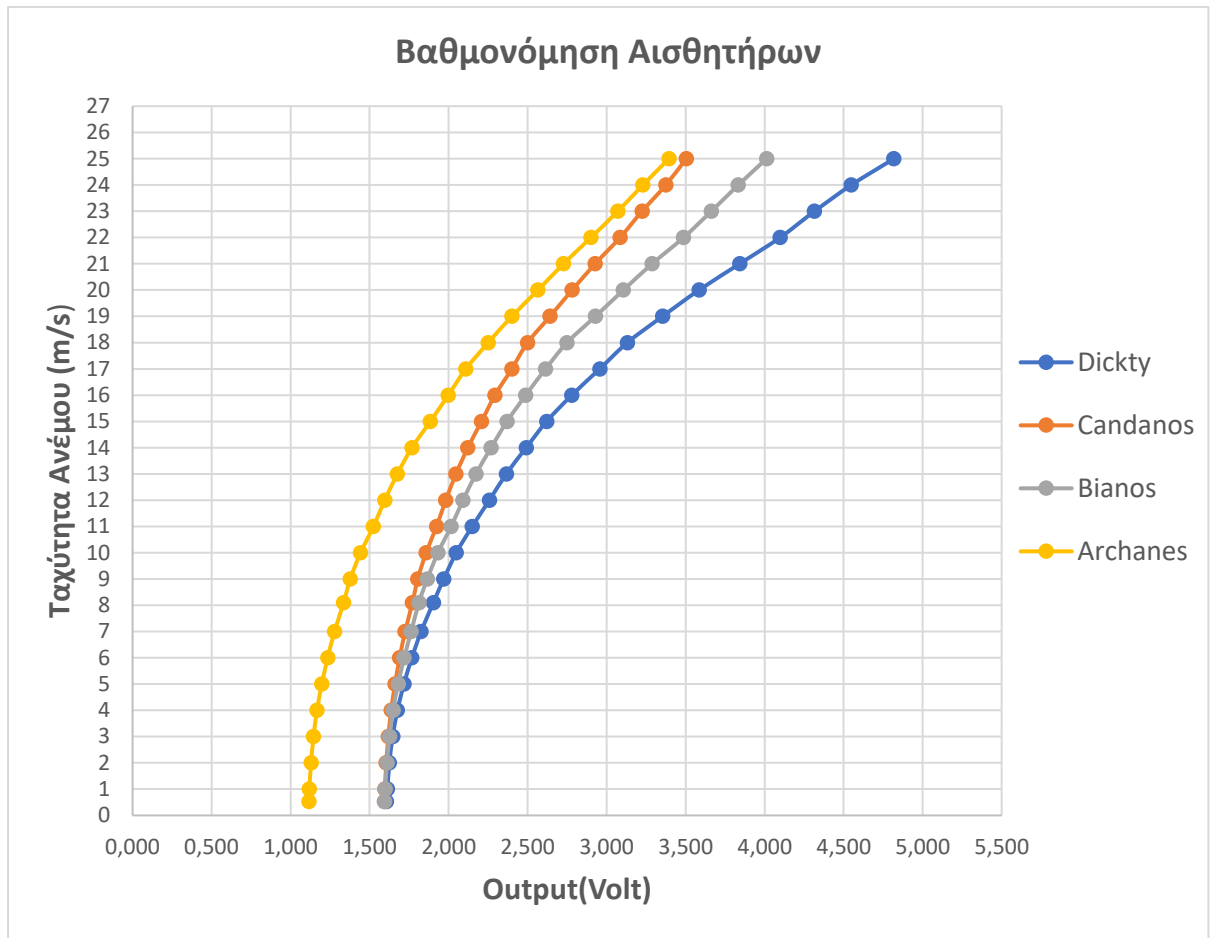
1. Πρώτα άνοιξα την αεροσήραγγα και σταθεροποίησα την ταχύτητα του ανέμου στην έξοδο της αεροσήραγγας στα 0,5 m/s με την βοήθεια του μετρητικού οργάνου HotWire.
2. Έπειτα κατέγραψα τις τιμές των αισθητήριων με την βοήθεια του προγράμματος WT-Measurement που ανάφερα παραπάνω. Ο ρυθμός δειγματοληψίας των τιμών ήταν μια τιμή ανά 3 δευτερόλεπτα για χρονικό διάστημα ενός λεπτού. Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε και για τις υπόλοιπες μετρήσεις για ταχύτητες ανέμου από 1m/s- 25m/s με το βήμα αλλαγής για κάθε μέτρηση να είναι το 1m/s.
3. Τέλος αφού τελείωσα την διαδικασία της μέτρησης εξήγαγα το φύλλο εργασίας με τα δεδομένα που είχα καταγράψει. Τα στοιχεία αυτά τα επεξεργάστηκα στο πρόγραμμα του excel από τα όποια προέκυψε μια μέση τιμή των μετρήσεων για κάθε μια από τις ταχύτητες.

6.4 Προβολή δεδομένων βαθμονόμησης

Στον πίνακα και διάγραμμα που ακολουθεί σας παραθέτω τα δεδομένα από την επεξεργασία των μετρήσεων στο excel όπου απεικονίζεται ο συσχετισμός του σήματος που εξάγουν η αισθητήρες ανάλογα της ταχύτητας ανέμου στο κέντρο της εξόδου της αεροσήραγγας.

| <u>Archanes(Volt)</u> | <u>Bianos(Volt)</u> | <u>Candanos(Volt)</u> | <u>Dickty(Volt)</u> | <u>Τιμές Hotwire(m/s)</u> |
|------------------------------|----------------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------------|
| 1,116 | 1,595 | 1,594 | 1,606 | 0,53 |
| 1,119 | 1,599 | 1,597 | 1,613 | 1 |
| 1,130 | 1,610 | 1,605 | 1,625 | 2 |
| 1,145 | 1,626 | 1,619 | 1,646 | 3 |
| 1,167 | 1,648 | 1,636 | 1,676 | 4 |
| 1,198 | 1,681 | 1,661 | 1,717 | 5 |
| 1,235 | 1,719 | 1,690 | 1,767 | 6 |
| 1,278 | 1,763 | 1,725 | 1,826 | 7 |
| 1,336 | 1,812 | 1,771 | 1,904 | 8,1 |
| 1,377 | 1,865 | 1,805 | 1,969 | 9 |
| 1,443 | 1,932 | 1,858 | 2,049 | 10 |
| 1,524 | 2,016 | 1,924 | 2,149 | 11 |
| 1,596 | 2,091 | 1,982 | 2,258 | 12 |
| 1,676 | 2,173 | 2,047 | 2,365 | 13 |
| 1,768 | 2,269 | 2,122 | 2,491 | 14 |
| 1,885 | 2,370 | 2,208 | 2,621 | 15 |
| 1,998 | 2,489 | 2,294 | 2,780 | 16 |
| 2,109 | 2,614 | 2,400 | 2,957 | 17 |
| 2,251 | 2,750 | 2,500 | 3,132 | 18 |
| 2,401 | 2,929 | 2,642 | 3,354 | 19 |
| 2,566 | 3,106 | 2,782 | 3,585 | 20 |
| 2,727 | 3,288 | 2,928 | 3,842 | 21 |
| 2,901 | 3,487 | 3,085 | 4,098 | 22 |
| 3,071 | 3,663 | 3,224 | 4,316 | 23 |
| 3,230 | 3,833 | 3,375 | 4,549 | 24 |
| 3,394 | 4,012 | 3,504 | 4,818 | 25 |

Πίνακας 2:Αντιστοιχία του σήματος που εξάγουν οι αισθητήρες με την ταχύτητα ανέμου στο κέντρο της αεροσήραγγας.

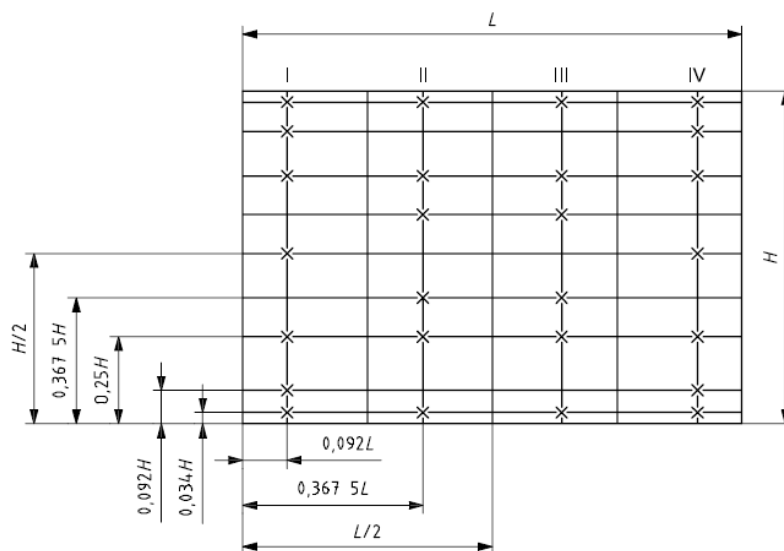


Διάγραμμα 1: Αντιστοιχία του σήματος που εξάγουν οι αισθητήρες με την ταχύτητα ανέμου στο κέντρο της αεροσήραγγας.

7. Πειραματική Διαδικασία

7.1 Πρότυπο μέτρησης

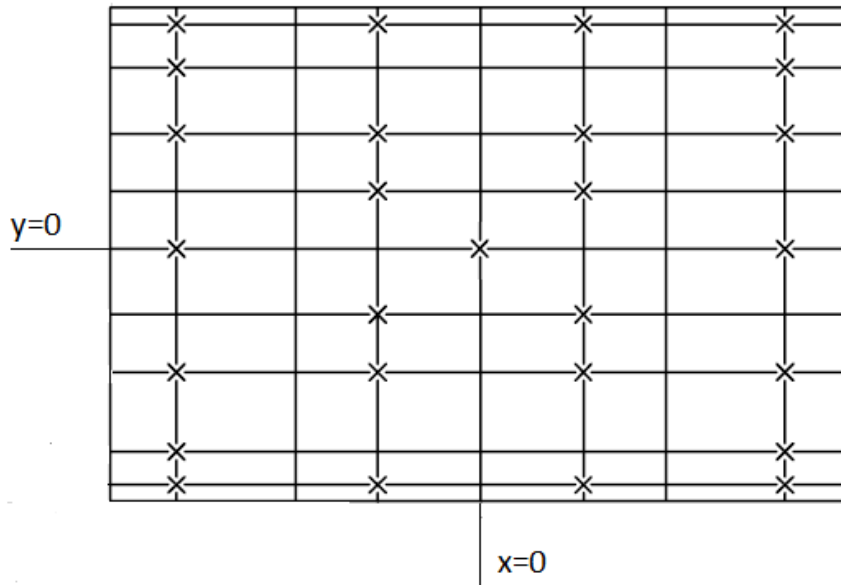
Η μέτρηση του πεδίου ροής για την πειραματική διάταξη έγινε σύμφωνα με το ISO 3966:2008. Στο πρότυπο αυτό αναφέρεται πως γίνεται η μέτρηση της ροής ρευστού σε κλειστούς αγωγούς και η μέτρηση της ταχύτητας με της χρήση σωλήνα Pitot. Σύμφωνα με την διάταξή του εργαστηρίου για αγωγό ορθογωνικής διατομής τα 26 σημεία που θα πρέπει να μετρήσουμε την ροή είναι τα ακόλουθα(Εικόνα 35). Επιπλέον στο πείραμα προστέθηκε και το κέντρο του ακροφυσίου της αεροσήραγγας.



Εικόνα 35:Θέση των 26 σημείων μέτρησης σε αγωγό ορθογωνικής διατομής.

| h/H | u/L | | | |
|---------|-------|---------|---------|-------|
| | I | II | III | IV |
| | 0,092 | 0,367 5 | 0,632 5 | 0,908 |
| 0,034 | 2 | 3 | 3 | 2 |
| 0,092 | 2 | — | — | 2 |
| 0,250 | 5 | 3 | 3 | 5 |
| 0,367 5 | — | 6 | 6 | — |
| 0,500 | 6 | — | — | 6 |
| 0,632 5 | — | 6 | 6 | — |
| 0,750 | 5 | 3 | 3 | 5 |
| 0,908 | 2 | — | — | 2 |
| 0,966 | 2 | 3 | 3 | 2 |

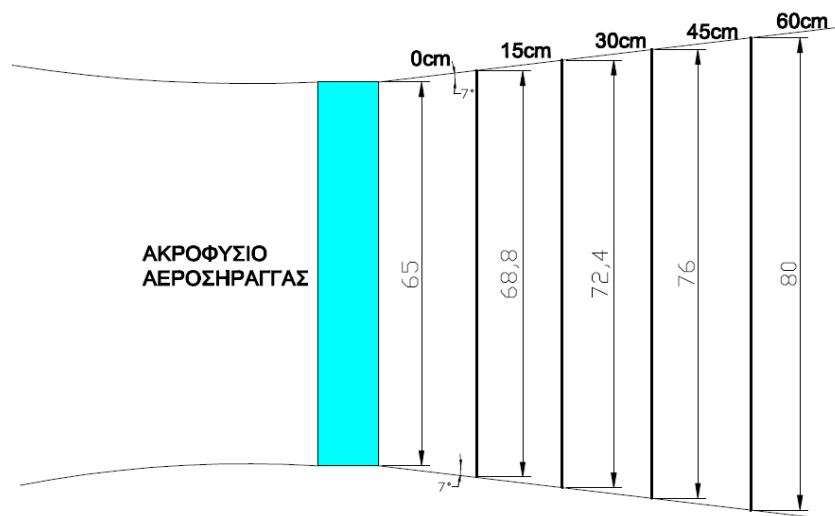
Εικόνα 36. συντελεστές βαρύτητας σημείων.



Εικόνα 37: Προσδιορισμός των 27 σημείων μέτρησης στη διατομή του ακροφυσίου της αεροσήραγγας.

Μετρήσεις

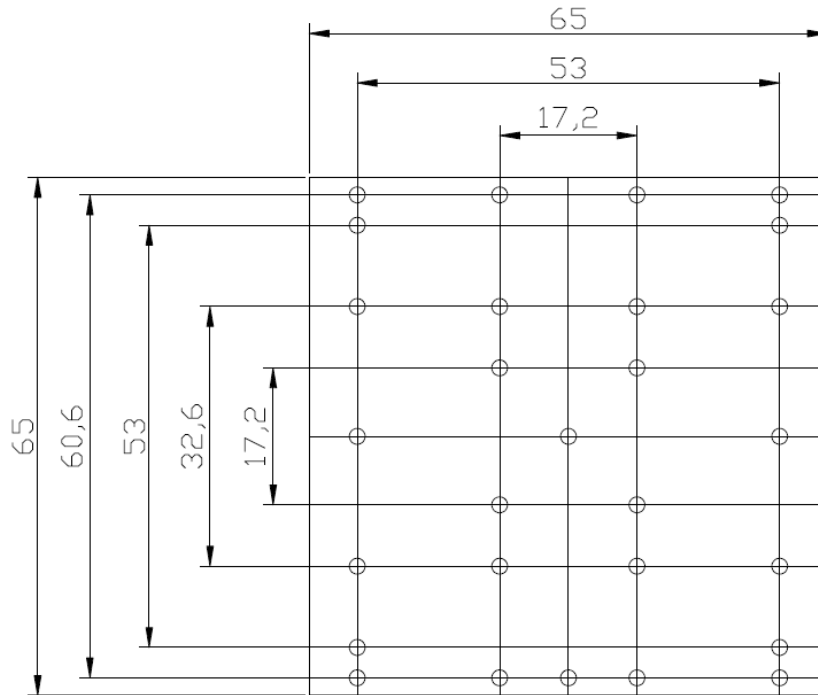
Για την παραγωγή του προφίλ ανέμου, στην έξοδο της αεροσήραγγας του εργαστηρίου πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις, σε διάφορες αποστάσεις από το πλαίσιο της εξόδου (0cm, 15cm, 30cm, 45cm, 60cm) και για ταχύτητες (5m/s, 10m/s, 15m/s, 20m/s). Σε κάθε μία από τις αποστάσεις αυτές από το ακροφύσιο της αεροσήραγγας, αντιστοιχεί και ένα πλαίσιο μετρήσεων 27 σημείων. Τα πλαίσια αυτά προέκυψαν από τον πολλαπλασιασμό της απόστασης, από το ακροφύσιο του εκάστοτε πλαισίου επί την εφαπτομένη γωνίας 7° . Η γωνία των 7° ουσιαστικά είναι η κλίση που αποκτάει η ροή του ανέμου κατά την έξοδο του από το ακροφύσιο



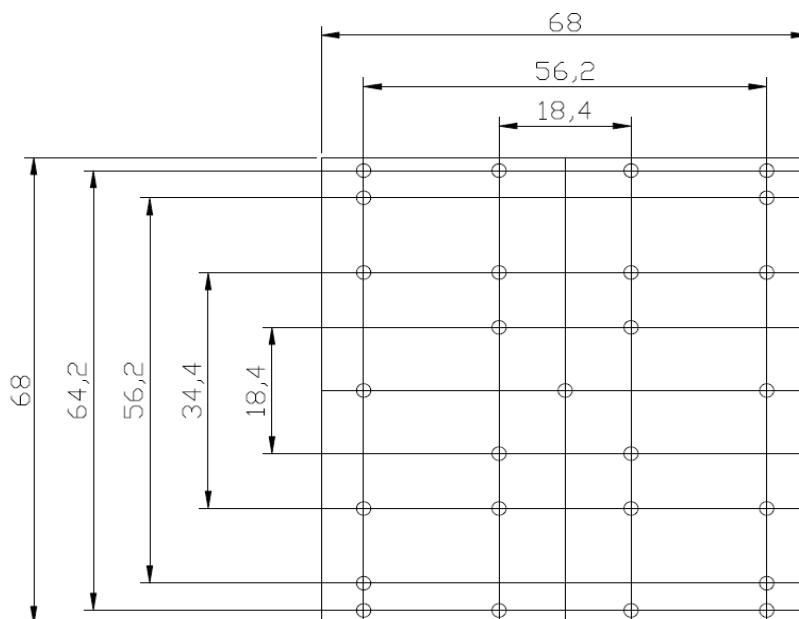
Εικόνα 38. Σχηματική απεικόνιση της κλίσης που αποκτά η ροή μετά την έξοδο.

Στη συνέχεια υπολογίστηκαν τα πλαίσια με τα σημεία των μετρήσεων, σε κάθε απόσταση από το ακροφύσιο.

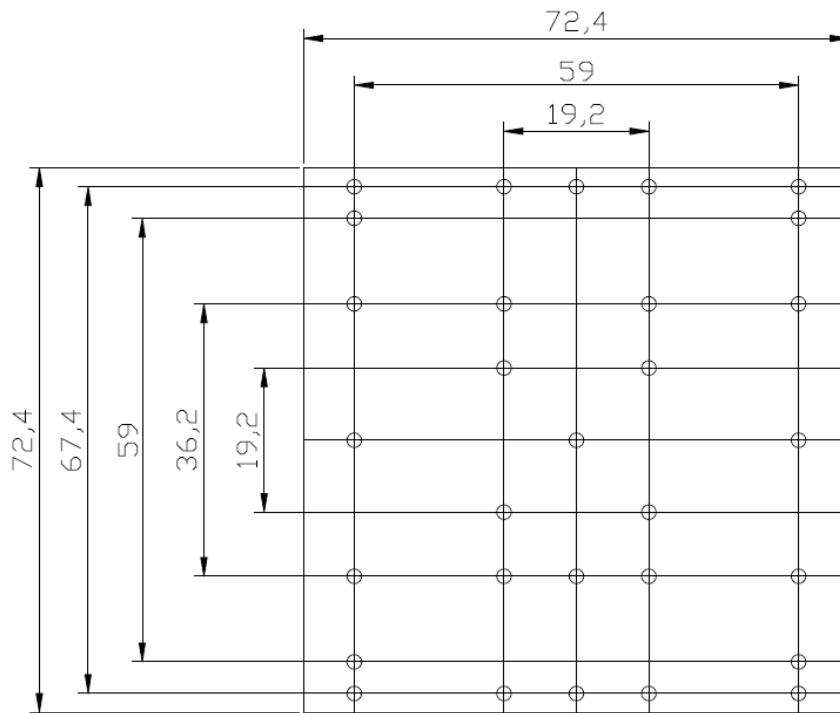
Τα πλαίσια που προέκυψαν σύμφωνα με το διεθνές πρότυπο και λαμβάνοντας υπόψιν και την κλίση της ροής κατά την έξοδο, είναι τα εξής:



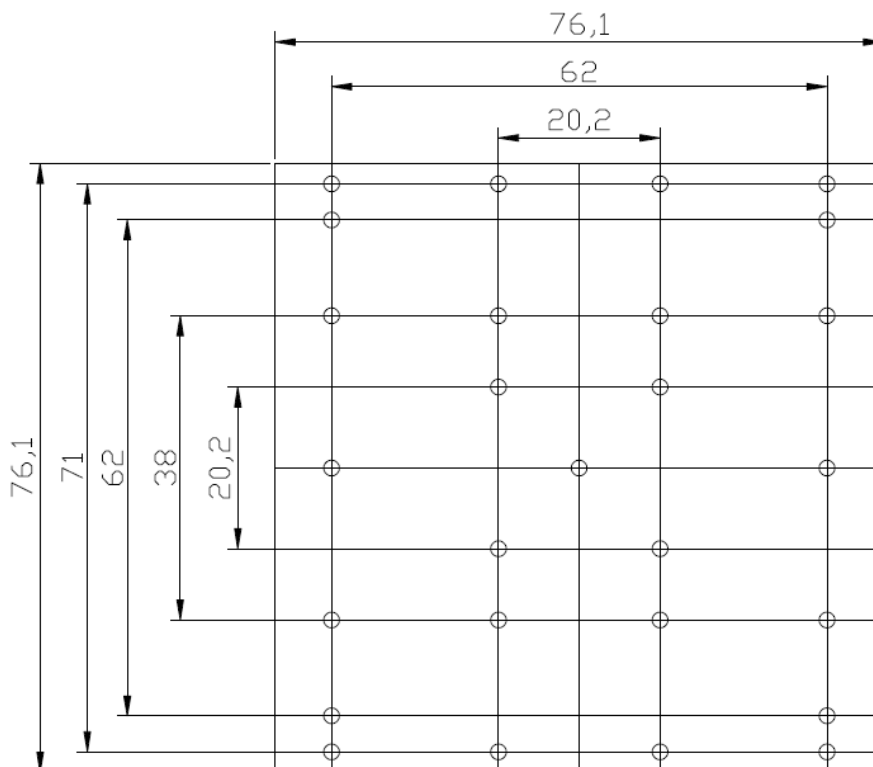
Εικόνα 39. Πλαίσιο μετρήσεων σε απόσταση 0cm από την έξοδο της αεροσήραγγας με διαστάσεις 65x65cm



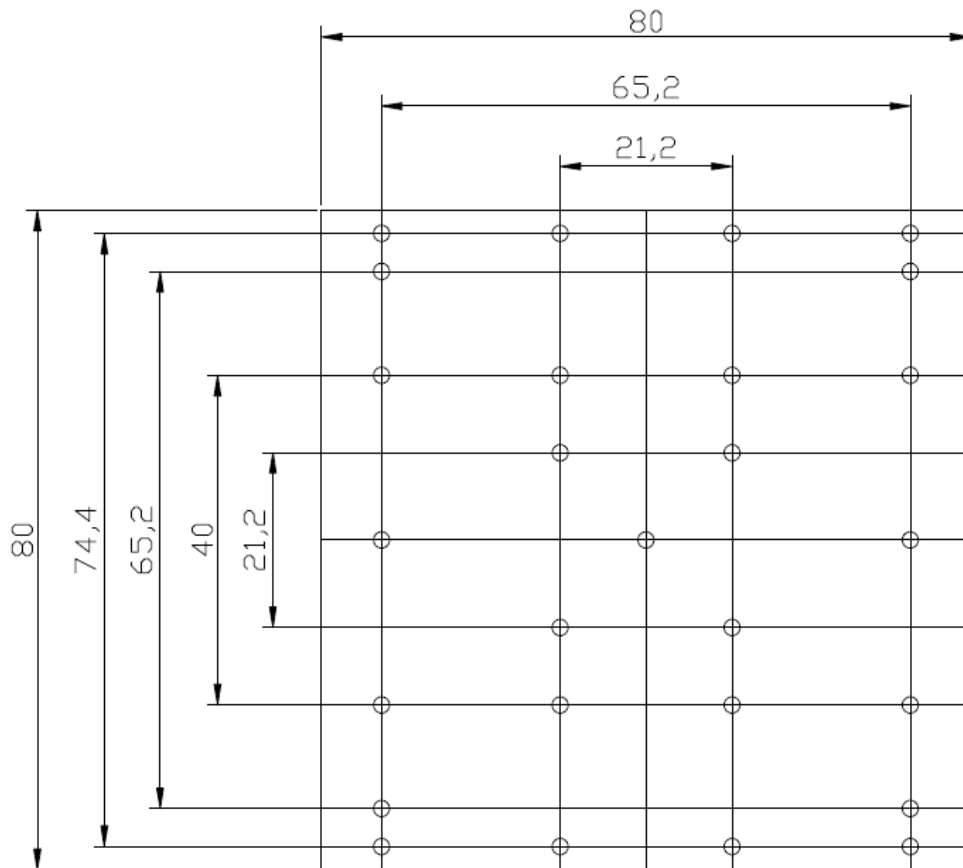
Εικόνα 40. Πλαίσιο μετρήσεων σε απόσταση 15cm από την έξοδο της αεροσήραγγας με διαστάσεις 68x68cm



Εικόνα 41. Πλαίσιο μετρήσεων σε απόσταση 30cm από την έξοδο της αεροσήραγγας με διαστάσεις 72.4x72.4cm



Εικόνα 42. Πλαίσιο μετρήσεων σε απόσταση 45cm από την έξοδο της αεροσήραγγας με διαστάσεις 76.1x76.1cm



Εικόνα 43. Πλαίσιο μετρήσεων σε απόσταση 60cm από την έξοδο της αεροσήραγγας με διαστάσεις 80x80cm

Για την σωστή διεξαγωγή του πειράματος εφαρμόστηκαν κάποια πρωτόκολλα τα όποια είναι:

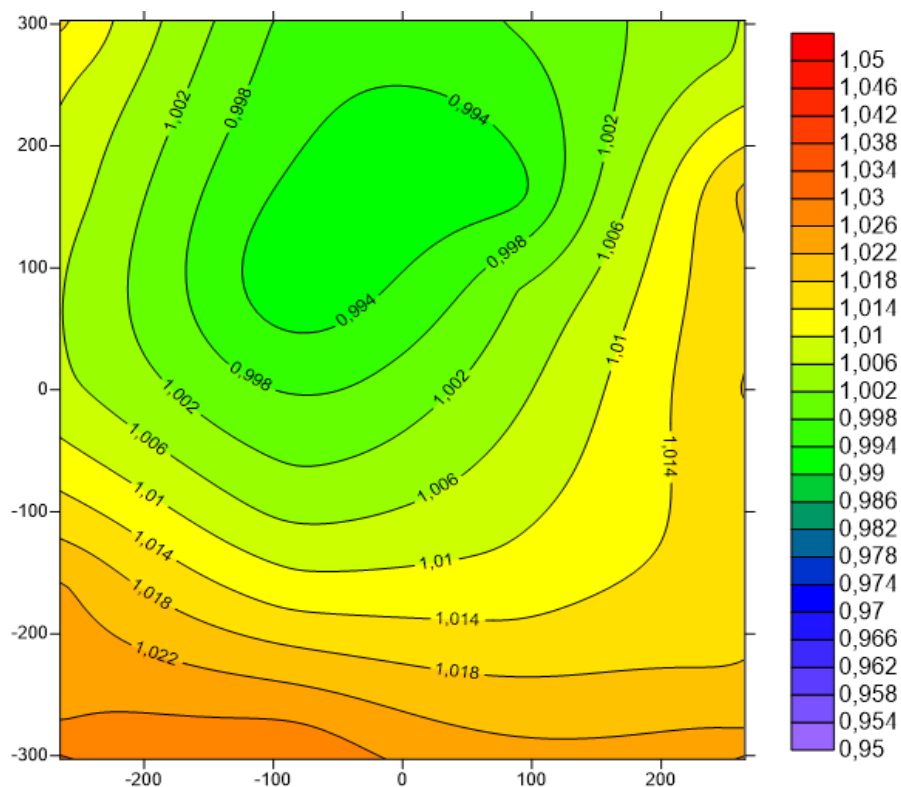
- Οι μετρήσεις της ταχύτητας του ανέμου 5m/s και 10m/s πραγματοποιήθηκαν έχοντας όλες τις πόρτες και τα παράθυρα του εργαστήριου κλειστά, εκτός το παράθυρο δίπλα στον ανεμιστήρα για την σωστή τροφοδοσία αέρα στην αεροσήραγγα.
- Οι μετρήσεις με ταχύτητα ανέμου 15,20, έγιναν έχοντας όλα τα παράθυρα και τις πόρτες ανοικτές για την αποφυγή στροβιλισμός λόγω των μεγάλων ταχυτήτων.
- Για την μέτρηση του πειράματος θα έπρεπε όλα τα Pitot που υπάρχουν στην μετρητική διάταξη να είναι κάθετα στο επίπεδο της ροής του ανέμου για να έχουμε σωστές τιμές.

- Το πρόγραμμα καταγραφής των μετρήσεων είναι το WindTunnelMeasurement, όπου είναι βασισμένο στην γλώσσα προγραμματισμού labView. Ο χρόνος δειγματοληψίας είναι 1 λεπτό σε κάθε σημείο, έχοντας συχνότητα μέτρησης 10000Hz. Στη συνέχεια εφαρμόστηκε ένα φίλτρο 200Hz στις μετρήσεις το οποίο να μειώνει τις παρεμβολές.
- Τα γραφήματα των ταχυτήτων που προέκυψαν από την επεξεργασία των μετρήσεων του ανέμου έγιναν με την βοήθεια του προγράμματος Surfer 13.

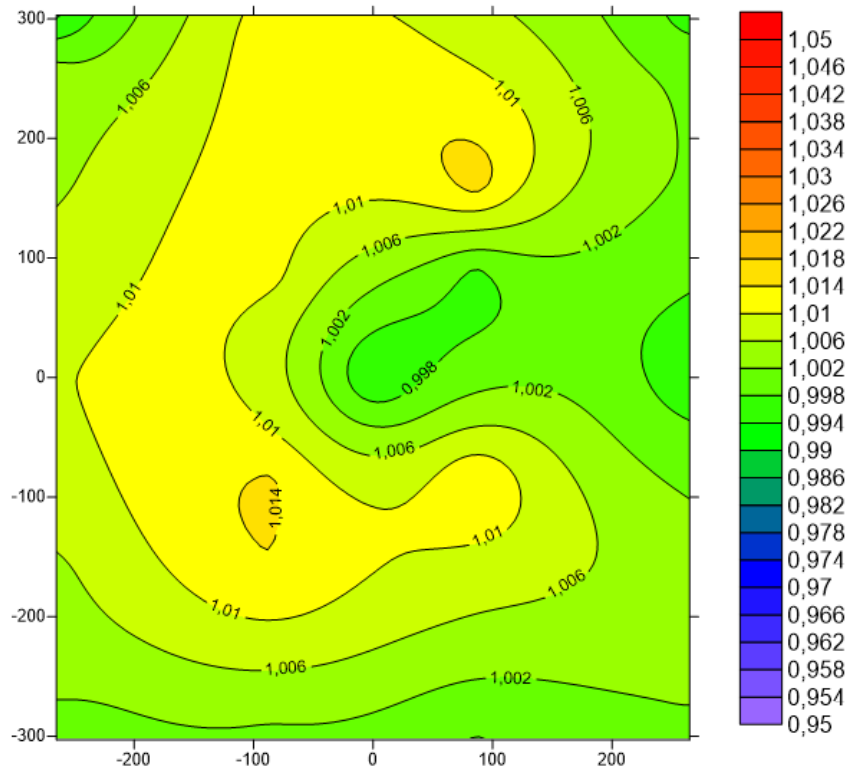
8. Γραφήματα Απεικόνισης Πεδίου Ροής

Σημείωση: Για την εκτύπωση των γραφημάτων χρειάστηκε να διαιρέσουμε την ταχύτητα στο καθένα εκ των 26 μετρούμενων σημείων (V) σε σχέση με την ταχύτητα στο κέντρο $X=0, Y=0$ (V0). Όποτε παρακάτω γίνεται η παράθεση των διαγραμμάτων.

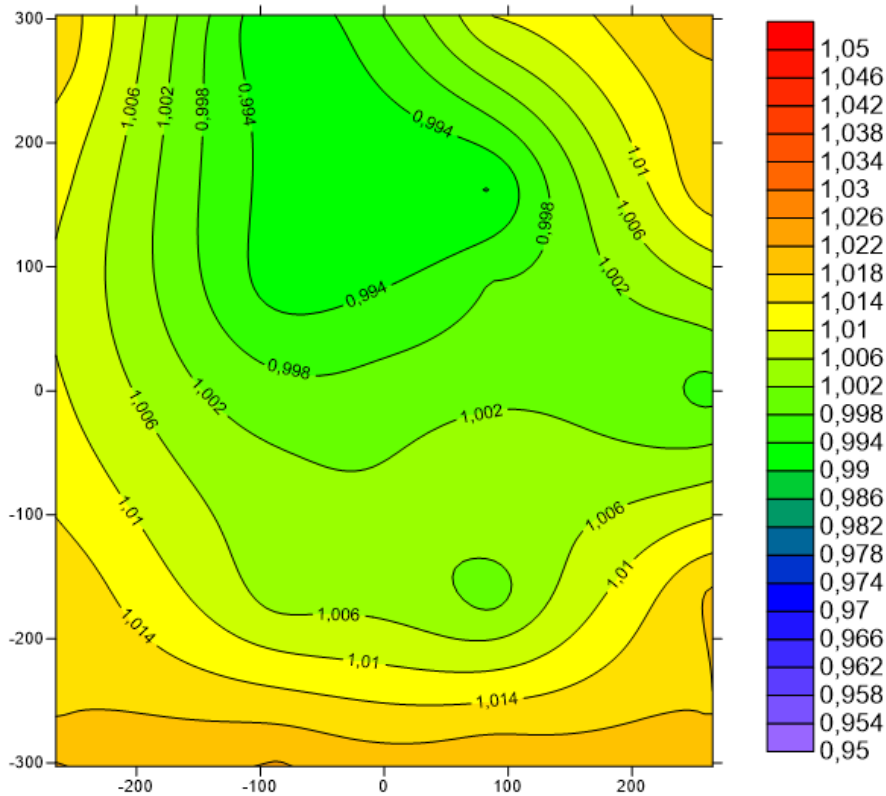
8.1 Γραφήματα απεικόνισης κανονικοποιημένου πεδίου ροής για απόσταση 0cm από το ακροφύσιο.



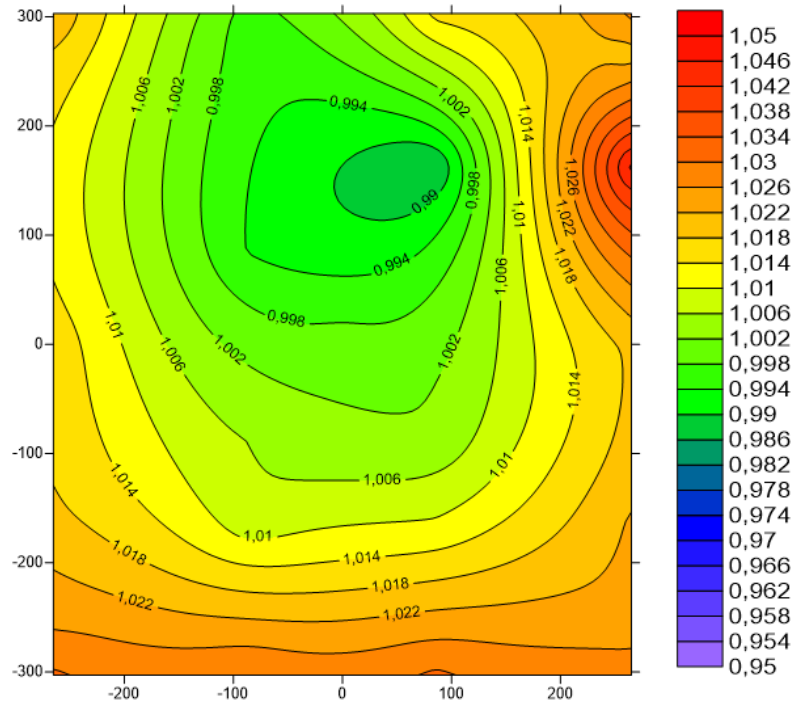
Γράφημα 1: Απεικόνιση κανονικοποιημένου πεδίου ροής (V/V_0) σε απόσταση 0στ και ταχύτητας ανέμου 5m/s.



Γράφημα 2: Απεικόνιση κανονικοποιημένου πεδίου ροής (V/V_0) σε απόσταση 0στ και ταχύτητας ανέμου 10m/s.

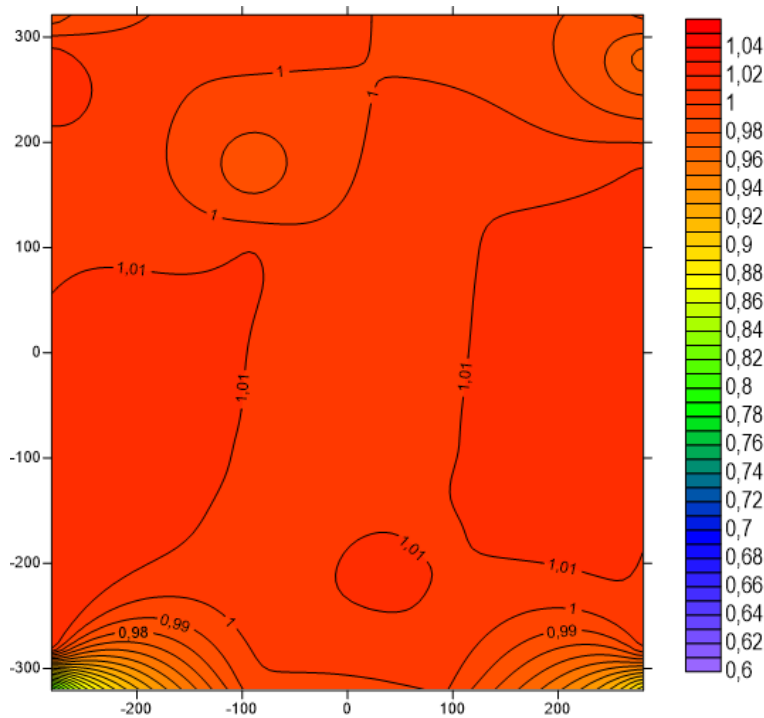


Γράφημα 3: Απεικόνιση κανονικοποιημένου πεδίου ροής (V/V_0) σε απόσταση 0cm και ταχύτητας ανέμου 15m/s.

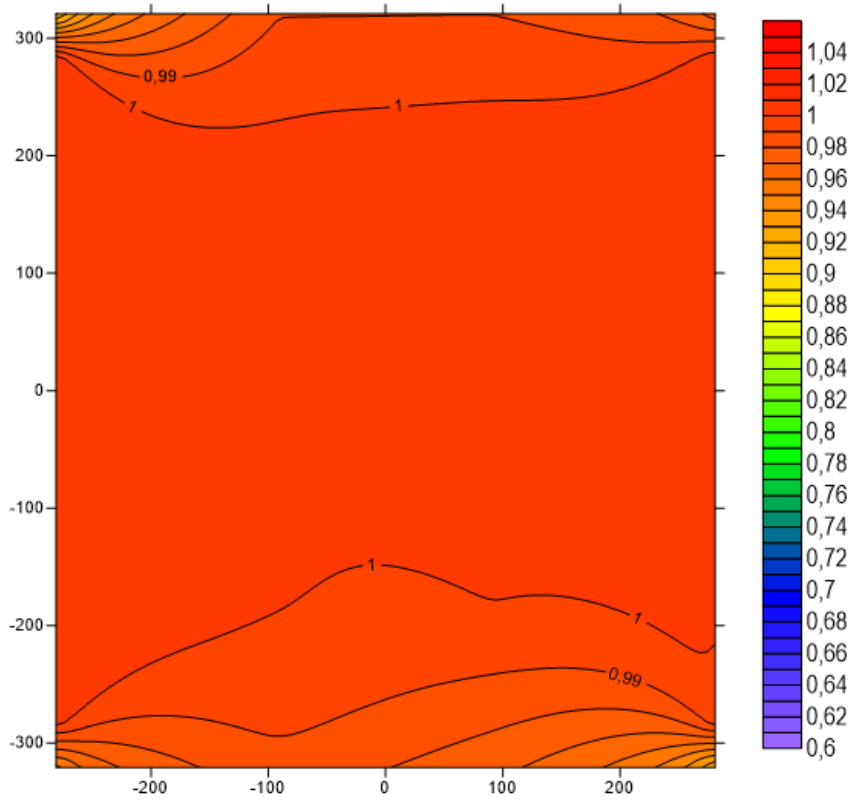


Γράφημα 4: Απεικόνιση κανονικοποιημένου πεδίου ροής (V/V_0) σε απόσταση 0cm και ταχύτητας ανέμου 20m/s.

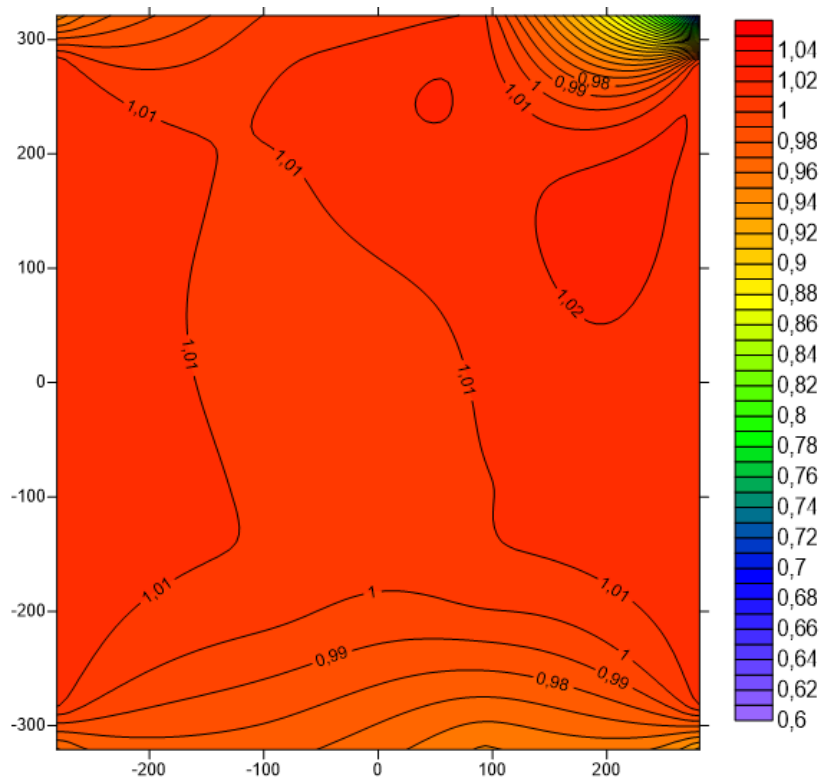
8.2 Γραφήματα απεικόνισης κανονικοποιημένου πεδίου ροής για απόσταση 15cm από το ακροφύσιο.



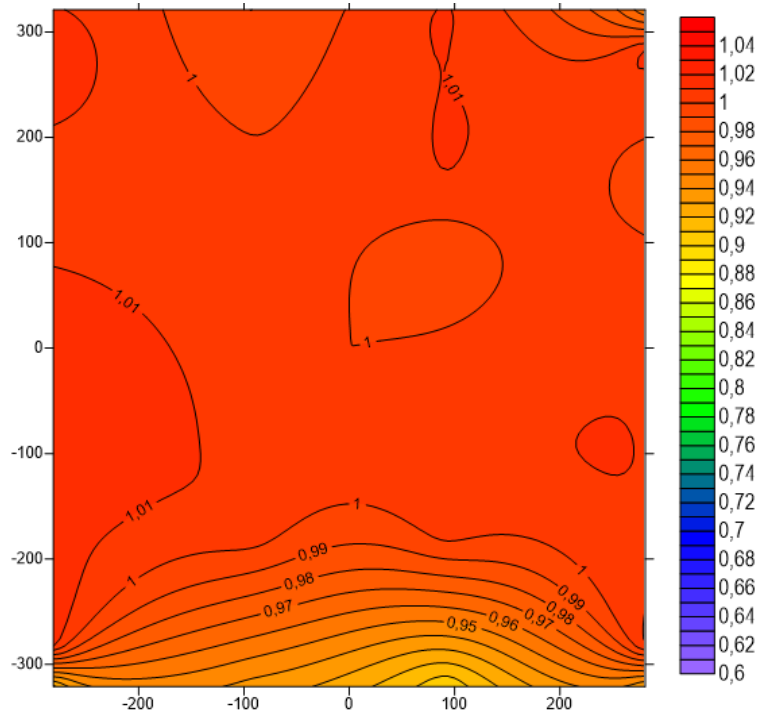
Γράφημα 5: Απεικόνιση κανονικοποιημένου πεδίου ροής (V/V_0) σε απόσταση 15cm και ταχύτητας ανέμου 5m/s.



Γράφημα 6: Απεικόνιση κανονικοποιημένου πεδίου ροής (V/V_0) σε απόσταση 15cm και ταχύτητας ανέμου 10m/s.

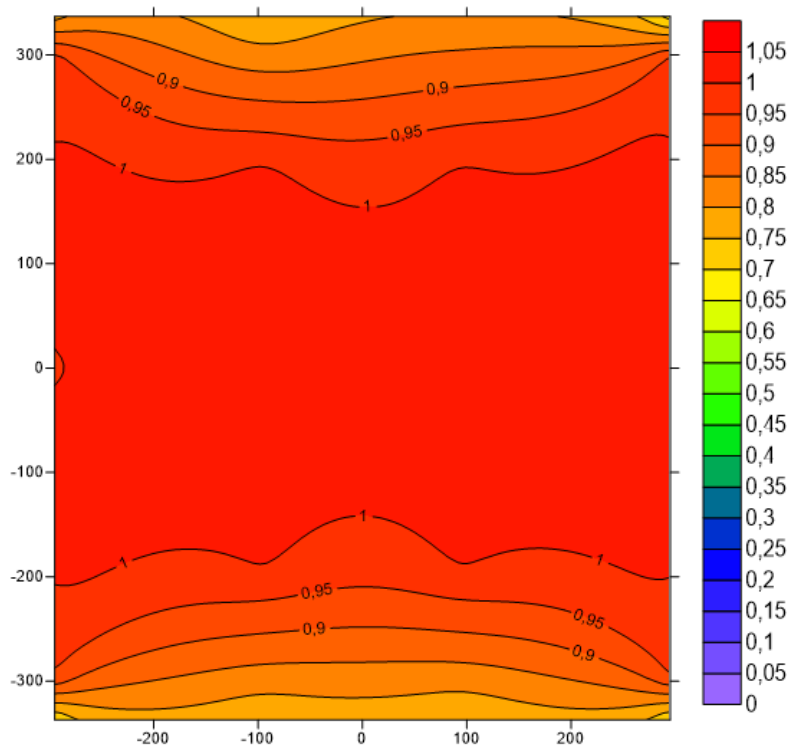


Γράφημα 7:Απεικόνιση κανονικοποιημένου πεδίου ροής (V/V_0) σε απόσταση 15cm και ταχύτητας ανέμου 15m/s.

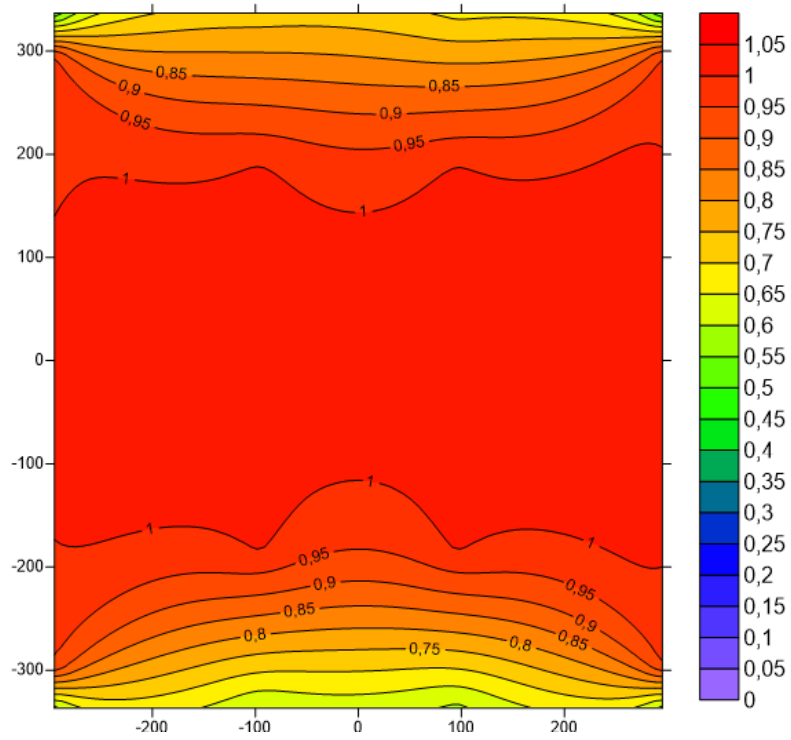


Γράφημα 8:Απεικόνιση κανονικοποιημένου πεδίου ροής (V/V_0) σε απόσταση 15cm και ταχύτητας ανέμου 20m/s.

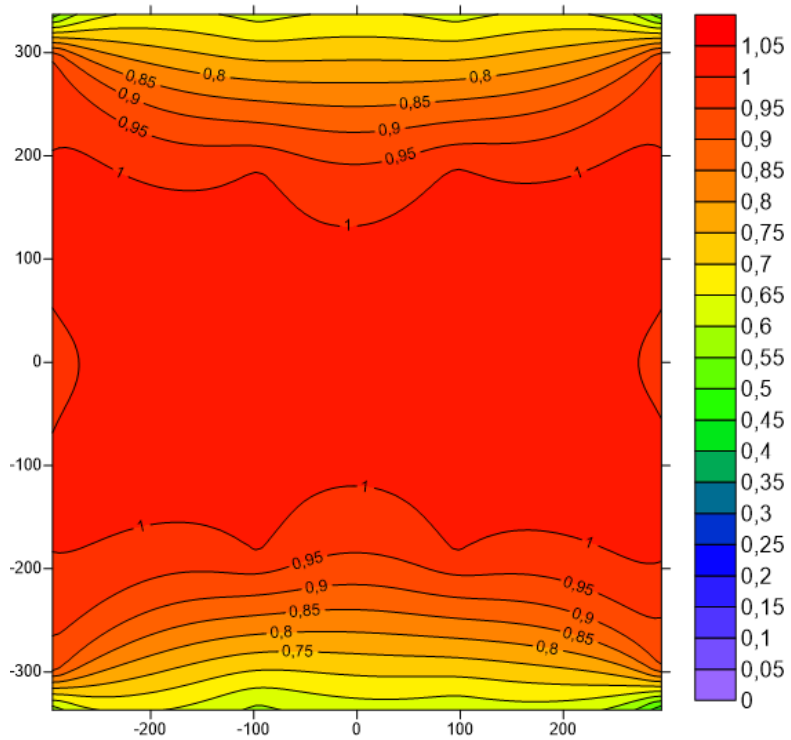
8.3 Γραφήματα απεικόνισης κανονικοποιημένου πεδίου ροής για απόσταση 30cm από το ακροφύσιο.



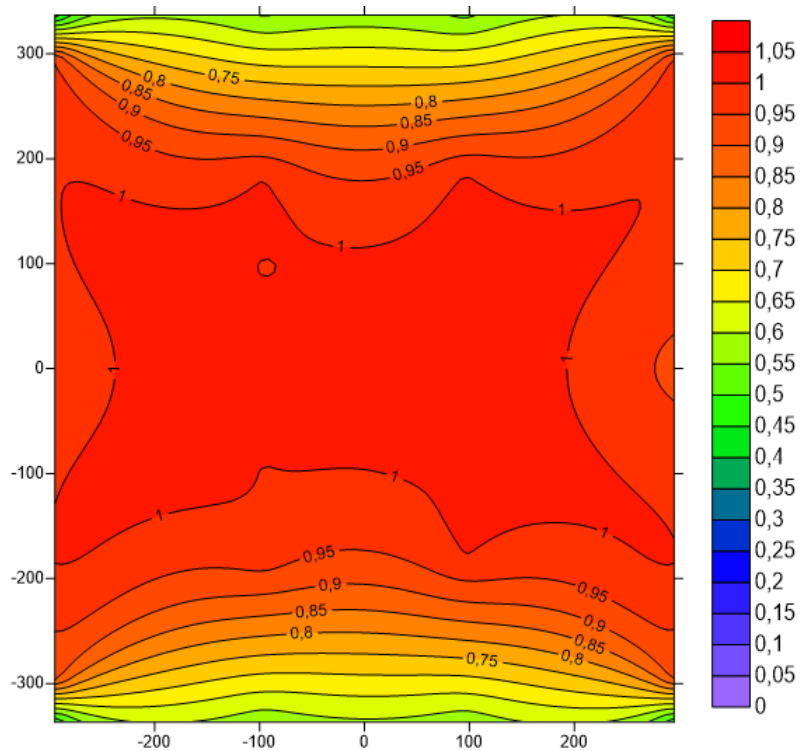
Γράφημα 9: Απεικόνιση κανονικοποιημένου πεδίου ροής (V/V_0) σε απόσταση 30cm και ταχύτητας ανέμου 5m/s.



Γράφημα 10: Απεικόνιση κανονικοποιημένου πεδίου ροής (V/V_0) σε απόσταση 30cm και ταχύτητας ανέμου 10m/s.

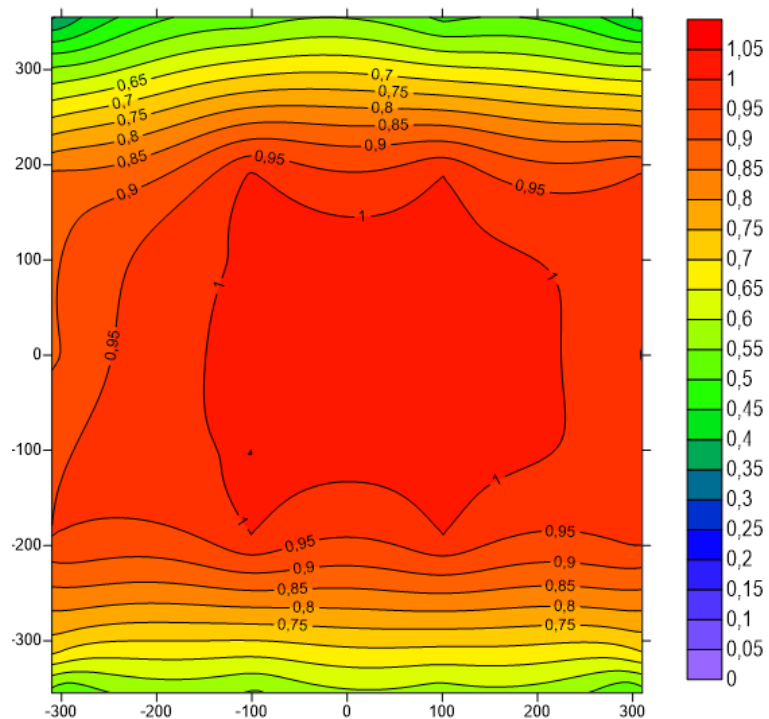


Γράφημα 11: Απεικόνιση κανονικοποιημένου πεδίου ροής (V/V_0) σε απόσταση 30cm και ταχύτητας ανέμου 15m/s.

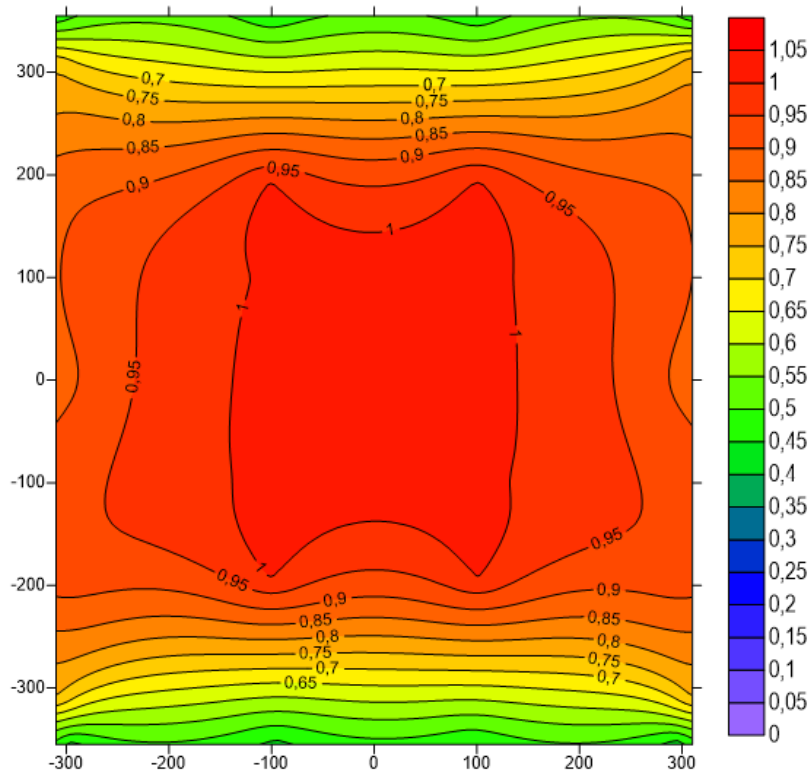


Γράφημα 12: Απεικόνιση κανονικοποιημένου πεδίου ροής (V/V_0) σε απόσταση 30cm και ταχύτητας ανέμου 20m/s.

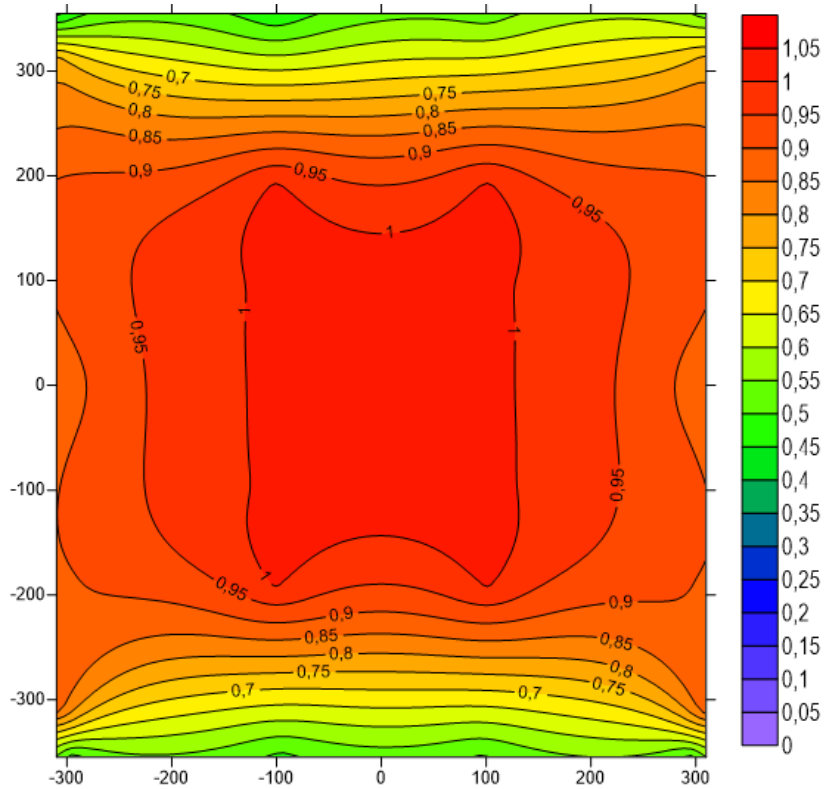
8.4 Γραφήματα απεικόνισης κανονικοποιημένου πεδίου ροής για απόσταση 45cm από το ακροφύσιο.



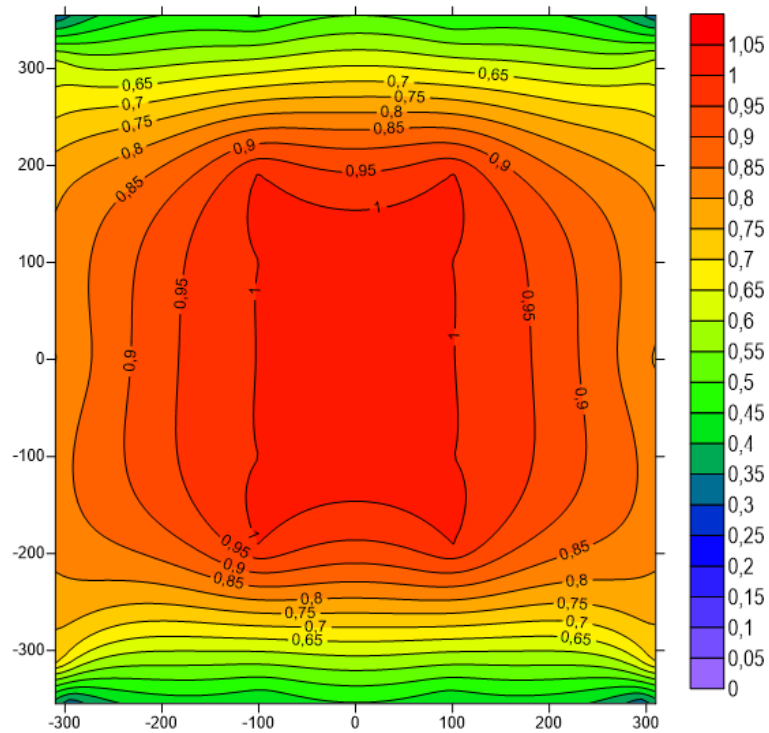
Γράφημα 13: Απεικόνιση κανονικοποιημένου πεδίου ροής (V/V_0) σε απόσταση 45cm και ταχύτητας ανέμου 5m/s.



Γράφημα 14: Απεικόνιση κανονικοποιημένου πεδίου ροής (V/V_0) σε απόσταση 45cm και ταχύτητας ανέμου 10m/s.

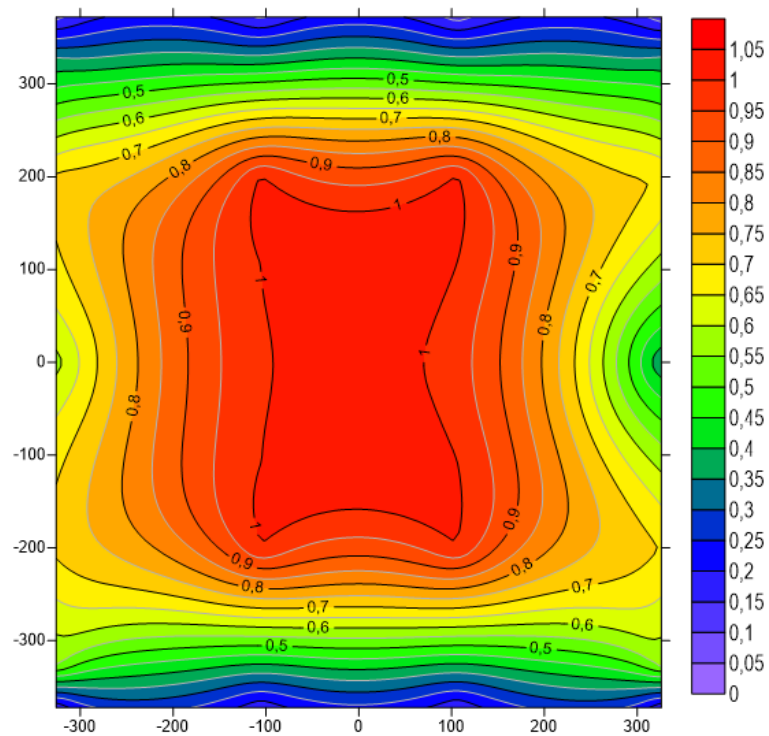


Γράφημα 15: Απεικόνιση κανονικοποιημένου πεδίου ροής (V/V_0) σε απόσταση 45cm και ταχύτητας ανέμου 15m/s.

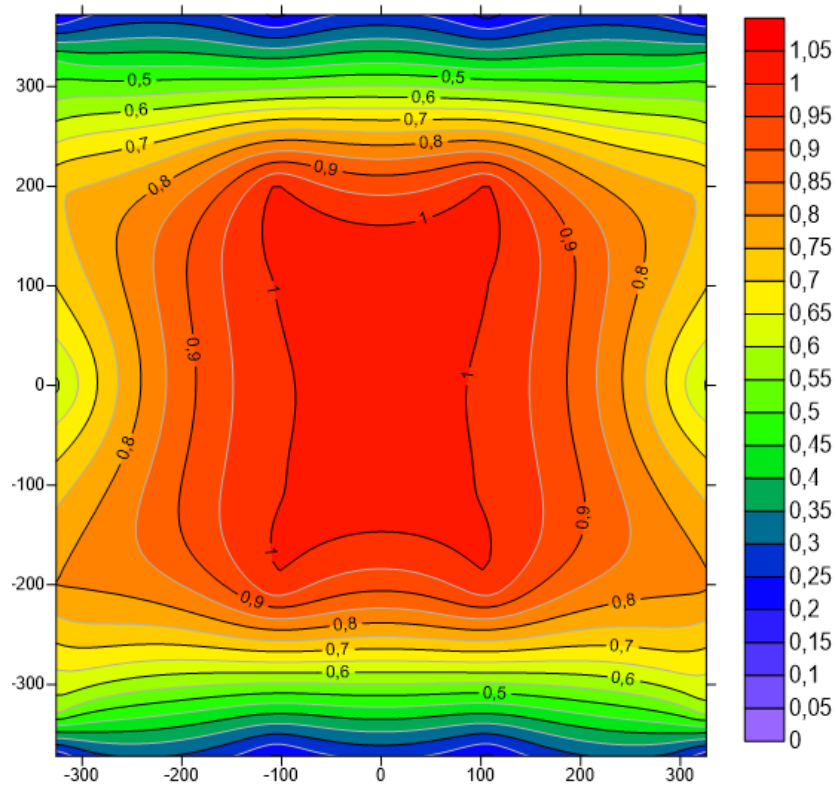


Γράφημα 16: Απεικόνιση κανονικοποιημένου πεδίου ροής (V/V_0) σε απόσταση 45cm και ταχύτητας ανέμου 20m/s.

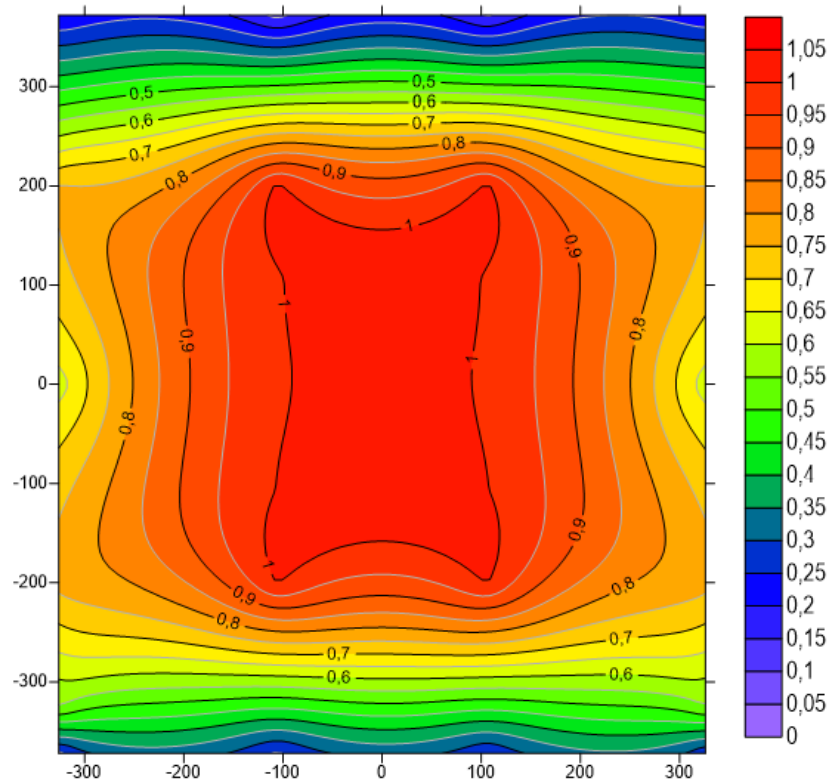
8.5 Γραφήματα απεικόνισης κανονικοποιημένου πεδίου ροής για απόσταση 60cm από το ακροφύσιο.



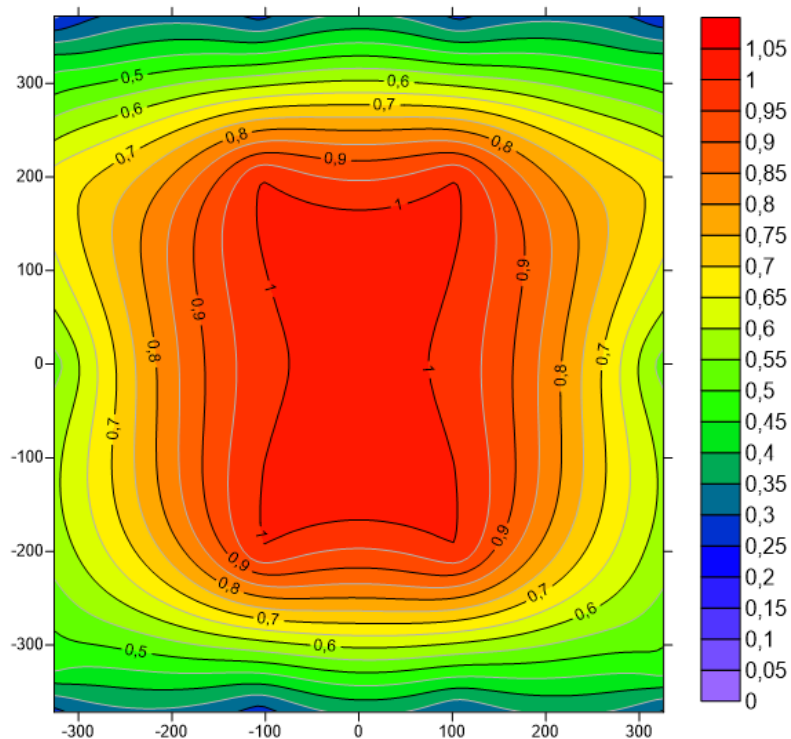
Γράφημα 17:Απεικόνιση κανονικοποιημένου πεδίου ροής (V/V_0) σε απόσταση 60cm και ταχύτητας ανέμου 5m/s.



Γράφημα 18:Απεικόνιση κανονικοποιημένου πεδίου ροής (V/V_0) σε απόσταση 60cm και ταχύτητας ανέμου 10m/s.



Γράφημα 19: Απεικόνιση κανονικοποιημένου πεδίου ροής (V/V_0) σε απόσταση 60cm και ταχύτητας ανέμου 15m/s.



Γράφημα 20: Απεικόνιση κανονικοποιημένου πεδίου ροής (V/V_0) σε απόσταση 60cm και ταχύτητας ανέμου 20m/s.

9. Τύρβη

9.1 Τι είναι η τύρβη ή τυρβώδης ροή.

Στη δυναμική των ρευστών, η τύρβη ή τυρβώδης ροή είναι ένας τύπος ροής ρευστού που χαρακτηρίζεται από χαοτική και ακανόνιστη κίνηση των σωματιδίων του ρευστού. Σε μια τυρβώδη ροή, τα σωματίδια του ρευστού κινούνται με απρόβλεπτο τρόπο, με δίνες και στροβιλισμούς που σχηματίζονται σε διάφορες θέσεις μέσα στο ρευστό. Αυτός ο τύπος ροής παρατηρείται συχνά σε ροές υψηλής ταχύτητας ή σε ροές γύρω από εμπόδια ή τραχείες επιφάνειες, όπου η κίνηση του ρευστού υπόκειται σε μεγάλες διαταραχές.

Η έναρξη της τυρβώδους ροής μπορεί σε κάποιο βαθμό να προβλεφθεί από τον αριθμό Reynolds. Η στρωτή ροή εμφανίζεται σε χαμηλούς αριθμούς Reynolds, όπου κυριαρχούν οι ιξώδεις δυνάμεις, και χαρακτηρίζεται από ομαλή, σταθερή κίνηση του ρευστού. Ενώ η τυρβώδης ροή εμφανίζεται σε υψηλούς αριθμούς Reynolds και κυριαρχείται από δυνάμεις αδράνειας, οι οποίες τείνουν να παράγουν χαοτικές δίνες, δίνες και άλλες αστάθειες της ροής. Αν και δεν υπάρχει κάποιο θεώρημα που να συνδέει άμεσα τον αριθμό Reynolds με την τύρβη, οι ροές σε αριθμούς Reynolds

μεγαλύτερους από 5000 είναι συνήθως τυρβώδεις, ενώ εκείνες σε χαμηλούς αριθμούς Reynolds συνήθως παραμένουν στρωτές.

9.2 Υπολογισμό Τύρβης

Σε μια αεροσήραγγα η ταχύτητα ανέμου ορίζεται συνήθως ως η σύνθεση μίας μέσης τιμής ταχύτητας ανέμου σε ορισμένο χρονικό διάστημα και διαφόρων διακυμάνσεων. Αυτό που προκύπτει είναι ότι υπάρχει έλλειψη περιοδικότητας με αποτέλεσμα να μην μπορεί να περιγραφεί με κάποιο τρόπο. Σε αυτή την περίπτωση μας βοηθάει η τύρβη που είναι σε θέση να αναλύσει τυχαία μεταβαλλόμενα συμβάντα

Η τύρβη προκύπτει από το πηλίκο της τυπικής απόκλισης (σ) κάθε σημείου προς την μέση ταχύτητα του σημείου αυτού.

Αναλυτικά:

Η μέση ταχύτητα προκύπτει από τον τύπο:

$$V_{av} = \frac{1}{N} \sum_i^N V_n$$

τυπική απόκλιση:

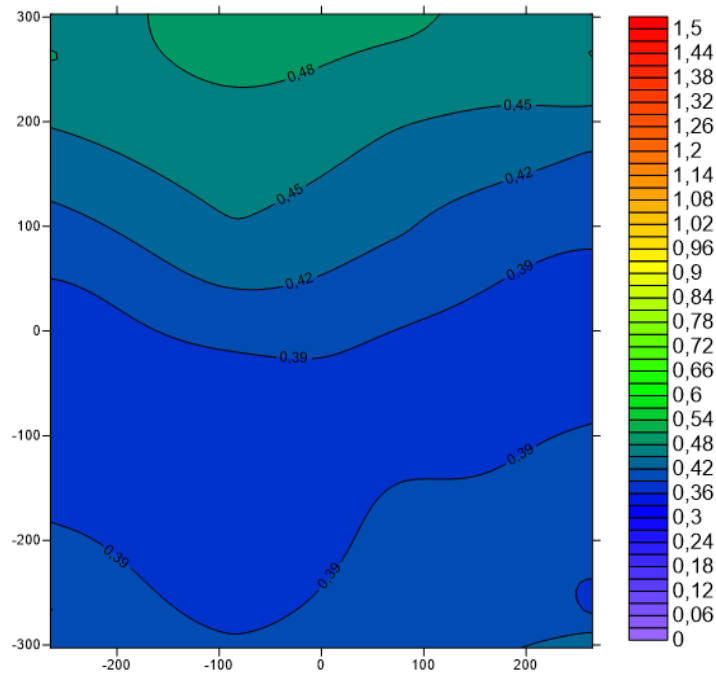
$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_i^N (V_n - V_{av})^2}$$

Και τέλος η τύρβη υπολογίζεται από τον τύπο :

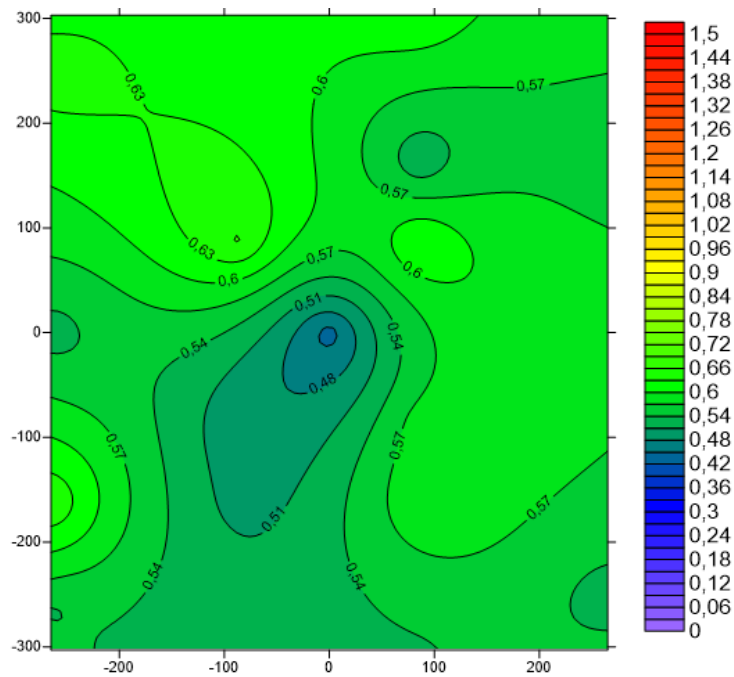
$$S = \frac{\sigma}{V_{av}}$$

10. Γραφήματα Απεικόνισης Τύρβης

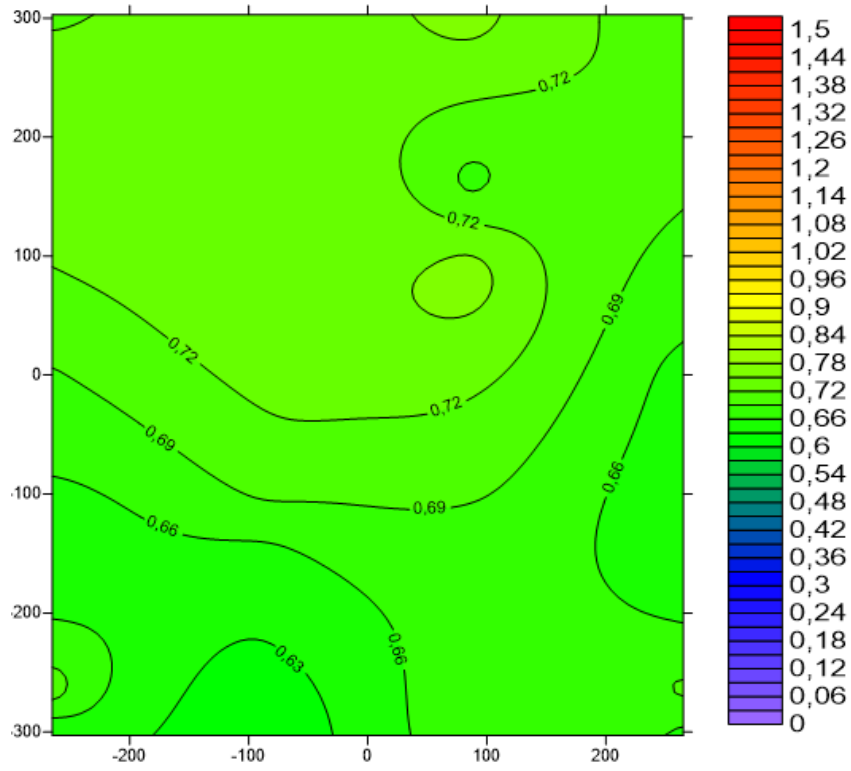
10.1 Γραφήματα απεικόνισης της επί% τύρβης για απόσταση 0cm από το ακροφύσιο.



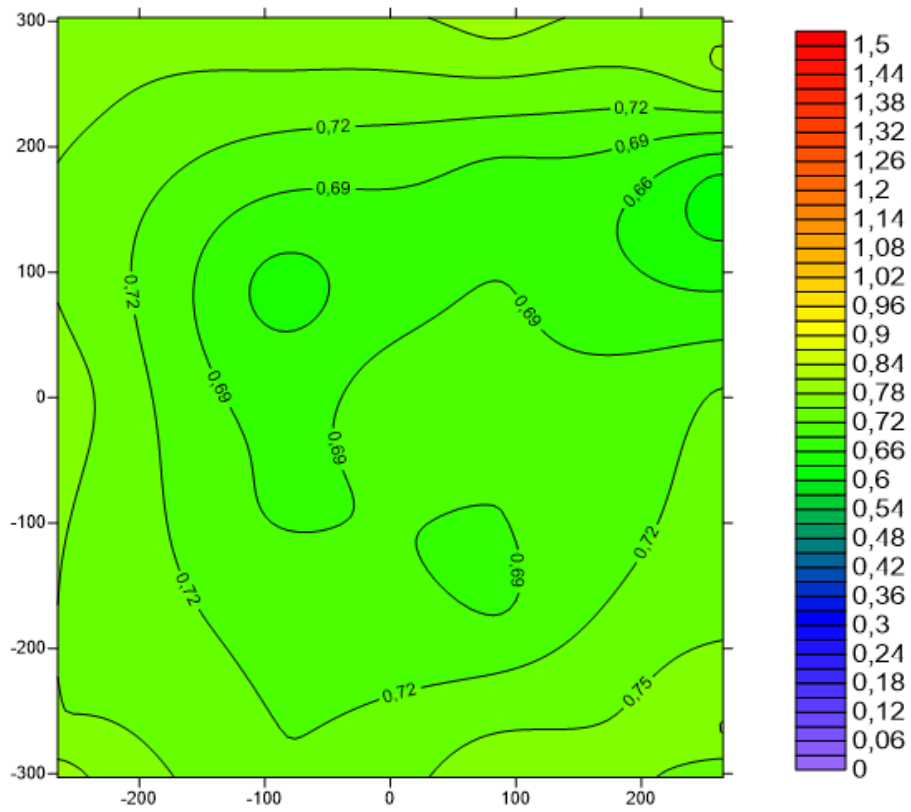
Γράφημα 21:Απεικόνιση επί της % τύρβης σε απόσταση 0cm και ταχύτητας ανέμου 5m/s.



Γράφημα 22:Απεικόνιση επί της % τύρβης σε απόσταση 0cm και ταχύτητας ανέμου 10m/s.

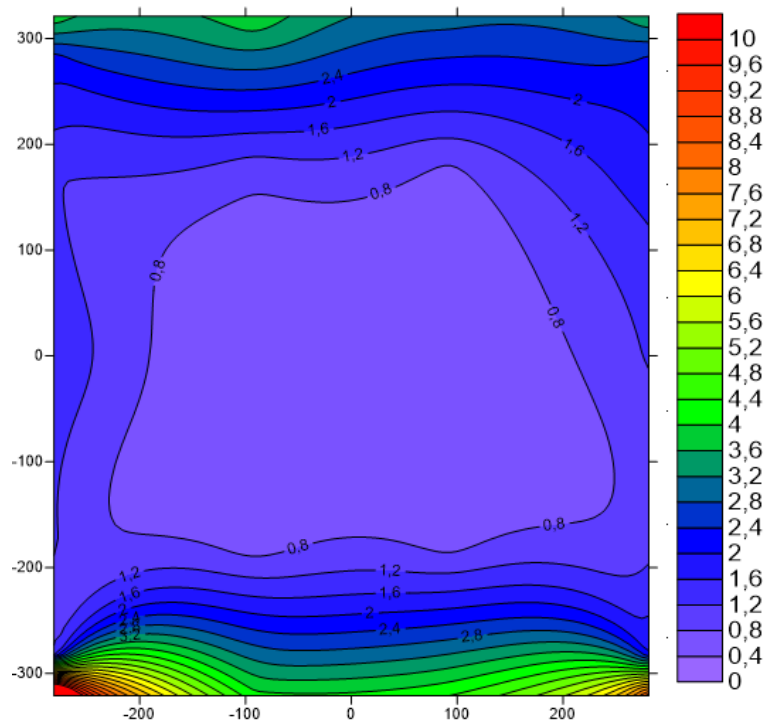


Γράφημα 23:Απεικόνιση επί της % τύρβης σε απόσταση 0cm και ταχύτητας ανέμου 15m/s.

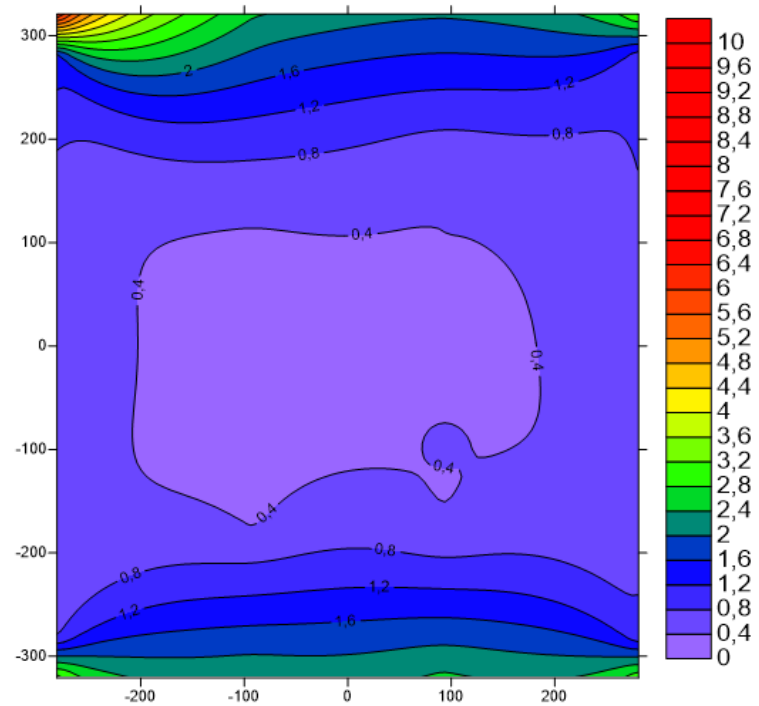


Γράφημα 24:Απεικόνιση επί της % τύρβης σε απόσταση 0cm και ταχύτητας ανέμου 20m/s.

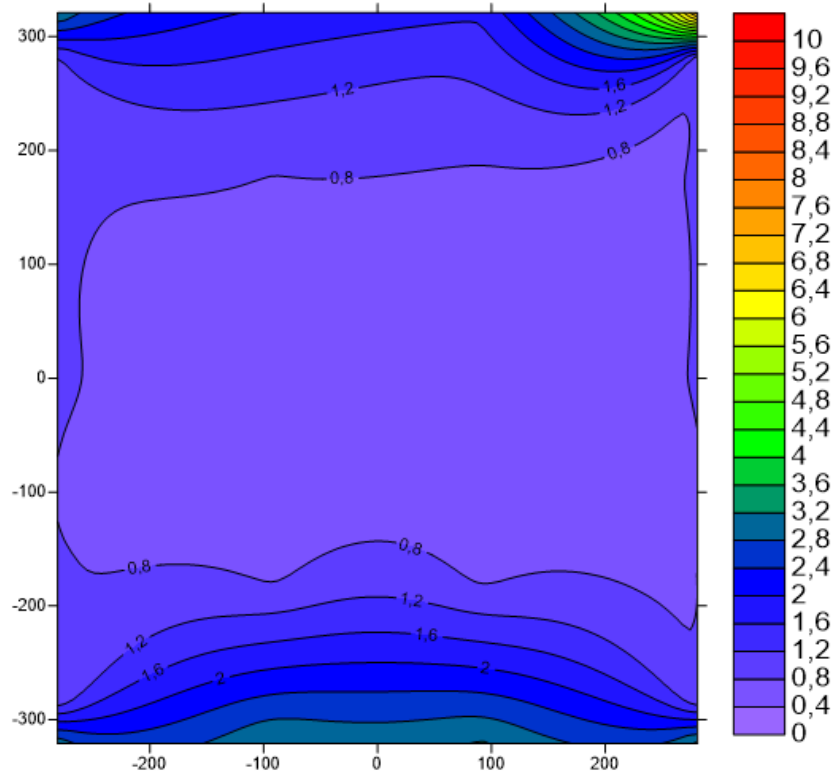
10.2 Γραφήματα απεικόνισης της επί% τύρβης για απόσταση 15cm από το ακροφύσιο.



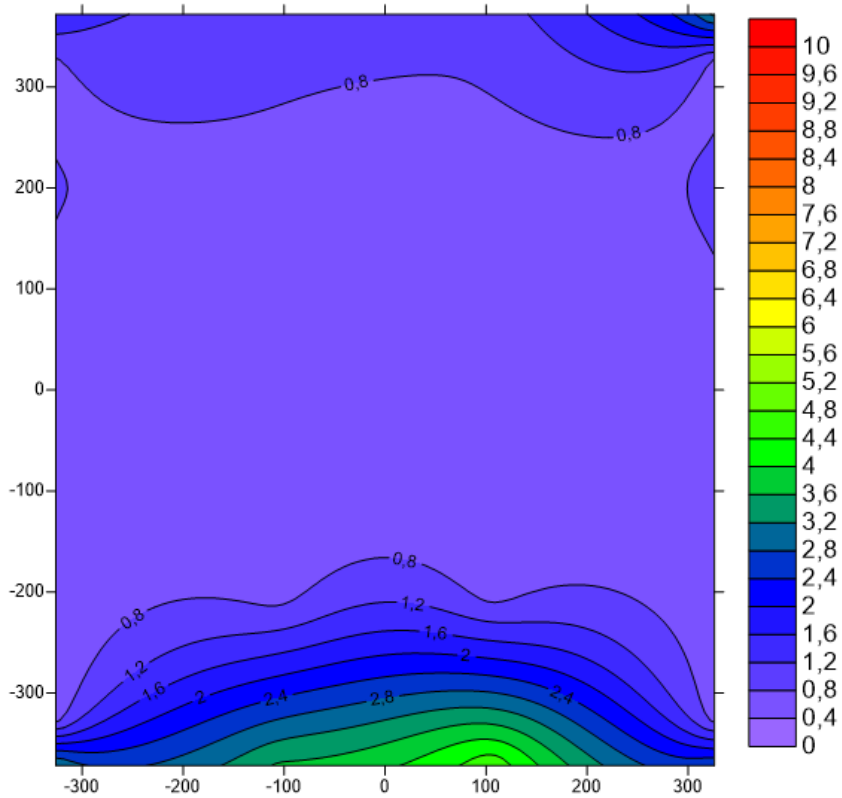
Γράφημα 25:Απεικόνιση επί της % τύρβης σε απόσταση 15cm και ταχύτητας ανέμου 5m/s.



Γράφημα 26:Απεικόνιση επί της % τύρβης σε απόσταση 15cm και ταχύτητας ανέμου 10m/s.

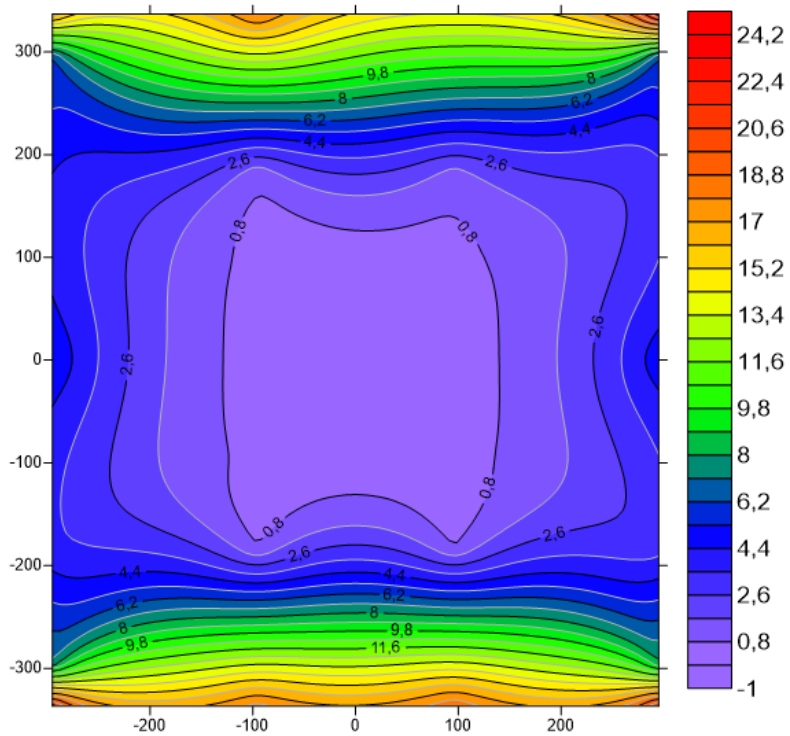


Γράφημα 27:Απεικόνιση επί της % τύρβης σε απόσταση 15cm και ταχύτητας ανέμου 15m/s.

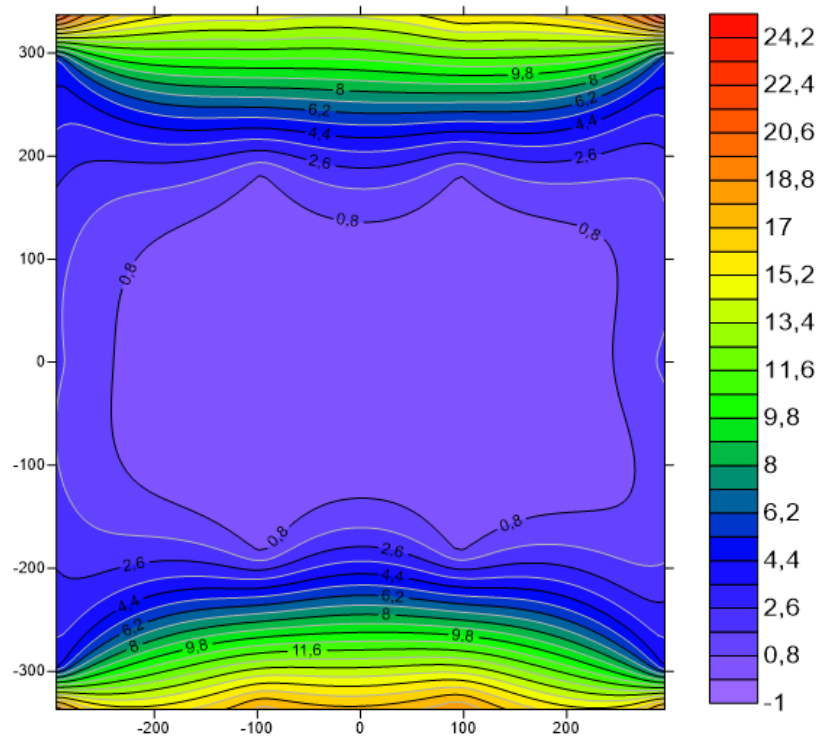


Γράφημα 28:Απεικόνιση επί της % τύρβης σε απόσταση 15cm και ταχύτητας ανέμου 20m/s.

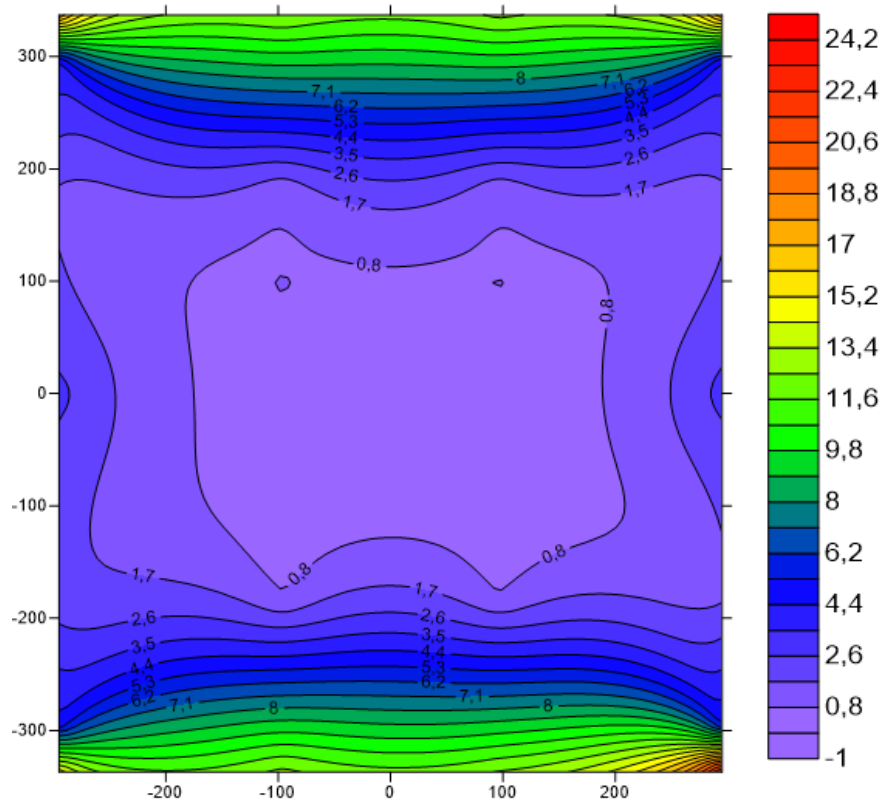
10.3 Γραφήματα απεικόνισης της επί% τύρβης για απόσταση 30cm από το ακροφύσιο.



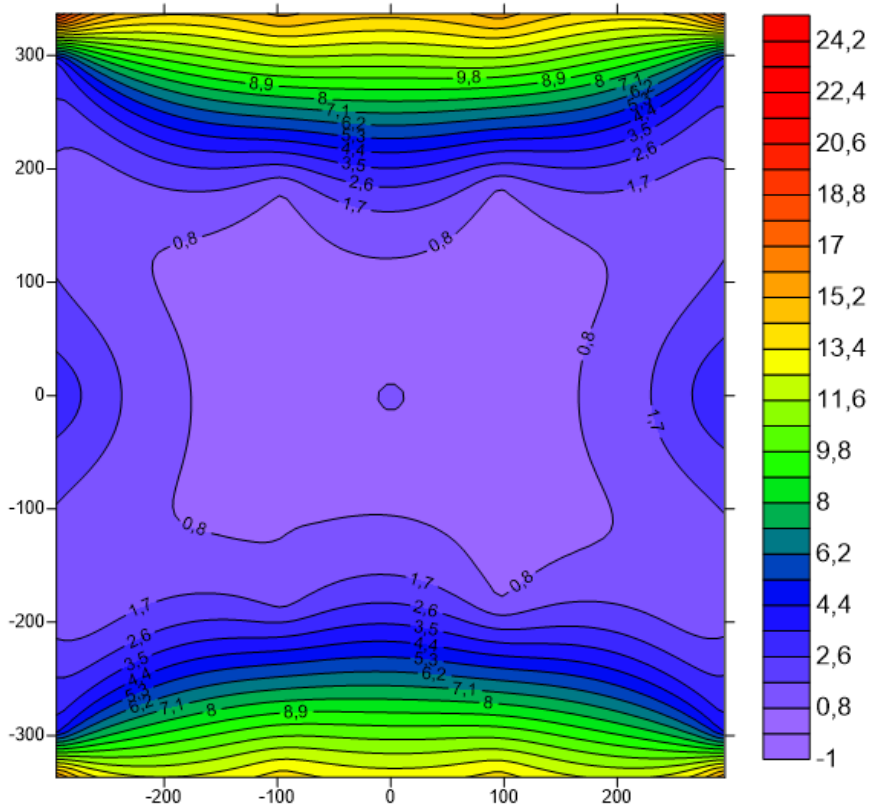
Γράφημα 29:Απεικόνιση επί της % τύρβης σε απόσταση 30cm και ταχύτητας ανέμου 5m/s.



Γράφημα 30:Απεικόνιση επί της % τύρβης σε απόσταση 30cm και ταχύτητας ανέμου 10m/s.

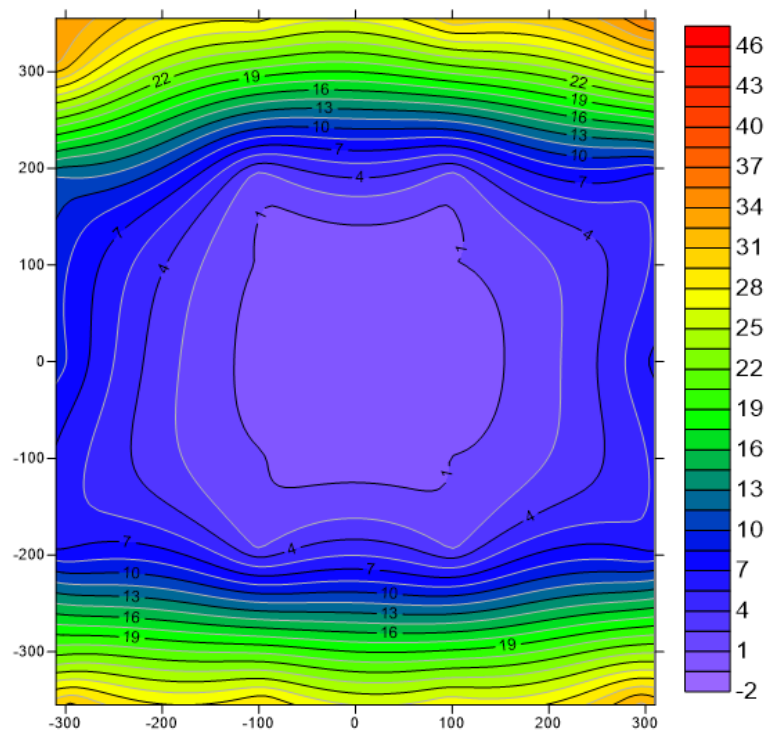


Γράφημα 31:Απεικόνιση επί της % τύρβης σε απόσταση 30cm και ταχύτητας ανέμου 15m/s.

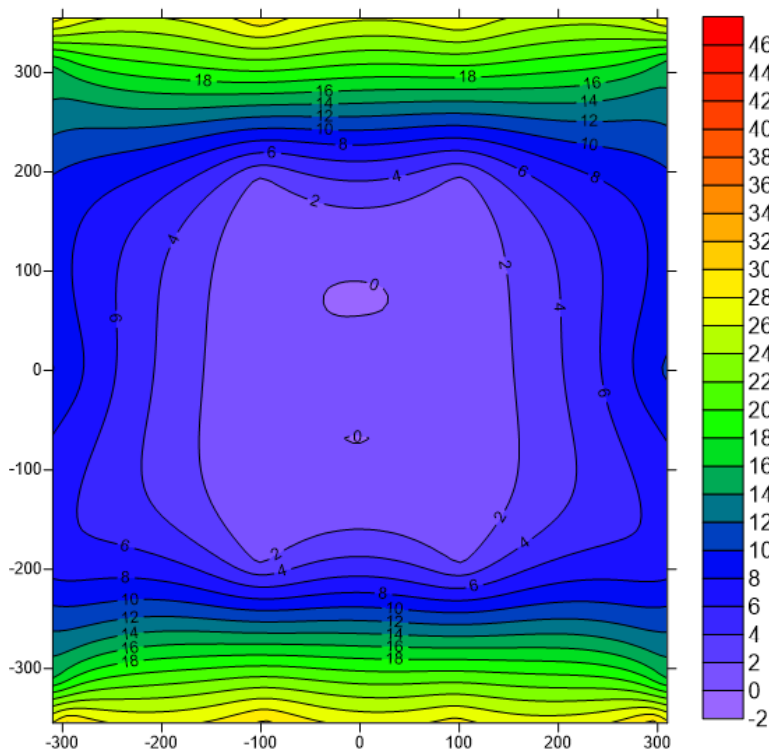


Γράφημα 32:Απεικόνιση επί της % τύρβης σε απόσταση 30cm και ταχύτητας ανέμου 20m/s.

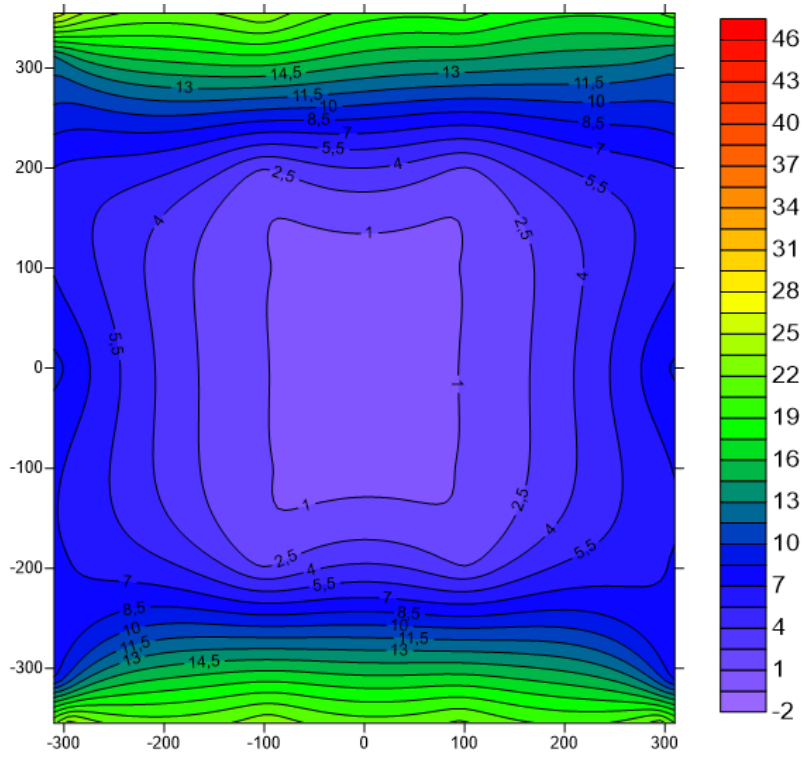
10.4 Γραφήματα απεικόνισης της επί% τύρβης για απόσταση 45cm από το ακροφύσιο.



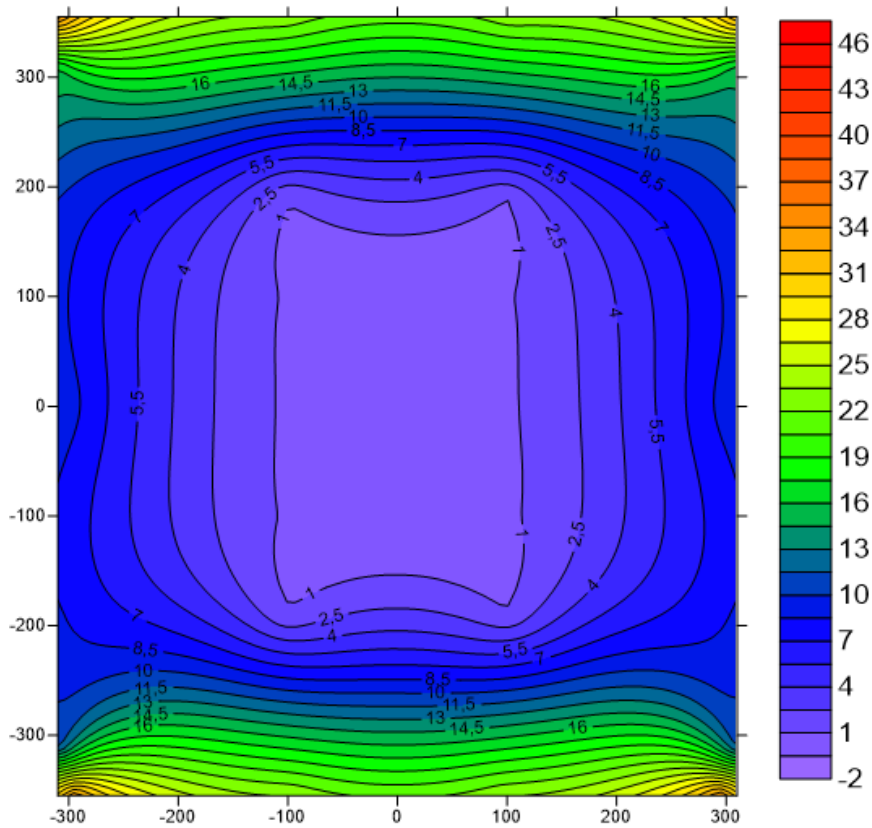
Γράφημα 33:Απεικόνιση επί της % τύρβης σε απόσταση 45cm και ταχύτητας ανέμου 5m/s.



Γράφημα 34:Απεικόνιση επί της % τύρβης σε απόσταση 45cm και ταχύτητας ανέμου 10m/s.

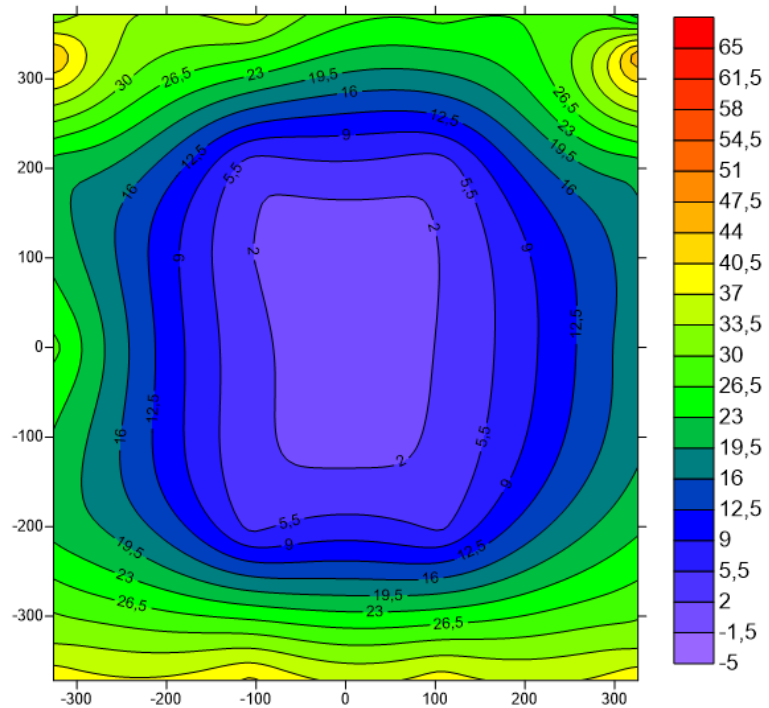


Γράφημα 35:Απεικόνιση επί της % τύρβης σε απόσταση 45m και ταχύτητας ανέμου 15m/s.

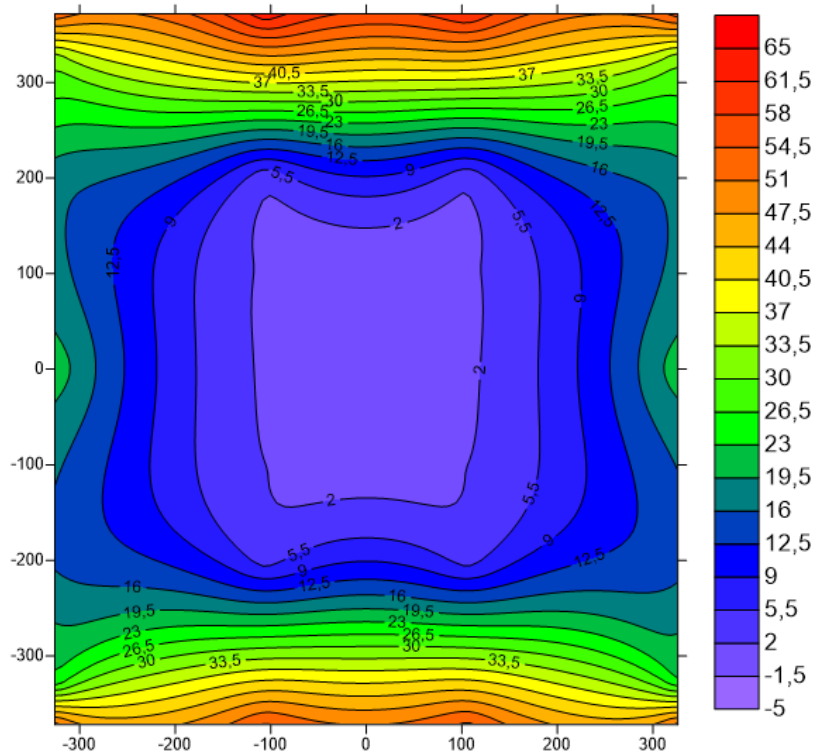


Γράφημα 36:Απεικόνιση επί της % τύρβης σε απόσταση 45m και ταχύτητας ανέμου 20m/s.

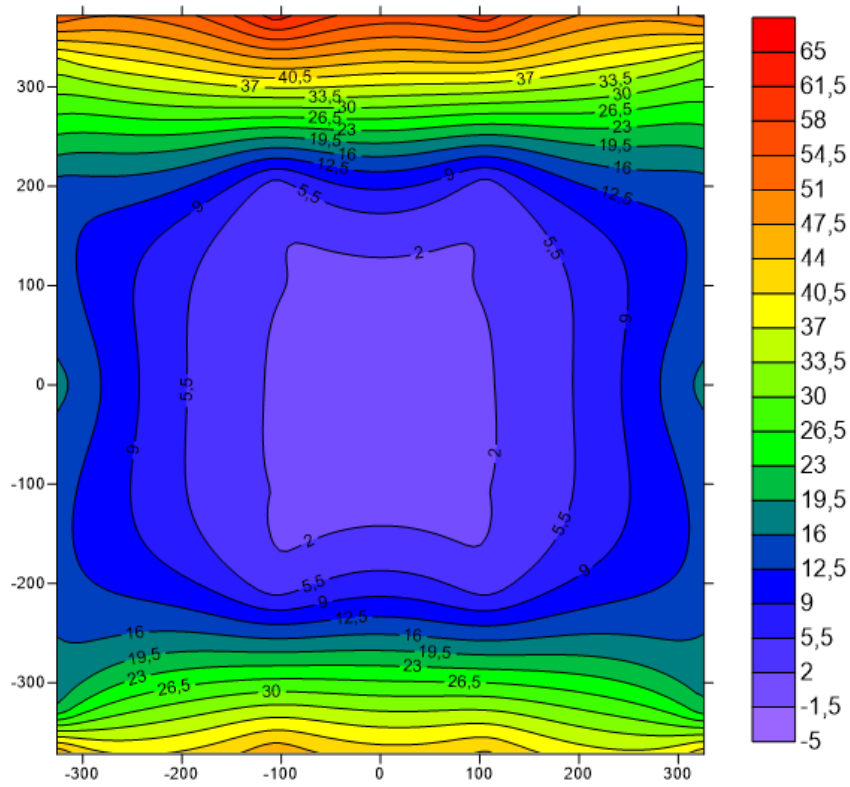
10.5 Γραφήματα απεικόνισης της επί% τύρβης για απόσταση 60cm από το ακροφύσιο.



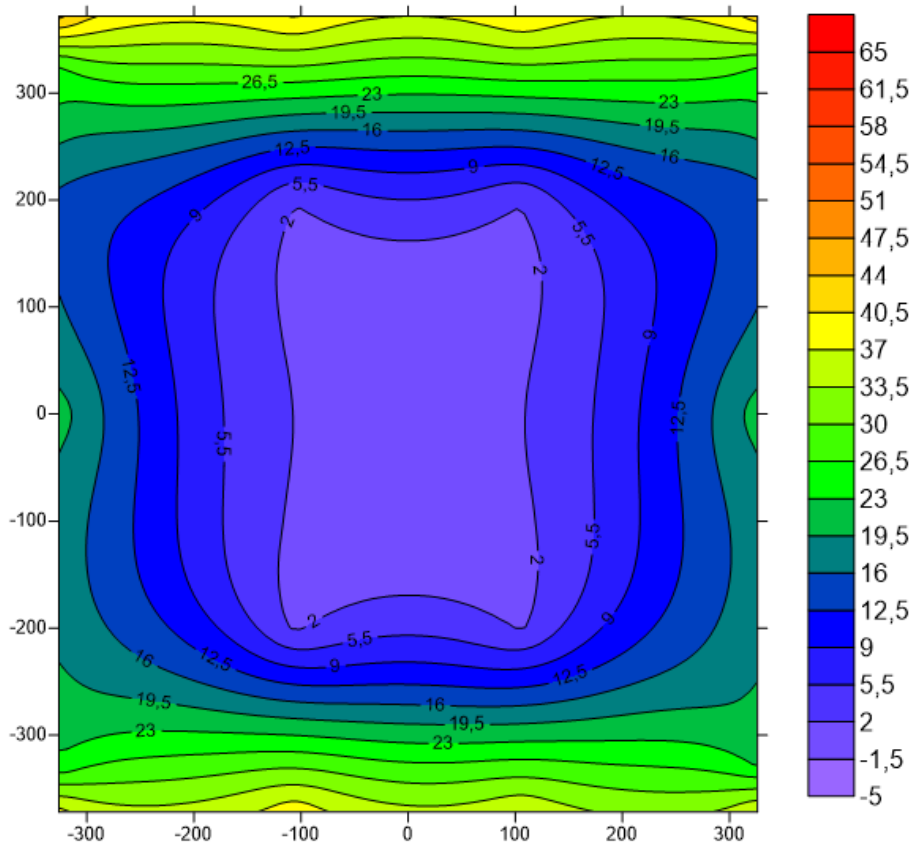
Γράφημα 37:Απεικόνιση επί της % τύρβης σε απόσταση 60cm και ταχύτητας ανέμου 5m/s.



Γράφημα 38:Απεικόνιση επί της % τύρβης σε απόσταση 60cm και ταχύτητας ανέμου 10m/s.



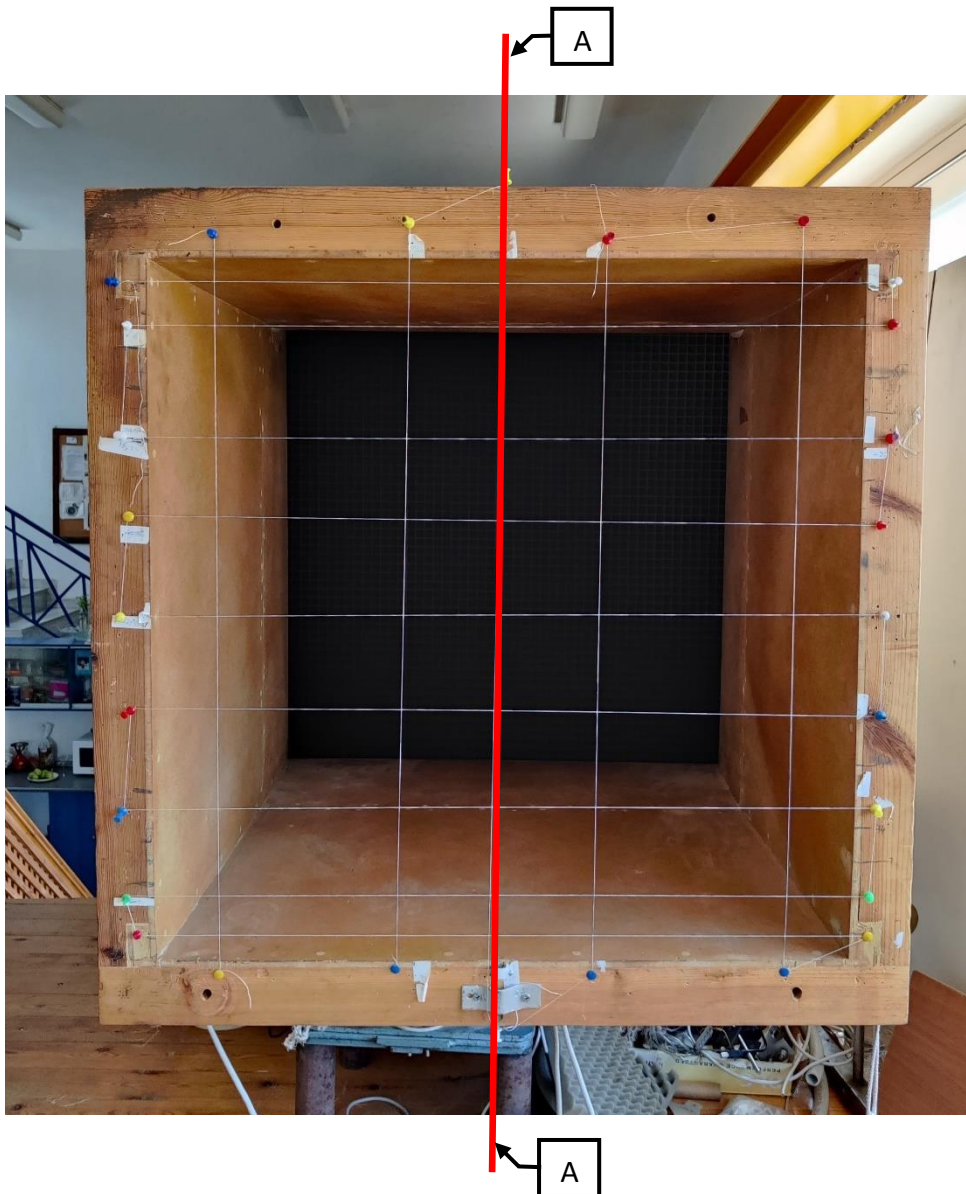
Γράφημα 39: Απεικόνιση επί της % τυρβης σε απόσταση 60m και ταχύτητας ανέμου 15m/s.



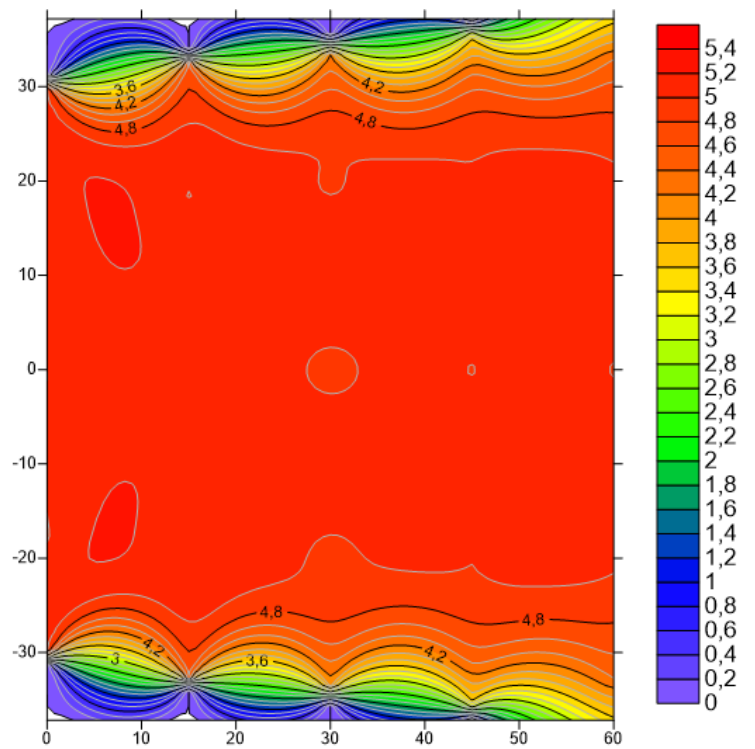
Γράφημα 40: Απεικόνιση επί της % τυρβης σε απόσταση 60m και ταχύτητας ανέμου 20m/s.

11. Γραφήματα ταχύτητας ανέμου σε οριζόντια και κατακόρυφη τομή

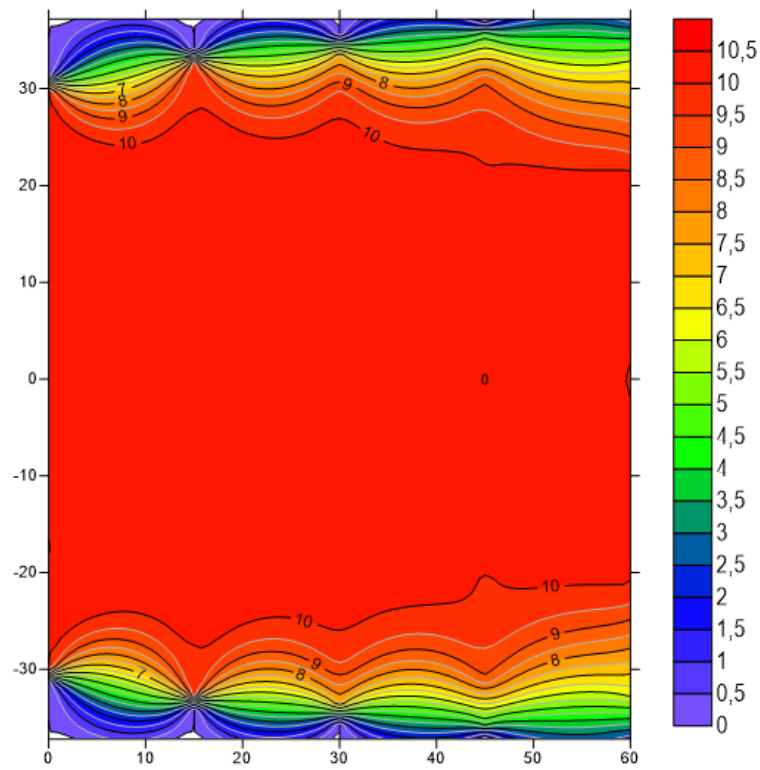
11.1 Γραφήματα απεικόνισης ταχύτητας ανέμου σε κατακόρυφη τομή A-A, στο $X=0$ για απόσταση 0-60cm.



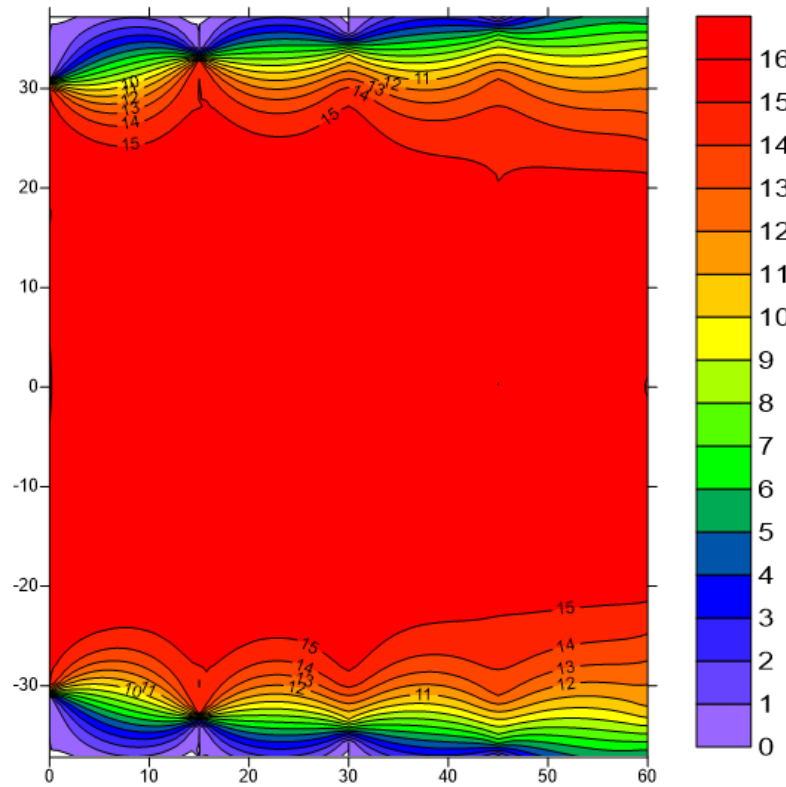
Εικόνα 44: Απεικόνιση τομής A-A για $X=0$ στο ακροφύσιο της αεροσήραγγας.



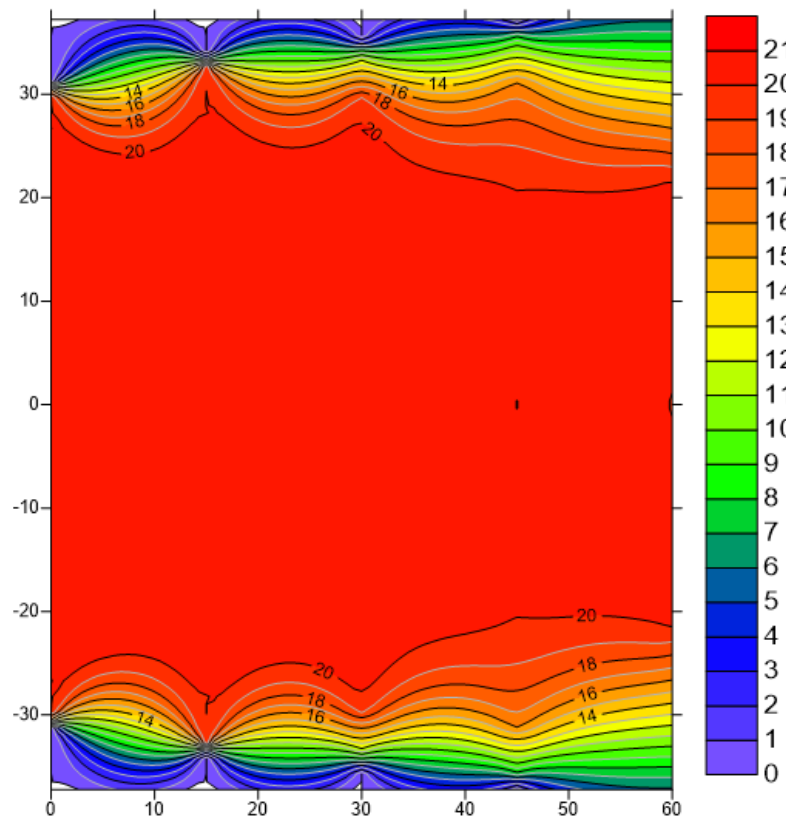
Γράφημα 41: Συμπεριφορά ταχύτητας ανέμου σε πλάγια όψη, για απόσταση 0-60cm και ταχύτητα ανέμου 5m/s



Γράφημα 42: Συμπεριφορά ταχύτητας ανέμου σε πλάγια όψη, για απόσταση 0-60cm και ταχύτητα ανέμου 10m/s.

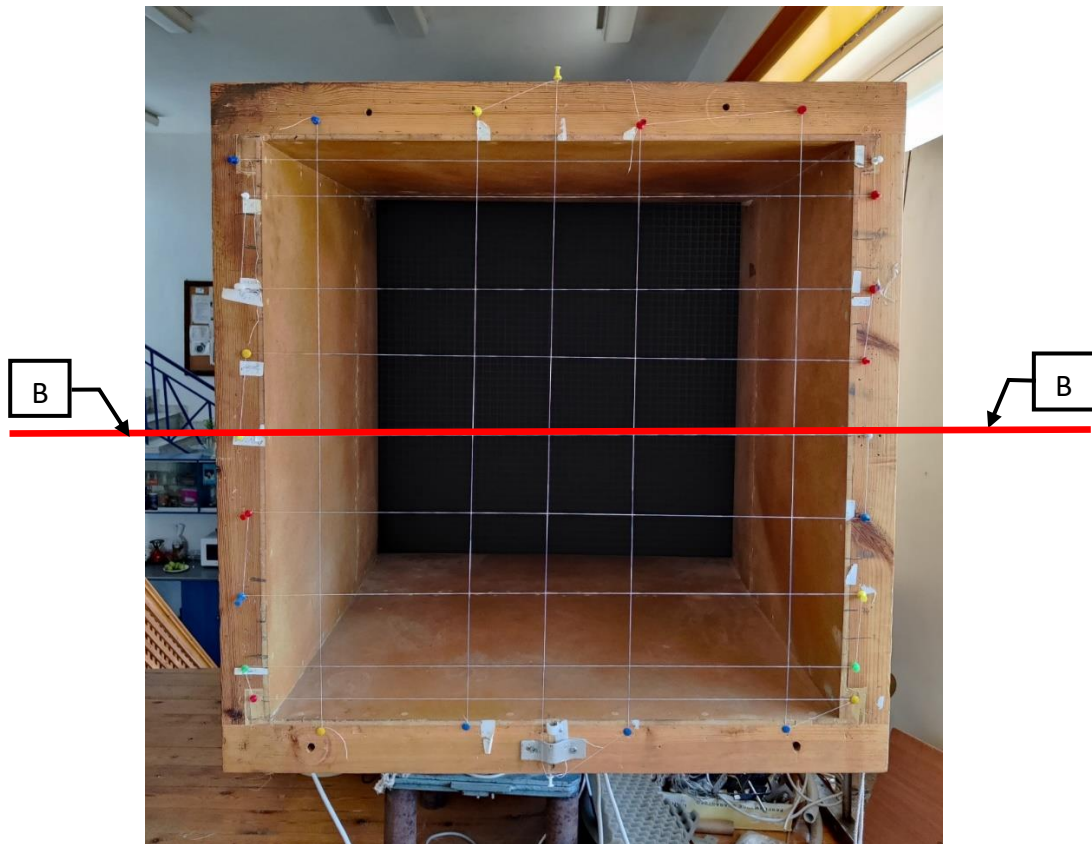


Γράφημα 43: Συμπεριφορά ταχύτητας ανέμου σε πλάγια όψη, για απόσταση 0-60cm και ταχύτητα ανέμου 15m/s.

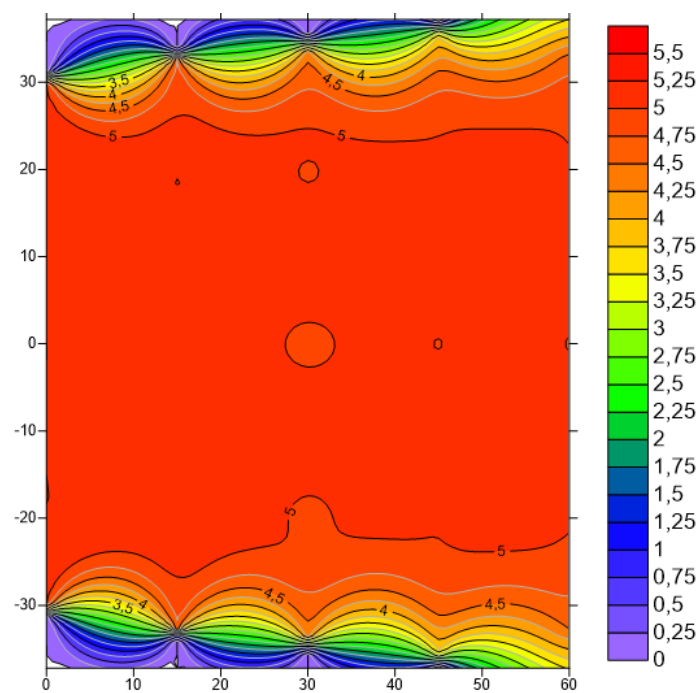


Γράφημα 44: Συμπεριφορά ταχύτητας ανέμου σε πλάγια όψη, για απόσταση 0-60cm και ταχύτητα ανέμου 20m/s

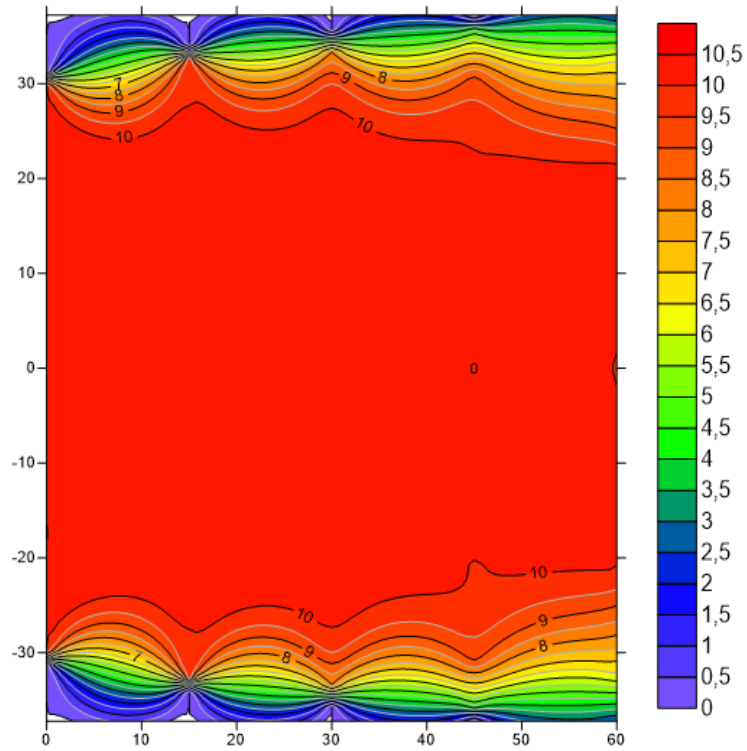
11.2 Γραφήματα απεικόνισης ταχύτητας ανέμου σε οριζόντια τομή B-B, $Y=0$ για απόσταση 0-60cm.



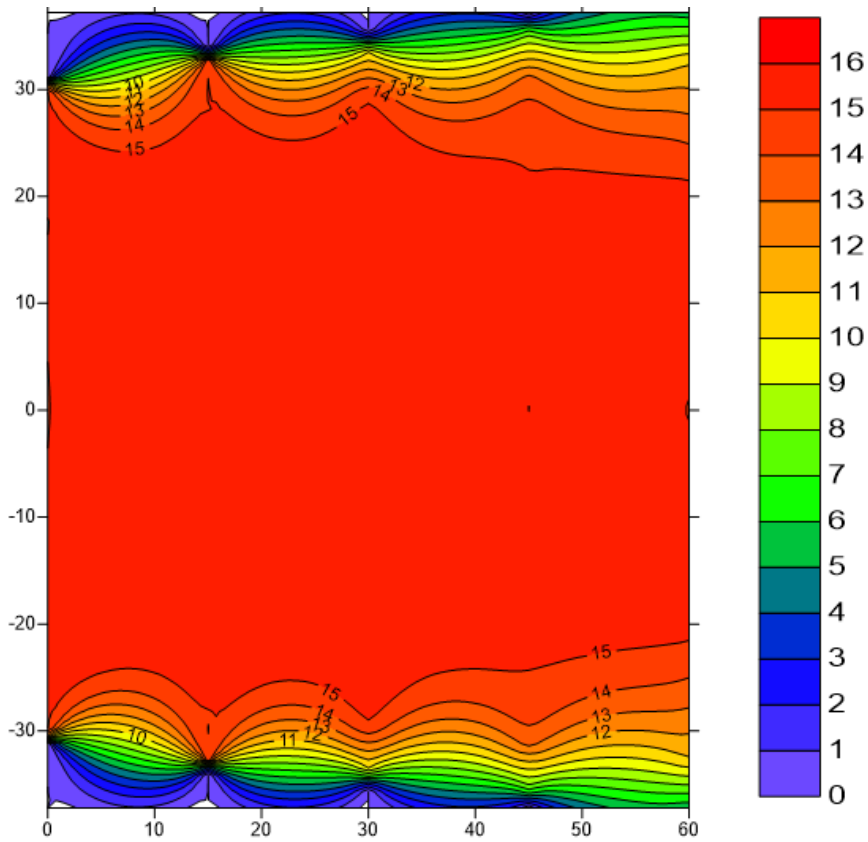
Εικόνα 45: Απεικόνιση τομής B-B για $Y=0$ στο ακροφύσιο της αεροσήραγγας.



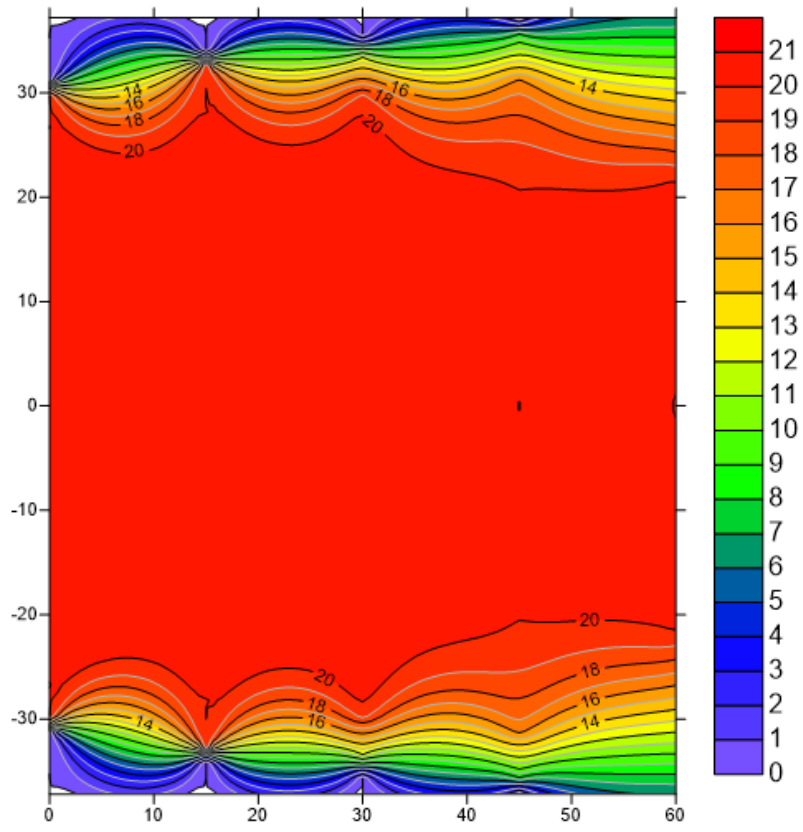
Γράφημα 45: Συμπεριφορά ταχύτητας ανέμου σε κάτοψη, για απόσταση 0-60cm και ταχύτητα ανέμου 5m/s



Γράφημα 46: Συμπεριφορά ταχύτητας ανέμου σε κάτοψη, για απόσταση 0-60m και ταχύτητα ανέμου 10m/s.



Γράφημα 47: Συμπεριφορά ταχύτητας ανέμου σε κάτοψη, για απόσταση 0-60m και ταχύτητα ανέμου 15m/s.



Γράφημα 48: Συμπεριφορά ταχύτητας ανέμου σε κάτοψη, για απόσταση 0-60cm και ταχύτητα ανέμου 20m/s.

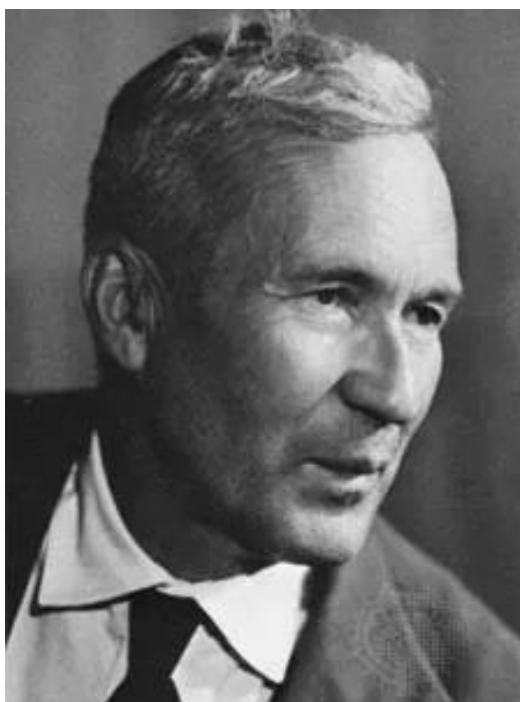
12. Διάγραμμα Kolmogorov

12.1 Ιστορικά στοιχεία

Ο Αντρέι Νικολάγεβιτς Κολμογκόροφ (25 Απριλίου 1903 στο Τάμποφ - 20 Οκτωβρίου 1987 στη Μόσχα) ήταν Ρώσος μαθηματικός που σημείωσε σημαντική πρόοδο στους τομείς της θεωρίας των πιθανοτήτων και της τοπολογίας. Στις αρχές της καριέρας του εργάστηκε πάνω στη διαισθητική λογική, και στις σειρές Φουριέ. Εργάστηκε επίσης στην τύρβη και την κλασική μηχανική, ενώ υπήρξε θεμελιωτής της αλγοριθμικής θεωρίας πολυπλοκότητας.

Ο Κολμογκόροφ εργάστηκε στο Κρατικό Πανεπιστήμιο της Μόσχας. Σπούδασε υπό τον Νικόλαϊ Luzin, παίρνοντας το διδακτορικό του το 1925, το 1931 έγινε καθηγητής του πανεπιστημίου. Το 1939 έλαβε τον τίτλο του ακαδημαϊκού της Ακαδημίας Επιστημών της ΕΣΣΔ. Κατά τη διάρκεια της καριέρας του έλαβε πολλές διακρίσεις μερικές από αυτές είναι. Το βραβείο Στάλιν το 1941 για την εργασία του στην Πιθανότητα και τη Στατιστική. Το βραβείο Wolf το 1980 για την συνολική συνεισφορά του στην επιστήμη. Ενώ έγινε ο πρώτος μαθηματικός από την ΕΣΣΔ που εξελέγη μέλος της Αμερικάνικης Εθνικής Ακαδημίας Επιστημών το 1958.

Αν και ο κατάλογος όλων των συνεισφορών του είναι πολύ μακρύς για να συμπεριληφθεί, ένα πράγμα είναι σαφές. Παρά την αντισυμβατική του ανατροφή, ο Κολμογορον ήταν ένα εξαιρετικά προικισμένο άτομο και ένας παραγωγικός ερευνητής που βοήθησε στην προώθηση των μαθηματικών και των πρακτικών εφαρμογών τους.



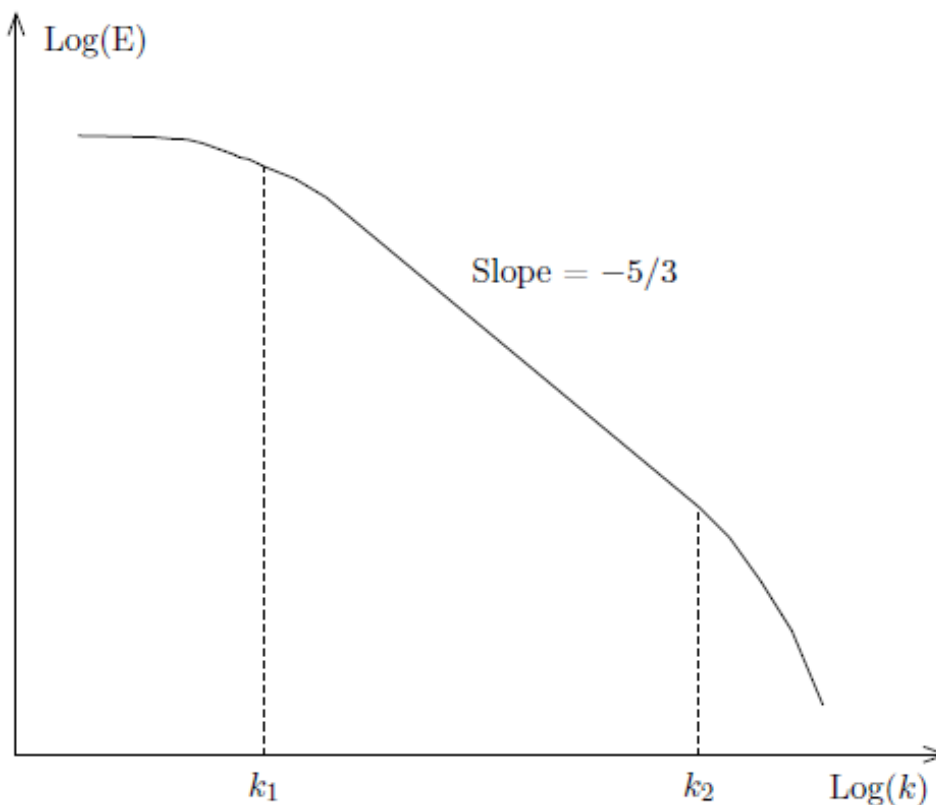
Εικόνα 46: Αντρέι Νικολάγεβιτς Κολμογκόροφ

12.2 Ο Νόμος του Kolmogorov -5/3

Ένα από τα πολλά θέματα που ανέλυσε ο Kolmogorov ήταν η τυρβώδη ροή που υπάρχει στους κινητήρες αεριωθούμενων αεροσκαφών. Έτσι το 1941 δημοσίευσε ένα άρθρο [A. N. Kolmogorov, Local structure of turbulence in an incompressible fluid for very large Reynolds numbers, Doklady Acad Sci. USSR 31 (1941) 301-305] όπου μέσα σε αυτό ανέλυε και το νόμο του “-5/3”.

Ο νόμος Kolmogorov -5/3 περιγράφει την ανάλυση της τυρβώδους κίνησης σε ένα ρευστό σε μεγάλες κλίμακες. Είναι ένας από τους πιο γνωστούς και σημαντικούς νόμους στην τύρβη, η οποία αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα της φυσικής. Ο νόμος Kolmogorov -5/3 περιγράφει τη σχέση μεταξύ του μεγέθους της τύρβης και της συχνότητας εμφάνισής της στην κλίμακα στην οποία μπορεί να μετρηθεί. Συγκεκριμένα, ο νόμος αυτός δηλώνει ότι η ενέργεια της τύρβης σε μια δεδομένη κλίμακα είναι αντιστρόφως ανάλογη της τρίτης δύναμης της κλίμακας ή $E(k) \sim k^{-5/3}$, όπου $E(k)$ είναι η ενέργεια της τύρβης στην κλίμακα k .

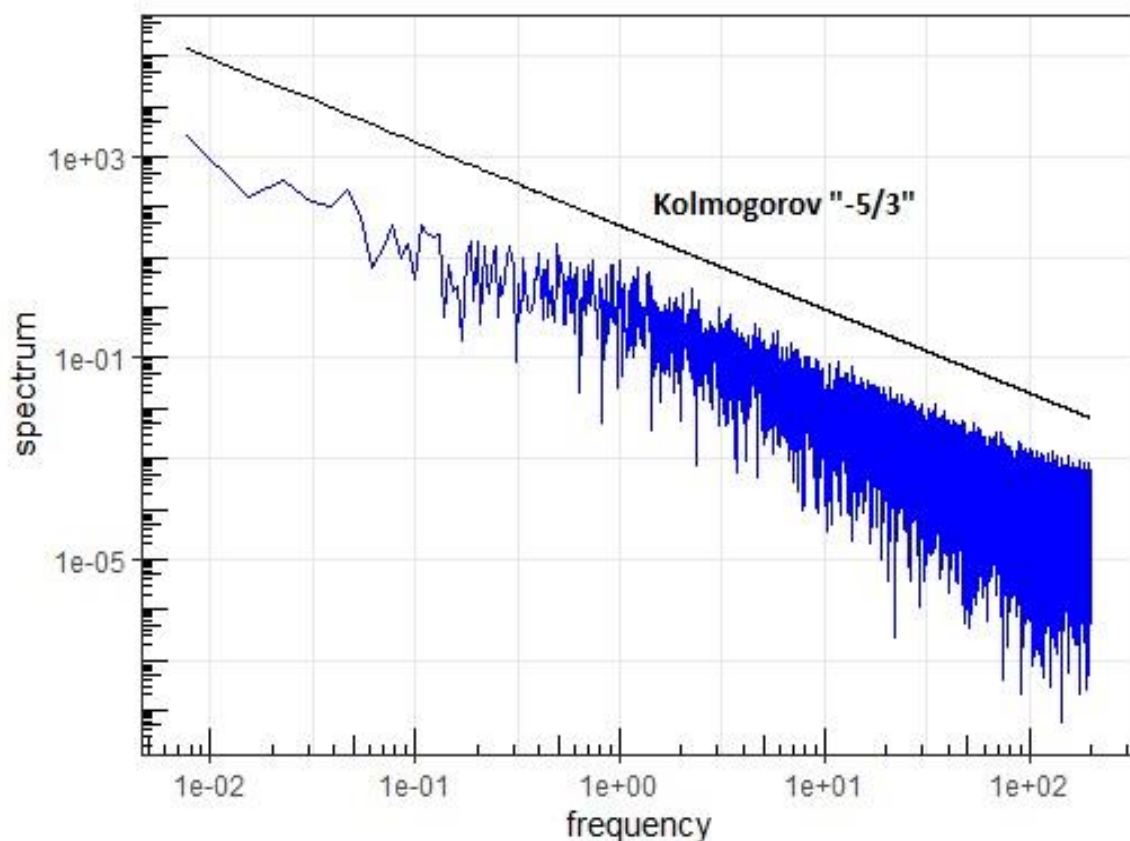
Ο νόμος Kolmogorov -5/3 είναι σημαντικός για την κατανόηση των φαινομένων τύρβης, καθώς επιτρέπει την πρόβλεψη της κίνησης της τύρβης σε διαφορετικές κλίμακες. Επιπλέον, ο νόμος αυτός είναι σημαντικός στη μελέτη της κατανομής της ενέργειας στο ρευστό και στο σχεδιασμό μηχανολογικών εφαρμογών που περιλαμβάνουν ροή ρευστών, όπως στο σχεδιασμό αεροσκαφών και ανεμογεννητριών.



Εικόνα 47: Το Ενεργειακό φάσμα καμπύλη Log-Log.

12.3 Εφαρμογή του νόμου Kolmogorov στην Αεροσήραγγα του εργαστήριου

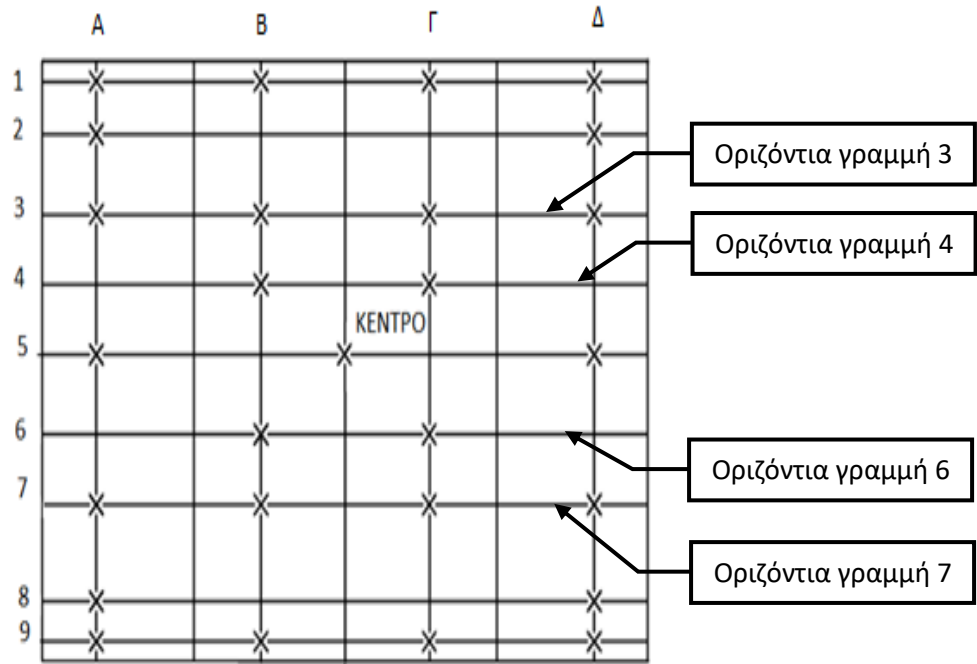
Η διαδικασία ξεκίνησε με την καταγραφή των δεδομένων στην αεροσήραγγα του εργαστήριου. Αρχικά κοίταξα αν το αισθητήριο (Bianos) είναι καθαρό και τοποθετημένο στο κέντρο της αεροσήραγγας. Έπειτα άνοιξα όλα τα παράθυρα του εργαστήριου για να μην δημιουργούν στροβιλισμούς και επηρεάσουν την μέτρηση. Τέλος άνοιξα το πρόγραμμα labview (WindTunnelMeasurement) και ξεκίνησα την καταγραφή των μετρήσεων της ταχύτητας ανέμου από το 0 έως τα 20m/s με το βήμα αλλαγής συχνότητας του inverter να είναι 0,10(Hz/s) και συχνότητα δειγματοληψίας τα 10000Hz. Τις μετρήσεις που κατέγραψα τις επεξεργαστικά με την βοήθεια του Rstudio. Το πρόγραμμα αυτό βοήθησε στο να εκτυπωθεί ένα διάγραμμα (spectrum-frequency) των μετρήσεων και της κλίσης kolmogorov $-5/3$.



Διάγραμμα 2: Το ενεργειακό φάσμα της αεροσήραγγας.

13. Συμπεράσματα-Παρατηρήσεις

13.1 Συμπεράσματα από τα γραφήματα στις ταχύτητας ανέμου.



Εικόνα 48. Χαρτογράφηση διατομής ακροφυσίου.

Με μία πρώτη ανάγνωση των γραφημάτων της ταχύτητας ανέμου, γίνεται φανερό ότι υπάρχει μια ιδανική περιοχή πραγματοποίησης των δοκιμών σε όλες τις ταχύτητες και αποστάσεις. Η περιοχή αυτή βρίσκεται ανάμεσα στα σημεία (3Α,3Δ)-(7Α,7Δ). Επίσης να σημειωθεί ότι από την απόσταση των 30cm και μετά από το επίπεδο εξόδου, έχουμε αλληλεπίδραση της ροής του ανέμου με το πάτωμα και το παράθυρο που βρίσκεται δίπλα από την αεροσήραγγα.

Αναλυτικές παρατηρήσεις για κάθε γράφημα ταχύτητας ανέμου.

1. Γραφήματα για απόσταση 0cm.

- Για ταχύτητα ανέμου 5m/s. Παρατηρούνται αμελητέες μεταβολές στο πεδίο ροής των μετρήσεων που κυμαίνονται από 0,2-2%.
- Για ταχύτητα ανέμου 10m/s. Η συμπεριφορά της ταχύτητας είναι πιο ομαλή καθώς οι μεταβολές κυμαίνονται σε όλο το πεδίο ροής από 0,2-1%.
- Για ταχύτητα ανέμου 15m/s. Ομοίως παρατηρείται η ίδια συμπεριφορά της ταχύτητας με τα 10m/s καθώς οι μετρήσεις είναι της τάξεως 0,2-1,8%.

- Για ταχύτητα ανέμου 20 m/s. Παρατηρούνται ένα ομοιόμορφο πεδίο ροής με μικρές διακύμανσης στην ταχύτητα του ανέμου 0,2-2,5%. Παρατηρείται μια περιοχή κοντά στην περιφέρεια στο 3Δ (δες Εικόνα 48), όπου έχουμε μία αύξηση της ταχύτητας κατά 5%. Πιθανόν οφείλεται στο ότι αυτό το σημείο βρίσκεται κοντά στο παράθυρο.

2. Γραφήματα για απόσταση 15cm.

- Για ταχύτητα ανέμου 5m/s. Οι μεταβολές στην ταχύτητα είναι μικρές στο 1%. Επίσης υπάρχουν αναταράξεις στη ροή του ανέμου στις γωνίες στο κάτω μέρος του γραφήματος, λόγω της ορθογωνικής διατομής του ακροφυσίου.
- Για ταχύτητα ανέμου 10m/s. Σε αυτό το γράφημα έχουμε μια πιο ομαλή ροή ανέμου που κυμαίνεται στο 1-2%.
- Για ταχύτητα ανέμου 15m/s. Σε αυτή τη περίπτωση οι διακυμάνσεις της ταχύτητας ανέμου είναι στο 1-2%. Παρατηρείται το φαινόμενο των στροβιλισμών στις γωνίες λόγω της διατομής του ακροφυσίου με τις μεταβολές να είναι 6-7%.
- Για ταχύτητα ανέμου 20m/s. Η συμπεριφορά του ανέμου είναι ομοιόμορφη σχεδόν σε όλο το τμήμα του πεδίου ροής με μεταβολές 1-2%. Ενώ παρατηρούνται μικρές απώλειες ταχύτητας στο κάτω χείλος του ακροφυσίου της τάξεως 8%.

3. Γραφήματα για απόσταση 30cm.

- Για ταχύτητα ανέμου 5m/s. Έχει δημιουργηθεί μία περιοχή στο εσωτερικό του ακροφυσίου όπου υπάρχει μία ομοιόμορφη ροή της ταχύτητας ανέμου με την διακύμανση να είναι στο 2%. Παράλληλα παρατηρείται διακύμανση στο άνω και κάτω μέρος του ακροφυσίου πάνω από την οριζόντια γραμμή 3 και 7 (δες Εικόνα 48), το οποίο οφείλεται στην κλίση της ροής διότι, το επίπεδο μέτρησης είναι σαφώς πιο μακριά από το ακροφύσιο της αεροσήραγγας με αποτέλεσμα σε εκείνα τα σημεία η μεταβολή να κυμαίνεται από 10-20%
- Για ταχύτητα ανέμου 10 και 15 m/s. Η συμπεριφορά της ροής του ανέμου είναι όμοια με αυτή για ταχύτητα 5m/s. Με την μόνη διαφορά να εντοπίζεται στην αύξηση διακύμανση 15-30% λόγω της αύξησης της ταχύτητας.
- Για ταχύτητα ανέμου 20m/s. Ομοίως με τη συμπεριφορά της ροής για τις ταχύτητες 5,10 και 15 m/s. Με την μεταβολή να κυμαίνεται σε αυτήν την περίπτωση 25-40%.

4. Γραφήματα για απόσταση 45cm.

- Για ταχύτητα ανέμου 5m/s. Αρχικά παρατηρούμε μια ομοιόμορφη συμπεριφορά στο κέντρο του ακροφυσίου με την μεταβολή της ταχύτητας να είναι 5-9%. Επιπλέον λόγω της απομάκρυνσης από το ακροφύσιο, το άνω και κάτω τμήματα πάνω από την οριζόντια γραμμή 3 και 7 (δες Εικόνα

48), αλληλοεπιδρούν με το πλαίσιο της αεροσήραγγας, με αποτέλεσμα να παρατηρείται μείωση στην ταχύτητα σε ποσοστό περίπου 30-45%

- Για ταχύτητα ανέμου 10m/s. Ομοίως με τη περίπτωση για ταχύτητα 5m/s. Με τη διακύμανση της ταχύτητας ανέμου στα άκρα να είναι 50-60%
- Για ταχύτητα ανέμου 15m/s. Ομοίως με την περίπτωση των 10m/s.
- Για ταχύτητα ανέμου 20m/s. Η συμπεριφορά της ροής είναι ομοιόμορφα κατανομημένη στη περιοχή ενδιαφέροντος, μεταξύ των οριζόντιων γραμμών 3 και 7 (δες Εικόνα 48), με την μεταβολή της ταχύτητάς να κυμαίνεται 5-15%. Ενώ πέρα από αυτούς τους τομείς η μείωση στην ταχύτητα είναι αισθητή και φτάνει έως 65%.

5. Γραφήματα για απόσταση 60cm

- Για ταχύτητα ανέμου 5m/s. Αυτό που παρατηρείται είναι ότι η ωφέλιμη περιοχή μελέτης έχει μειωθεί αισθητά και βρίσκεται μεταξύ των σημείων 3B, 3Γ, 7B, 7Γ. Αυτό οφείλεται λόγω της μεγάλης απόστασης από το ακροφύσιο και της κλίσης που αποκτά η ροή μετά της έξοδο. Με την διακύμανση της ταχύτητάς του ανέμου όμως να μένει σταθερή 5-10%. Πέρα από αυτά τα σημεία όμως σημειώνονται σοβαρές μειώσεις ταχύτητας οπότε κρίνονται αδιάφορες προς μελέτη αυτές οι περιοχές.
- Για ταχύτητες ανέμου 10m/s,15m/s,20m/s. Ομοίως με τη περίπτωση για ταχύτητα 5m/s

13.2 Συμπεράσματα από τα γραφήματα τύρβης.

Αναλυτικές παρατηρήσεις για κάθε γράφημα τύρβης.

1. Για την απόσταση των 0cm

- Στα 5m/s. Παρατηρείται μια ομοιόμορφη κατανομή της τύρβης σε όλο το ακροφύσιο με τις τιμές να είναι οι επιθυμητές 0,39%-0,48%. Δηλαδή κάτω από 2% που είναι το ανώτατο όριο για την σωστή λειτουργία της αεροσήραγγας.
- Στα 10m/s. Οι τιμές της τύρβης είναι οι ιδανικές σε όλα τα σημεία και μέσα στα όρια από 0,48%-0,63%.
- Στα 15m/s. Η τύρβη βρίσκεται σε χαμηλά επίπεδα 0,63%-0,72%.
- Στα 20m/s. Ομοίως με τα 15 m/s.

2. Για την απόσταση των 15cm

- Στα 5m/s. Η τύρβη είναι αρκετά χαμηλά σε όλα τα σημεία από 0,8%-1,6%. Εκτός από τα σημεία που βρίσκονται εκτός των οριζόντιων γραμμών 3 και 7 (δες Εικόνα46), όπου εκεί η τύρβη υπερβαίνει το 2%. Ο λόγος που

υπάρχει αυτή η αύξηση οφείλεται στην απόσταση από το ακροφύσιο και της χαμηλής ταχύτητας ανέμου.

- Στα 10m/s. Βλέπουμε μια ομαλή συμπεριφορά σε όλο το πεδίο ροής με τις τιμές της τύρβης να κυμαίνονται από 0,8%-1,6%. Παρατηρείται μια αύξηση (<0,02) στις γωνίες και στο άνω χείλος του ακροφυσίου.
- Στα 15m/s. Οι τιμές της τύρβης παραμένουν αρκετά χαμηλά στο εσωτερικό του γραφήματος σε αντίθεση με τις τιμές στις γωνίες και στο κάτω χείλος του ακροφυσίου όπου παίρνουν τιμές πάνω από 2%.
- Στα 20m/s. Όμοια με τα 15 m/s.

Στο εξής θα πρέπει να αναφέρουμε ότι στις παρατηρήσεις για τα διαγράμματα τύρβης των πεδίων σε απόσταση 30cm, 45cm, 60cm από την έξοδο του ακροφυσίου, που θα ακολουθήσουν βγήκε ένα κοινό συμπέρασμα, για τα σημεία πάνω από τις οριζόντιες γραμμές 3 και 7 (δες Εικόνα 48), οι τιμές της τύρβης είναι μεγαλύτερες 8% λόγω της απόστασης από το ακροφύσιο και της κλίσης που αποκτά η ροή για αυτό το λόγο δεν θα αναφερθούν παρακάτω.

3. Για την απόσταση των 30cm

- Στα 5m/s. Οι τιμές της τύρβης στο κέντρο του ακροφυσίου είναι κάτω από το 2% και όσο πάμε προς την περιφέρεια αυξάνεται το ποσοστό.
- Στα 10m/s. Παρατηρείται μια ποιο ομοιόμορφη κατανομή της τύρβης μέσα το ωφέλιμο εύρος με τις τιμές να είναι 0,4%-1%.
- Στα 15m/s. Ομοίως με τα 10m/s.
- Στα 20m/s. Ομοίως με τα 10m/s.

4. Για την απόσταση των 45cm

- Στα 5m/s. Η τύρβη με τιμές μικρότερες του 2% βρίσκεται στη περιοχή γύρο από το κέντρο μεταξύ των οριζοντίων γραμμών 4 και 6 (δες Εικόνα 48).
- Στα 10m/s. Ομοίως τα 5m/s.
- Στα 15m/s. Στη περιοχή εντός των οριζοντίων γραμμών 4 και 6 (δες Εικόνα 48), η τιμή της τύρβης παραμένει χαμηλά (<2%). Ενώ εκτός έχει τιμές που ξεπερνούν το 4% .
- Στα 20m/s. Οι τιμές της τύρβης στο κέντρο της αεροσήραγγας είναι στο επιθυμητό όριο. Ενώ όσο πλησιάζουμε στην περιφέρεια και πέρα από τους οριζόντιων γραμμών 4 και 6 (δες Εικόνα 48). η τύρβης είναι σε αρκετά υψηλές τιμές.

5. Για την απόσταση των 60cm,

- Σε αυτή την κατηγορία δεν υπάρχουν μεγάλες διαφορές στα γραφήματα της τύρβης. Αυτό που παρατηρείται είναι ότι το ωφέλιμο πεδίο στο οποίο η τύρβη είναι μικρότερη του 2% είναι σε μία συγκεκριμένη περιοχή σε ακτίνα 30cm από το κέντρο του ακροφυσίου. Αυτό οφείλεται στη μεγάλη απόσταση από το ακροφύσιο και της κλίσης που αποκτά η ροή μετά την έξοδο.

Συμπέρασμα: Από την εξέταση των αποτελεσμάτων προκύπτει το συμπέρασμα πως οι δοκιμές πρέπει διεξάγονται σε απόσταση περίπου 15cm από το στόμιο του ακροφυσίου και ανάμεσα στους οριζόντιους τομείς 3 και 7 (δες Εικόνα 48). Σε αυτές τις περιοχές παρατηρείται η βέλτιστη απόδοση όσον αφορά την ταχύτητα και την τύρβη.

14.Προτάσεις Βελτίωσης

- Προτείνω να προστεθούν γωνίες στην εσωτερική διαμόρφωση του ακροφυσίου της αεροσήραγγας, έτσι ώστε να μετατραπεί από τετραγωνική σε εξαγωνική διατομή. Μέσω αυτού του μετασχηματισμού, η ροή του αέρα κατά την εξαγωγή θα γίνει πιο ομαλή, με αποτέλεσμα να προκύψει μια ομοιόμορφη ροή.



Εικόνα 49:Ενδεικτική τοποθέτηση γωνιών για την δημιουργία εξαγωνικής διατομής.

- Επίσης, όσον αφορά τον τομέα των μετρήσεων, είναι απαραίτητο να αναπτυχθεί ένας μηχανισμός στήριξης για τον σωλήνα Pitot πάνω στην επιφάνεια XY, προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν τα δονήσεις κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Αυτές οι δονήσεις είναι εξαιρετικά καταστροφικές στις υψηλές ταχύτητες και, επομένως, η ανάπτυξη ενός τέτοιου μηχανισμού είναι ζωτικής σημασίας.
- Επιπλέον είναι ανάγκη να βρεθεί ένας τρόπος διατήρησης της καθετότητας του σωλήνα Pitot. Αυτό είναι σημαντικό διότι σε αυτό το σημείο εμπλέκεται ο ανθρώπινος παράγοντας, ο οποίος μερικές φορές είναι ασταθής και δύσκολα αποφεύγει το σφάλμα.

15.Βιβλιογραφία

- History of data science*. (2021, 03 06). Ανάκτηση από <https://www.historyofdatascience.com/andrey-kolmogorov-mathematician-extraordinaire/>
- WIKIPEDIA. (χ.χ.). Ανάκτηση από WIND TUNNEL: https://en.wikipedia.org/wiki/Wind_tunnel
- WIKIPEDIA. (χ.χ.). Ανάκτηση από Subsonic and transonic wind tunnel: https://en.wikipedia.org/wiki/Subsonic_and_transonic_wind_tunnel#Subsonic_tunnel
- WIKIPEDIA. (χ.χ.). Ανάκτηση από TURBULENCE: <https://en.wikipedia.org/wiki/Turbulence>
- ΓΚΟΛΤΣΙΟΣ, Ε. (2019, 07 10). Διπλωματική Εργασία"ΜΈΤΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΡΟΗΣ ΣΕ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΗ ΓΩΝΙΑ 90ο". ΠΑΤΡΑ, ΕΛΛΑΔΑ. Ανάκτηση από <https://nemertes.library.upatras.gr/server/api/core/bitstreams/8d205ac8-a6dc-451b-a2af-076367d0acd2/content>
- ΚΟΥΒΑΔΑΚΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ, Δ. Γ. (χ.χ.). Εργασία"ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΕΡΟΣΥΡΑΓΓΑΣ ΠΤΕΡΥΓΩΣΕΩΝ". ΠΑΤΡΑ, ΕΛΛΑΔΑ. Ανάκτηση από <https://www.mead.upatras.gr/wp-content/uploads/2020/07/POSTERKOUVADAKIS-IOANNIS6890.pdf>
- ΛΑΖΑΡΟΣ , Χ. (2013, 03 23). Διπλωματική Διατριβή"ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΡΟΪΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ Δ-ΠΤΕΡΥΓΑΣ ΚΑΙ ΘΑΛΑΜΟΥ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΤΗΣ ΑΕΡΟΣΗΡΑΓΓΑΣ". ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ, ΕΛΛΑΔΑ. Ανάκτηση από <http://ikee.lib.auth.gr/record/132354/files/%CE%94%CE%99%CE%95%CE%A1%CE%95%CE%A5%CE%9D%CE%97%CE%A3%CE%97%20%CE%A1%CE%9F%CE%99%CE%9A%CE%A9%CE%9D%20%CE%A7%CE%91%CE%A1%CE%91%CE%9A%CE%A4%CE%97%CE%A1%CE%99%CE%A3%CE%A4%CE%99%CE%9A%CE%A9%CE%9D%20%CE%A0%CE%A4%CE%>
- ΜΗΤΑΝΙΔΗΣ, Γ. (2010, 03 13). Διπλωματική Εργασία"ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΤΗΝ ΑΕΡΟΣΗΡΑΓΓΑ ΣΕ ΠΤΕΡΥΓΙΟ ΚΑΙ ΔΡΟΜΕΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ". ΑΘΗΝΑ, ΕΛΛΑΔΑ. Ανάκτηση από https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/3314/metanidesg_w_tunneltests.pdf?sequence=3
- ΜΠΟΧΤΗΣ, Θ. (1998, 07 20). Διπλωματική Εργασία"ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΑΕΡΟΣΗΡΑΓΓΑΣ ΤΟΥ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ". ΒΌΛΟΣ, ΕΛΛΑΔΑ. Ανάκτηση από <https://core.ac.uk/download/pdf/132804857.pdf>
- ΠΑΧΑΚΗΣ, Γ. (2019, 09 06). Πτυχιακή Εργασία"Μετρήσεις, απεικόνιση και αξιολόγηση του πεδίου ροής στο χώρο δοκιμών της αεροσήραγγας του Εργαστηρίου Αιολικής Ενέργειας του ΕΛΜΕΠΑ". ΗΡΑΚΛΕΙΟ, ΕΛΛΑΔΑ.

ΣΟΥΡΒΟΥ, Φ. (2017, 05 03). Πτυχιακή Εργασία "ΜΕΛΕΤΗ-ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ-ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΑΕΡΟΣΗΡΑΓΓΑΣ ΑΝΟΙΧΤΟΥ ΤΥΠΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΟΠΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΡΟΗΣ ΑΕΡΑ ΠΑΝΩ ΣΕ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΕΣ". ΣΕΡΡΕΣ, ΕΛΛΑΔΑ. Ανάκτηση από <https://docplayer.gr/60746173-Meleti-shediasmos-kataskeyi-aerosiraggas-anoihtoy-typou-gia-tin-optikopoiisi-kai-metrissi-fainomenon-rois-aera-pano-se-aerodynamikes-geometries.html>

Σταυρακάκης, Ι. (2017, 12 06). Πτυχιακή Εργασία "Μέτρηση και αξιολόγηση πεδίου ροής στο πεδίο δοκιμών της αεροσηραγγας του Εργαστηρίου Αιολικής Ενέργειας του ΤΕΙ Κρήτης". Ηράκλειο, Ελλάδα. Ανάκτηση από <https://apothesis.lib.hmu.gr/bitstream/handle/20.500.12688/8525/StavrakakisIoannis2017.pdf?sequence=1>

ΤΖΙΡΑΚΗΣ, Κ. (2021). "Εισαγωγή στις βασικές έννοιες της μηχανικής ρευστών". Ηράκλειο. Ανάκτηση από https://eclass.hmu.gr/modules/document/file.php/MECH163/Fluid_Mechanics_Book%20%2846%29.pdf