



06/12/2017

Μέτρηση και αξιολόγηση  
πεδίου ροής στο πεδίο  
δοκιμών της αεροσήραγγας  
του Εργαστηρίου Αιολικής  
Ενέργειας του ΤΕΙ Κρήτης



Ιωάννης Σταυρακάκης

## Περιεχόμενα

Αντικείμενο και στόχοι της πτυχιακής εργασίας .....	4
Δομή εργασίας.....	4
Object and objectives of diplomatic work.....	4
Work structure .....	4
Κεφάλαιο 1 .....	5
Βασικές Αρχές Αεροδυναμικής .....	5
Η Ροή και τα Χαρακτηριστικά της.....	5
Είδη Ροής .....	6
Ιδανική / Πραγματική Ροή .....	6
Συμπιεστή / Ασυμπιεστή Ροή .....	6
Στρωτή και Τυρβώδης ροή .....	7
Ο Αριθμός Reynolds.....	9
Αρχή της Συνέχειας της Ροής.....	10
Θεώρημα Bernoulli .....	11
Κεφάλαιο 2 .....	13
Αεροσήραγγες .....	13
Αεροδυναμικές δοκιμές σε αεροσήραγγες .....	15
Διάκριση αεροσηράγγων.....	16
Κατηγορίες υποηχητικών αεροσηράγγων και ειδικά.....	17
χαρακτηριστικά τους.....	17
Παραγωγή μόνιμου και ομοιόμορφου ροϊκού πεδίου.....	21
Περιγραφή ακροφυσίου, θαλάμου μετρήσεων, διαχύτη και ανεμιστήρα.....	22
Ακροφύσιο.....	22
Θάλαμος μετρήσεων.....	23
Διαχύτης .....	24
Ανεμιστήρες .....	25
Ενεργειακές απαιτήσεις .....	26
Inverter.....	31
Κεφάλαιο 3 .....	32
Εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε.....	32
Πειραματική διαδικασία.....	33
Κεφάλαιο 4 .....	40
Τα αποτελέσματα από μετρήσεις της ταχύτητας ανέμου.....	40
Για τα 0cm από την έξοδο του ακροφυσίου.....	40
Για τα 15cm.....	42

Για τα 30cm.....	44
Για τα 45cm.....	46
Για τα 60cm.....	48
<b>ΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ ΣΤΗ     ΜΕΣΗ ΤΟΥ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ</b> .....	50
<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΑΝΕΜΟΥ</b> .....	51
<b>ΤΥΡΒΗ</b> .....	55
<b>ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΥΡΒΗΣ</b> .....	55
<b>Αποτελέσματα από υπολογισμούς της τύρβης της ταχύτητας ανέμου.....</b>	56
Για τα 0cm από την έξοδο του ακροφυσίου .....	56
Για τα 15cm.....	58
Για τα 30cm.....	60
Για τα 45cm.....	62
Για τα 60cm.....	64
<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΤΥΡΒΗΣ</b> .....	66
<b>ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ</b> .....	67
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b> .....	69

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Ευχαριστώ ιδιαίτερα τον επιβλέπων καθηγητή μου Δρ. Κωνσταντίνο Κονταξάκη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση της παρούσας πτυχιακής εργασίας όπως και για την καθοδήγηση του για την περάτωση της.

Επίσης ευχαριστώ όλο το προσωπικό του αιολικού εργαστηρίου οι οποίοι με έκαναν και ένιωσα άνετα καθόλη την διάρκεια της παραμονής μου εδώ.

## **Αντικείμενο και στόχοι της πτυχιακής εργασίας**

Το αντικείμενο της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η ανάλυση του πεδίου ροής του ανέμου της αεροσήραγγας του εργαστηρίου αιολικής ενέργειας του ΤΕΙ Κρήτης προκειμένου να προσδιοριστεί αν μπορούν να γίνουν αξιόπιστες δοκιμές μοντέλων με την χρήση αυτής αλλά και οι περιοχές στις οποίες υπάρχουν οι καταλληλότερες συνθήκες για τις δοκιμές αυτές.

## **Δομή εργασίας**

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στη θεωρία για την ροή των ρευστών και τα είδη της και υπάρχουν έννοιες και τύποι που θα είναι χρήσιμοι για την κατανόηση της εργασίας στην συνέχεια

Στο δεύτερο κεφάλαιο θα βρει κανείς θεωρία για τις αεροσήραγγες γενικά αλλά και την περιγραφή της και τα τεχνικά χαρακτηριστικά της αεροσήραγγας του εργαστηρίου που χρησιμοποιήθηκε.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε με τον χρησιμοποιούμενο εξοπλισμό.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων της ταχύτητας ανέμου και της τύρβης και γίνονται και προτάσεις βελτίωσης της μετρητικής διάταξης.

## **Object and objectives of diplomatic work**

The purpose of this diplomatic project is to analyze the wind turbine wind field of the TEI Crete Wind Energy Laboratory in order to determine if reliable model tests can be made using this as well as the areas where the most suitable conditions for testing exist.

## **Work structure**

In the first chapter there is a reference to the fluid flow theory and its types and there are concepts and formulas that will be useful for the understanding of the work thereafter

In the second chapter we will find theory about wind tunnels in general but also its description and technical characteristics of the wind tunnel of the laboratory used.

The third chapter describes the experimental procedure followed with the equipment used.

In the fourth chapter we present the results of the measurements of the wind speed and turbidity and suggestions for improvement of the measuring device.

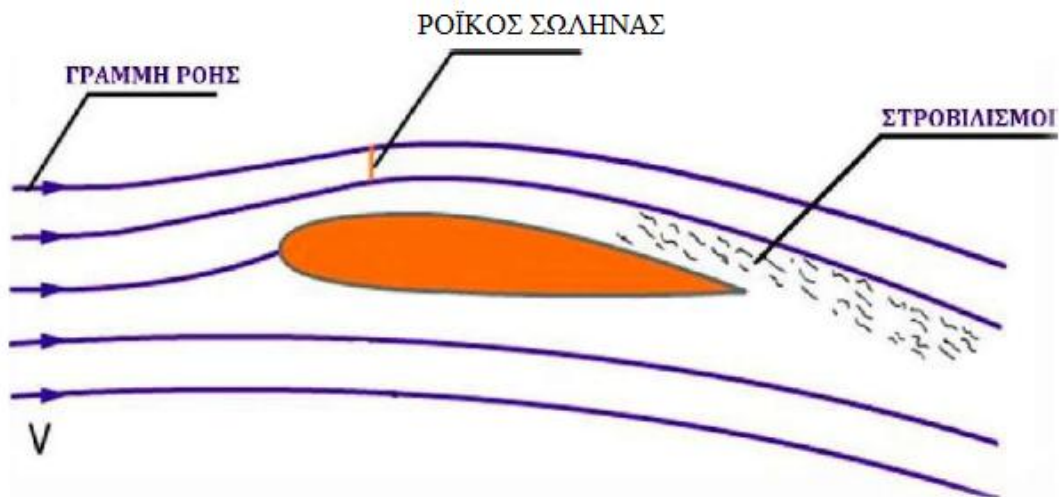
# Κεφαλαίο 1

## Βασικές Αρχές Αεροδυναμικής

Αεροδυναμική ονομάζεται το κομμάτι της ρευστομηχανικής που ασχολείται με την μελέτη της ροής γύρω από σώματα αεροδυναμικής μορφής και τις δυνάμεις που αναπτύσσονται πάνω σ' αυτά. Αεροδυναμικής μορφής θεωρούνται τα στερεά τα οποία έχουν την μικρότερη διάσταση σε σχέση με τις υπόλοιπες στην πλευρά κάθετα στην ροή του αέρα. Τα σώματα αυτά είναι σχεδιασμένα έτσι ώστε να αποφεύγεται κατά το δυνατόν το φαινόμενο της αποκόλλησης της ροής που θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο.

## Η Ροή και τα Χαρακτηριστικά της

Στην ρευστομηχανική και κατ' επέκταση στην αεροδυναμική ο όρος ροή ορίζει την κίνηση των μορίων ενός ρευστού από το αρχικό σημείο της παρατήρησης μας στο τελικό σε βάθος χρόνου.



Εικόνα 1:Ροή γύρω από αεροδυναμικό σώμα (Peng, 2001)

Ο γεωμετρικός τόπος των θέσεων ενός μορίου ρευστού που κινείται ονομάζεται τροχιά του ρευστού. Η φανταστική γραμμή η οποία έχει την ιδιότητα σε κάθε σημείο της να έχει εφαπτόμενο το διάνυσμα της ταχύτητας  $V$  ονομάζεται γραμμή ροής.

Ροϊκοςσωληνασνομάζεται ένας απειροστός αγωγός ή σωλήνας του οποίου η επιφάνεια αποτελείται από γραμμές ροής με οδηγό μια κλειστή καμπύλη. Η ταχύτητα ροής  $V$  ορίζεται ως το όριο του λόγου της απόστασης που διανύει ένα στοιχείο του ρευστού προς τον χρόνο που απαιτείται. Στις περιπτώσεις που μελετάται η ροή ρευστού γύρω από ένα σώμα ο όρος αντικαθίσταται ισοδύναμα από την σχετική ταχύτητα του ρευστού με το σώμα.

## **Είδη Ροής**

### **Ιδανική / Πραγματική Ροή**

Ιδανική χαρακτηρίζεται η ροή που μεταξύ των μορίων της και των τοιχωμάτων των στερεών ορίων που την περιορίζουν, δεν ασκούνται τριβές. Τα ρευστά που την πραγματοποιούν ονομάζονται Ιδανικά Ρευστά, δεν έχουν ιξώδες, και είναι υποθετικά ρευστά.

Πραγματική λέγεται η ροή που μεταξύ των μορίων της και των τοιχωμάτων που περιορίζουν αυτή, ασκούνται τριβές και διατμητικές τάσεις. Τα ρευστά που την πραγματοποιούν λέγονται Πραγματικά Ρευστά, είναι αυτά που βρίσκονται στη φύση και έχουν ιξώδες (ιξώδη ρευστά).

### **Συμπιεστή / Ασυμπιεστη Ροή**

Η ροή του αέρα είναι ασυμπιεστη ή συμπιεστή ανάλογα με την τιμή του αριθμού Mach ( $M$ ) που ορίζεται ως εξής:

$$M = V/a$$

Όπου:

- ✓  $V$  είναι η σχετική ταχύτητα του αντικειμένου μέσα στο ρευστό και
- ✓  $a$  είναι η ταχύτητα του ήχου στο ρευστό μέσο. Για τον αέρα στο επίπεδο της θάλασσας η ταχύτητα του ήχου είναι 1225Km/h ή 340,3 m/s.

Ασυμπιεστη χαρακτηρίζεται η ροή, όταν η πυκνότητα  $\rho$  παραμένει σταθερή. Ο αέρας μπορεί να θεωρηθεί ασυμπιεστος για περιθώριο ταχυτήτων μέχρι 0,4  $M$ . Στην περίπτωση αυτή μιλάμε για Ασυμπιεστη Αεροδυναμική ή Αεροδυναμική μικρών υποηχητικών ταχυτήτων.

Συμπιεστή χαρακτηρίζεται η ροή κατά την οποία μεταβάλλεται η τιμή της πυκνότητας  $\rho$ . Ο αέρας λαμβάνεται υποχρεωτικά συμπιεστός για ταχύτητες μεγαλύτερες από 0,4  $M$ . Την περιοχή αυτή ταχυτήτων μελετάει η Συμπιεστή

Αεροδυναμική, η οποία χωρίζεται στην Αεροδυναμική μεγάλων υποηχητικών ταχυτήτων (από 0,4 -0,9M) στη Διηχητική Αεροδυναμική (M=1), στην Υπερηχητική Αεροδυναμική (1<M<6) και στην Υπερυχητική Αεροδυναμική (M>6).



Εικόνα 2:Πολεμικό αεροσκάφος τη στιγμή που σπάει το φράγμα του ήχου

### **Στρωτή και Τυρβώδης ροή**

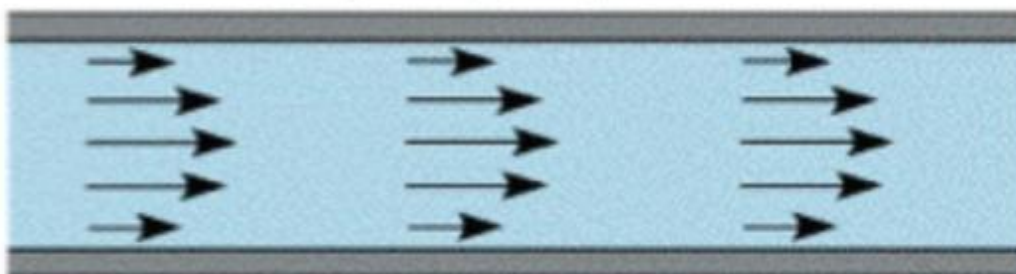
Η ροή, ανεξαρτήτως αν είναι συμπιεστή ή όχι, μπορεί να διακριθεί σε στρωτή και τυρβώδης ανάλογα με το μοτίβο των γραμμών ροής. Στρωτή ή παράλληλη ροή υπάρχει όταν το ρευστό ρέει παράλληλα με τα τοιχώματα του μέσου που το περιέχει και οι γραμμές ροής είναι παράλληλες μεταξύ τους. Στην κατάσταση τυρβώδους ή στροβιλώδους ροής, οι γραμμές ροής έχουν την μορφή ακανόνιστων καμπυλών που (σε δισδιάστατη προβολή) τέμνουν συνεχώς η μία την άλλη δίνοντας την εικόνα ροής με στροβιλισμούς.



## Τυρβώδης ροή

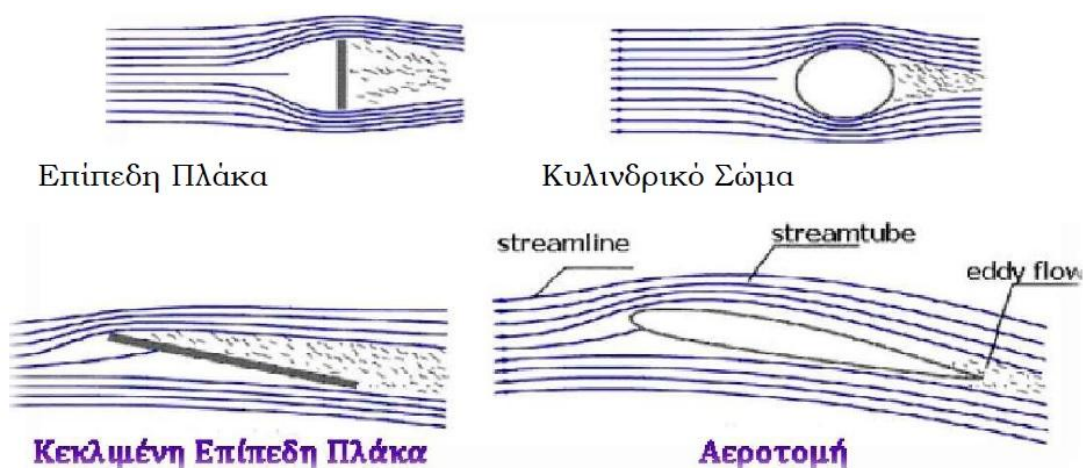


## Στρωτή ροή



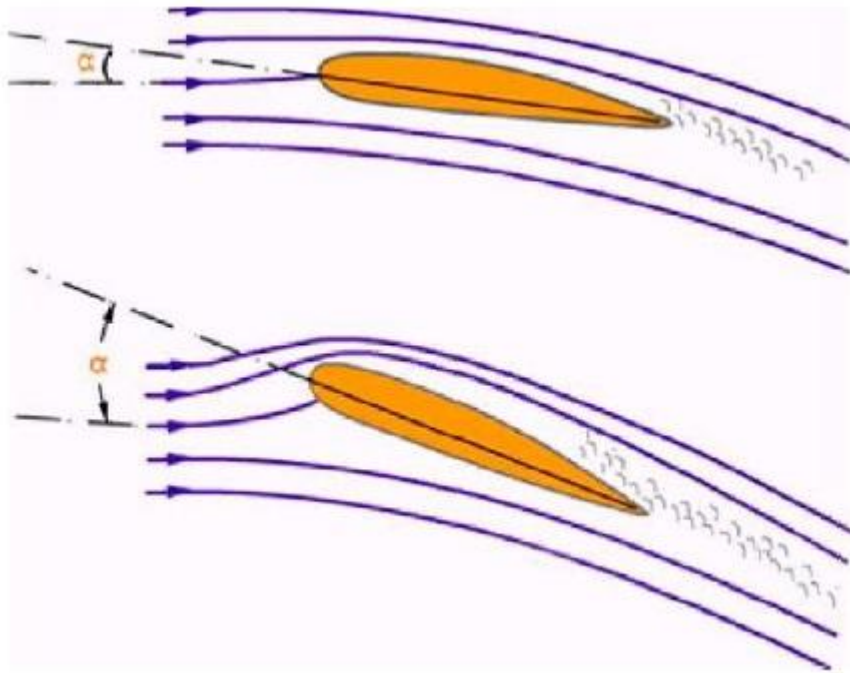
Εικόνα 3: Αναπαράσταση για τυρβώδη και στρωτή ροή

Το διάγραμμα ροής είναι ένας γραφικός τρόπος αναπαράστασης της ροής από τον οποίο φαίνεται το μοτίβο των ρευματικών σωλήνων και κατ'επέκταση το είδος της ροής σε διαφορετικά σημεία του χώρου παρατήρησης. Σε χαμηλές ταχύτητες ροής γύρω από ένα σώμα το είδος της ροής εξαρτάται μόνο από το σχήμα του σώματος και την σχετική θέση του με τη ροή



Εικόνα 4: Επίδραση του σχήματος του σώματος στο είδος ροής (Μπεργελές, 1995)

Όπως φαίνεται, το μοτίβο των ροϊκών σωλήνων επηρεάζεται από την γωνία προσβολής ( $\alpha$ ) του ρευστού επάνω στο σώμα.



Εικόνα 5:Επίδραση της θέσης του σώματος στην ροή (Peng, 2001)

### Ο Αριθμός Reynolds

Μια ακόμη παράμετρος η οποία χαρακτηρίζει τη ροή του αέρα είναι και ο αριθμός Reynolds,, ο οποίος ορίζεται ως :

$$Re = \frac{\rho * V * l}{\mu}$$

όπου

$\rho$ : η πυκνότητα του ρευστού (για αέρα 1,225 Kg/m<sup>3</sup>σε T=15°C )

V: η ταχύτητα του ρευστού (m/sec)

l: το χαρακτηριστικό μήκος (m)

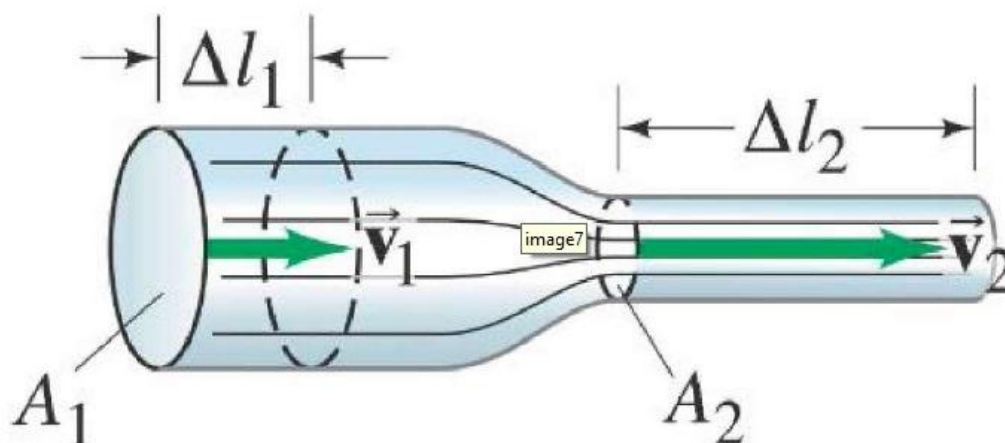
$\mu$ : το ιξώδες του ρευστού (για αέρα 18×10<sup>-5</sup>Kg/m×sec).

Όπως φαίνεται από φυσικής πλευράς, ο Reεκφράζει ένα μέτρο μεταξύ των αδρανειακών δυνάμεων και των δυνάμεων συνεκτικότητας. Έτσι μικροί αριθμοί Reynolds, σημαίνουν ροή στην οποία υπερέχουν οι δυνάμεις συνεκτικότητας, ενώ μεγάλοι αριθμοί Reynolds, ροή στην οποία υπερέχουν οι αδρανειακές δυνάμεις. Η πρώτη περίπτωση (Re πολύ μικρό) συμβαίνει όταν μελετώνται σώματα πολύ μικρών διαστάσεων ή μικρών ταχυτήτων και που το ρευστό έχει μεγάλο κινηματικό ιξώδες, όπως π.χ. στην περίπτωση νέφους σωματιδίων ή φιλμ ελαίου μεταξύ του τροφέα και του εδράνου ενός περιστρεφόμενου άξονα (έρπουσα ροή).

Ιδιαίτερη σπουδαιότητα όμως έχει η δεύτερη περίπτωση των μεγάλων αριθμών Reynolds, η οποία έχει πολλές τεχνικές εφαρμογές, ιδιαίτερα σε προβλήματα τεχνικής της πτήσης ενός αεροπλάνου, και τούτο διότι αυτή συμβαίνει σε ρευστά με πολύ μικρό κινηματικό ιξώδες  $\nu$  (νερό και αέρα) και σε σώματα που οι διαστάσεις τους και οι ταχύτητες τους είναι μεγάλες. Αναφέρεται ότι η επίδραση του αριθμού Reynolds στη ροή γύρω από σώματα είναι καθοριστική για τη μορφή της ροής γύρω από αυτό. Από διάφορα πειράματα που είχαν γίνει, έχει διαπιστωθεί ότι όταν αυξάνεται ο αριθμός Reynolds γίνεται μετάπτωση της ροής από στρωτή σε τυρβώδη.

### Αρχή της Συνέχειας της Ροής

Ο Νόμος της συνέχειας της ροής είναι από τους σημαντικότερους νόμους στην ρευστομηχανική. Η σχέση που περιγράφει αυτόν τον νόμο ονομάζεται εξίσωση της συνέχειας της ροής και ορίζει ότι η παροχή παραμένει σταθερή κατά μήκος μίας φλέβας (ενός σωλήνα), που διαρρέεται από ένα ρευστό. Η εξίσωση αυτή είναι άμεση συνέπεια της αρχής διατήρησης της ύλης.



Εικόνα 6:Μείωση της διατομής A συνεπάγεται αύξηση της ταχύτητα ροής V.(physatwes.com)

Έστω ότι ο αέρας εισέρχεται από το σημείο 1 και εξέρχεται από το σημείο 2 με παροχή  $m_1$  και  $m_2$  αντίστοιχα. Επειδή η μάζα του αέρα που μπαίνει στο σωλήνα δεν έχει πουθενά αλλού να πάει εκτός από την έξοδο του σωλήνα (2) θεωρούμε ότι η παροχή μάζας στα σημεία 1 και 2 είναι ίση

Αναλυτικά:

$$m_{in} = m_{out}$$

$$\rho_1 \cdot A_1 \cdot V_1 = \rho_2 \cdot A_2 \cdot V_2$$

Για ασυμπίεστη ροή όπου  $\rho_1 = \rho_2$

$$A_1 \cdot V_1 = A_2 \cdot V_2$$

$$\rho \cdot A \cdot v = \text{σταθερό}$$

Όπου

$\rho_1, \rho_2$ : Πυκνότητα του ρευστού στα σημεία 1 και 2

$m_{in}, m_{out}$ : Παροχή μάζας εισόδου και εξόδου

$V_1, V_2$ : Ταχύτητα ροής στα σημεία 1 και 2

Η παραπάνω εξίσωση μας δείχνει ότι η πυκνότητα του αέρα που κινείται με μικρή ταχύτητα παραμένει σχεδόν σταθερή ανάμεσα στα σημεία 1 και 2 και ότι η ταχύτητα ροής του αέρα είναι αντιστρόφως ανάλογη της διατομής του σωλήνα που περνάει. Ουσιαστικά όσο στενεύει η διατομή του σωλήνα τόσο αυξάνεται η ταχύτητα του ρευστού και αντιστρόφως.

### **Θεώρημα Bernoulli**

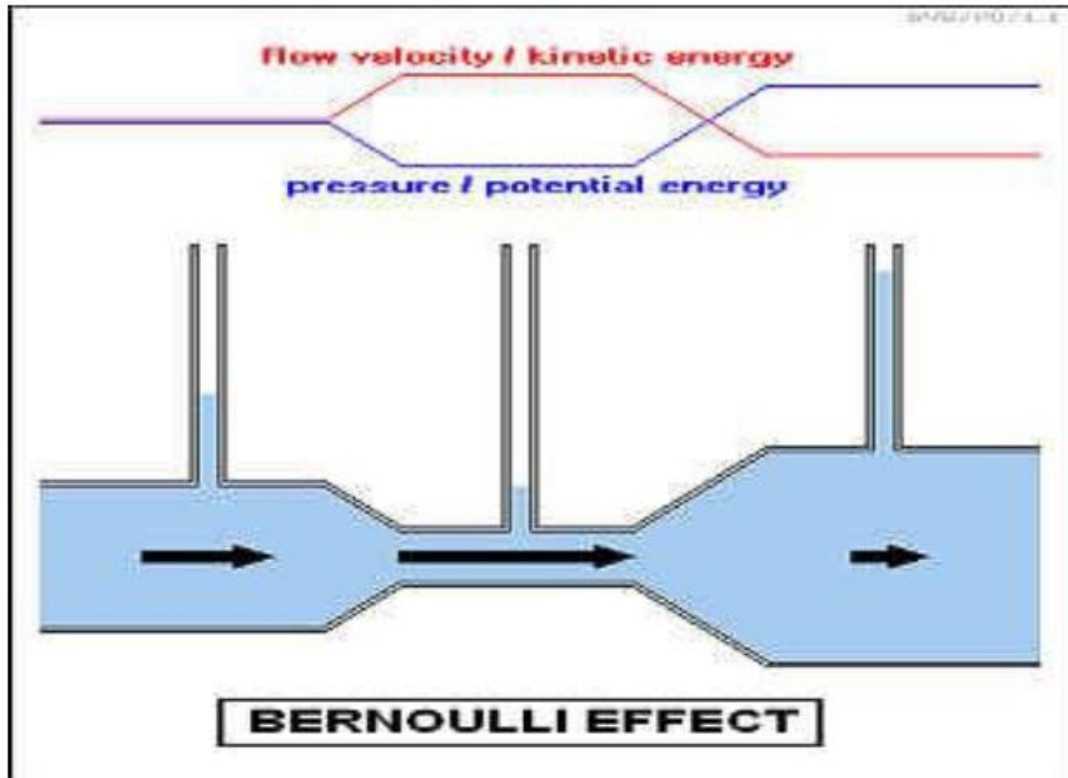
Θεώρημα Bernoulli είναι το θεμελιώδες θεώρημα της ρευστομηχανικής καθώς ορίζει την σχέση ανάμεσα στην πίεση και την ταχύτητα ροής ενός ρευστού σε κίνηση. Ταυτίζεται με την αρχή διατήρησης της ενέργειας στα ρευστά.

Σύμφωνα με το θεώρημα Bernoulli, το σύνολο της ενέργειας ενός μορίου ρευστού που βρίσκεται σε κίνηση σε μία ρευματική γραμμή παραμένει σταθερό και ισούται με το άθροισμα της δυναμικής ενέργειας, της κινητικής ενέργειας και της ενέργειας θέσεως στο κάθε σημείο.

$$P_1 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_1^2 + \rho \cdot g \cdot h_1 = P_2 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_2^2 + \rho \cdot g \cdot h_2 \quad (1)$$

Όταν τα σημεία 1 και 2 δεν έχουν υψομετρική διαφορά η εξίσωση (1) γίνεται:

$$P_1 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_2^2 \quad (2)$$



Εικόνα 7: Φαινόμενο Bernoulli (Encyclopedia Britannica)

Σύμφωνα με την εξίσωση (2) το άθροισμα της στατικής πίεσης και της δυναμικής είναι σταθερό σε κάθε σημείο της ροής. Εφόσον η δυναμική πίεση ορίζεται ως  $q_i = 0.5 \cdot \rho \cdot V_i^2$  και η πυκνότητα δεν μεταβάλλεται, συμπεραίνουμε ότι η αύξηση της ταχύτητας ροής σε ένα σημείο συνεπάγεται την αντίστοιχη μείωση της στατικής πίεσης  $P$  και αντίστροφα.

## Κεφάλαιο 2

### Αεροσήραγγες

Στον τομέα της αεροδυναμικής η πλέον σημαντική, αναγκαία και καθολικά αναγνωρισμένη πειραματική εγκατάσταση για έρευνα είναι η αεροσήραγγα (windtunnel).

Οι αεροσήραγγες (windtunnels) εμφανίστηκαν στα τέλη του 19<sup>ου</sup> αιώνα και έγιναν ιδιαίτερα δημοφιλείς το 1903 από τους αδελφούς Wright. Η χρήση τους εξαπλώθηκε γρήγορα μιας και έχουν τη δυνατότητα να δέχονται μοντέλα υπό κλίμακα και διαρκή διαθεσιμότητα. Με αυτό τον τρόπο παρέχουν τη δυνατότητα η αεροδυναμική έρευνα να γίνεται προσιτή οικονομικά, ταχύτατη και ακριβής.



Εικόνα 8: Κατασκευή μοντέλου για αεροδυναμικές μετρήσεις.



Εικόνα 9: Τελική μορφή μοντέλου.

Γενικά ορίζεται ως η πειραματική εγκατάσταση μέσα στην οποία παράγεται ένα ελεγχόμενο ροϊκό πεδίο που προσβάλλει ένα υπό κλίμακα μοντέλο μιας πτέρυγας, ενός αεροσκάφους ή ενός σώματος που αποτελεί το μέσο με το οποίο μπορεί να εξομοιωθεί ένα πραγματικό ροϊκό πεδίο. Ταυτόχρονα δίνει την δυνατότητα κατανόησης σε βάθος των υπό μελέτη φυσικών φαινομένων και επομένως αυξάνει την θεωρητική γνώση του επιστήμονα-ερευνητή.

Τα πειραματικά αποτελέσματα που προκύπτουν από την μελέτη ενός μοντέλου στην αεροσήραγγα μπορούν να θεωρηθούν σαν αξιόπιστα στον βαθμό που μπορεί να εξομοιωθεί μέσα σ' αυτή το ροϊκό πεδίο γύρω από το πειραματικό σώμα που αποτελεί και το κύριο αντικείμενο έρευνας. Η εξομοίωση όμως του πραγματικού ροϊκού πεδίου μέσα στην αεροσήραγγα είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθεί (αν όχι αδύνατο) στον βαθμό που πρέπει να επιτευχθούν ταυτόχρονα η γεωμετρική, η δυναμική και η κινηματική ομοιότητα, μεταξύ του πραγματικού και του υπό κλίμακα ροϊκού πεδίου και σωμάτων.

Η γεωμετρική ομοιότητα έχει να κάνει με το πρόβλημα των τοιχωμάτων της αεροσήραγγας καθώς δεν είναι δυνατό να φανταστούμε π.χ. ένα αεροσκάφος να πετά μέσα σ' ένα αγωγό. Στα τοιχώματα της αεροσήραγγας ανακλώνται οι διαταραχές που προκαλούνται στο ροϊκό πεδίο από το μοντέλο και επομένως επηρεάζουν το ροϊκό πεδίο γύρω από το μοντέλο κάτι που δεν συμβαίνει στο πραγματικό ροϊκό πεδίο.

Για τις υποηχητικές ταχύτητες το πρόβλημα δεν είναι τόσο έντονο καθώς οι διαταραχές αποσβένουν εκθετικά, ενώ για τις υπερηχητικές είναι κύριο πρόβλημα καθώς οι διαταραχές διαδίδονται κατά μήκος των χαρακτηριστικών γραμμών (γραμμές Mach) προς το άπειρο.

Επίσης υπάρχει το πρόβλημα της στήριξης του μοντέλου. Τα τελευταία χρόνια μελετάται η "μαγνητική στήριξη" που εξαλείφει το πρόβλημα αλλά έχει δυο βασικά μειονεκτήματα που είναι η πολυπλοκότητα του συστήματος και η αντιοικονομική χρήση του. Τέλος είναι και το πρόβλημα της τραχύτητας των επιφανειών του μοντέλου. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η επιθυμητή τραχύτητα για την κατεργασία των επιφανειών του μοντέλου είναι της τάξης 1 έως 5μ.

Η κινηματική ομοιότητα αναφέρεται στην εξομοίωση των αδιατάρακτων ροϊκών μεγεθών, δηλαδή ως προς την ομοιομορφία του ροϊκού πεδίου, στην στάθμη τύρβης και την συμπύκνωση των υδρατμών σε υπερηχητικές ταχύτητες.

Η δυναμική ομοιότητα επιβάλλει την αναπαραγωγή αδιάστατων χαρακτηριστικών αριθμών και αυτό αποτελεί ένα κύριο πρόβλημα καθώς δεν είναι δυνατό να αναπαραχθούν αυτοί ταυτόχρονα ιδιαίτερα σε υψηλές ταχύτητες (υπερηχητικές και υπέρ-υπερηχητικές ροές). Οι αδιάστατοι αυτοί αριθμοί περιγράφουν το φυσικό φαινόμενο και η αναπαραγωγή τους επιτρέπει την μεταφορά των πειραματικών μετρήσεων στο πραγματικό ροϊκό πεδίο.

Στην πιο γενική περίπτωση πρέπει να αναπαραχθούν ο ισεντροπικός εκθέτης  $\gamma$  ( $=C_p/C_v$ )

και οι παρακάτω αδιάστατοι αριθμοί:

- Αριθμός Reynolds (Re)
- Αριθμός Mach (M)

- Αριθμός Strouhal (Sr)
- Αριθμός Froude (Fr)
- Αριθμός Brinkman (Br)
- Αριθμός Prandtl (Pr)
- Αριθμός Damkohler (Dam)

Ο αδιάστατος αριθμός Dam αναφέρεται για διαστημικά οχήματα ή διηπειρωτικά βλήματα με κινητήρες υγρών ή στερεών προωθητικών και δίνει ένα μέτρο του χρόνου διάρκειας της ροής των προωθητικών προς την διάρκεια χρόνου της χημικής αντίδρασης των προωθητικών.

Για να θεωρηθεί ένα πείραμα που πραγματοποιείται σε αεροσήραγγα όμοιο με την αεροδυναμική συμπεριφορά του φυσικού αντικείμενου, πρέπει να έχουν τον ίδιο αριθμό Reynolds.

Η επίτευξη του ίδιου αριθμού Re στην αεροσήραγγα με τον αντίστοιχο σε ελεύθερη πτήση επιτυγχάνεται είτε με συμπίεση του αέρα στην αεροσήραγγα καθώς  $Re \sim \rho$ , είτε με μείωση του ιξώδους του αέρα καθώς  $Re \sim 1/\mu$ , είτε με χρήση του όσο το δυνατό μεγαλύτερου μοντέλου για δεδομένη εγκατάσταση καθώς  $Re \sim L$ . Αύξηση του αριθμού Re επιτυγχάνεται και με αύξηση χαρακτηριστικού γεωμετρικού μήκους της αεροσήραγγας (π.χ. μήκος θαλάμου μετρήσεων) αλλά αυτό οδηγεί σε μεγαλύτερες εγκαταστάσεις αεροσηράγγων μ'αποτέλεσμα αυξανόμενο κόστος κατασκευής και λειτουργίας.

Οι απαιτήσεις για δυναμική ομοιότητα είναι να αναπαραχθούν ταυτόχρονα οι αδιάστατοι αριθμοί. Δεν υπάρχει καμία αεροσήραγγα στην οποία να μπορούν να αναπαραχθούν οι προαναφερόμενοι αδιάστατοι αριθμοί ταυτόχρονα.

### Αεροδυναμικές δοκιμές σε αεροσήραγγες

Σε αεροσήραγγα μπορούν να πραγματοποιηθούν οι παρακάτω βασικές δοκιμές:

- *Μέτρηση αεροδυναμικών φορτίων.*

Η πλέον χρήσιμη εφαρμογή των αεροσηραγγών είναι η μέτρηση των αεροδυναμικών φορτίων που εμφανίζονται σε μία δισδιάστατη ή τρισδιάστατη επιφάνεια. Τα αεροδυναμικά φορτία που εμφανίζονται, δυνάμεις και ροπές, μας δίνουν τη συμπεριφορά της επιφάνειας σε ένα ρεύμα αέρα.

- Απεικόνιση των γραμμών ροής γύρω από αντικείμενο.

Το πρόβλημα που υφίσταται στη μελέτη αεροδυναμικών φαινομένων είναι η έλλειψη οπτικής επαφής του υπό εξέταση φαινομένου και άρα ελλιπής κατανόησή του. Σε μία αεροσήραγγα με κατάλληλες διατάξεις εμφάνισης των γραμμών ροής (διάταξη παραγωγής καπνού, ίνες κτλ) μπορούμε να έχουμε μία ολοκληρωμένη παρατήρηση του φαινομένου.





Εικόνα 10: Εμφάνιση γραμμών ροής με χρήση καπνού.

Με τις δύο αυτές δυνατότητες μπορεί ο σχεδιασμός ενός αεροσκάφους, αυτοκινήτου κ.α. να βελτιωθεί. Αεροσήραγγες χρησιμοποιούνται και για τον έλεγχο κτιριακών κατασκευών, γεφυρών κτλ.

### **Διάκριση αεροσήραγγων**

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) Δηχητικές ( $0,9 < M < 1,2$ )
- iv) Υπερηχητικές ( $1,2 < M < 5$ )
- v) Υπέρ-υπερηχητικές ( $5 < M$ )

Οι πρώτες δυο κατηγορίες είναι γνωστές και σαν υποηχητικές αεροσήραγγες.

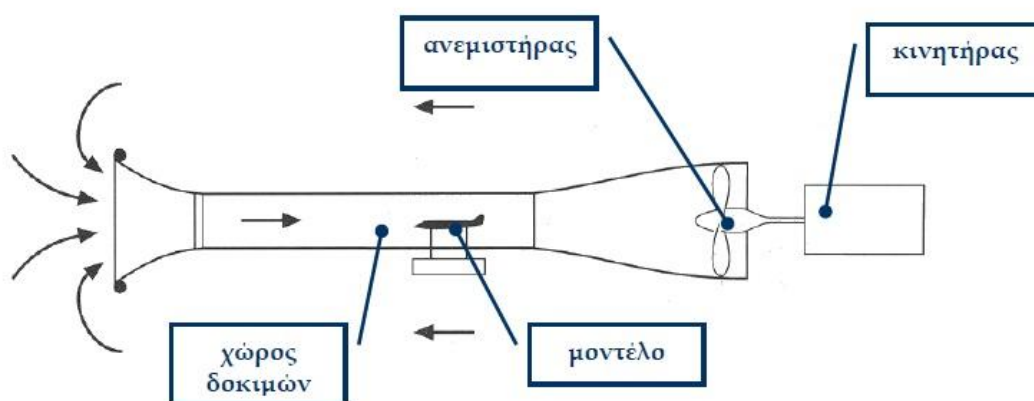
## Κατηγορίες υποηχητικών αεροσήραγγων και ειδικά χαρακτηριστικά τους

Ο απλούστερος τύπος υποηχητικής αεροσήραγγας είναι αυτή του ανοικτού κυκλώματος (open-circuit). Συνήθως όλες οι αεροτομές με διάμετρο θαλάμου μετρήσεων μικρότερη από 60cm είναι ανοικτού κυκλώματος. Αντίθετα, σχεδόν όλες οι μεγάλες είναι κλειστού υποηχητικές αεροσήραγγες είναι κλειστού κυκλώματος.

Οι αεροσήραγγες που συνήθως απαντώνται είναι 2 τύπων με δύο διαφοροποιήσεις του χώρου δοκιμών.

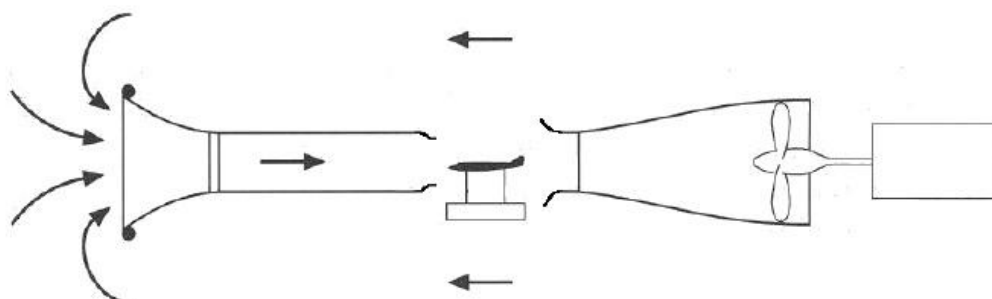
➤ Η αεροσήραγγα ανοικτού κυκλώματος (opencircuit) χαρακτηρίζεται από την ευθύγραμμη κίνηση που ο αέρας πραγματοποιεί εντός αυτής και την εισαγωγή του από τον περιβάλλοντα χώρο, όπου και εξέρχεται.

Οι αεροσήραγγες ανοικτού κυκλώματος με κλειστό χώρο δοκιμών ονομάζονται opencircuit - closedjet (NPL type)



Εικόνα 11: Αεροσήραγγα ανοικτού κυκλώματος με κλειστό χώρο δοκιμών (closedjet - opencircuit wind tunnel).

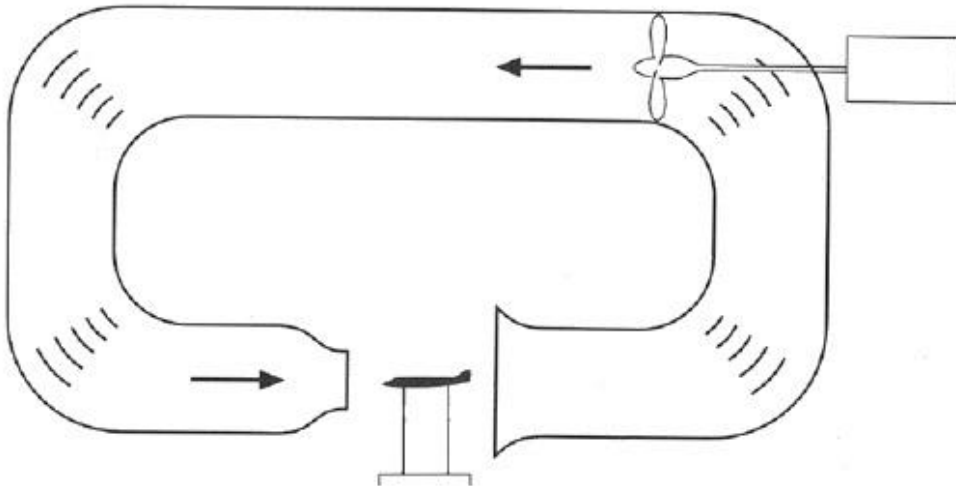
ενώ με ανοικτό χώρο δοκιμών ονομάζονται open circuit - open jet (Eiffel type)



Εικόνα 12: Αεροσήραγγα ανοικτού κυκλώματος με ανοικτό χώρο δοκιμών (openjet - opencircuit wind tunnel).

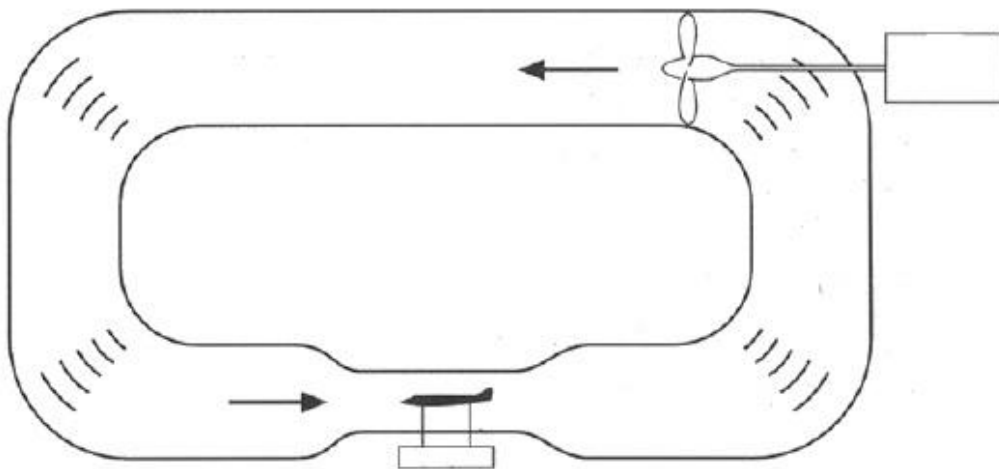
➤ Η αεροσήραγγα κλειστού κυκλώματος (closed return), (Prandtl/ Gottingen type),

έχειτη μορφή βρόγχου και ο αέρας ακολουθεί μία κλειστή διαδρομή εντός της. Μια αεροσήραγγα κλειστού κυκλώματος μπορεί να έχει ανοικτό χώρο δοκιμών



Εικόνα 13: Αεροσήραγγακλειστούκυκλώματος με ανοικτόξώροδοκιμών (openjet - closedtypewindtunnel).

ή κλειστό χώρο δοκιμών.



Εικόνα 14: Αεροσήραγγακλειστούκυκλώματος με κλειστόξώροδοκιμών (closedjet - closedtypewindtunnel).

Συγκρίνοντας μια μέση αεροσήραγγα ανοικτού κυκλώματος με μια μέση κλειστού κυκλώματος, διακρίνουμε ότι η δεύτερη παρουσιάζει ένα ανεπηρέαστο από εξωτερικές συνθήκες ροϊκό πεδίο και καλύτερο συντελεστή ισχύος (που ορίζεται σαν ο λόγος της εισαγόμενης ισχύος στην αεροσήραγγα προς την ροϊκή ισχύ-δηλαδή τον ρυθμό ροής της κινητικής ενέργειας- στον θάλαμο μετρήσεων).

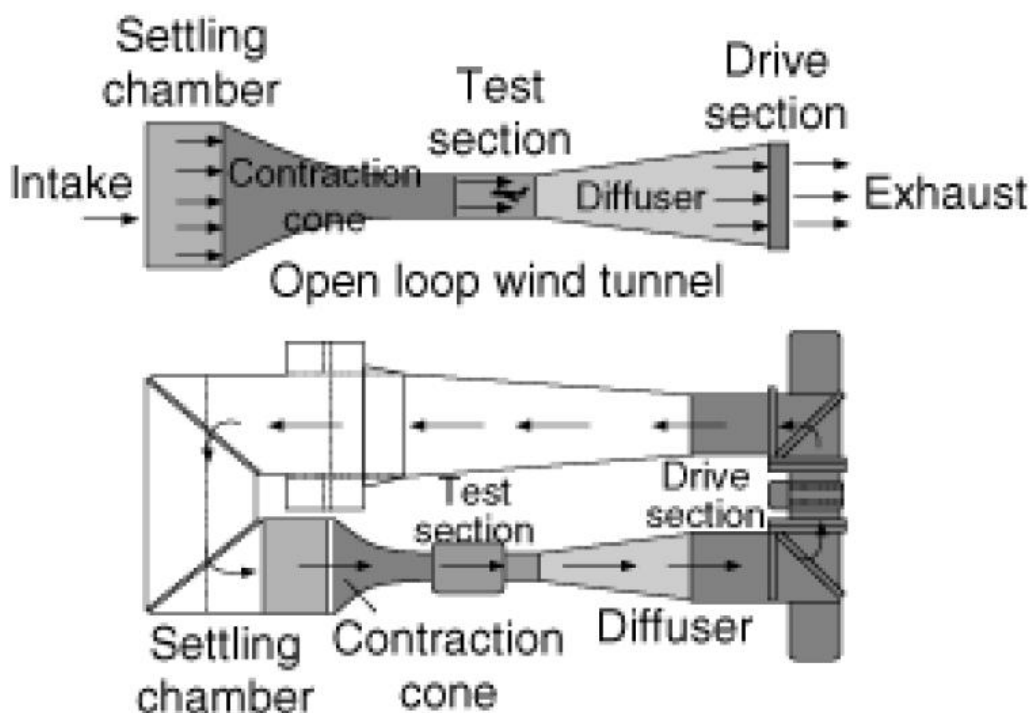
Σαν κύριο μειονέκτημα των αεροσηράγγων ανοικτού κυκλώματος μπορεί να θεωρηθεί ότι το ροϊκό πεδίο τους επηρεάζεται δραστικά από τις εξωτερικές συνθήκες (εργαστήριο ή ατμόσφαιρα). Ταυτόχρονα επειδή η στατική πίεση στον θάλαμο

μετρήσεων είναι μικρότερη της ατμοσφαιρικής αυτές «υποφέρουν» από την αναπόφευκτη αναρρόφηση μαζών αέρος καθ'όσον στον θάλαμο μετρήσεων υπάρχουν αρκετές οπές για την εισαγωγή σωλήνων μετρήσεως της πίεσης, αεροδυναμικών ζυγών και άλλων μετρητικών διατάξεων.

Για τις αεροσήραγγες απαιτείται η δυνατότητα μελέτης του μοντέλου ενός αεροσκάφους και η γεωμετρία με το μέγεθος του θαλάμου μετρήσεων, υπαγορεύονται από την ανάγκη ελαχιστοποίησης της επιδράσεως του τοιχώματος της αεροσήραγγας για ένα προκαθορισμένο μέγεθος μοντέλου. Μερικές φορές υπάρχει η δυνατότητα πειραματισμού στην αεροσήραγγα με μισά μοντέλα συμμετρικά ως προς επίπεδο τα οποία συνήθως προσαρμόζονται σε ψευδο- τοιχώματα απομακρυσμένα από τα τοιχώματα της αεροσήραγγας έτσι ώστε να αποφεύγεται η επίδραση του οριακού στρώματος των τοιχωμάτων της αεροσήραγγας.

Αρκετές αεροσήραγγες έχουν τέτοιους θαλάμους μετρήσεων έτσι ώστε να επιτρέπεται η μελέτη δυσδιάστατων ροϊκών πεδίων ενώ άλλες διαθέτουν διάσχιστα ή εύκαμπτα τοιχώματα.

Εφόσον έχουν επιλεγεί το μέγεθος του θαλάμου μετρήσεων καθώς επίσης το είδος του, δηλαδή ανοικτός ή κλειστός, και ο τύπος της αεροσήραγγας, δηλαδή ανοικτού ή κλειστού κυκλώματος, απομένει ο σχεδιασμός της υπόλοιπης εγκατάστασης που εξαρτάται από τον βέλτιστο συνδυασμό μεταξύ του διαθέσιμου χώρου και ισχύος καθώς επίσης από την απαιτούμενη ποιότητα του ροϊκού πεδίου στον θάλαμο μετρήσεων.



Εικόνα 15: Σχηματική αναπαράσταση κλειστού και ανοικτού κυκλώματος αεροσήραγγας στοάνω και κάτω κομμάτι του σχήματος αντίστοιχα. Φαίνεται ξεκάθαρα η κατεύθυνση της ροής καθώς και των επιμέρους στελεχών της αεροσήραγγας.

Σε όλες τις αεροσήραγγες, πριν από τον θάλαμο μετρήσεων υπάρχει ένα ακροφύσιο στο οποίο η ροή επιταχύνεται προς τον θάλαμο μετρήσεων ενώ η ολική πίεση

παραμένει σταθερή.

Συνηθίζεται, πριν από το ακροφύσιο η τοποθέτηση κυψελίδων ή πλεγμάτων ή και των δύο μαζί με σκοπό 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.

Η προσαρμογή των πλεγμάτων έχει σαν σκοπό την εξάλειψη της ανομοιομορφίας, ως προς την ταχύτητα του ροϊκού πεδίου. Μπορεί επίσης να αποδειχθεί θεωρητικά ότι η προσαρμογή ενός πλέγματος που προξενεί μια πτώση πίεσης ίση με το διπλάσιο της δυναμικής πίεσης επιτυγχάνει την απόκτηση ενός ομοιόμορφου ροϊκού πεδίου μετά το πλέγμα. Το τμήμα αυτό της αεροσήραγγας που περιλαμβάνει τις κυψελίδες και τα πλέγματα καλείται θάλαμος καθησυχασμού της ροής ή θάλαμος εξομαλύνσεως της ροής (settling chamber).

Οι επιδράσεις του ακροφυσίου και των πλεγμάτων στο ροϊκό πεδίο με μικρές διαταραχές μπορεί να φανεί από την εξίσωση του Bernoulli. Η ύπαρξη του ακροφυσίου απαιτεί, τουλάχιστον για εγκαταστάσεις κλειστού κυκλώματος, μία αντίστοιχη εκτόνωση του ροϊκού πεδίου μετά τον θάλαμο μετρήσεων.

Ελαχιστοποίηση των ενεργειακών απωλειών και των διαταραχών μπορεί να επιτευχθεί με έναν αποκλίνοντα αγωγό (διαχύτη) όχι απαραίτητα κυκλικής διατομής με μια ολική γωνία απόκλισης 50 περίπου. Συνηθίζεται η τοποθέτηση του ανεμιστήρα, για την παραγωγή του ροϊκού πεδίου, σε σταθερής διατομής αγωγό και πιο συγκεκριμένα στο σημείο εκείνο του διαχύτη όπου η αντίστοιχη εγκάρσια διατομή είναι τουλάχιστον διπλάσια από την διατομή του θαλάμου μετρήσεων.

Γι' αυτό τον λόγο, μαζί με τις προαναφερόμενες απαιτήσεις για ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας και των διαταραχών, οι αεροσήραγγες ανοικτού αλλά και κλειστού τύπου φέρουν διαχύτη μετά τον θάλαμο μετρήσεων.

Για αεροσήραγγες κλειστού κυκλώματος απαιτούνται κατάλληλοι αγωγοί (καμπύλοι) με εσωτερικές πτερυγώσεις (οδηγά πτερύγια) έτσι ώστε η ροή να επαναφέρεται ομαλά κατά γωνία 3600 (συνήθως συναντώνται τέσσερις καμπύλοι αγωγοί με γωνία 900 ο κάθε ένας). Μία καλοσχεδιασμένη εγκατάσταση αεροσήραγγας με τα προαναφερόμενα χαρακτηριστικά μπορεί να έχει μεταβολές της διακυμαινόμενης ταχύτητας στον θάλαμο μετρήσεων μικρότερες από 0,1% της μέσης ταχύτητας. Αυτό βέβαια προϋποθέτει την επάρκεια χώρου για την τοποθέτηση της εγκατάστασης της αεροσήραγγας, σε μία αντίθετη περίπτωση η αύξηση της καταναλωμένης ενέργειας είναι αναπόφευκτη.

Ουσιαστικά οι διαφορές είναι ότι οι αεροσήραγγες ανοικτού τύπου έχουν μικρόαρχικό κόστος αλλά μεγάλο λειτουργικό συγκρινόμενες με τις αεροσήραγγες κλειστού κυκλώματος μιας και δεν εκμεταλλεύονται την κινητική ενέργεια του αέρα που αποβάλλουν στον περιβάλλοντα χώρο. Είναι πιο θορυβώδεις αλλά δεν έχουν προβλήματα αύξησης της θερμοκρασίας. Τέλος είναι πιο πρακτικές για πραγματοποίηση πειραμάτων με χρήση καπνού για απεικόνιση της ροής εφόσον δεν

απαιτούν καθαρισμό.

### **Παραγωγή μόνιμου και ομοιόμορφου ροϊκού πεδίου**

Μη μόνιμη ροή στην αεροσήραγγα ισοδυναμεί με μια χαμηλής συχνότητας διακύμανση της ταχύτητας τέτοια ώστε να παρατηρείται στα μανόμετρα και τους αεροδυναμικούς ζυγούς.

Η διάκριση μεταξύ μη μόνιμης και ροής με τύρβη είναι κατά κάποιο κύριο τρόπο υποκειμενική αλλά συνήθως αυτή αντιστοιχεί σε μια διάκριση των αιτιών που μπορούν να τις παράγουν.

Μη μόνιμη ροή ισοδυναμεί με αποκόλληση ή διακοπτόμενη αποκόλληση της ροής όπως για παράδειγμα σε ένα διαχύτη με μεγάλη γωνία απόκλισης ή σ' ένα πολύ μικρού μήκους ακροφύσιο. Υπάρχουν και άλλα αίτια που μπορούν να προκαλέσουν μη μόνιμο ροϊκό πεδίο και ενδεικτικά μπορεί να αναφερθεί η διακύμανση της συχνότητας του άξονα του ανεμιστήρα.

Πραγματική τύρβη ή διακύμανση της στροβιλότητας προκαλείται λόγω της ανάπτυξης του οριακού στρώματος στα τοιχώματα των αγωγών επαναφοράς, των απορευμάτων των πτερυγίων του ανεμιστήρα και τα οδηγία πτερύγια. Συνηθίζεται όμως ο όρος «τύρβη» να περιλαμβάνει και όλα αυτά τα φαινόμενα που είναι υπεύθυνα για την παραγωγή μη μόνιμου ροϊκού πεδίου.

Ανομοιομορφίες της μέσης ταχύτητας προκαλούνται από:

- i) Πρόχειρο σχεδιασμό των οδηγών πτερυγίων.
- ii) Την ανάπτυξη του οριακού στρώματος στα τοιχώματα του τμήματος επαναφοράς και ιδιαίτερα από τις αποκολλήσεις που μπορούν να προκληθούν είτε από μία μεγάλη γωνία του διαχύτη είτε από πρόχειρο σχεδιασμό των οδηγών πτερυγίων στους καμπύλους αγωγούς, με αποτέλεσμα την δημιουργία ενός ασύμμετρου ροϊκού πεδίου.
- iii) Πρόχειρο σχεδιασμό του ανεμιστήρα ή των πτερυγίων ευθυγράμμισης της ροής που μπορούν να προκαλέσουν στροβιλισμό ή περιστροφή όλου του ροϊκού πεδίου γύρω από τον διαμήκη άξονα της αεροσήραγγας.

Για μια υψηλών επιδόσεων αεροσήραγγα αποδεκτές τιμές για την μεταβολή της μέσης ταχύτητας κατά πλάτος του θαλάμου μετρήσεων είναι 0,2% και επομένως ο σχεδιασμός μιας χαμηλής τύρβης αεροσήραγγας υπαγορεύει αυτόματα την ομοιομορφία της μέσης ταχύτητας.

Σε μία όμως αεροσήραγγα γενικής χρήσεως, η τύρβη είναι μικρότερης σπουδαιότητας και ο σχεδιασμός της αεροσήραγγας προσδιορίζεται από την απαιτούμενη ομοιομορφία της μέσης ταχύτητας.

Μη μονιμότητα και υψηλής έντασης τύρβη στο ροϊκό πεδίο του θαλάμου μετρήσεων μπορούν να αποφευχθούν σε μια καινούργια αεροσήραγγα ή να ελαχιστοποιηθούν σε μία υπάρχουσα με δύο τρόπους: είτε βελτιώνοντας την ροή στο τμήμα επαναφοράς είτε τοποθετώντας κυψελίδες, πλέγματα και ένα μεγάλο ακροφύσιο πρι από τον θάλαμο μετρήσεων. Καθώς είναι δύσκολο να εξαλειφθεί μία χαμηλής συχνότητας μη μονιμότητα της ροής δίχως μεγάλη πτώση της ολικής πίεσης στον θάλαμο καθησυχασμού της ροής, είναι αναγκαία η αποφυγή μεγάλης εκτάσεως αποκολλήσεων στο τμήμα επαναφοράς της ροής.

Σε όλες τις παλαιού σχεδιασμού αεροσήραγγες συναντώνται οι κυψελίδες στον θάλαμο καθησυχασμού της ροής σε μια προσπάθεια βελτίωσης της ποιότητας της ροής στον θάλαμο μετρήσεων.

Στις σύγχρονες αεροσήραγγες με μεγάλους λόγους σύγκλισης του ακροφυσίου σπάνια συναντάται η χρήση των κυψελίδων καθώς το όφελος από την χρησιμοποίησή τους είναι ελάχιστο.

Η χρήση των πλεγμάτων αποδεικνύεται πολύ χρησιμότερη από τις κυψελίδες για απόκτηση επιθυμητής ροής και γι' αυτό στις σύγχρονες αεροσήραγγες, σε ένα πολύ μεγάλο ποσοστό, συναντάται ένα καλοσχεδιασμένο σύστημα πλεγμάτων. Συνήθως στον θάλαμο καθησυχασμού της ροής τοποθετούνται δύο πλέγματα ενώ αν είναι επιθυμητό ένα ροϊκό πεδίο με χαμηλές έντασης τύρβης (αεροσήραγγες χαμηλής τύρβης) χρησιμοποιούνται διατάξεις έξι ή περισσότερων πλεγμάτων. Τα πλέγματα προσαρμόζονται σε πλαίσια τα οποία μπορούν να τοποθετηθούν στον θάλαμο καθησυχασμού της ροής και η βέλτιστη θέση τους προσδιορίζεται κατά πειραματικό τρόπο μετά την κατασκευή της αεροσήραγγας.

## **Περιγραφή ακροφυσίου, θαλάμου μετρήσεων, διαχύτη και ανεμιστήρα.**

### **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.

Η συνεχής επιτάχυνση της ροής επιτυγχάνεται στην πραγματικότητα μόνο κατά τον διαμήκη άξονα του ακροφυσίου γιατί σε κάθε ακροφύσιο πεπερασμένου μήκους υπάρχουν περιοχές ανάστροφων βαθμίδων της ταχύτητας με αποτέλεσμα την αποκόλληση του οριακού στρώματος από τα τοιχώματα του. Επιπρόσθετα σε ακροφύσια πολυγωνικής διατομής (π.χ. ορθογωνικής διατομής) εμφανίζονται φαινόμενα δευτερευόντων ροών στις γωνίες με αποτέλεσμα την ευκολότερη αποκόλληση του οριακού στρώματος που αναπτύσσεται κοντά σε αυτές από το αντίστοιχο που αναπτύσσεται κοντά στον διαμήκη άξονα του ακροφυσίου.

Η επίδραση των δευτερευόντων ροών στην ανάπτυξη του ροϊκού πεδίου στο ακροφύσιο μπορεί να μειωθεί αλλά όχι να εξαφανισθεί με δισδιάστατα ακροφύσια.

Οι δευτερεύοντες ροές μπορούν να αποφευχθούν με ακροφύσια κυκλικής ή ελλειπτικής διατομής αλλά το όφελος αυτό αντισταθμίζεται από τις παρουσιαζόμενες κατασκευαστικές δυσκολίες. Με σκοπό να αποφευχθούν δυσκολίες στην κατασκευή των ακροφυσίων και επιπρόσθετα να ελαχιστοποιηθούν οι επιδράσεις των δευτερευόντων ροών, τα ακροφύσια που συνήθως χρησιμοποιούνται είναι οκταγωνικής διατομής. Ο σχεδιασμός ενός τέτοιου ακροφυσίου στηρίζεται στην υπόθεση ότι η ροή συμπεριφέρεται κατά τον ίδιο τρόπο όπως και σε ένα αξονοσυμμετρικό ακροφύσιο.

Ο λόγος σύγκλισης του ακροφυσίου που ορίζεται σαν ο λόγος των επιφανειών των διατομών εισόδου και εξόδου, δηλαδή  $k=A_1/A_2$  καθορίζει το μέγεθος του ακροφυσίου οπότε και της αεροσήραγγας και κατά συνέπεια το κόστος της αεροσήραγγας. Ένας

επιπρόσθετος παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη στην επιλογή του λόγου σύγκλισης είναι η επίδραση του στην μεταβολή της ταχύτητας στον θάλαμο μετρήσεων.

Η μεταβολή της ταχύτητας στον θάλαμο μετρήσεων είναι αντιστρόφως ανάλογη του λόγου σύγκλισης οπότε ένας μεγάλος λόγος σύγκλισης (π.χ. από 7 έως 14) βοηθά πολύ στην απόκτηση ενός καλού ροϊκού πεδίου στον θάλαμο μετρήσεων.

### **Θάλαμος μετρήσεων**

Ο σχεδιασμός κάθε αεροσήραγγας ξεκινά από τον καθορισμό δύο πολύ βασικών κριτηρίων:

- i) Το είδος των πειραμάτων που πρόκειται να γίνουν.
- ii) Τις προϋποθέσεις που πρέπει να εκπληρώνει η εγκατάσταση, δηλαδή γεωμετρία και διαστάσεις του θαλάμου μετρήσεων καθώς επίσης επιθυμητή ροϊκή ταχύτητα, για να μπορεί να ανταποκριθεί στον σκοπό για τον οποίο κατασκευάστηκε.

Τα προαναφερθέντα κριτήρια καθορίζουν κατά κάποιο τρόπο την απαιτούμενη ενεργειακή ανάγκη και γενικά καθορίζουν τον όλο σχεδιασμό. Το μέγεθος του θαλάμου μετρήσεων και η ταχύτητα του ροϊκού πεδίου σ' αυτόν προσδιορίζουν το μέγεθος του αριθμού Reynolds της αεροσήραγγας.

Θεωρητικά, τουλάχιστον ένας μεγάλος θάλαμος μετρήσεων για την μελέτη μεγάλης κλίμακας μοντέλων σε μία δεδομένη ταχύτητα θα μπορούσε να επιτύχει τον ίδιο αριθμό Reynolds με ένα αντίστοιχα μικρότερο αλλά με ταχύτητα μεγαλύτερη της ταχύτητας του πρώτου.

Στην πραγματικότητα όμως, παρά το γεγονός ότι ο ίδιος αριθμός Reynolds μπορεί να επιτευχθεί σε μια αεροσήραγγα διπλάσιου μεγέθους από μια άλλη, το κόστος της μεγάλης αεροσήραγγας είναι περίπου τετραπλάσιο από το αντίστοιχο της μικρής.

Η διατομή του θαλάμου μετρήσεων μπορεί να είναι κυκλική, ελλειπτική, τετραγωνική, ορθογωνική, οκταγωνική. Οι προαναφερόμενες διατομές δεν αποτελούν και τις μοναδικές επιλογές καθ' όσον η πράξη δείχνει ότι έχουν επιλεγεί και άλλες σε μια προσπάθεια επίτευξης της βέλτιστης λύσης συνδυάζοντας τα πλεονεκτήματα που απορρέουν από την γεωμετρία κάθε μιας από τις προαναφερόμενες διατομές.

Η σημαντικότερη παράμετρος για την επιλογή του θαλάμου μετρήσεων είναι το εμβαδόν της διατομής του καθ' όσον αυτό καθορίζει τις ενεργειακές ανάγκες της αεροσήραγγας. Το δεύτερο καθοριστικό στοιχείο προκύπτει από τον συνδυασμό της αεροδυναμικής και της χρήσης της αεροσήραγγας.

Για μια δοσμένη επιφάνεια διατομής θα πρέπει να υπάρχει η δυνατότητα μελέτης μοντέλων μεγάλου διατάματος αλλά για μικρότερες τιμές του λόγου ύψους προς πλάτους ίσου με 7 προς 10 περίπου, η επίδραση των τοιχωμάτων μεταβάλλεται δραστικά σ' όλο το πλάτος του εκπετάσματος του μοντέλου με αποτέλεσμα να αμφισβητείται η αξιοπιστία των πειραματικών δεδομένων.

Το μήκος του θαλάμου μετρήσεων συνήθως είναι μία έως δύο φορές η μέγιστη διάσταση του θαλάμου μετρήσεων στην είσοδό του. Η επιλογή του μήκους εξαρτάται τόσο από την ενεργειακή κατανάλωση που αυτό προσφέρει όσο και από το κατά πόσο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλη την έκταση του καθ' όσον το ροϊκό πεδίο



δεν είναι ομοιόμορφο στην αρχή και στο τέλος του θαλάμου μετρήσεων.

Η ανάπτυξη του οριακού στρώματος κατά μήκος του θαλάμου μετρήσεων έχει σαν αποτέλεσμα την βαθμιαία μείωση της ενεργού διατομής του με αντίστοιχη αύξηση της ταχύτητας του ροϊκού πεδίου. Αυτή η επιτάχυνση της ροής προκαλεί μια πτώση πίεσης κατά μήκος του θαλάμου μετρήσεων με αποτέλεσμα την εμφάνιση μιας επιπρόσθετης αντίστασης (horizontalbuoyancy) στο μοντέλο. Αν η διατομή του θαλάμου μετρήσεων αυξανόταν βαθμιαία κατά τρόπο που να αντισταθμίζεται η αύξηση του πάχους μετάθεσης του οριακού στρώματος τότε θα μπορούσε να επιτευχθεί μηδενική βαθμίδα πίεσης κατά μήκος του θαλάμου μετρήσεων.

Δυστυχώς όμως δεν υπάρχει καμιά μέθοδος σχεδιασμού των τοιχωμάτων του θαλάμου μετρήσεων έτσι ώστε να διατηρείται σταθερή σε στατική πίεση κατά μήκος του.

Από πρακτική καθαρά θεώρηση ο θάλαμος μετρήσεων πρέπει να είναι εφοδιασμένος με αρκετά παράθυρα και επαρκή φωτισμό για πλήρη οπτική επαφή με το μοντέλο ενώ θα πρέπει να προβλεφθεί και η τοποθέτηση όλων αυτών των οργάνων που επιτρέπουν την λήψη ποσοτικών μετρήσεων.

Όλα τα προαναφερόμενα είχαν σαν αντικείμενο κλειστούς θαλάμους μετρήσεων καθόσον αυτοί συναντώνται κατά συντριπτική πλειοψηφία στις υπάρχουσες αεροσήραγγες.

Ανοικτοί θάλαμοι μετρήσεων (open-jet) συναντώνται σε αεροσήραγγες για ειδικές πειραματικές μετρήσεις (π.χ. μελέτη ελίκων).

Τα δύο κυρίαρχα προβλήματα που συναντώνται σε ανοικτούς θαλάμους μετρήσεων είναι:

i) Το ότι ο αεροδυναμικός ζυγός του θαλάμου μετρήσεων απαιτεί πλήρη προστασία από το ροϊκό πεδίο, οδηγεί στην εγκατάσταση ενός τοιχώματος με αποτέλεσμα την δυσκολία στις διορθώσεις των πειραματικών μετρήσεων

ii) Η απαιτούμενη ισχύ για μια αεροσήραγγα με ανοικτό θάλαμο μετρήσεων είναι τριπλάσια από αυτή της ίδιας αεροσήραγγας με κλειστό θάλαμο μετρήσεων

### **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. Η ανάστροφη βαθμίδα της πίεσης που επικρατεί στο διαχύτη μπορεί να προκαλέσει την αποκόλληση του οριακού στρώματος από τα τοιχώματα του διαχύτη με αποτέλεσμα την αύξηση των απωλειών και της έντασης της τύρβης στην αεροσήραγγα.

Πειραματικά αποτελέσματα οδηγούν στο συμπέρασμα ότι διαχύτης με ολική γωνία απόκλισης των απέναντι τοιχωμάτων ίση με 50 περίπου εξασφαλίζουν το απαιτούμενο ροϊκό πεδίο με αντιστάθμισμα την αύξηση του μήκους του διαχύτη και κατά συνέπεια της αεροσήραγγας.

Η γωνία απόκλισης μπορεί να αυξηθεί στις 70 εφόσον πρόκειται να χρησιμοποιηθούν μοντέλα με μικρή αντίσταση αλλά αυτό δεν μπορεί να αποτελέσει ισχυρό κριτήριο

για τον σχεδιασμό του διαχύτη μιας αεροσήραγγας.

Η απόδοση ενός διαχύτη μπορεί να εκφραστεί από τον λόγο της ανακτώμενης στατικής πίεσης προς την απώλεια σε δυναμική πίεση. Για ατριβής ροή, από την εξίσωση Bernoulli, συμπεραίνουμε ότι αυτός ο λόγος ισούται με την μονάδα οπότε η απόδοση του διαχύτη είναι 100%.

Για πραγματική όμως ροή η αύξηση της στατικής πίεσης είναι πάντα μικρότερη από την πτώση της δυναμικής πίεσης οπότε η απόδοση του διαχύτη είναι πάντα μικρότερη της μονάδας.

Διάφοροι τρόποι με τους οποίους μπορεί να εξασφαλιστεί αποδοτική λειτουργία του διαχύτη με μεγάλες γωνίες απόκλισης σε συνδυασμό με την ελαχιστοποίηση του κόστους είναι: πλέγματα (screens), γεννήτριες στροβιλισμών (vortexgenerators), έλικες (windmills), πτερύγια (splitterplates), και σχισμές ελέγχου του οριακού στρώματος (boundarylayercontrolsloths).

Πλέγματα : Σε διαχύτη με ολική γωνία απόκλισης μεγαλύτερη από 450, η ροή μπορεί να εξομαλυνθεί σε ικανοποιητικό βαθμό με την τοποθέτηση πλεγμάτων κατά διαστήματα κατά το μήκος του.

Σαν μειονέκτημα της χρήσεως των πλεγμάτων πρέπει να αναφερθεί το υψηλό κόστος τους και η συνεισφορά τους στις απώλειες πίεσης της αεροσήραγγας.

Γεννήτριες στροβιλισμών: Είναι απλά πτερύγια που παράγουν στροβίλους για την παροχή ενέργειας στην χαμηλής ενέργειας ροή κοντά στα τοιχώματα. Κατ'αυτό τον τρόπο μειώνονται οι πιθανότητες για αποκόλληση της ροής. Συνήθως γεννήτριες στροβιλισμών βτοποθετούνται στο τέλος του θαλάμου μετρήσεων πριν από τον διαχύτη.

Οι γεννήτριες στροβιλισμών χρησιμοποιούνται για διαχύτες στους οποίους παρουσιάζεται αποκόλληση με γωνία απόκλισης 70 έως 100 και στην περίπτωση ορθογωνικής διατομής διαχυτών όπου δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν έλικες.

Έλικες: Χρησιμοποιούνται για την άντληση ενέργειας από περιοχές χαμηλής δυναμικής πίεσης. Με την εγκατάσταση ενός ή δύο ελίκων μπορεί να εξοικονομηθεί σημαντικό κόστος κατασκευής κάνοντας διαχύτη 120.

Πτερύγια: Προσαρμόζονται κατά μήκος του διαχύτη και μειώνουν τις γωνίες απόκλισης μεταξύ των αντικείμενων τοιχωμάτων του διαχύτη διαχωρίζοντας τον σε μικρότερους διαχύτες με μικρότερες γωνίες απόκλισης. Η ανάκτηση πίεσης που επιτυγχάνεται με τα πτερύγια είναι μεγαλύτερη από την αύξηση απωλειών που οφείλεται στην επιπρόσθετη τριβή.

Σχισμές ελέγχου του οριακού στρώματος: Χρησιμοποιούνται μόνο για αεροσήραγγες ανοικτού κυκλώματος. Σε αεροσήραγγες ανοικτού κυκλώματος επικρατεί υποπίεση στον θάλαμο μετρήσεων οπότε η διάνοιξη οπών στην είσοδο του διαχύτη βελτιώνει την εξέλιξη του ροϊκού πεδίου σ'αυτόν.

### **Ανεμιστήρες**

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. Ο ανεμιστήρας θα πρέπει να έχει δυνατότητες μεταβολής των στροφών του και μερικές φορές απαιτείται τα πτερύγια του να είναι μεταβλητού βήματος έτσι ώστε να εξασφαλίζεται ο βέλτιστος έλεγχος της ταχύτητας του ροϊκού πεδίου στην αεροσήραγγα.

Η περιφερειακή ταχύτητα του ανεμιστήρα θα πρέπει ταυτόχρονα να διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα και οπωσδήποτε να είναι μικρότερη του μισού της ταχύτητας του ήχου έτσι ώστε να αποφεύγονται φαινόμενα συμπίεστικότητας της ροής.

Μετά τον ανεμιστήρα υπάρχει μια τάση περιστροφής της ροής η οποία μπορεί να αποσβεσθεί με την προσαρμογή ακτινικών πτερυγίων πίσω από τον ανεμιστήρα. Αυτά τα πτερύγια καλούνται πτερύγια ευθυγράμμισης της ροής και η τομή τους είναι ένα αεροδυναμικό προφίλ (αεροτομή) με καμπυλότητα τέτοια που να παράγει περιστροφή της ροής ίσου μέτρου και αντίθετου φοράς από αυτήν που παράγεται από τον ανεμιστήρα.

Επιπρόσθετα τα πτερύγια ευθυγράμμισης της ροής πρέπει να έχουν πτερύγια καμπυλότητας (flaps) έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η μέγιστη αποδοτικότητα τους σε ολόκληρο το φάσμα ταχυτήτων της αεροσήραγγας. Η τάση περιστροφής της ροής μπορεί να αποσβεσθεί επίσης με συνδυασμό δύο αντιθέτως περιστρεφόμενων ανεμιστήρων εν σειρά.

### **Ενεργειακές απαιτήσεις**

Ένα μέτρο για την απόδοση μιας αεροσήραγγας αποτελεί ο συντελεστής ισχύος (powerfactor), που ορίζεται σαν ο λόγος της απαιτούμενης ισχύος για την κίνηση του ανεμιστήρα της αεροσήραγγας προς την ροϊκή ισχύ του θαλάμου μετρήσεων.

Οι ολικές απώλειες στην αεροσήραγγα μπορούν να θεωρηθούν σαν το άθροισμα των απωλειών κάθε επί μέρους τμήματος της. Θα μπορούσαμε να κατατάξουμε αυτές στις παρακάτω κατηγορίες:

- i) Απώλειες πίεσης που οφείλονται στην επιφανειακή τριβή.
- ii) Απώλειες πίεσης από τις κυψελίδες και τα πλέγματα.
- iii) Απώλειες πίεσης που οφείλονται σε αποκολλήσεις της ροής.
- iv) Απώλειες εξόδου για την περίπτωση αεροσηράγγων ανοικτού κυκλώματος.

Είναι δυνατόν να επιτευχθεί ενεργειακή εξοικονόμηση σε μια αεροσήραγγα με:

- a) Συμπίεση του αέρα,
- b) με την χρήση αερίου υψηλού μοριακού βάρους και
- c) με μείωση της θερμοκρασίας.

Από αυτούς τους τρόπους ο πρώτος οδηγεί σε αεροσήραγγες μεταβλητής πυκνότητας ενώ ο δεύτερος χρησιμοποιείται για ειδικής χρήσης αεροσήραγγες. Η τεχνική μείωσης της θερμοκρασίας αποτελεί την αρχή λειτουργίας των κρυογενικών αεροσηράγγων στις οποίες μπορεί να εξασφαλισθεί και αναπαραγωγή του αριθμού Reynolds για πραγματικές συνθήκες.

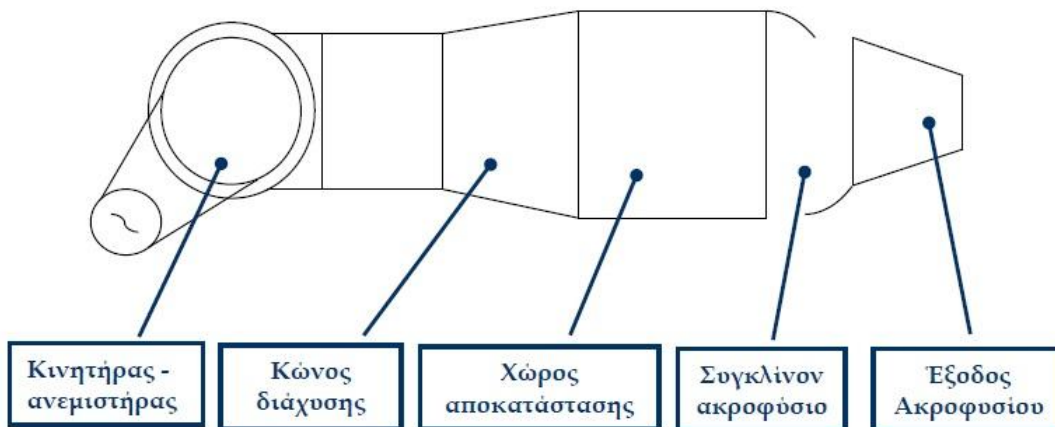
Προς το παρόν οι κρυογενικές αεροσήραγγες αποτελούν αντικείμενο μελέτης και σαν κύριο μειονέκτημα τους θα πρέπει να σημειωθεί το υψηλό κόστος κατασκευής τους, καθώς επίσης και η πολυπλοκότητά του όλου συστήματος.

### Περιγραφή αεροσήραγγας εργαστηρίου

Η αεροσήραγγα του εργαστηρίου είναι ανοικτού κυκλώματος με ανοικτό χώρο δοκιμών. Η επιφάνεια του ακροφυσίου είναι  $650\text{mm} \times 650\text{mm}$ . Η γεωμετρία της φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 16: Η αεροσήραγγα του εργαστηρίου



Εικόνα 17: Περιγραφή της αεροσήραγγας του εργαστηρίου.

1. Ο ανεμιστήρας είναι μία φυγόκεντρη αντλία που οδηγείται από ένα τριφασικό κινητήρα 18,5kW. Ο τύπος του ανεμιστήρα είναι NICOTRA VRE ADH 710R με ισχύ 14,7kW, διαστάσεις 898x898 παροχή 45000 m<sup>3</sup>/h και ονομαστικές στροφές 850rpm. Ο κινητήρας ελέγχεται μέσω ενός Inverter που μεταβάλλει μέσω της συχνότητας τις στροφές του.

Η μέγιστη ταχύτητα εξόδου του αέρα από το ακροφύσιο φτάνει τα 25m/sec.



Εικόνα 18: Ο κινητήρας με τον ανεμιστήρα

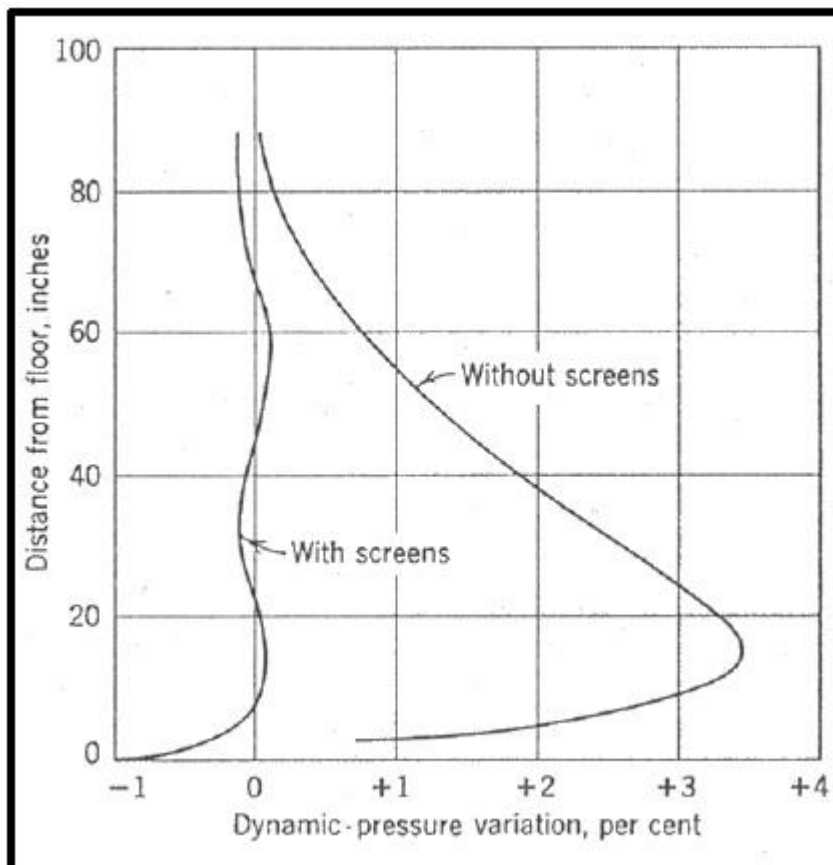


Εικόνα 19: Ο inverter του εργαστηρίου

2. Στη συνέχεια, χώρα λαμβάνει η διάχυση της ροής με σκοπό την μείωση της ταχύτητας της ροής.

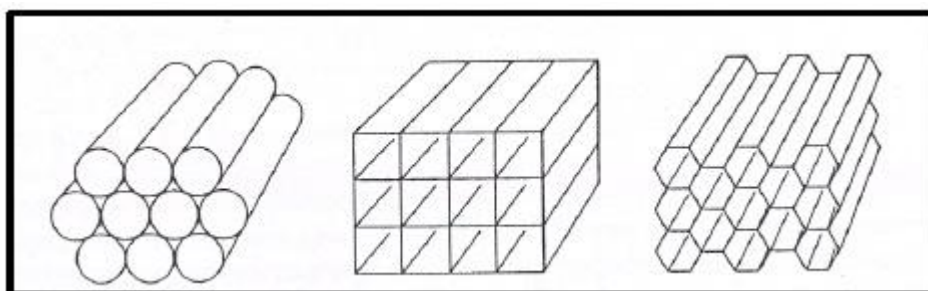
3. Στο χώρο αποκατάστασης η ροή από στροβιλώδης γίνεται στρωτή. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση σιτών (screens) και κυψελών (honeycombs).

Οι σήτες κυρίως μειώνουν τους αξονικούς στροβιλισμούς. Συγχρόνως παρατηρείται μία μεγάλη πτώση της πίεσης επηρεάζοντας κυρίως τις υψηλές ταχύτητες, επιτυγχάνοντας μια πιο ομοιόμορφη αξονική ταχύτητα.



Εικόνα 20: Μεταβολή του προφίλταχύτητας με χρήση ή όχι οθισήτας.

Οι κυψέλες προκαλούν μικρή πτώση πίεσης που προκαλεί μικρή μείωση στην αξονική ταχύτητα. Χαρακτηρίζονται από μήκος μεγαλύτερο κατά μία τάξη μεγέθους από τη διάμετρό τους, μειώνοντας έτσι την απόκλιση της ροής από την επιθυμητή αξονική.



Εικόνα 21: Κυψέλες διαφόρων μορφών

Η αεροσήραγγα του εργαστηρίου έχει δύο σήτες και μία διάταξη κυψελών κυλινδρικής μορφής.

Η μείωση της ταχύτητας λόγω εμποδίων έχει μεγάλη επίδραση στην απαιτούμενη ισχύ εφόσον η ισχύς είναι ανάλογη του κύβου της ταχύτητας. Απαραίτητη κρίνεται λοιπόν η τοποθέτηση των σητών και των κυψελών στο χώρο αποκατάστασης όπου η ταχύτητα έχει τη χαμηλότερη τιμή.

## **Inverter**

Το μοντέλο του inverter που χρησιμοποιεί το εργαστήριο είναι Siemens Micromaster 440.

Η σειρά MICROMASTER 440 περιλαμβάνει μια γκάμα ρυθμιστών στροφών για τον έλεγχο της ταχύτητας των τριφασικών κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος. Τα διάφορα μοντέλα της καλύπτουν όλο το φάσμα από 120W ως 200kW(για σταθερή ροπή (CT), εναλλακτικά ως 250kW(για μεταβλητή ροπή(VT)). Οι ρυθμιστές στροφών ελέγχονται από μικροεπεξεργαστή και χρησιμοποιούν κορυφαίας τεχνολογίας Διπολικά Τρανζίστορ Μονωμένης Πύλης (IGBT). Αυτός ο σχεδιασμός τους καθιστά ιδιαίτερα ευέλικτους και αξιόπιστους. Εκτεταμένες διατάξεις προστασίας διασφαλίζουν πλήρως τη λειτουργία του ρυθμιστή και του κινητήρα.



## Κεφάλαιο 3

### Εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε

1. Σωλήνας pitot συνδεδεμένος με το διαφορικό αισθητήρα πίεσης (differential pressure transmitter HD408T)
2. Ανεμόμετρου θερμού σύρματος (hotwire)
3. Τράπεζα x-y
4. Διαφορικός αισθητήρας πίεσης (differential pressure transmitter HD408T), (Στατικό ανεμόμετρο)



Εικόνα 22: Διαφορικός αισθητήρας πίεσης

Τα HD408T, πομποί για σχετική ή διαφορική ατμοσφαιρική πίεση με αναλογική έξοδο. Χρησιμοποιούνται σε όλες εκείνες τις εφαρμογές όπου πρέπει να παρακολουθείται μη διαβρωτικός αέρας ή αέριο, με πεδία πίεσης από 10 mbar έως 2000 mbar.

Ο αισθητήρας δίνει εξαιρετικά ακριβείς και σταθερές μετρήσεις της εφαρμοζόμενης διαφορικής πίεσης, με εξαιρετική επαναληψιμότητα, χαμηλή υστέρηση και πολύ καλή σταθερότητα θερμοκρασίας.

Το σήμα εξόδου του αισθητήρα ρυθμίζεται ώστε να παρέχει τάση ή έξοδο ρεύματος ή έξοδο τάσης γραμμικά ανάλογη με την εφαρμοζόμενη διαφορική πίεση.

Οι πομποί είναι έτοιμοι για χρήση καθώς έχουν βαθμονομηθεί.

Χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της βαρομετρικής πίεσης σε καθαρό χώρο, για τον έλεγχο των φίλτρων, τη μέτρηση των ροών (απασχόληση με τον σωλήνα Pitot), για τις μηχανές συσκευασίας και συσκευασίας και για τον έλεγχο του εξαερισμού.

5. Ηλεκτρονικός υπολογιστής
6. Πρόγραμμα μετρήσεων γραμμένο σε LabView (Wind measure NP version 7,1)

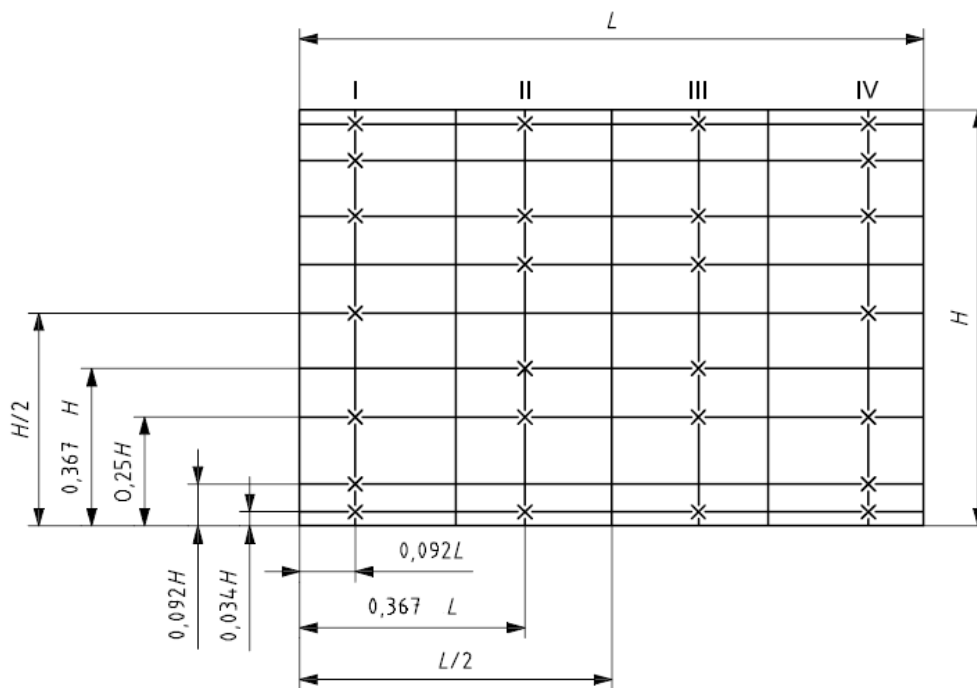
## Πειραματική διαδικασία

Αρχικά προσδιορίστηκαν τα σημεία (συντεταμένες) που θα έπρεπε να ληφθούν οι μετρήσεις ανέμου. Οι υπολογισμοί των σημείων προέκυψαν από το πρότυπο ISO 3966/15-7-2008 measurement of fluid flow in closed conduits-Velocity area method using pitot static tubes (μέτρηση της ροής ρευστού σε κλειστούς αγωγούς-Μέθοδος ταχύτητας με χρήση στατικών σωλήνων pitot). Το πρότυπο αυτό καθορίζει μια μέθοδο για τον προσδιορισμό σε κλειστό αγωγό του ρυθμού όγκου ροής μιας κανονικής ροής:

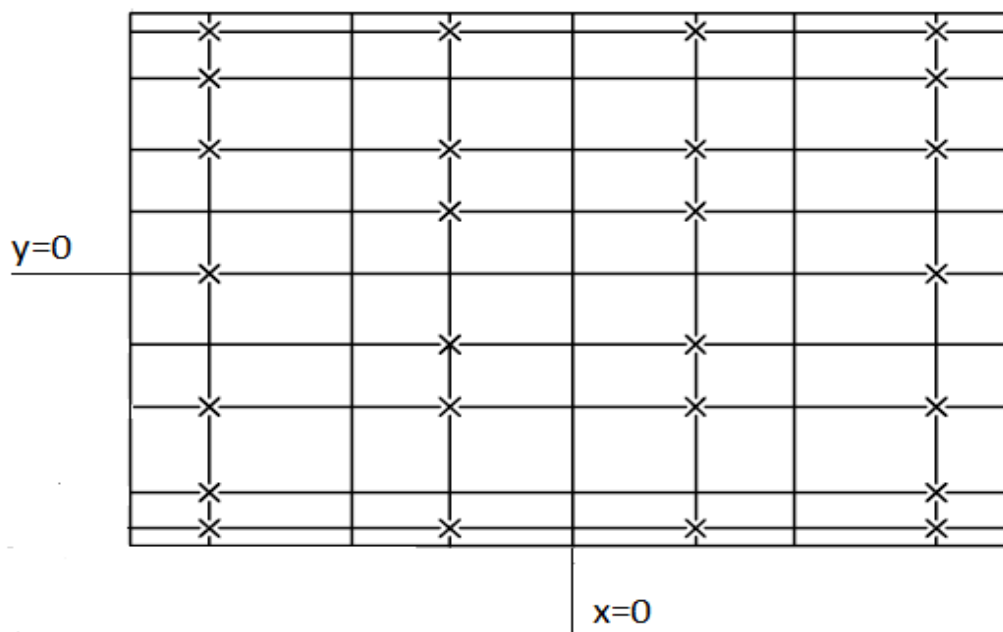
- i. ενός ρευστού ουσιαστικώς σταθερής πυκνότητας ή που αντιστοιχεί σε έναν αριθμό Mach που δεν υπερβαίνει το 0,25
- ii. με ουσιαστικά ομοιόμορφη θερμοκρασία στασιμότητας στην εγκάρσια τομή μέτρησης
- iii. που ρέει πλήρως στον αγωγό
- iv. κάτω από σταθερές συνθήκες ροής.

Το πρότυπο ασχολείται με

- την τεχνολογία και τη συντήρηση των στατικών σωλήνων pitot
- τον υπολογισμό των τοπικών ταχυτήτων από τις μετρούμενες διαφορικές πιέσεις και
- τον υπολογισμό του ρυθμού ροής με την ολοκλήρωση της ταχύτητας.



Εικόνα 23: Σημεία βάση προτύπου

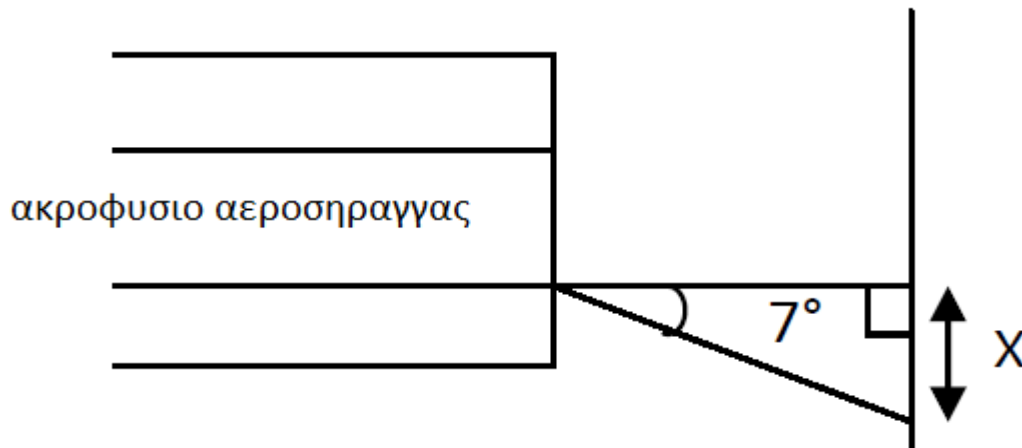


Εικόνα 24: Προσδιορισμός των σημείων που χρησιμοποιήθηκαν ως αρχές αξόνων κατά την διάρκεια των μετρήσεων

Για την ανάλυση του προφίλανέμου στην έξοδο του ακροφυσίου της αεροσήραγγας έγιναν μετρήσεις και σε διαφορετικές αποστάσεις από την επιφάνεια του ακροφυσίου. Οι αποστάσεις αυτές ήταν 0cm, 15cm, 30cm, 45cm, 60cm

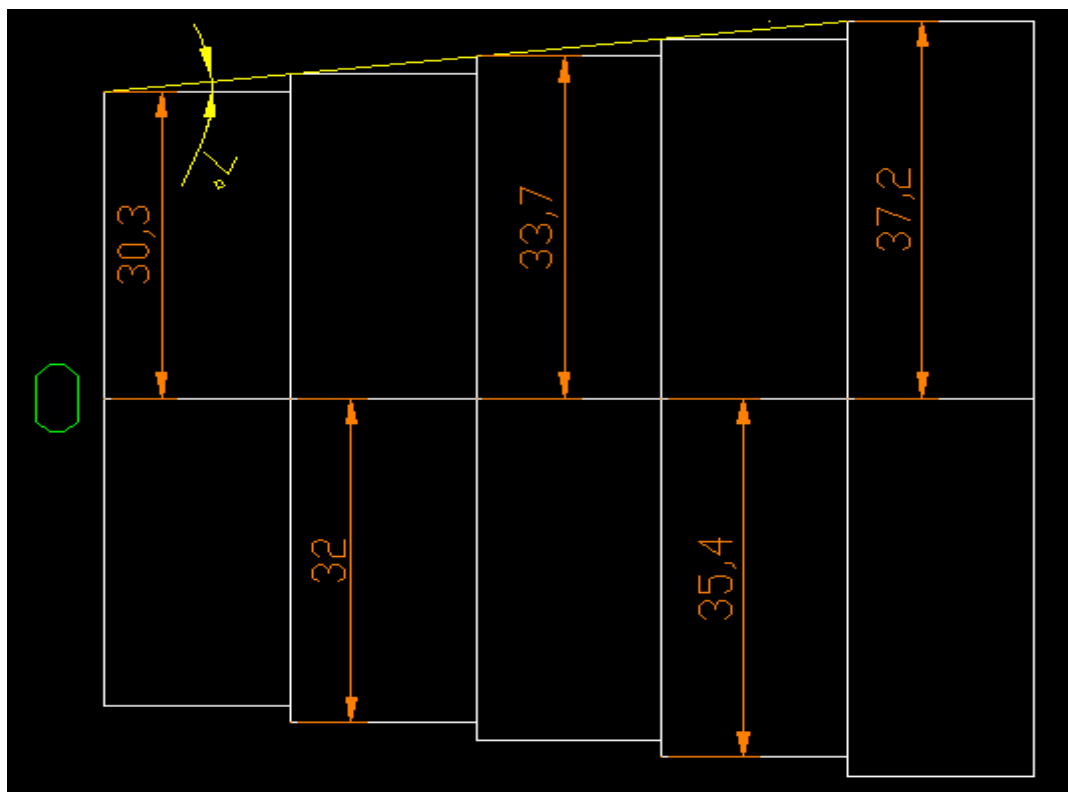
Οι εσωτερικές διαστάσεις του ακροφυσίου της αεροσήραγγας του εργαστηρίου είναι 65x65cm.

Η ροή του ανέμου στην έξοδο του πεδίου ροής έχει μια κλίση της τάξης των 7<sup>η</sup> οποία έπρεπε να ληφθεί υπ' όψιν στους υπολογισμούς.



Εικόνα 25: Κλίση ακροφυσίου

Έτσι υπολογίστηκε η εφαπτόμενη των 7 μοιρών και πολλαπλασιάστηκε επί των σημείων.



Εικόνα 26: Οι διαστάσεις που υπολογίστηκαν και η κλίση που των 7<sup>ο</sup>

Παρακάτω παρουσιάζεται η μορφή της διάταξης



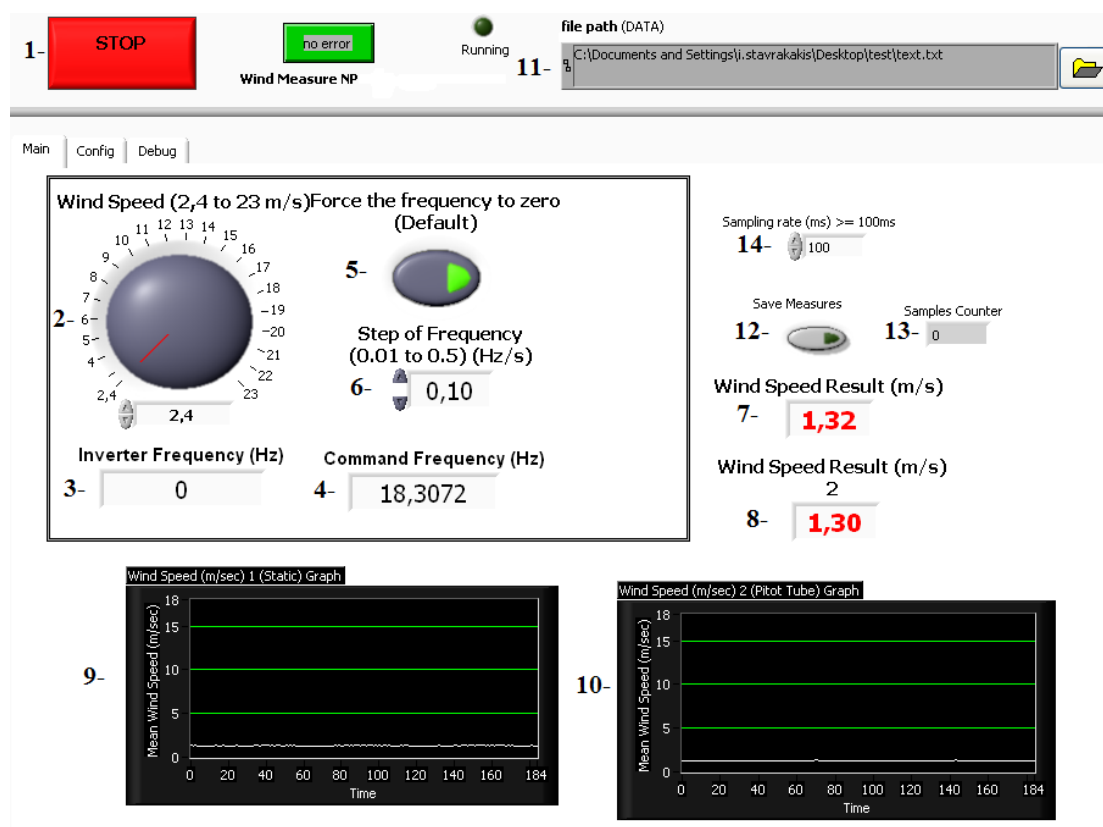
Εικόνα 27: Πρόσωση του ακροφυσίου μαζί με τα όργανα μέτρησης



Εικόνα 28: Πλάγια όψη του ακροφυσίου μαζί με τα όργανα μέτρησης

Όπως διακρίνεται στις φωτογραφίες ο σωλήνας pitot έχει τοποθετηθεί πάνω στο κινούμενο μέρος του μεταλλικού πλαισίου της τράπεζας XY, έχει βεβαιωθεί ότι έχει ευθυγραμμιστεί πλήρως και είναι σταθερό, το Hot wire έχει στερεωθεί επίσης στο κύριο σώμα του μεταλλικού πλαισίου στο κέντρο και ως προς τον άξονα x και y του ακροφυσίου της αεροσήραγγας και βρίσκεται σε μια απόσταση της τάξης των 3cm πιο μπροστά από το pitot. Επίσης για να υπάρχει μια ένδειξη και ακρίβεια των σημείων της μέτρησης, έχει χρησιμοποιηθεί μετροταινία η οποία κολλήθηκε στις άκρες του ακροφυσίου και χρησιμοποιήθηκαν πινέζες με λεπτή κλωστή πάνω στα εκάστοτε σημεία (τα σημεία ήταν μόνο για μια απόσταση κάθε φορά, μετά υπήρχε μετακίνηση στις πινέζες με τις κλωστές στα προβλεπόμενα σημεία κάθε απόστασης).

Οι μετρήσεις τις καταγράφηκαν με τον υπολογιστή χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα γραμμένο σε LabView.



Εικόνα 29: Χρησιμοποιούμενο πρόγραμμα LabVIEW

Αυτή είναι η εικόνα του προγράμματος και η λειτουργία του είναι η εξής:

1. Κουμπί STOP για να σταματάει πλήρως το πρόγραμμα.
2. Ρυθμιστής επιθυμητής ταχύτητας όπου ορίζεται η ταχύτητα την οποία θέλει ο χρήστης είτε πληκτρολογώντας την τιμή είτε από τα βελάκια αυξομείωσης με βήμα 0,1 m/s είτε με το περιστρεφόμενο κουμπί.
3. Δείκτης συχνότητας inverter όπου αναγράφεται η συχνότητα λειτουργίας inverter κατά την λειτουργία του.

4. Δείκτης command frequency όπου αναγράφεται η συχνότητα που έχει λάβει ως εντολή ο inverter ώστε να φτάσει την οριζόμενη ταχύτητα.
5. Το κουμπί force the frequency to zero κάνει αυτό ακριβώς που περιγράφει δηλαδή δίνει την εντολή ώστε να μηδενίσει την συχνότητα του inverterόπου αυτό συνεπάγεται και την διακοπή παραγωγής αέρα από την αεροσήραγγα.
6. Το step of frequency αυξομειώνει την ταχύτητα μεταβολής της συχνότητας αλλά όπως αναφέρεται και στην φωτογραφία οι τιμές που μπορεί να πάρει είναι από 0.01-0.05 Hz/s.
7. Η ένδειξη wind speed result (m/s) δείχνει την ταχύτητα που λαμβάνει από το διαφορικό αισθητήρα πίεσης.
8. Η ένδειξη wind speed result (m/s) δείχνει την ταχύτητα που λαμβάνει από το σωλήνα pitot.
9. Το γράφημα αυτό δίνει την δυνατότητα να παρακολουθεί ο χρήστης την συμπεριφορά της ταχύτητας του διαφορικού αισθητήρα πίεσης σε σχέση με τον χρόνο.
10. Το γράφημα αυτό δίνει την δυνατότητα να παρακολουθεί ο χρήστης την συμπεριφορά της ταχύτητας του σωλήνα pitot σε σχέση με τον χρόνο.
11. Εδώ ορίζεται η «διαδρομή» (όνομα και θέση στον H/Y)του αρχείου τύπου .txt όπου θα αποθηκεύονται οι μετρήσεις το οποίο καταγράφει σε τρεις στήλες τον χρόνο, την ταχύτητα που εμφανίζει ο διαφορικός αισθητήρας και την ταχύτητα που εμφανίζει ο σωλήνας pitot.
12. Το κουμπί save measures ενεργοποιεί και απενεργοποιεί την αποθήκευση μετρήσεων. Το πρόγραμμα μπορεί να «τρέχει» αλλά δεν αποθηκεύει παρά μόνο όταν το κουμπί είναι πατημένο.
13. Ο δείκτης samples counter καταγράφει πόσες μετρήσεις έχουν καταγραφεί στο ορισμένο αρχείο και ενεργοποιείται μόνο όταν είναι ενεργό και το save measures
14. Το sampling rate ορίζει την ταχύτητα δειγματοληψίας δηλαδή το χρονικό διάστημα ανά μέτρηση το οποίο πρέπει μεγαλύτερο των 100ms.Στο πείραμα ορίστηκε στα 100ms.

Η πορεία λήψης των μετρήσεων έγινε ως εξής:

1. Δινόταν εντολή για την επιθυμητή ταχύτητα του ανέμου μέσω του προγράμματος (**κουμπί 2 εικόνα 25**)
2. Ο έλεγχος για το αν υπάρχει η ταχύτητα αυτή γινόταν μέσω του hotwire ανεμόμετρου το οποίο ήταν τοποθετημένο στο κέντρο του ακροφυσίου ( $x=0$   $y=0$ ) όπου είχε τεκμηριωθεί ότι ήταν το πιο ακριβές όργανο από τα χρησιμοποιούμενα. Γενικά είχε γίνει βαθμονόμηση όλου του εξοπλισμού πριν την έναρξη του πειράματος
3. Οριζόταν ο προορισμός του αρχείου .txt όπου θα γινόταν η αποθήκευση (**κουμπί 11 εικόνα 25**)
4. Οι ταχύτητες που έδινε ως αποτέλεσμα το πρόγραμμα όπως προαναφέρθηκε ήταν από το pitot (**wind speed result 2, εικόνα 25**) και το στατικό ανεμόμετρο (**wind speed result, εικόνα 25**) έτσι υπήρχε η μετακίνηση του

- σωλήνα pitot στα σημεία που είχαν οριστεί από το πρότυπο με την χρήση της τράπεζας ΧΥόπου ήταν τοποθετημένος ο pitot υπό σταθερή ταχύτητα για κάθε κατηγορία ταχύτητας (5, 10, 15, 20m/s) και κάθε απόσταση
5. Κάθε φορά που υπήρχε η βεβαιότητα ότι όλα δουλεύουν ομαλώς και τηρούνται οι κατάλληλες συνθήκες ενεργοποιόταν η αποθήκευση των μετρήσεων.

Η επεξεργασία των μετρήσεων έγινε με την βοήθεια του προγράμματος surfer 8 της golden software.

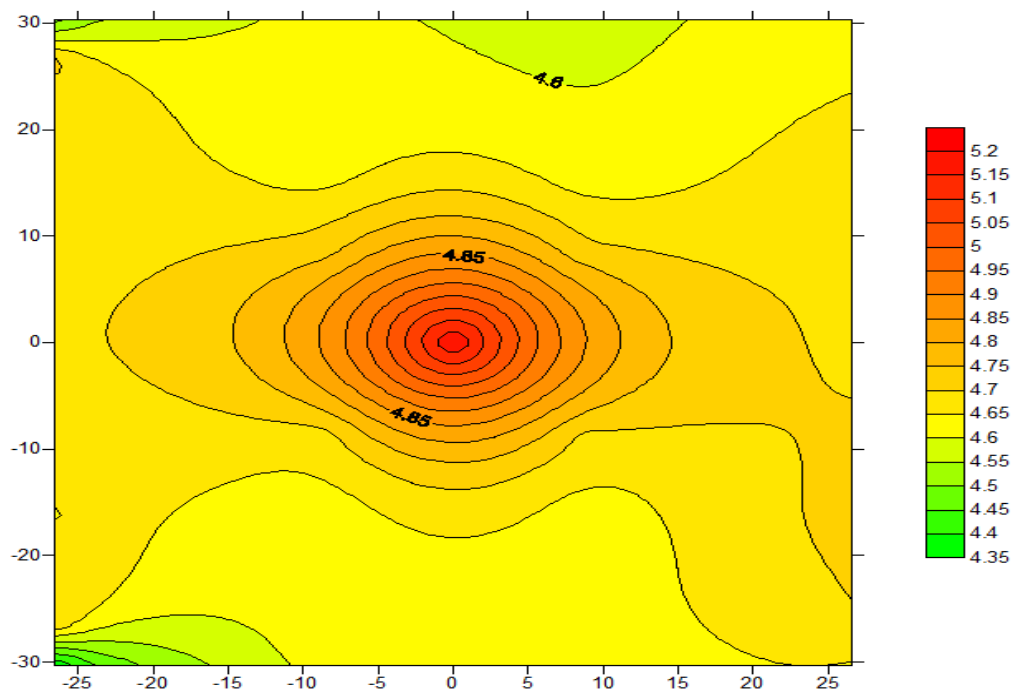


## Κεφάλαιο 4

### Τα αποτελέσματα από μετρήσεις της ταχύτητας ανέμου

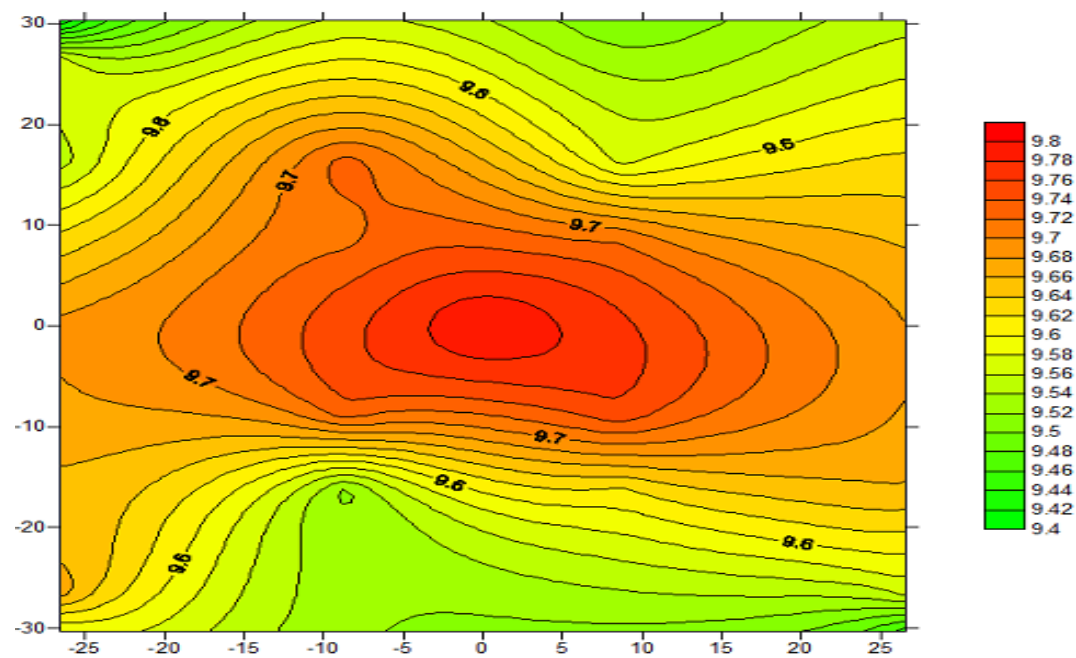
Για τα 0cm από την έξοδο του ακροφυσίου

5m/s



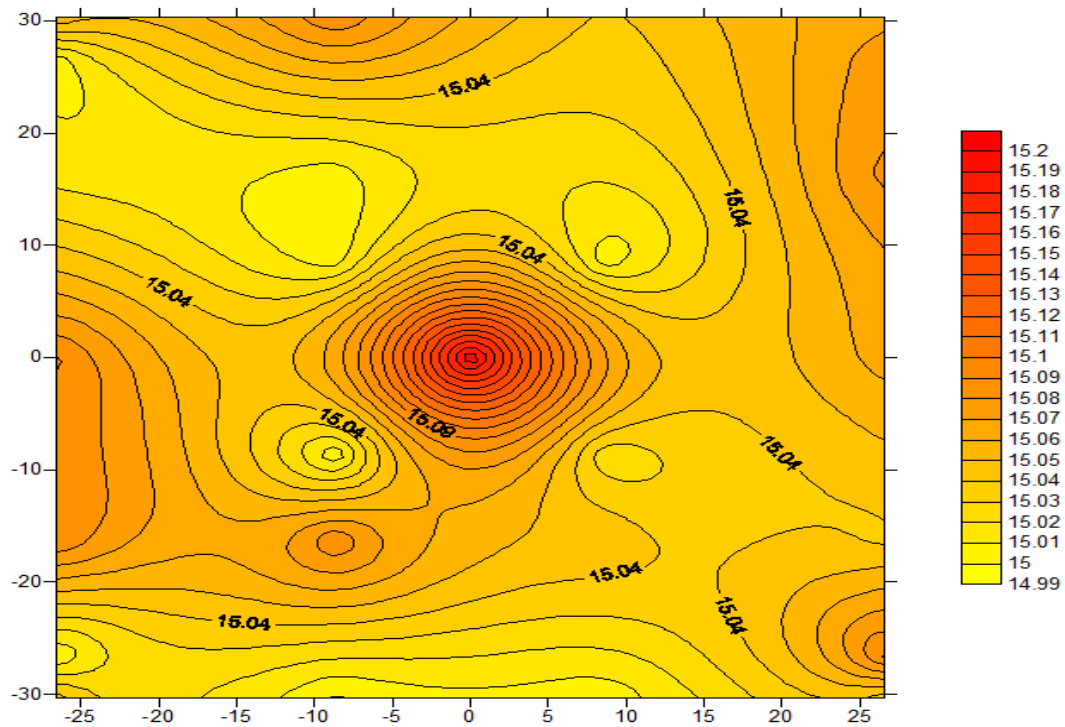
Γράφημα 1: Πεδίο ροής ανέμου σε απόσταση 0cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 5m/s

10m/s



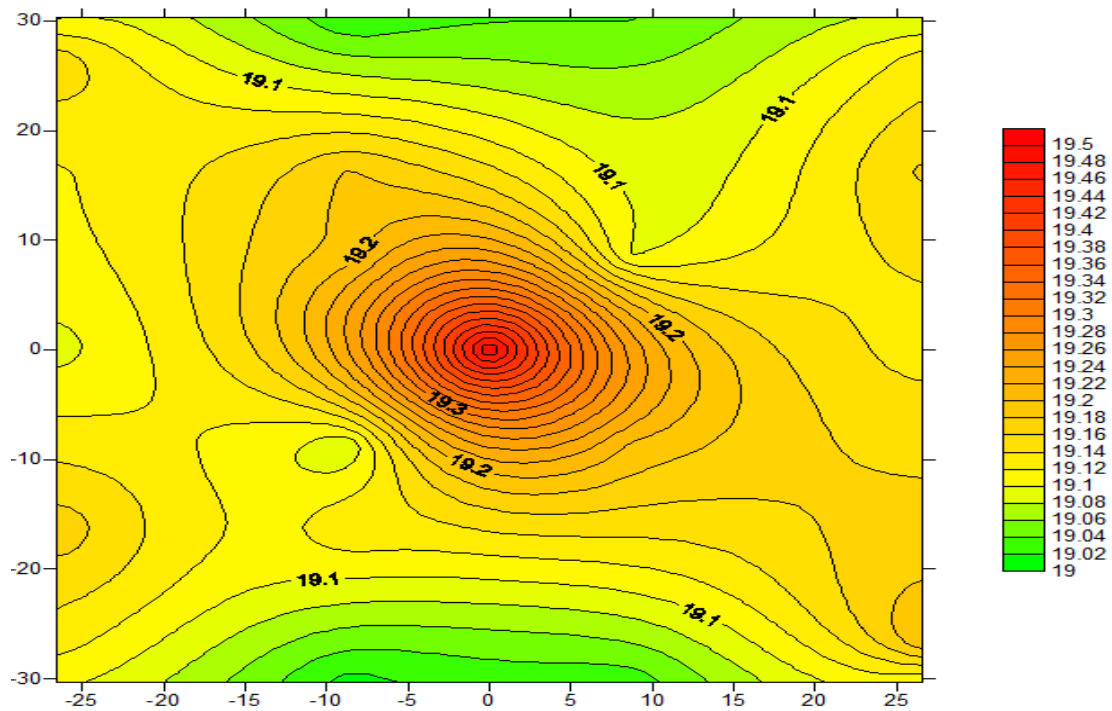
Γράφημα 2: Πεδίο ροής ανέμου σε απόσταση 0cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 10m/s

### 15m/s



Γράφημα 3: Πεδίο ροής ανέμου σε απόσταση 0cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 15m/s

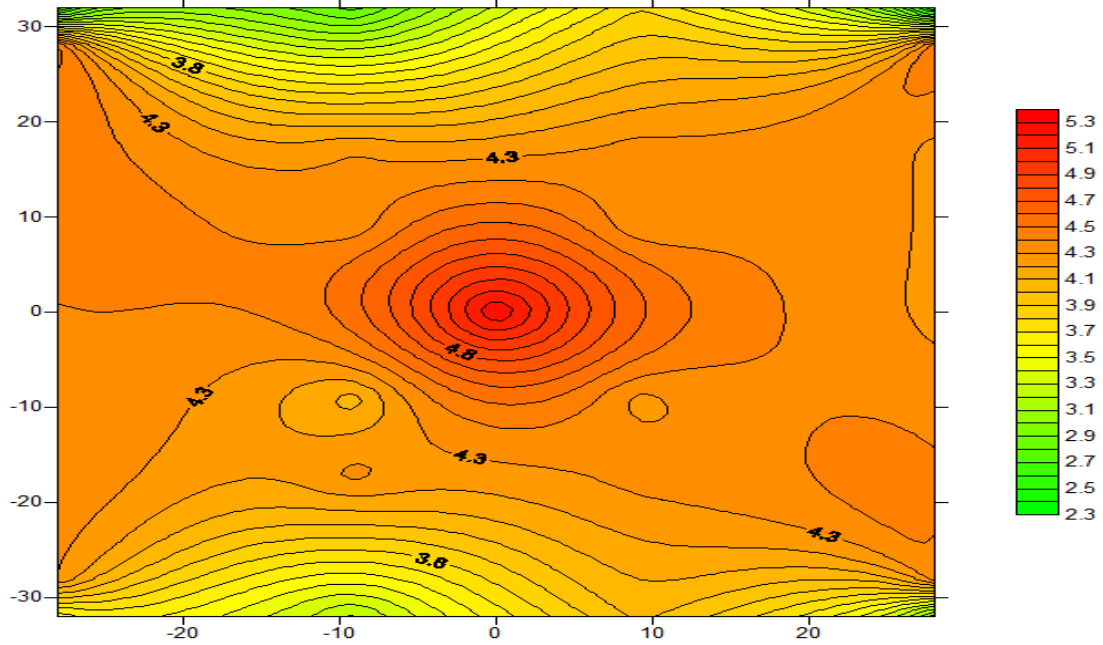
### 20m/s



Γράφημα 4: Πεδίο ροής ανέμου σε απόσταση 0cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 20m/s

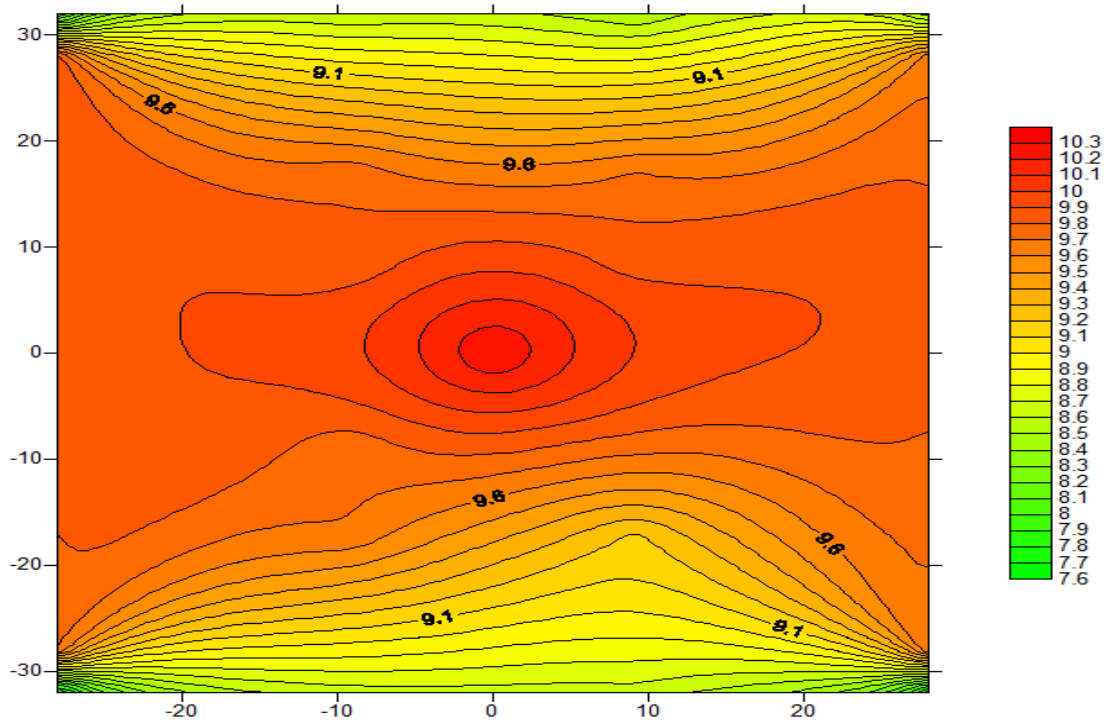
## Για τα 15cm

5m/s



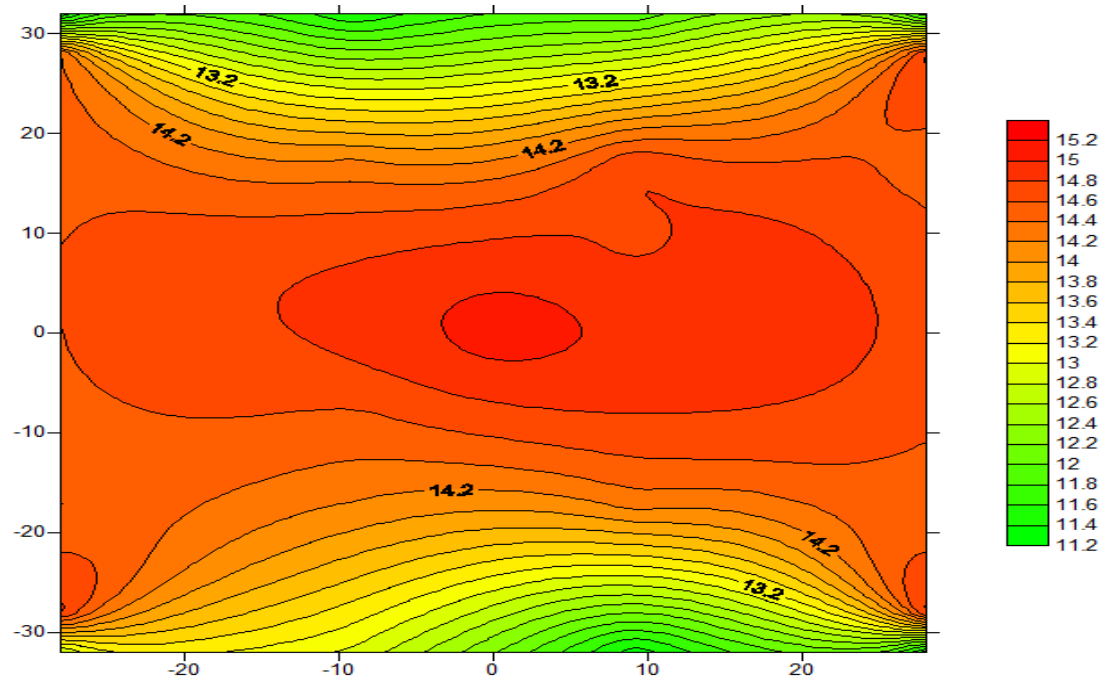
Γράφημα 5: Πεδίο ροής ανέμου σε απόσταση 15cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 5m/s

10m/s



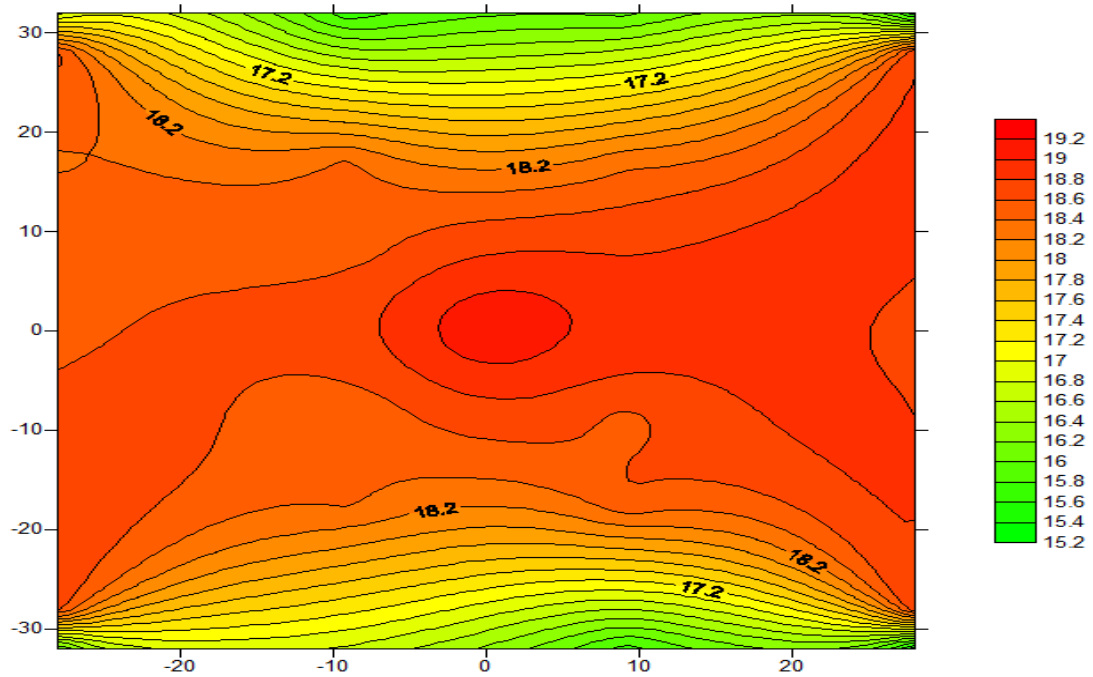
Γράφημα 6: Πεδίο ροής ανέμου σε απόσταση 15cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 10m/s

15m/s



Γράφημα 7: Πεδίο ροής ανέμου σε απόσταση 15cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 15m/s

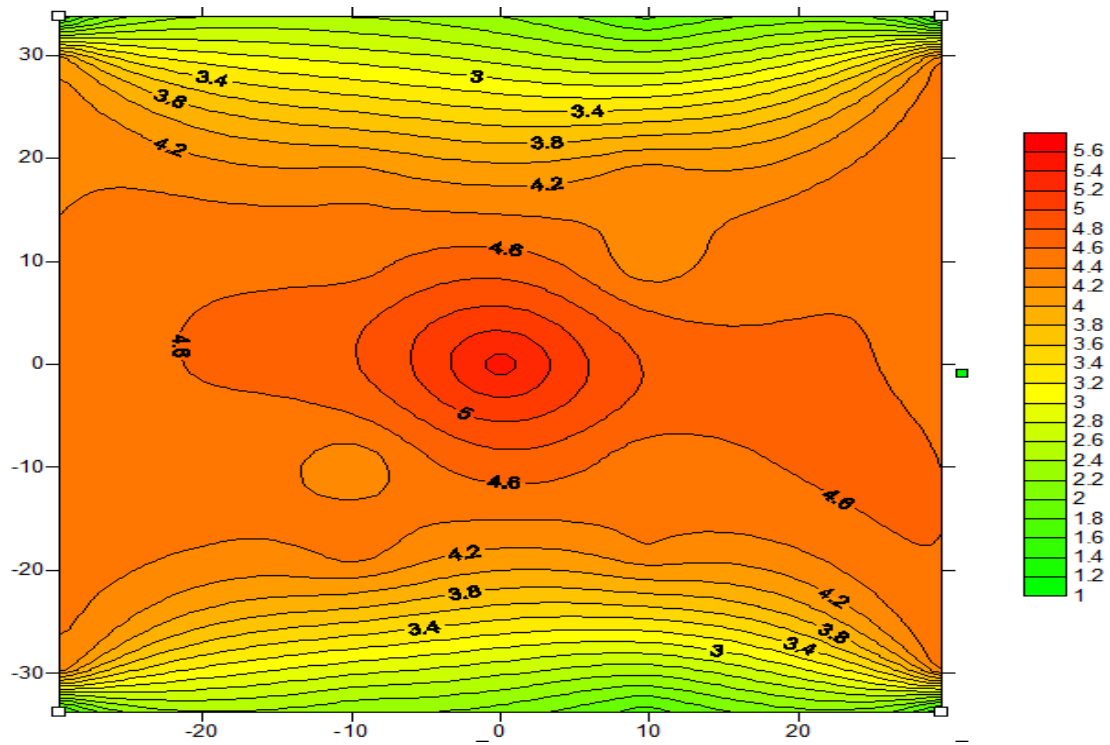
20m/s



Γράφημα 8: Πεδίο ροής ανέμου σε απόσταση 15cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 20m/s

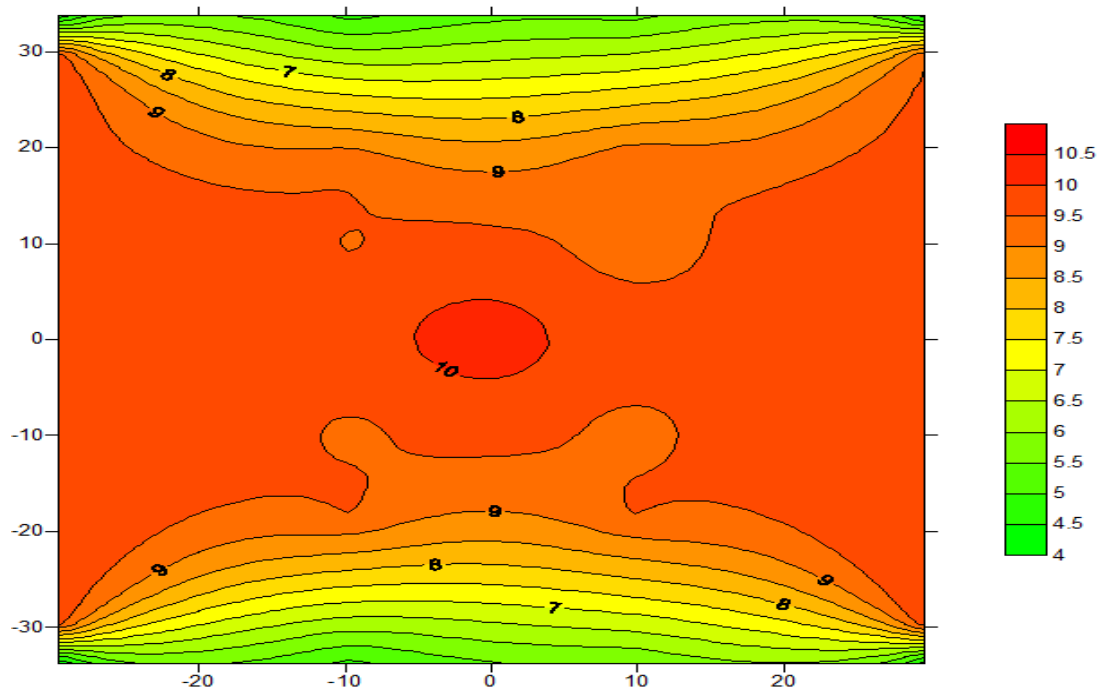
## Για τα 30cm

5m/s



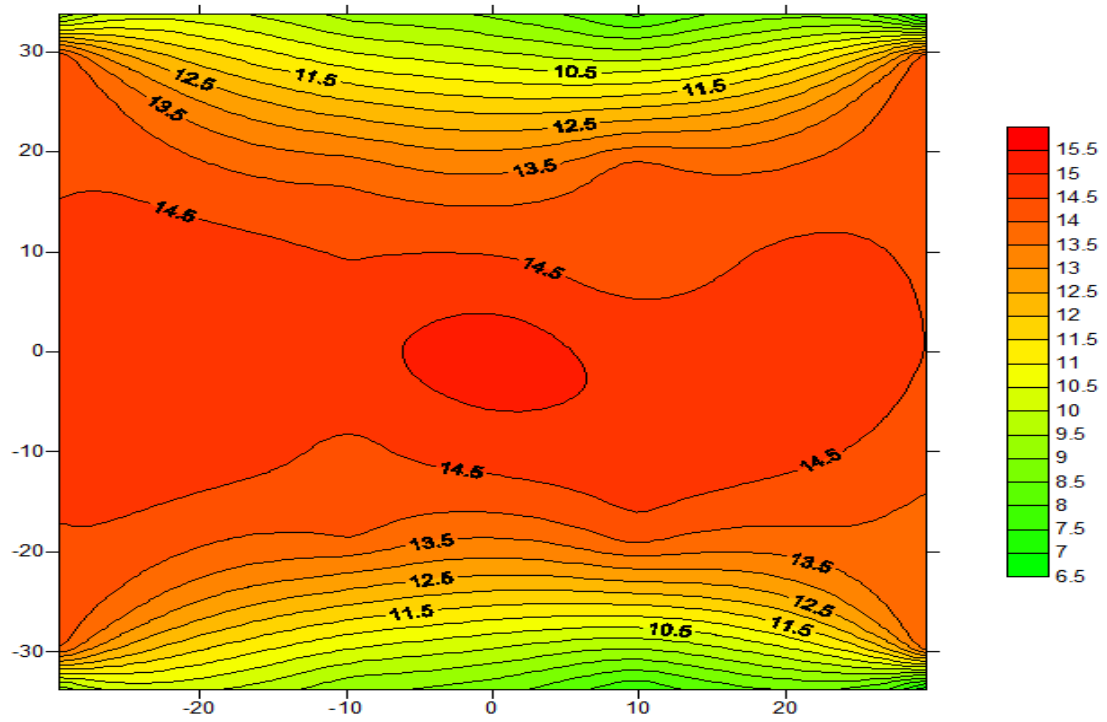
Γράφημα 9: Πεδίο ροής ανέμου σε απόσταση 30cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 5m/s

10m/s



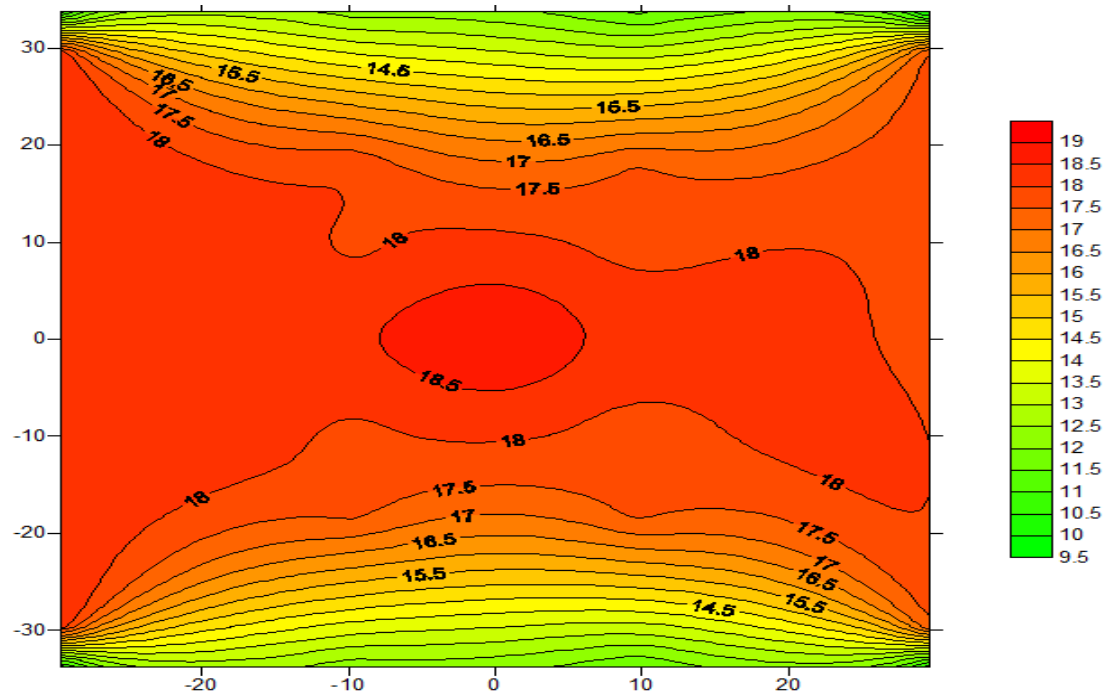
Γράφημα 10: Πεδίο ροής ανέμου σε απόσταση 30cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 10m/s

15m/s



Γράφημα 11: Πεδίο ροής ανέμου σε απόσταση 30cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 15m/s

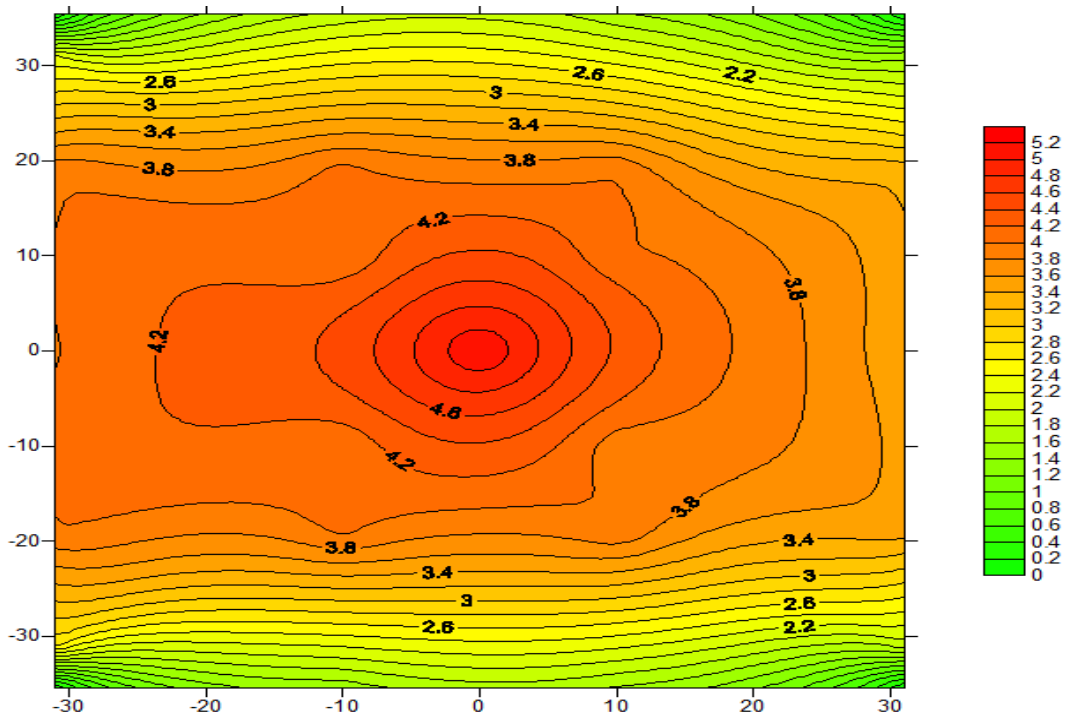
20m/s



Γράφημα 12: Πεδίο ροής ανέμου σε απόσταση 30cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 20m/s

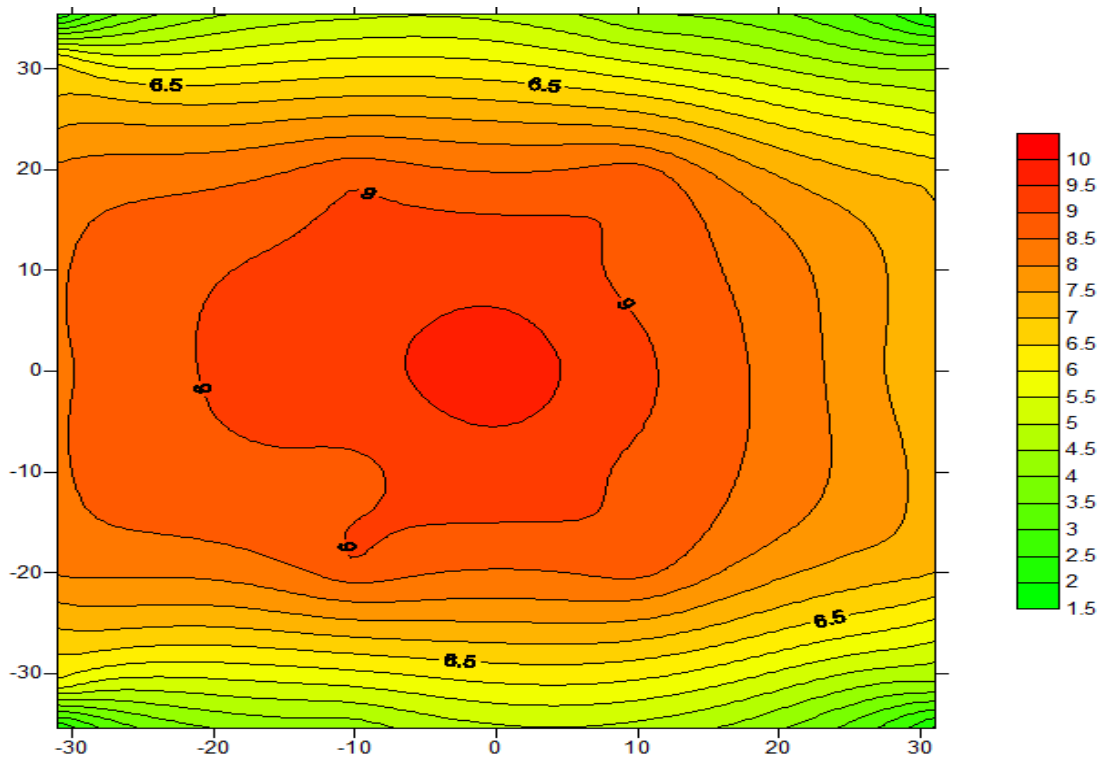
## Για τα 45cm

5m/s



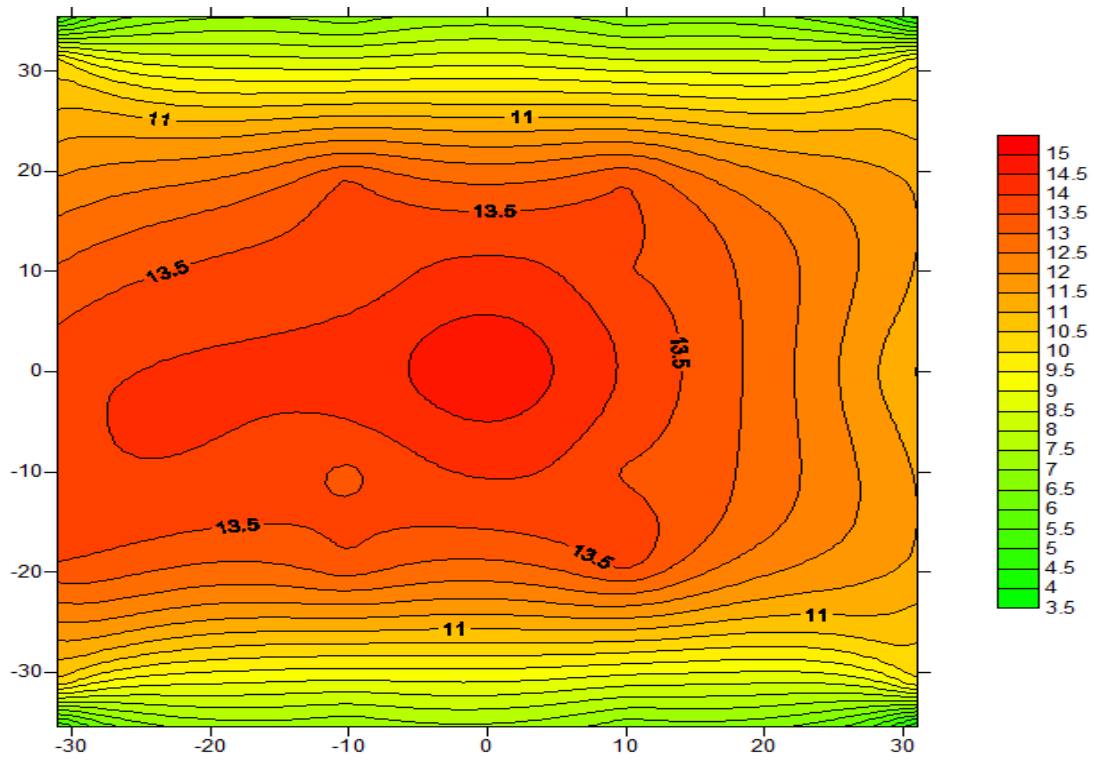
Γράφημα 13: Πεδίο ροής ανέμου σε απόσταση 45cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 5m/s

10m/s



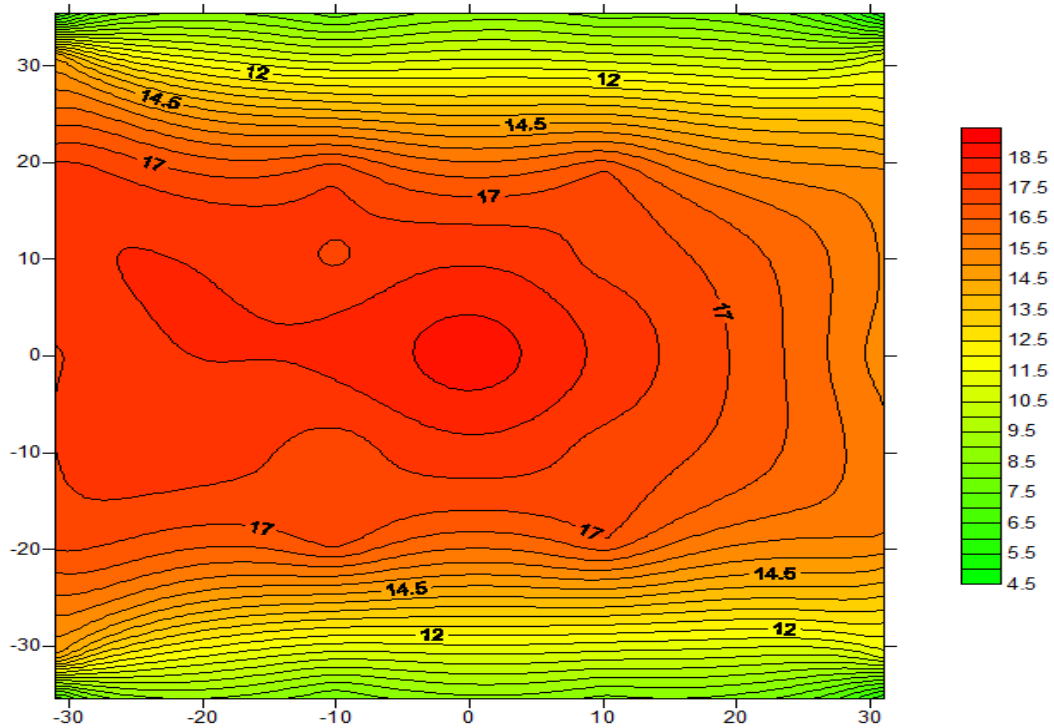
Γράφημα 14: Πεδίο ροής ανέμου σε απόσταση 45cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 10m/s

**15m/s**



Γράφημα 15: Πεδίο ροής ανέμου σε απόσταση 45cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 15m/s

**20m/s**

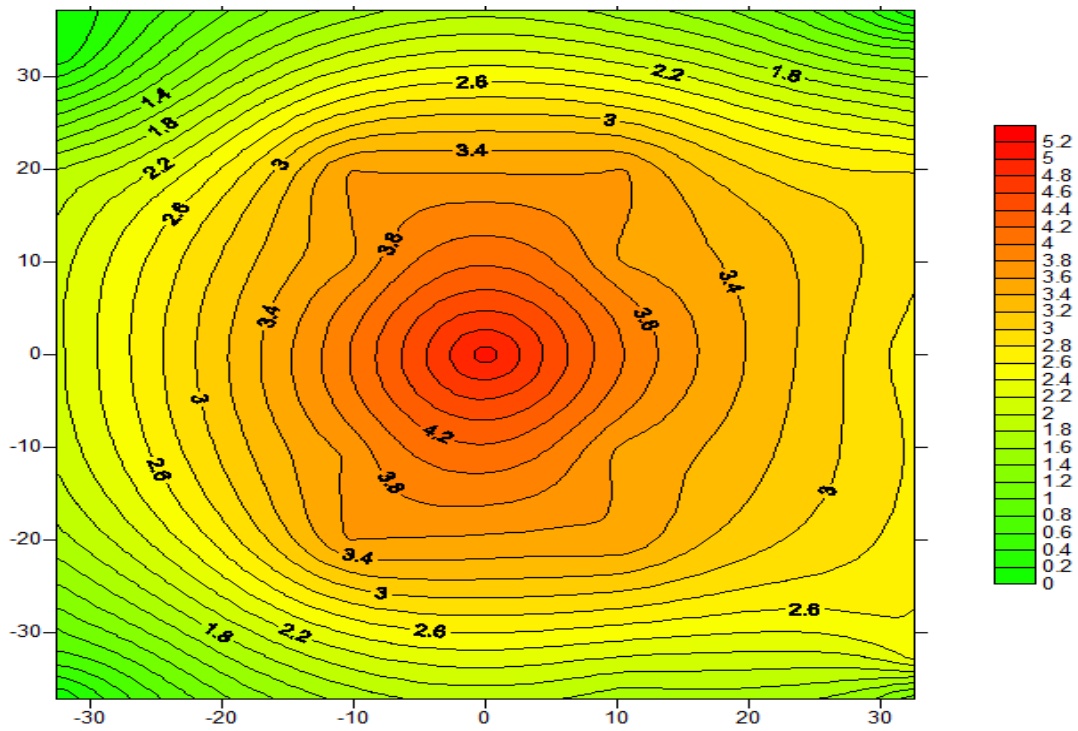


Γράφημα 16: Πεδίο ροής ανέμου σε απόσταση 45cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 20m/s



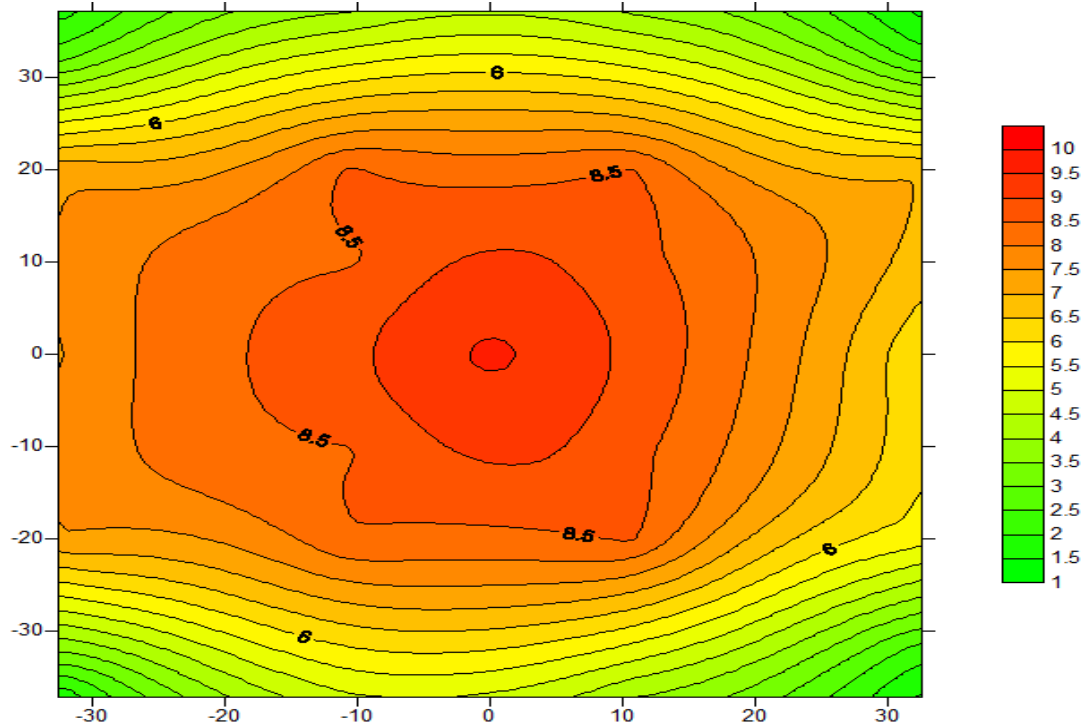
## Για τα 60cm

5m/s



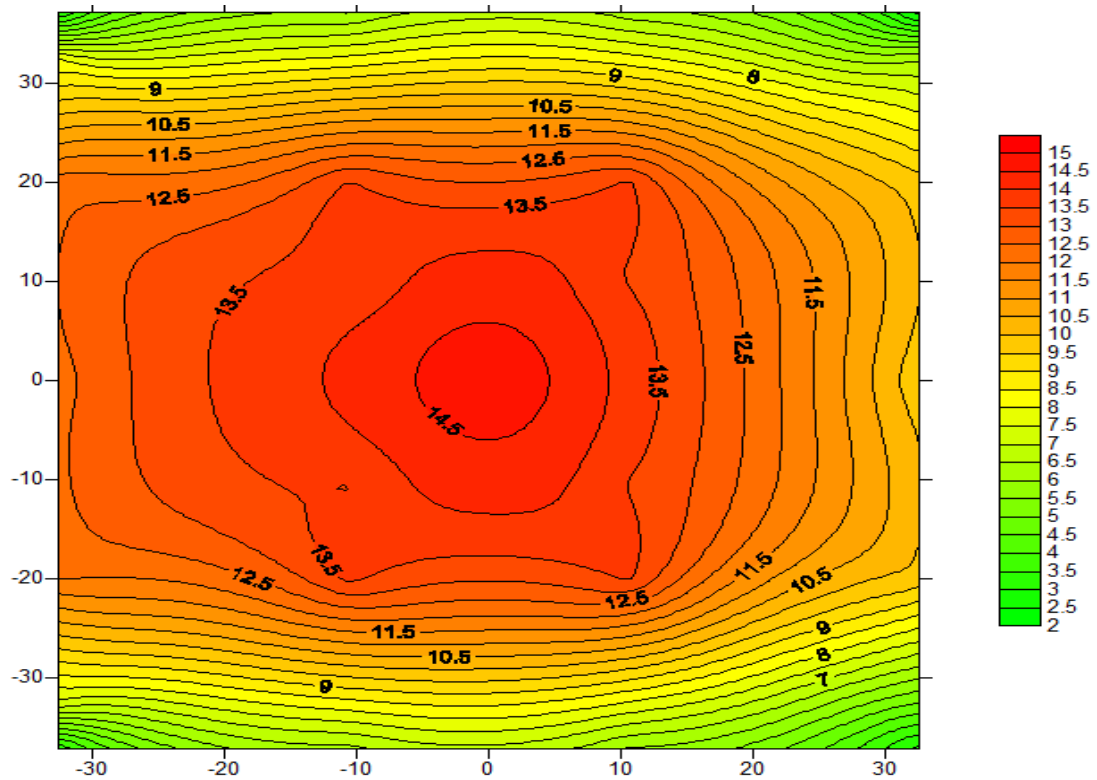
Γράφημα 17: Πεδίο ροής ανέμου σε απόσταση 60cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 5m/s

10m/s



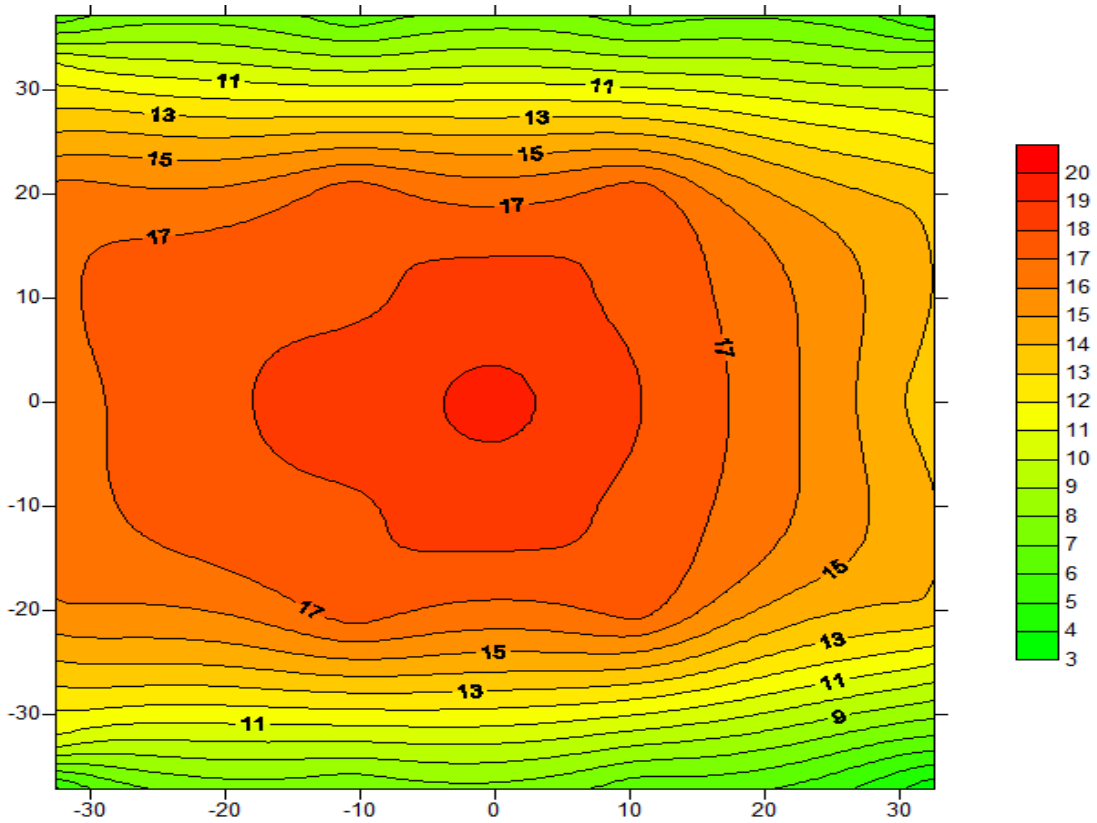
Γράφημα 18: Πεδίο ροής ανέμου σε απόσταση 60cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 10m/s

15m/s



Γράφημα 19: Πεδίο ροής ανέμου σε απόσταση 60cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 15m/s

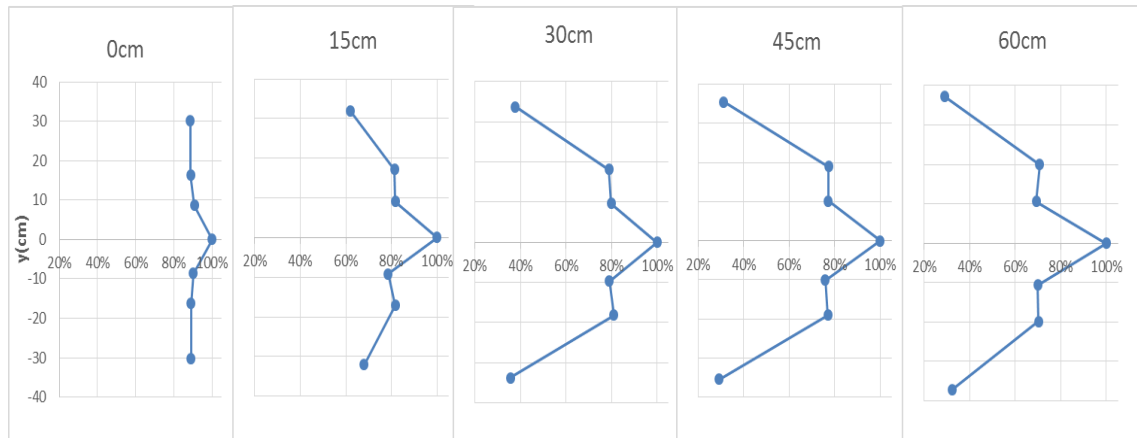
20m/s



Γράφημα 20: Πεδίο ροής ανέμου σε απόσταση 60cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 20m/s

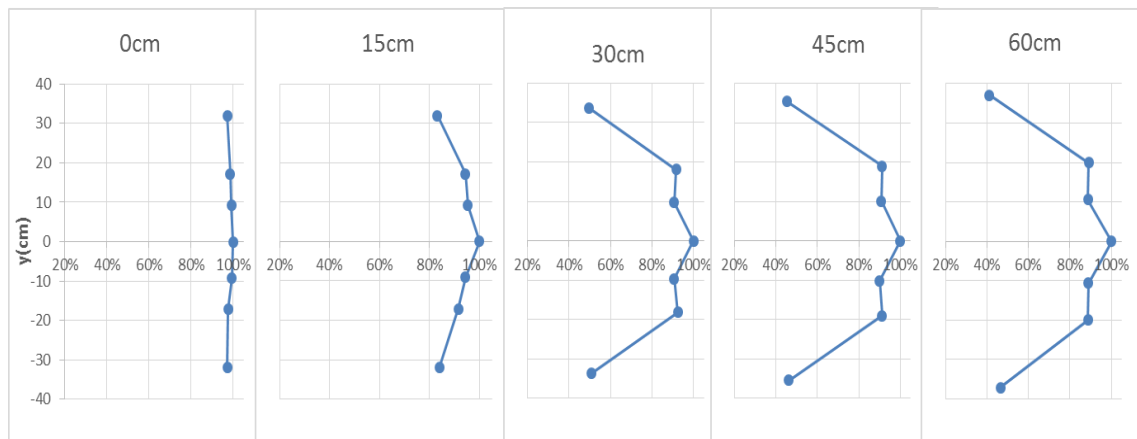
## ΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ ΣΤΗ ΜΕΣΗ ΤΟΥ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ

**5m/s**



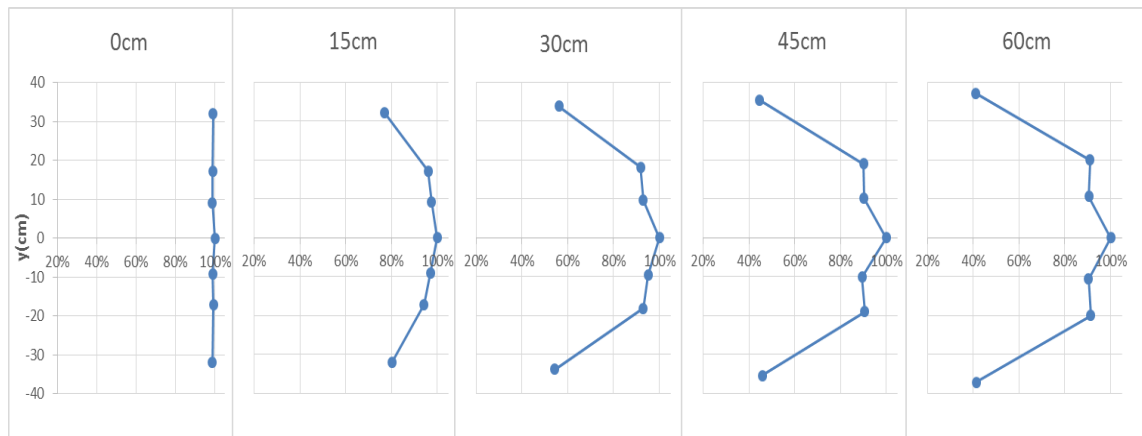
Γράφημα 21: Συμπεριφορά κανονικοποιημένης ταχύτητας σε ποσοστό (σε σχέση με την μέγιστη ταχύτητα στο σημείο  $x=0, y=0$ ) ανέμου στη μέση ( $x=0$ ) του ακροφυσίου για όλες τις αποστάσεις σε ταχύτητα των 5m/s

**10m/s**



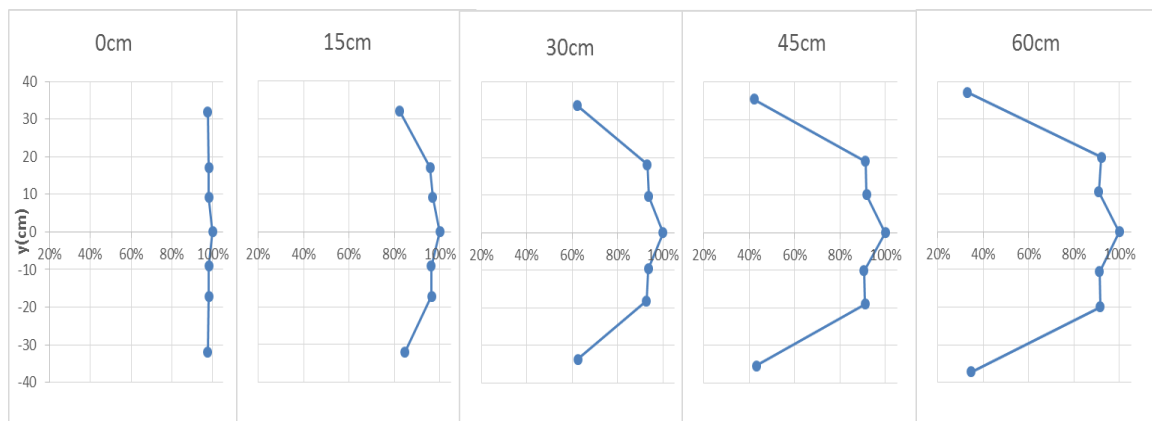
Γράφημα 22: Συμπεριφορά κανονικοποιημένης ταχύτητας σε ποσοστό (σε σχέση με την μέγιστη ταχύτητα στο σημείο  $x=0, y=0$ ) ανέμου στη μέση ( $x=0$ ) του ακροφυσίου για όλες τις αποστάσεις σε ταχύτητα των 10m/s

## 15m/s



Γράφημα 23: Συμπεριφορά κανονικοποιημένης ταχύτητας σε ποσοστό (σε σχέση με την μέγιστη ταχύτητα στο σημείο  $x=0, y=0$ ) ανέμου στη μέση ( $x=0$ ) του ακροφυσίου για όλες τις αποστάσεις σε ταχύτητα των 15m/s

## 20m/s



Γράφημα 24: Συμπεριφορά κανονικοποιημένης ταχύτητας σε ποσοστό (σε σχέση με την μέγιστη ταχύτητα στο σημείο  $x=0, y=0$ ) ανέμου στη μέση ( $x=0$ ) του ακροφυσίου για όλες τις αποστάσεις σε ταχύτητα των 20m/s

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΑΝΕΜΟΥ

Για την πιο εύκολη κατανόηση των συμπερασμάτων κρίθηκε σκόπιμο να χρησιμοποιηθεί ξανά η εικόνα με τα σημεία από το πρότυπο χωρισμένο σε τομείς και με αριθμημένα τα σημεία.

	A	B	Γ	Δ
I	1 *	1 *	1 *	1 *
II	2 *			2 *
III	3 *	2 *	2 *	3 *
IV		3 *	3 *	
V	4 *			4 *
VI		4 *	4 *	
VII	5 *	5 *	5 *	5 *
VIII	6 *			6 *
IX	7 *	6 *	6 *	7 *

Εικόνα 30: Τα μετρούμενα σημεία αριθμημένα και χωρισμένα σε κάθετους και οριζόντιους τομείς

Με μία πρώτη ανάγνωση των γραφημάτων της ταχύτητας ανέμου φαίνεται πως υπάρχει μια ωφέλιμη περιοχή στην οποία έχουμε την καλύτερη απόδοση της αεροσήραγγας σε όλες τις ταχύτητες και αποστάσεις. Η περιοχή αυτή βρίσκεται ανάμεσα στα σημεία των τομέων III-VII(εικόνα 26). Όπως επίσης πράγμα που είναι εμφανές αλλά από τα 45cm και μετά ότι στο τμήμα όπου η αεροσήραγγα πλησιάζει τον τοίχο (τομέας Δ εικόνα 26) του εργαστηρίου έχουμε μείωση της ταχύτητας.

Πιο αναλυτικά για κάθε γράφημα θα γίνει παρατήρηση των διακυμάνσεων ταχύτητας σε όλο το φάσμα εξαιρουμένου του σημείου στο κέντρο του ακροφυσίου ( $x=0,y=0$  **εικόνα 20**) όπου η λήψη των μετρήσεων γίνεται με διαφορετικό όργανο (hotwire) σε σχέση με τα υπόλοιπα σημεία ώστε να βρεθεί η ωφέλιμη περιοχή σε κάθε ταχύτητα και απόσταση:

### 1. Για την απόσταση των 0cm

- Στα **5m/s** σε όλο το πεδίο ροής των μετρήσεων δεν έχουμε μεγάλες διακυμάνσεις. Οι διακυμάνσεις αυτές κυμαίνονται στο **1-2% με εξαίρεση τα σημεία (A1) και(A7) όπου εδώ η ταχύτητα είναι χαμηλότερη κατά 3% και 5% αντίστοιχα.**
- Στα **10m/s** η συμπεριφορά της ταχύτητας είναι πιο ομαλή καθώς οι μεταβολές κυμαίνονται σε όλο το πεδίο ροής σε ποσοστά 1-3%
- Στα **15m/s** βελτιώνεται ακόμα περισσότερο η συμπεριφορά της ταχύτητας καθώς οι διακυμάνσεις σε όλο το πεδίο ροής είναι περίπου 1%
- Στα **20m/s** μοιώς με τα 15m/s

### 2. Για την απόσταση των 15cm

- Στα **5m/s** εδώ είναι εμφανές ότι στα οριζόντια σημεία που βρίσκονται κοντά στο χείλος του ακροφυσίου, τομείς I και IX (όπου  $y=32\text{cm}$  ή  $y=-32\text{cm}$ ), παρατηρούνται σημαντικές απώλειες ταχύτητας της τάξης ακόμα και του 40%, όμως σε όλο το υπόλοιπο τμήμα έχουμε ταχύτητες με διακυμάνσεις του 2%
- Στα **10m/s** όπως στα 5m/s έτσι και εδώ στους τομείς I και IX υπάρχει μείωση της ταχύτητας, όμως εδώ κυμαίνεται σε ποσοστά του 12-22%. Σε όλο το υπόλοιπο φάσμα η ταχύτητα είναι παραπλήσια με διακυμάνσεις του 1-2%
- Στα **15m/s** ισχύει ό,τι και στα προηγούμενα με διακυμάνσεις κάτω του 2% στο οριζόντιο πεδίο
- Στα **20m/s** παρατηρείται η ίδια συμπεριφορά όπως στα 15m/s

**3. Για την απόσταση των 30cm** όπως και στα 15cm τα ακραία οριζόντια σημεία, δηλαδή όπου  $y=33.7$  και  $y=-33.7$ , δέχονται παρενοχλήσεις από το πλαίσιο του ακροφυσίου με αποτέλεσμα να έχουμε αρκετή μείωση της καταγραφόμενης ταχύτητας

- Στα **5m/s** στα τμήματα που παρατηρείται η μείωση της ταχύτητας κυμαίνεται στα επίπεδα του 60-70%, ενώ στα λοιπά σημεία η ταχύτητα είναι παρεμφερής με διαφορές κάτω του 3% με εξαίρεση το σημείο B4 ( $x=-9.6, y=-9.6$ ) όπου παρατηρείται μείωση του 8%
- Στα **10m/s** η μείωση της ταχύτητας στα σημεία του τομέα I και τομέα IX (όπου  $y=33.7$  και  $y=-33.7$  αντίστοιχα) κυμαίνεται στα επίπεδα του 45-55%. Στα υπόλοιπα τμήματα μπορεί να γίνει η εξής παρατήρηση, ότι δηλαδή στα ακραία κάθετα μετρούμενα τμήματα δηλαδή τομέας A και Δ (όπου  $x=-29.5$  και  $x=29.5$  αντίστοιχα) οι διακυμάνσεις είναι του 2-3% ενώ στο υπόλοιπο τμήμα (τομείς B, Γ) είναι στο 5%. Επίσης στους τομείς A και Δ παρατηρούνται και ελαφρώς υψηλότερες ταχύτητες περίπου 0,3m/s του πεδίου ροής (εξαιρουμένου του κέντρου)
- Στα **15m/s** στους τομείς I και IX (όπου  $y=33.7$  και  $y=-33.7$ ) η μείωση της ταχύτητας αγγίζει ποσοστά του 40-50%. Για τα υπόλοιπα σημεία οι διαφορές που σημειώνονται είναι στο 3%
- Στα **20m/s** στους τομείς I και IX (όπου  $y=33.7$  και  $y=-33.7$ ) η μείωση της ταχύτητας είναι 30-40% σε σχέση με τα υπόλοιπα σημεία του πεδίου ροής. Για τα υπόλοιπα σημεία οι διαφορές που σημειώνονται είναι του 2%

**4. Για την απόσταση των 45cm**

- Στα **5m/s** πρέπει να αναφερθεί ότι στα σημεία A1(-31,35.4), A7(-31,-35.4), Δ1(31,35.4), Δ7(31,-35.4) δηλαδή στις 4 μετρούμενες γωνίες δεν μπορούσε να καταγραφεί ταχύτητα, υπήρχε η ένδειξη NaN στο πρόγραμμα, οπότε και χρησιμοποιήθηκαν ως 0. Όπως είχε αναφερθεί και στην αρχή

των συμπερασμάτων φαινόταν ότι στα σημεία του τομέα Δ έχουμε πτώση της ταχύτητας βεβαιώνεται μέσω σύγκρισης των μετρήσεων σε σχέση με τους άλλους κάθετους (Α, Β, Γ) αφού υπολογίστηκε ότι η σε σχέση με τον Α είχε μείωση 19% ενώ σε σχέση με τους άλλους δύο μείωση του 38%.

- Στα **10m/s** στους τομείς Ι, ΙΙ, VIII και ΙΧ έχουμε μειώσεις ταχύτητας 45-75% σε σχέση με τα υπόλοιπα σημεία του πεδίου ροής. Στα υπόλοιπα σημεία στους τομείς Β και Γ οι διακυμάνσεις ταχύτητας είναι κάτω του 3%. Στον τομέα Α το ποσοστό αυτό είναι 6-8% ενώ στον τομέα Δ παρατηρείται ξανά μείωση. Πιο αναλυτικά όσον αφορά τον τομέα Δ η μείωση που σημειώνεται σε σχέση με τον Α, που είναι ο αντίστοιχος από την άλλη μεριά και είναι πιο ακριβής μια τέτοια σύγκριση, είναι περί του 19%, ενώ με τους άλλους 2 είναι στο 35%
- Στα **15m/s** στους τομείς Ι, ΙΙ, VIII και ΙΧ έχουμε μειώσεις ταχύτητας 45-75% σε σχέση με τα υπόλοιπα σημεία του πεδίου ροής. Εξαιρουμένου του τομέα Δ που θα συγκριθεί ξεχωριστά με τους υπόλοιπους η ταχύτητα εμφανίζει μια ομαλή συμπεριφορά με διαφορές του 1-2% εκτός του σημείου Α3 όπου η ταχύτητα είναι χαμηλότερη από τα άλλα σημεία κατά 10%. Στον τομέα Δ τώρα σε σχέση με τον Α εμφανίζει μειώσεις του 11% ενώ με τον Β και τον Γ μειώσεις κατά 22% και 21% αντίστοιχα
- Στα **20m/s** η συμπεριφορά του ανέμου είναι ίδια με τα 15m/s οπότε και θα γίνει ιδιαίτερη αναφορά μόνο στην σύγκριση των τομέων με τον Δ. Ξανά παρατηρούνται μειώσεις, σε σχέση με τον Α περί του 16% και με τους άλλους 2 στο 21%.

**5. Για την απόσταση των 60cm**, εδώ δεν θα γίνει καμία αναφορά για τους τομείς Ι, ΙΙ, VII, ΙΧ καθώς και εδώ όπως και στα 45cm σημειώνονται σοβαρές μειώσεις ταχύτητας οπότε και κρίνονται αδιάφορες προς μελέτη περιοχές για τον λόγο αυτό δεν θα γίνεται ιδιαίτερη αναφορά.

- Στα **5m/s** υπήρχε δυσκολία στο να καταγράψουν αξιόπιστες μετρήσεις για τους τομείς Α και Δ καθώς αρκετές ήταν μηδενικές ανεξάρτητου δείγματος οπότε και θα γίνει απλά αναφορά ότι στους τομείς Β και Γ οι ταχύτητες ήταν παραπλήσιες με διαφορές του 2%
- Στα **10m/s** εδώ παρατηρούνται σημαντικές μειώσεις και στον τομέα Α (x=32.5cm) του 11-12% σε σχέση με τους τομείς Β και Γ μεταξύ των οποίων έχουμε παραπλήσιες ταχύτητες με διαφορές 1-2% μεταξύ των αντίστοιχων μετρούμενων σημείων. Όσον αφορά την σύγκριση του τομέα Α και Δ που είναι και πιο εύστοχη να γίνεται ο Δ παρουσιάζει μια μέση μείωση σε όλα τα αντίστοιχα σημεία του 18%.

- Στα **15m/s**όπως και στα 10m/s έτσι και εδώ η συμπεριφορά που παρατηρείται στο πεδίο ροής είναι παρεμφερής. Δηλαδή πάλι παρουσιάζονται μειώσεις ταχύτητας στον τομέα Α, ο τομέας Δ έχει τονιστεί από τα 45cm πως έχει μειώσεις σε σχέση με τον αντίστοιχο Α σε ποσοστό 21%, ενώ οι τομείς Β και Γ εμφανίζουν παρόμοια αποτελέσματα με αποκλίσεις περίπου 1%
- Στα **20m/s**εδώ θα δοθεί έμφαση μόνο στην σύγκριση των τομέων Α-Δ και Β-Γ αφού πλέον έχει καταστεί σαφείς η συμπεριφορά του ανέμου σε αυτή την απόσταση. Ο Δ λοιπόν έχει γενικά ταχύτητες χαμηλότερες του Α κατά 21% ενώ μεταξύ Γ και Δ υπάρχουν διαφορές του 1%.

## ΤΥΡΒΗ

### ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΥΡΒΗΣ

Για τον υπολογισμό της τύρβης χρησιμοποιήθηκε το παρακάτω τυπολόγιο

Η μέση ταχύτητα του ανέμου

$$\bar{V} = \frac{1}{N} \sum_i^N V_n$$

Όπου N το πλήθος των μετρήσεων και  $V_n$  η ταχύτητα του ανέμου.

Η τυπική απόκλιση

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} * \sum_i^N (V_n - \bar{V})^2}$$

Η τύρβη

$$S = \frac{\sigma}{\bar{V}}$$

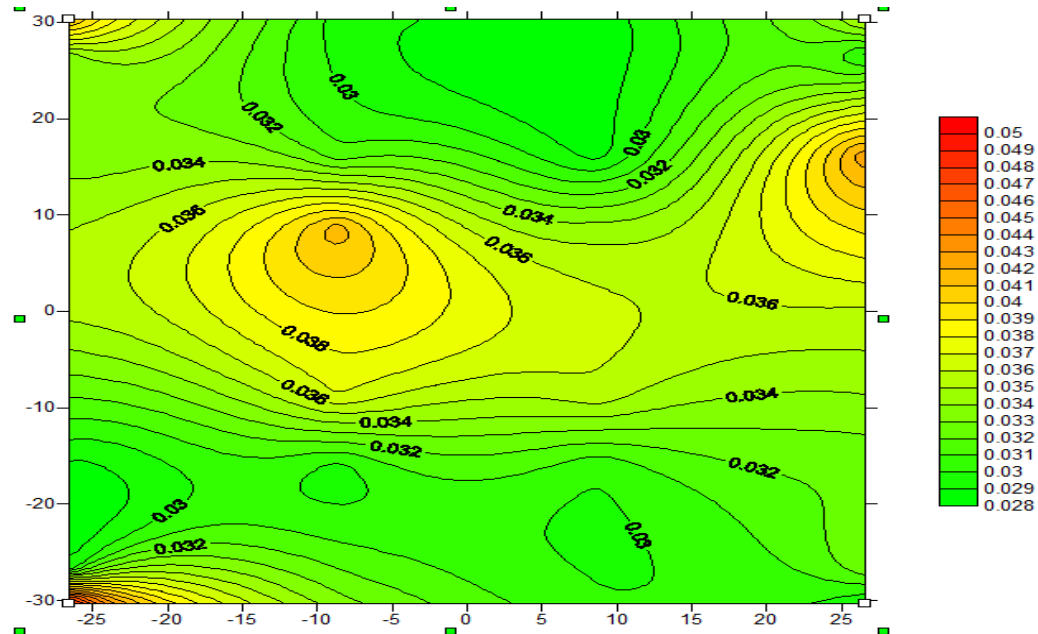
Σημείωση, για τον υπολογισμό της τύρβης ( $\sigma$ ) το  $\bar{V}$  ήταν η εκάστοτε μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου στο κάθε σημείο μέτρησης.



## Αποτελέσματα από υπολογισμούς της τύρβης της ταχύτητας ανέμου

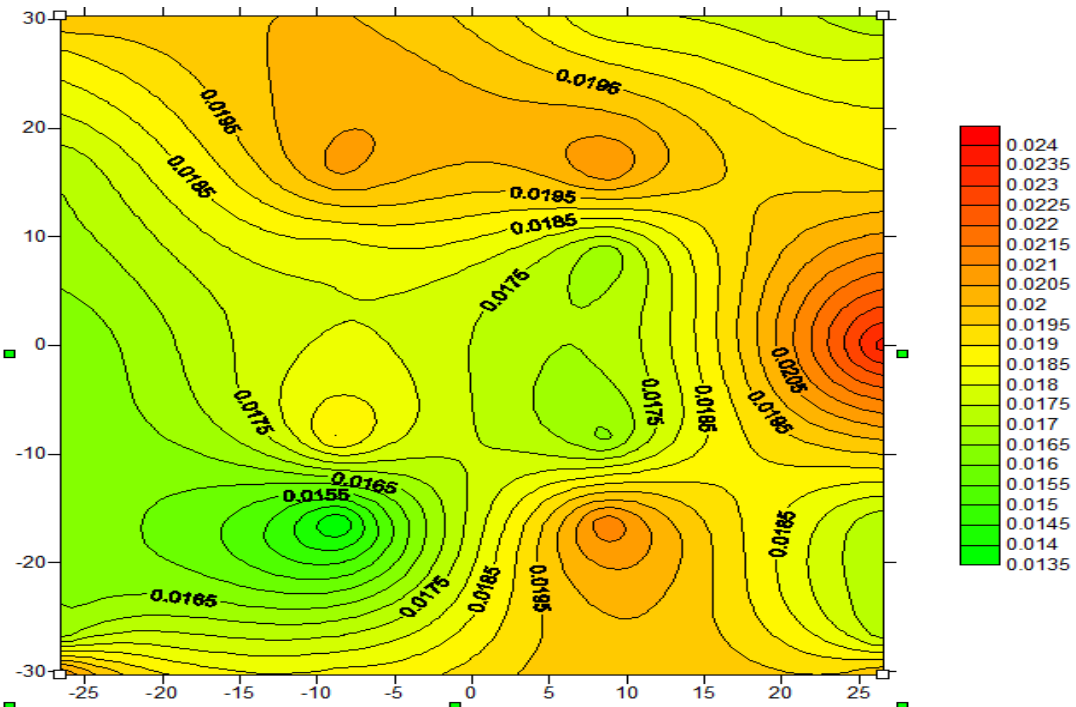
Για τα 0cm από την έξοδο του ακροφυσίου

5m/s



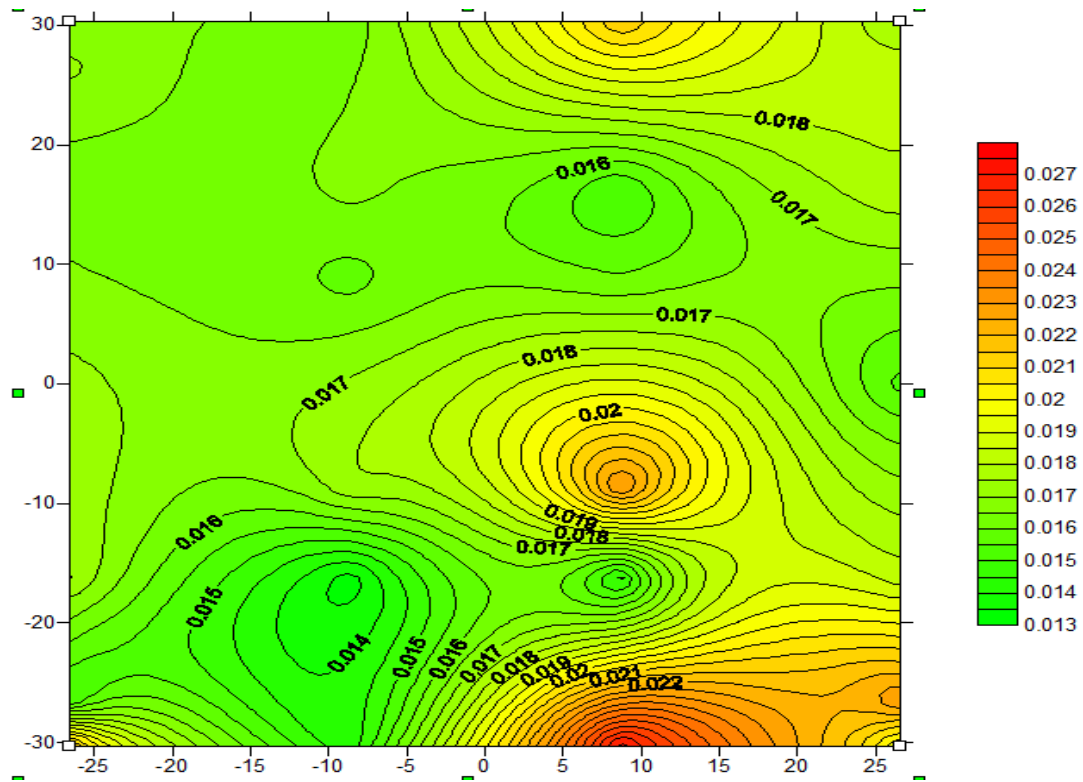
Γράφημα 25: Τύρβη σε απόσταση 0cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 5m/s

10m/s



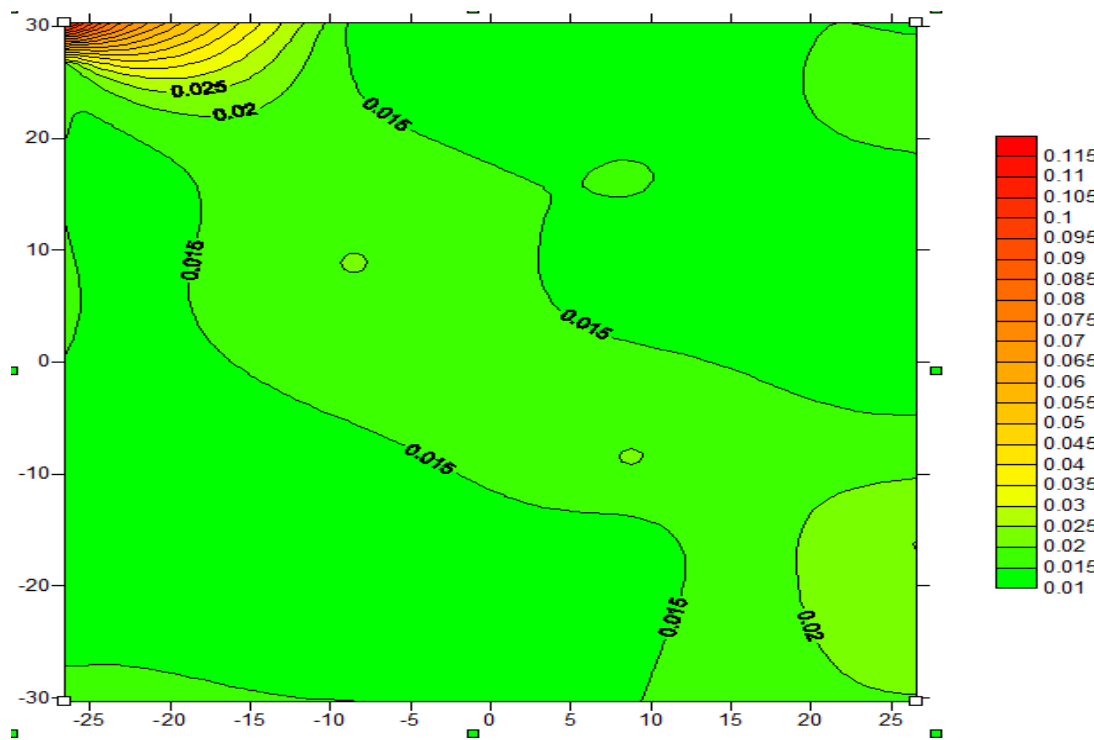
Γράφημα 26: Τύρβη σε απόσταση 0cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 10m/s

15m/s



Γράφημα 27: Τύρβη σε απόσταση 0cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 15m/s

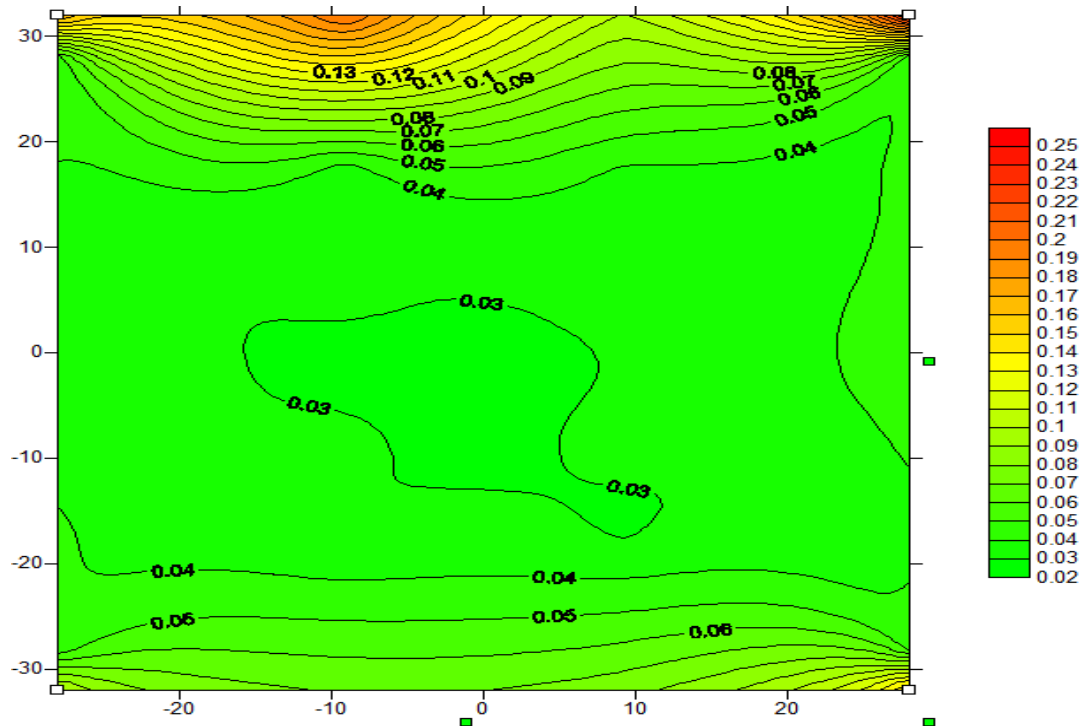
20m/s



Γράφημα 28: Τύρβη σε απόσταση 0cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 20m/s

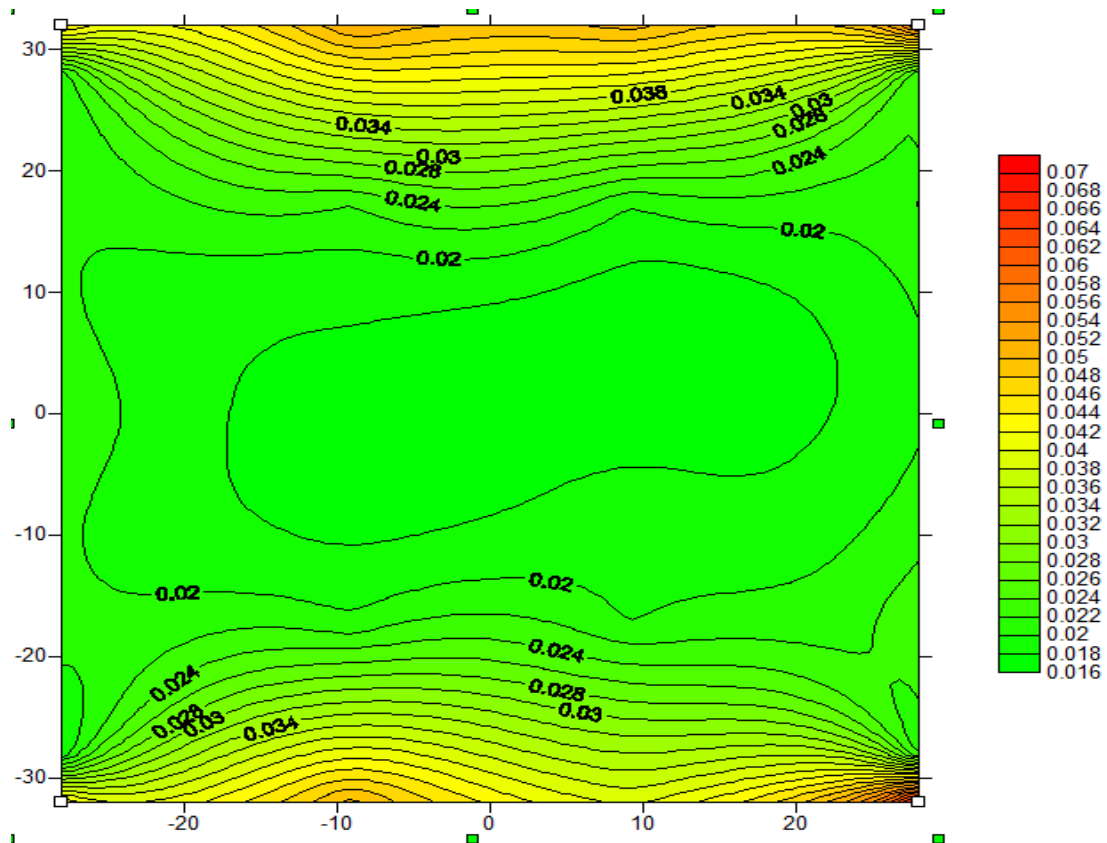
## Για τα 15cm

5m/s



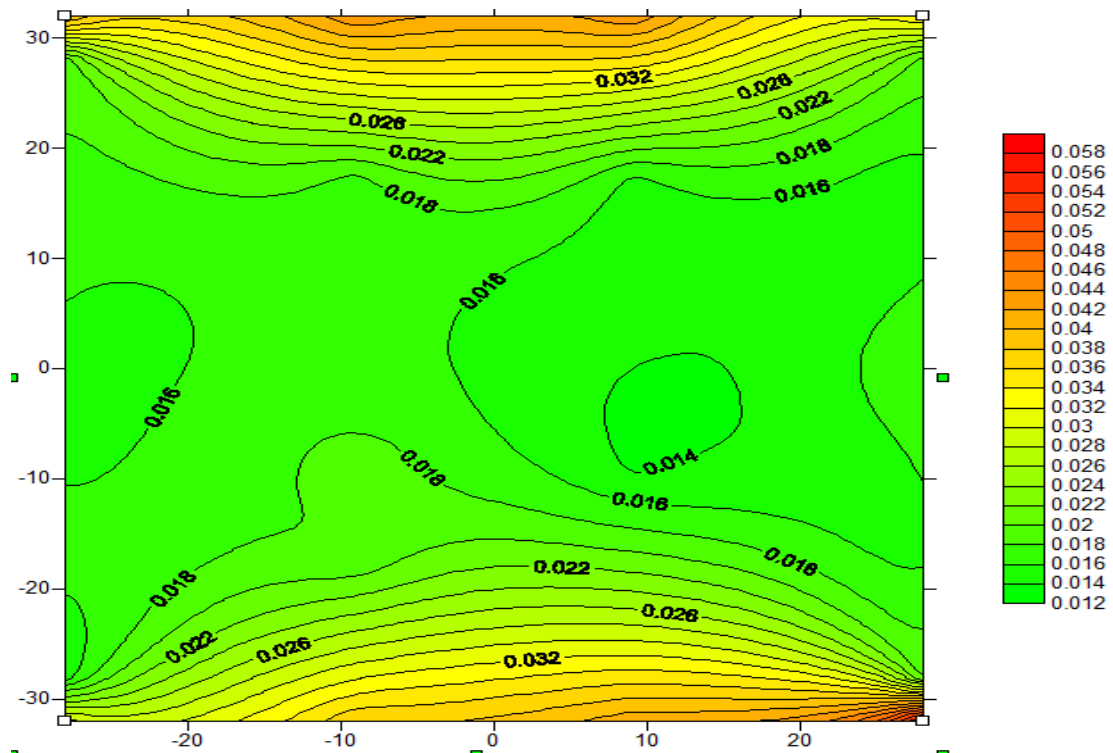
Γράφημα 29: Τύρβη σε απόσταση 15cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 5m/s

10m/s



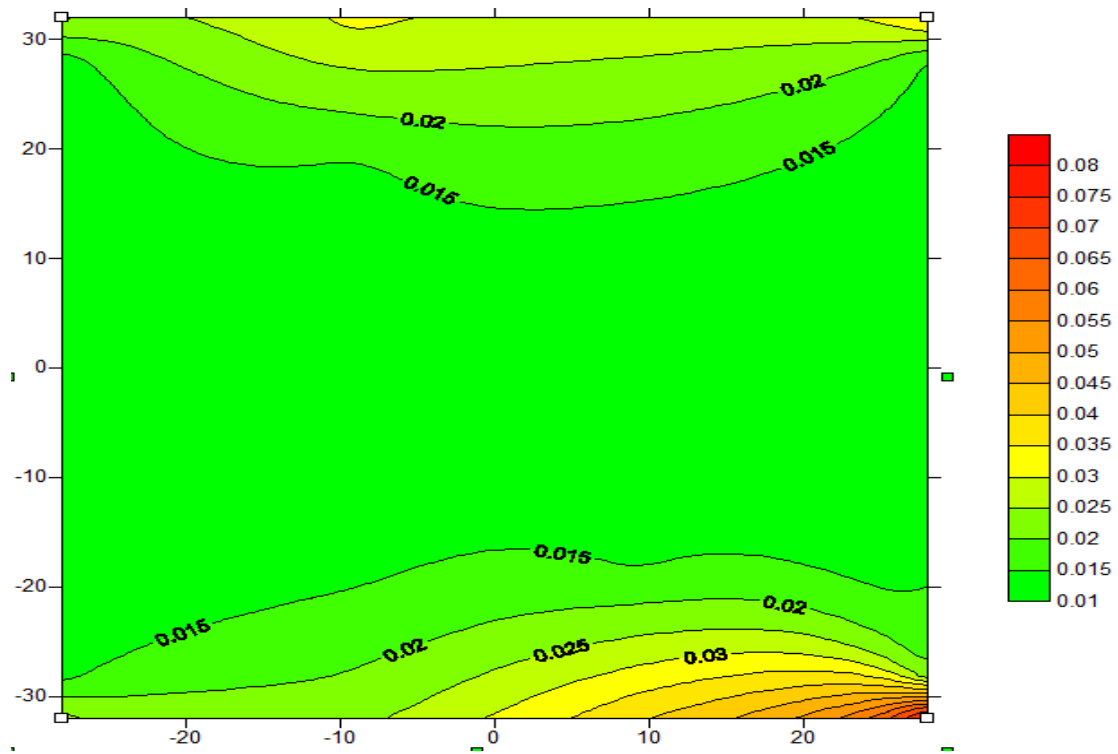
Γράφημα 30: Τύρβη σε απόσταση 15cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 10m/s

15m/s



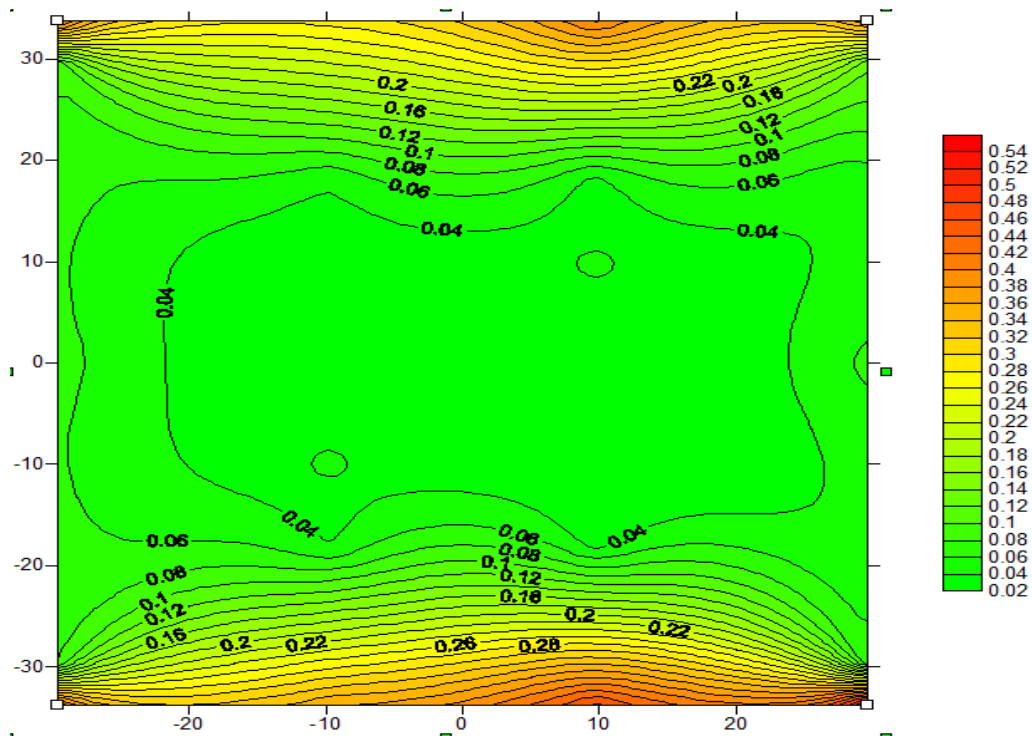
Γράφημα 31: Τύρβη σε απόσταση 15cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 15m/s

20m/s



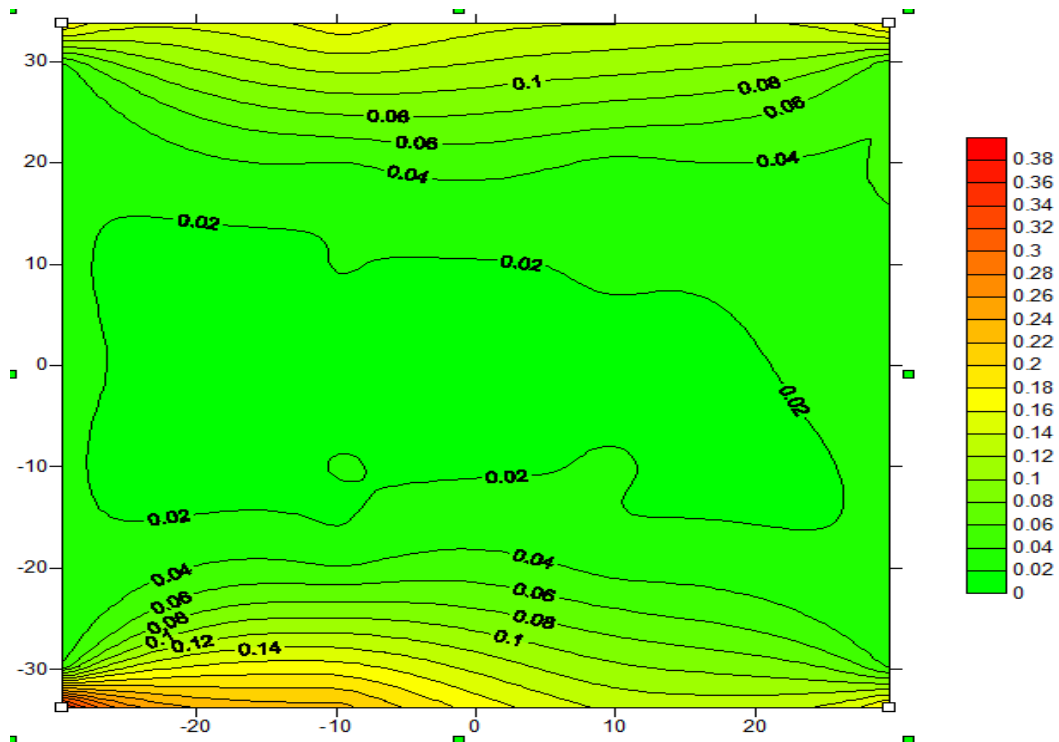
Γράφημα 32: Τύρβη σε απόσταση 15cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 20m/s

**Για τα 30cm**  
**5m/s**



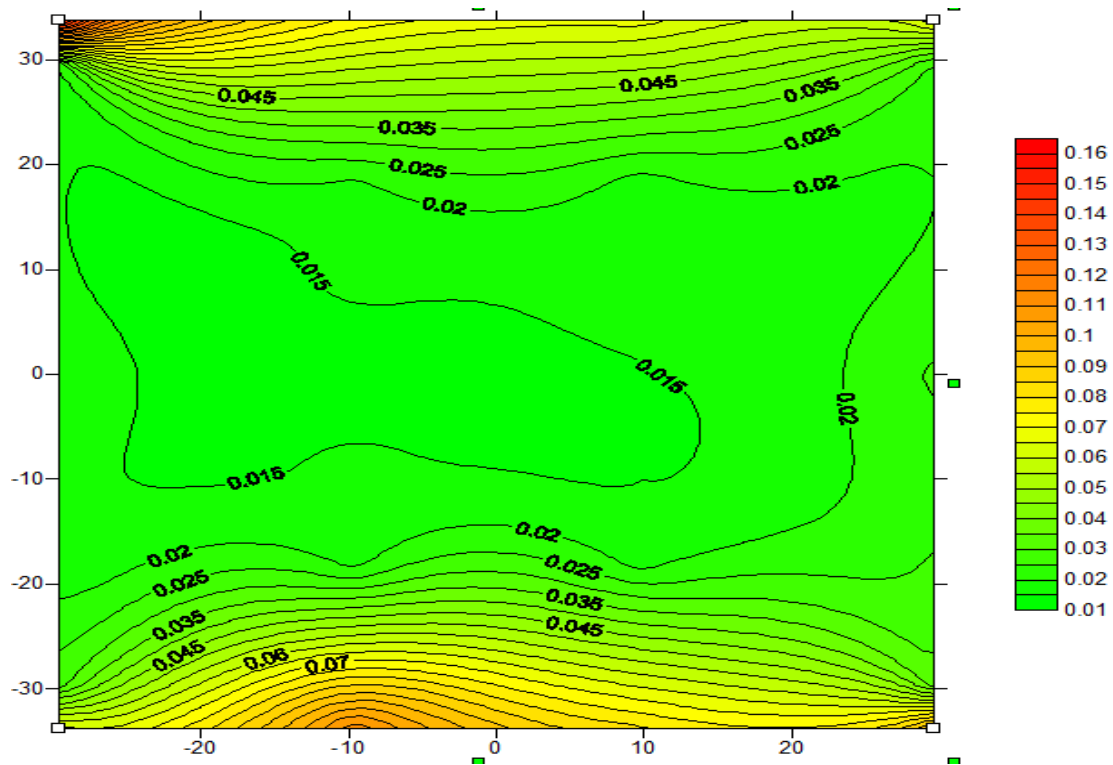
Γράφημα 33: Τύρβη σε απόσταση 30cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 5m/s

**10m/s**



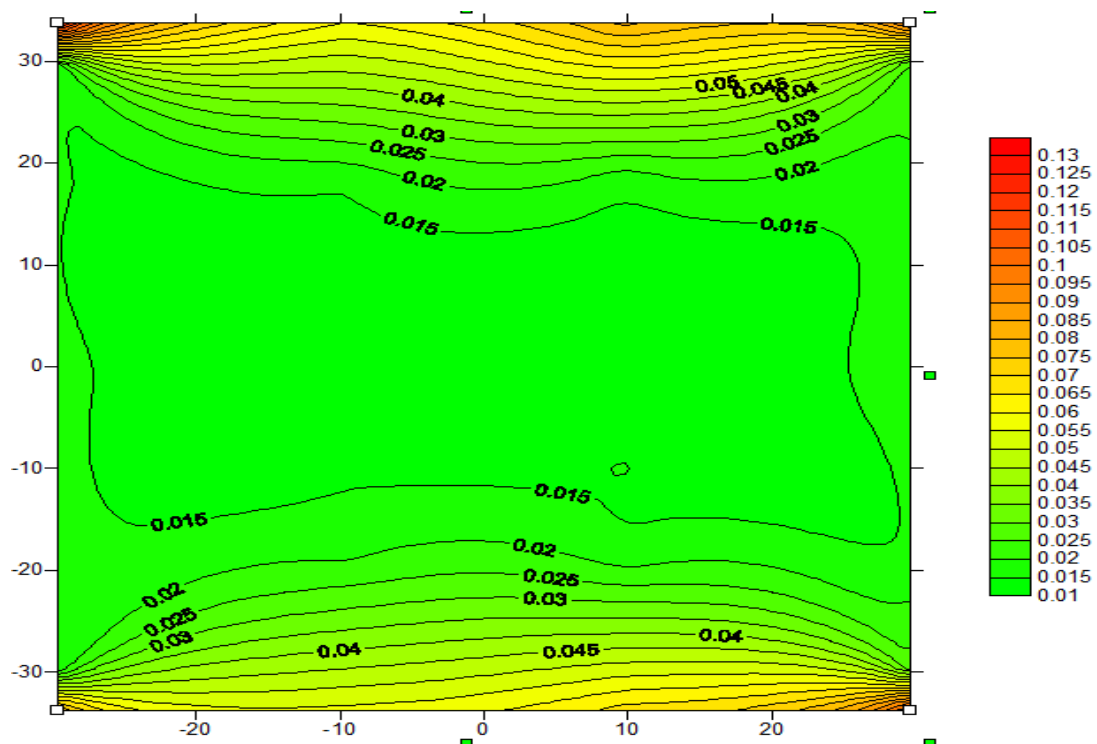
Γράφημα 34: Τύρβη σε απόσταση 30cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 10m/s

15m/s



Γράφημα 35: Τύρβη σε απόσταση 30cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 15m/s

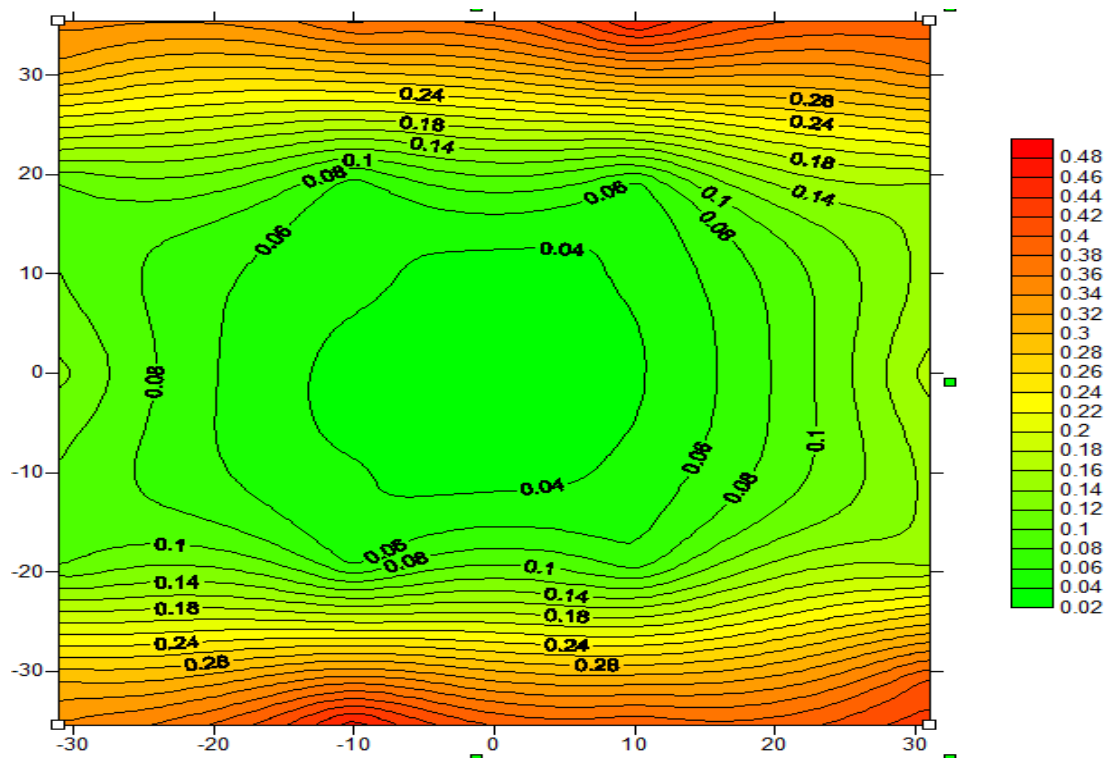
20m/s



Γράφημα 36: Τύρβη σε απόσταση 30cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 20m/s

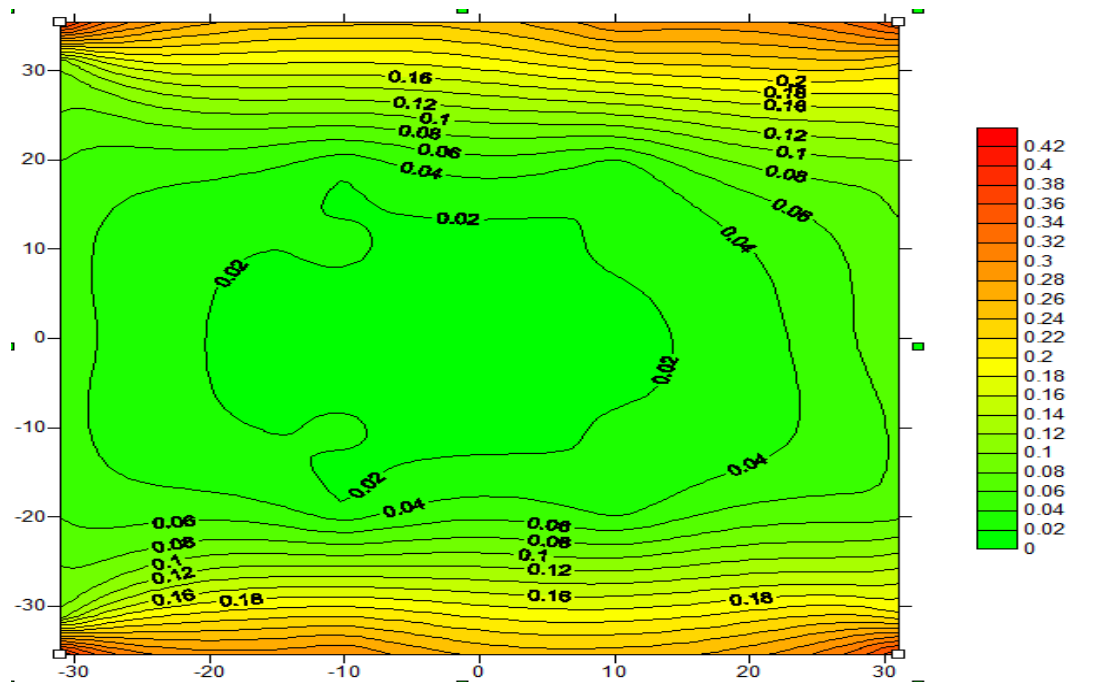
## Για τα 45cm

5m/s



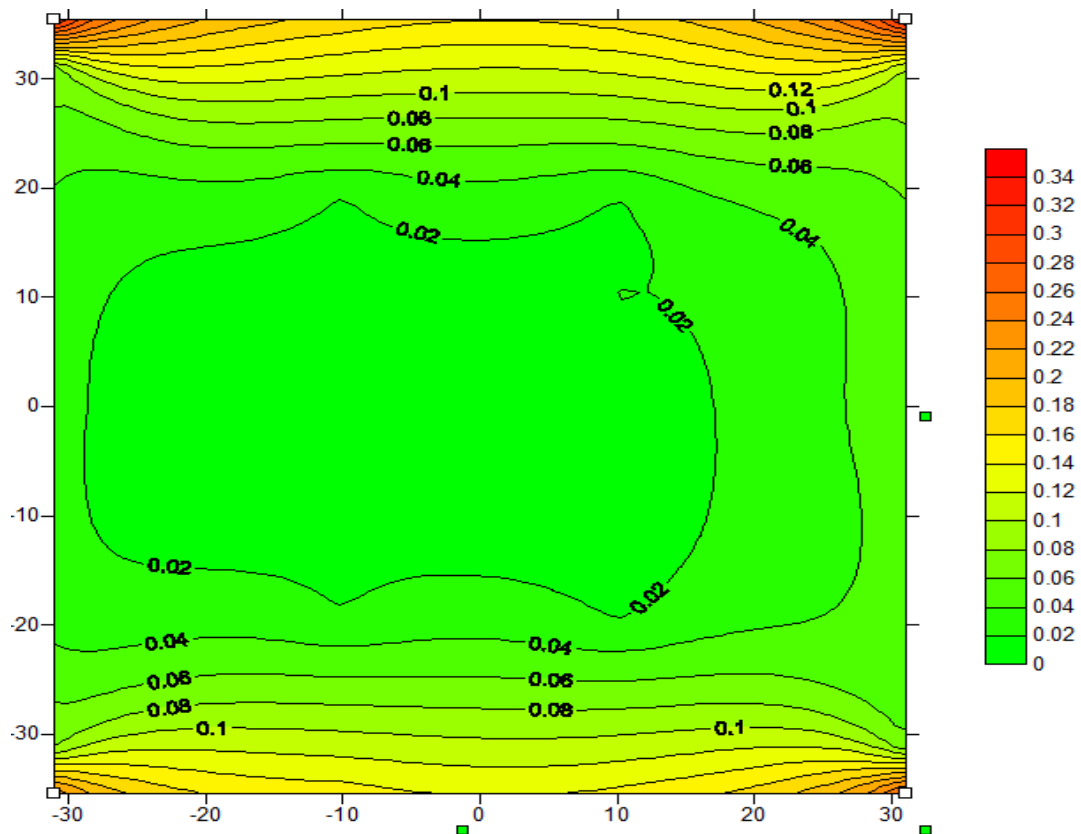
Γράφημα 37: Τύρβη σε απόσταση 45cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 5m/s

10m/s



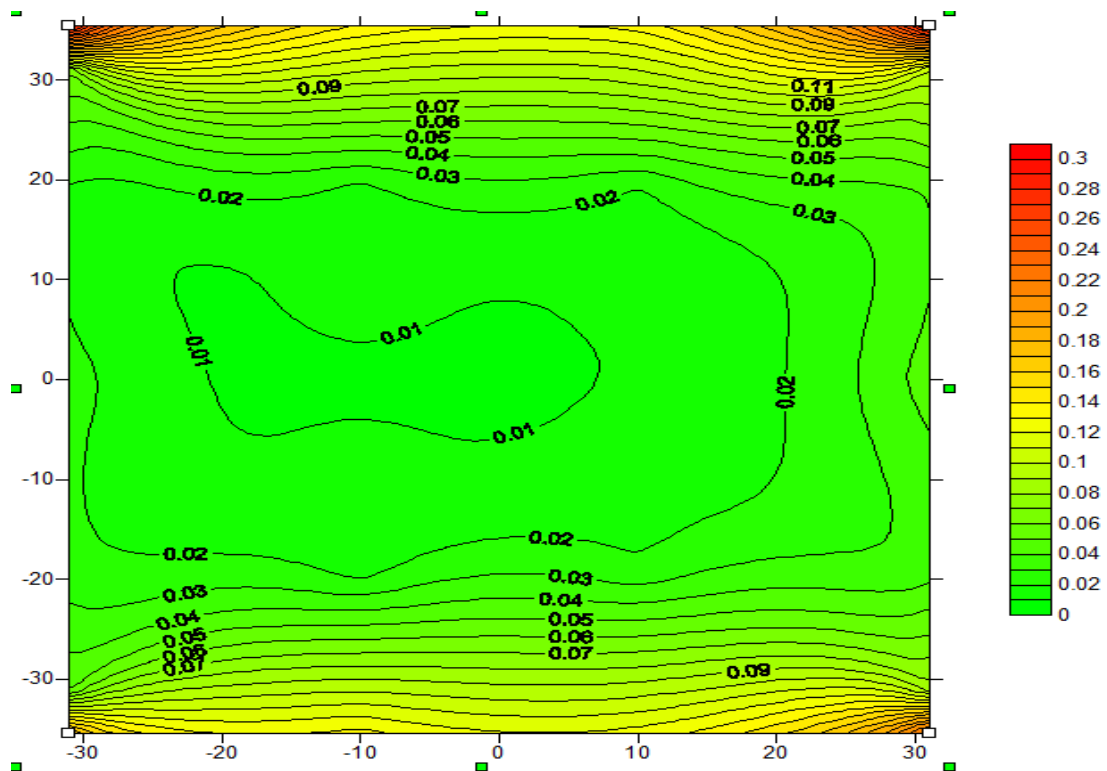
Γράφημα 38: Τύρβη σε απόσταση 45cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 10m/s

15m/s



Γράφημα 39: Τύρβη σε απόσταση 45cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 15m/s

20m/s

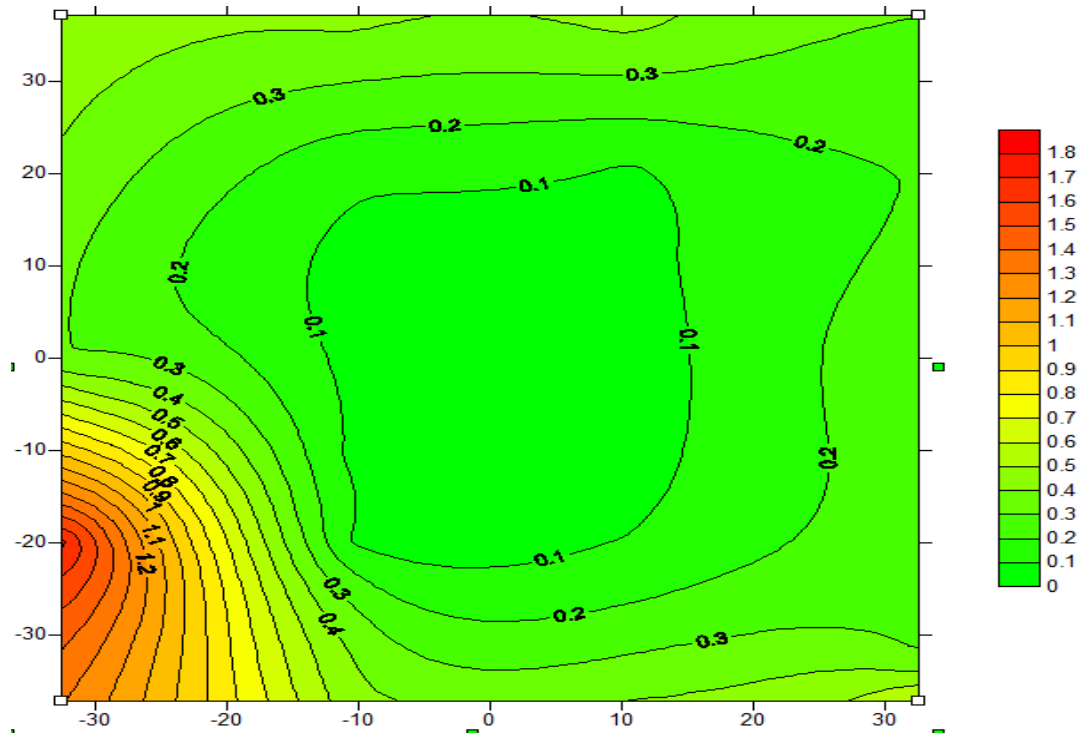


Γράφημα 40: Τύρβη σε απόσταση 45cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 20m/s



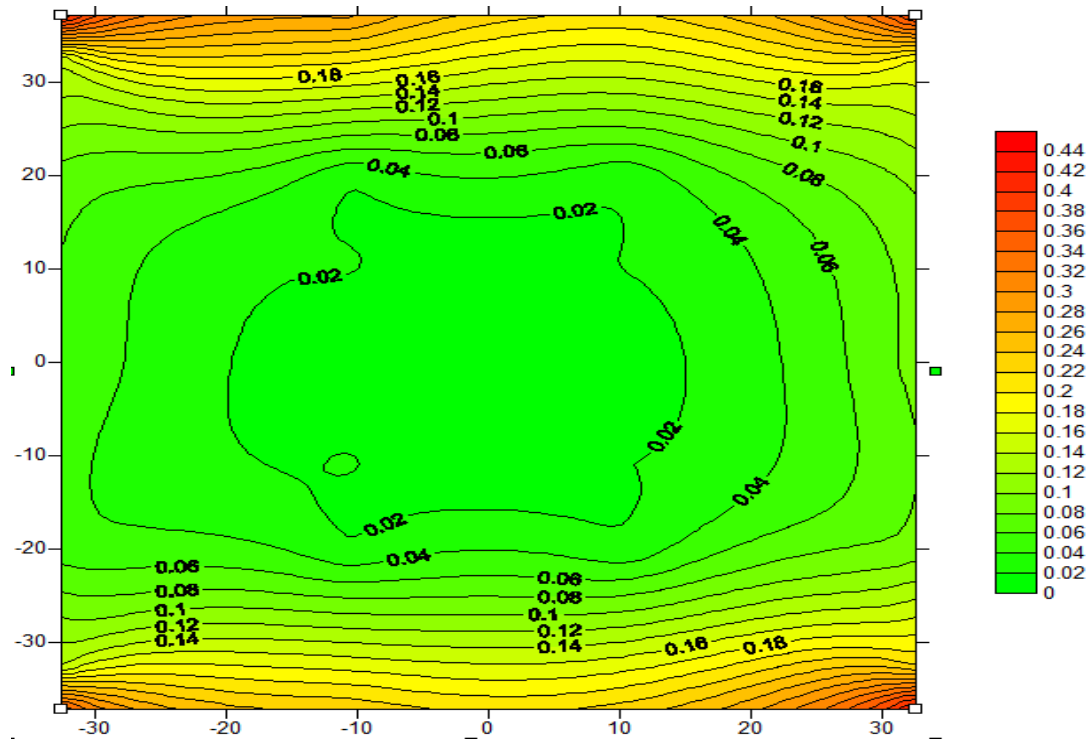
## Για τα 60cm

5m/s



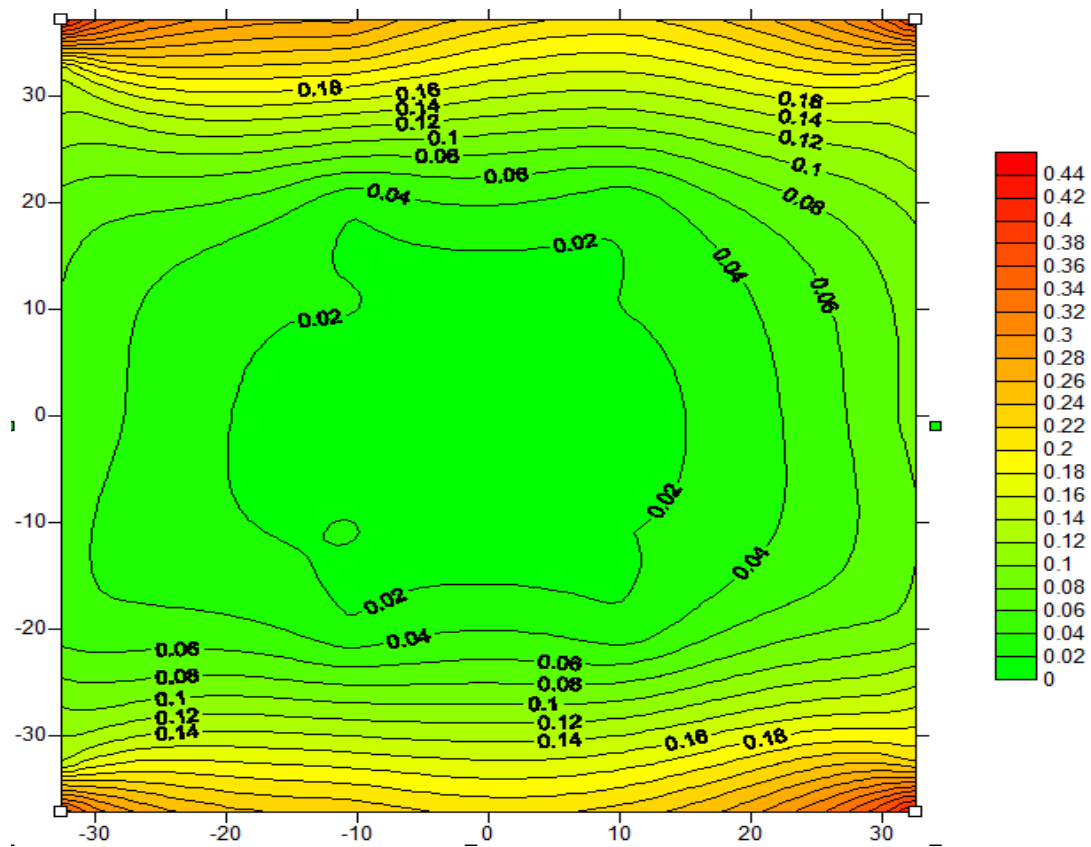
Γράφημα 41: Τύρβη σε απόσταση 60cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 5m/s

10m/s



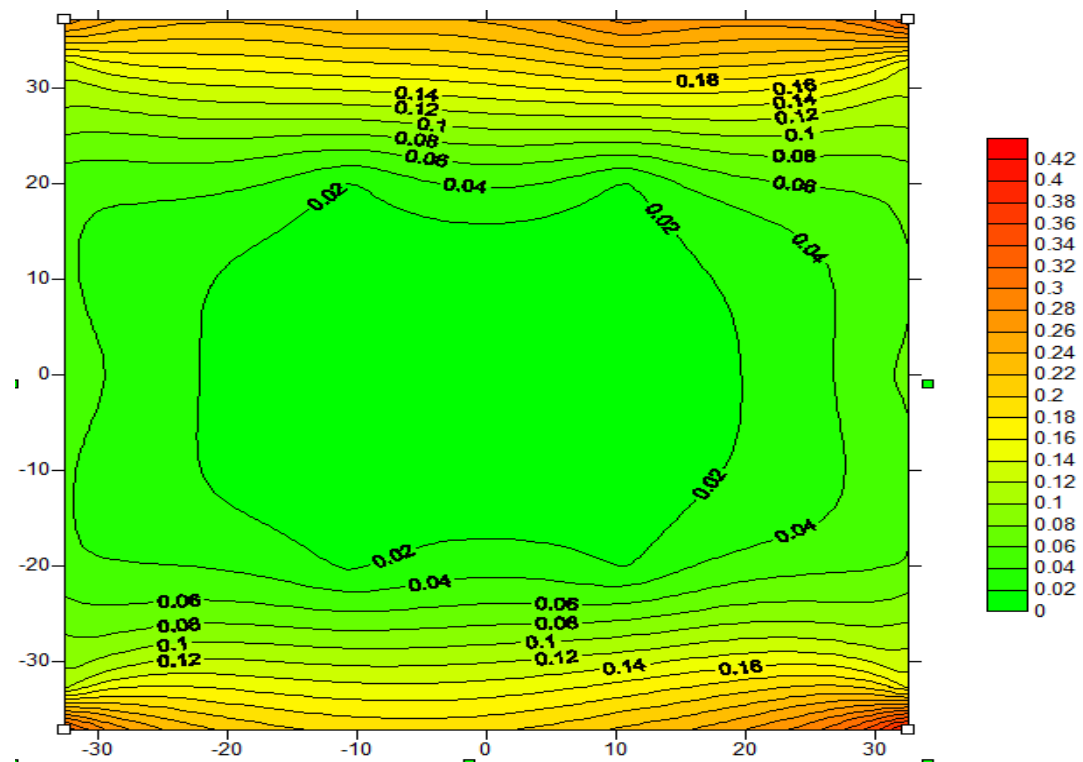
Γράφημα 42: Τύρβη σε απόσταση 60cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 10m/s

15m/s



Γράφημα 43: Τύρβη σε απόσταση 60cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 15m/s

20m/s



Γράφημα 44: Τύρβη σε απόσταση 60cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 20m/s

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΤΥΡΒΗΣ

### 1. Για την απόσταση των 0cm

- Στα **5m/s**η τύρβη έχει αρκετά υψηλές τιμές σε όλο το πεδίο ροής πάνω από 0,028 έως 0,04 ενώ θεωρούνται καλές συνθήκες όταν υπάρχουν τιμές κάτω του 0,02. Βέβαια σε ένα βαθμό είναι αναμενόμενο στα 5m/sκαθώς ήταν γνωστό ότι δεν υπάρχει μεγάλη ακρίβεια του προγράμματος σε μετρήσεις που γίνονταν σε ταχύτητες κάτω των 6m/s
- Στα **10m/s**οι τιμές της τύρβης είναι στα επιθυμητά επίπεδα με μικρές αποκλίσεις στο σημείο Δ4 η τιμή της ξεπερνάει αρκετά το 0,02 κατά 0,004. Υπέρβαση μικρή έχουμε και στο A7(0,02110)
- Στα **15m/s**στα σημεία στα οποία έχουμε υπέρβαση της επιθυμητής τιμής είναι τα A7(0,02176), Γ1(0,02147), Γ4(0,02320),Γ6(0,02729) και Δ6(0,02303)
- Στα **20m/s**παρατηρείται και η πιο ομαλή συμπεριφορά που όμως εμφανίζει και 2 τιμές εκτός ορίου, η μία ιδιαίτερα είναι στο A1(0,11133) δηλαδή 5 φορές πάνω και η άλλη στο Δ6 (0,02265)

### 2. Για την απόσταση των 15cm

- Στα **5m/s**η τύρβη είναι αρκετά υψηλή σε όλα τα σημεία αφού σε κανένα δεν πέφτει κάτω του 0,02. Όλες είναι πάνω 0,03 και σημειώνονται και ακόμα υψηλότερες στους τομείς I και IX που είναι από 0,09-0,24
- Στα **10m/s**εξαιρουμένων των τομέων I,II,IIIκαι IX οι τιμές της τύρβης είναι παραπλήσιες στο 0,02 και καμία δεν ξεφεύγει αρκετά ώστε να είναι άξια λόγου
- Στα **15m/s**η συμπεριφορά βελτιώνεται ακόμα περισσότερο καθώς εξαιρουμένων των τομέων I και IX όλες οι τιμές είναι κάτω του 0,019 ειδικά στα σημεία κοντά στο κέντρο πέφτει και στο 0,015
- Στα **20m/s**εξαιρουμένων των τομέων I και IX όλες οι τιμές είναι κάτω του 0,015 ειδικά στα σημεία κοντά στο κέντρο πέφτει κάτω από 0,013

**Από εδώ και στο εξής δεν θα υπάρξει ενασχόληση με τους τομείς I,II, VII και IX καθώς σημειώνονται παντού αρκετά μεγάλες τιμές και μόνο σε αντίθετη περίπτωση θα αναφερθούν**

- ### 3. Για την απόσταση των 30cm
- από εδώ και στο εξής δεν θα υπάρξει ενασχόληση με τους τομείς I,II, VII και IX καθώς σημειώνονται παντού αρκετά μεγάλες τιμές και μόνο σε αντίθετη περίπτωση θα αναφερθούν

- Στα **5m/soi** τιμές είναι πάνω του 0,035 σε όλο το πεδίο που ασχολούμαστε
- Στα **10m/soi** τιμές είναι αρκετά κοντά στο 0,02
- Στα **15m/soi** τιμές είναι κάτω του 0,02 ιδιαίτερα κοντά στο κέντρο μόνο στον τομέα Δ έχουμε ελάχιστες υπερβάσεις
- Στα **20m/sακόμα** και στους τομείς II και VII σημειώνονται τιμές κοντά στο 0,02. Με εξαίρεση αυτούς οι τιμές κυμαίνονται στο 0,015

#### 4. Για την απόσταση των 45cm

- Στα **5m/σόλες** οι τιμές είναι ανάμεσα στο 0,04-0,4
- Στα **10m/σπάλι** έχουμε υψηλότερες τιμές του 0,02 και μόνο στο κοντά στο κέντρο ( $x=0,y=0$ ) πλησιάζουν αλλά είναι ελαφρώς μεγαλύτερες κατά 0,4% περίπου
- Στα **15m/μόνοστον** τομέα Δ έχουμε υψηλότερες αρκετά από το επιθυμητό τιμές περί του 0,02
- Στα **20m/sστο** τομέα Δ αποκλίνει κατά 0,001-0,002 αλλά στους άλλους τομείς η τύρβη είναι κάτω του επιθυμητού ορίου με τιμές κοντά στο 0,014

#### 5. Για την απόσταση των 60cm,

- Στα **5m/σόλες** οι τιμές είναι πάνω του 0,09
- Στα **10m/sμόνο** κοντά στο κέντρο έχουμε τιμές κοντά στο 0,02 αλλά και πάλι είναι υψηλότερες
- Στα **15m/sμόνο** στον τομέα Δ έχουμε υψηλότερες αρκετά από το επιθυμητό τιμές περί του 0,02
- Στα **20m/sστο** τομέα Δ αποκλίνει κατά 0,001-0,002 αλλά στους τομείς η τύρβη είναι κοντά στο επιθυμητού ορίου με τιμές κοντά στο 0,02 ενώ πλησιέστερα του κέντρου πλησιάζει το 0,01

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων βγαίνει το συμπέρασμα πως οι δοκιμές πρέπει να λαμβάνουν χώρα σε απόσταση περίπου 15cm από το στόμιο του ακροφυσίου και ανάμεσα στα σημεία B2,3,4,5 και Γ2,3,4,5 καθώς εκεί παρατηρείται η καλύτερη συμπεριφορά όσον αφορά την ταχύτητα και την τύρβη ταυτόχρονα.

## ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ

Ένας τρόπος βελτίωσης της διάταξης θα ήταν να τοποθετηθούν γωνίες και η διατομή του ακροφυσίου από τετράγωνη να γίνει οκτάγωνη ώστε να έχουμε καλύτερη συγκέντρωση αέρα στη μέση όπου είναι και η περιοχή ενδιαφέροντος.

Επίσης, θα έπρεπε να υπάρξει βελτίωση του προγράμματος λήψης μετρήσεων ώστε να εξαλειφθεί όσο το δυνατόν περισσότερο η αβεβαιότητα στις χαμηλές ταχύτητες (<5m/s).

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- <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%95%CE%A1%CE%A5%CE%93%CE%91%CE%A3%20%CE%94%20%CE%9A%CE%91%CE%99%20%CE%98%CE%91%CE%9B%CE%91%CE%9C%CE%9F%CE%A5%20%CE%9C%CE%95%CE%A4.pdf>
- [https://en.wikipedia.org/wiki/Pitot\\_tube](https://en.wikipedia.org/wiki/Pitot_tube)
- [https://en.wikipedia.org/wiki/Reynolds\\_number](https://en.wikipedia.org/wiki/Reynolds_number)
- Low-speed wind tunnel testing by William H. Rae, Jr and Alan Pope
- <https://www.doblx.com/continuous-measurement/hd408t-hd4v8t-differential-and-relative-pressure-transmitters-ranges-10-10-mbar-to-2000-2000-mbar-4-20ma-or-vdc-output-connected-by-tube>
- <https://w5.siemens.com/greece/internet/en/pss/I/Automation/Documents/MM440%20C2%BA%C3%BF%C2%BF%C3%9F%C3%BA%C2%A3%C2%BD%C2%BF%C2%AA%C3%A1.pdf>