

**Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών**

Διπλωματική Εργασία



***Αξιολόγηση του πεδίου ροής στο χώρο δοκιμών της
αεροσήραγγας του Εργαστηρίου Αιολικής
Ενέργειας του ΕΛΜΕΠΑ***

**Φοιτητής: Γεώργιος Ε. Παχάκης
(ΑΜ: 6161)**

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Κονταξάκης

Ηράκλειο Μάϊος 2021

Περιεχόμενα.

Σκοπός-Αντικείμενο.....	4
Περίληψη Διπλωματικής.....	4
Work subject	4
Summary of this work	4
Λέξεις κλειδιά.....	5
Κεφάλαιο 1	5
Ιστορικά στοιχεία	5
Τι είναι η αεροσήραγγα	5
Υποχητική Αεροδυναμική Σήραγγα (Αεροσήραγγα).....	6
Ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας χωρίζονται σε:.....	6
Κατηγορίες υποχητικών αεροσηράγγων και ειδικά χαρακτηριστικά τους	8
Χαρακτηριστικά ροής.....	10
Ροή – Κίνηση Ρευστού:.....	10
Κατηγορίες ροής.....	12
1. Ιδανική Ροή:.....	12
2. Πραγματική Ροή:	12
3. Συμπιεστή ροή:.....	12
4. Ασυμπίεστη Ροή:	12
5. Στρωτή Ροή:.....	12
6. Τυρβώδη Ροή:	12
Ο Αριθμός Reynolds	13
Κεφάλαιο 2	15
Περιγραφή πειράματος.....	15
Διαδικασία μετρήσεων.	15
Αισθητήρια μέτρησης.....	16
Σωλήνας Pitot-Prandtl	16
Θερμική ανεμομετρία (Hot wire)	18
Πιστοποίηση-Βαθμονόμηση αισθητήρων	21
Εξοπλισμός του εργαστηρίου που χρησιμοποιήθηκε:	21
Διαδικασία βαθμονόμησης.....	24
Προετοιμασία Βαθμονόμησης.	24

Πορεία μετρήσεων για την βαθμονόμηση	26
Επαλήθευση βαθμονόμησης	30
Τμήματα αεροσήραγγας εργαστηρίου	33
Πρότυπο μέτρησης.....	37
Πρωτόκολλο μέτρησης.....	43
1. Προφύλαξη από εξωγενείς παράγοντες	43
2. Σωστή τοποθέτηση σωλήνα Pitot	44
3. Για να είναι μια μέτρηση σωστή	44
4. Δειγματοληψία.....	45
5. Καταγραφή μέτρησης	45
6. Αποθήκευση μέτρησης.....	45
Κεφάλαιο 3	47
Διαγράμματα ταχυτήτων στην έξοδο της αεροσήραγγας	47
Γραφήματα για απόσταση 0cm από το ακροφύσιο.	47
Γραφήματα για απόσταση 15cm από το ακροφύσιο.	50
Γραφήματα για απόσταση 30cm από το ακροφύσιο.	53
Γραφήματα για απόσταση 45cm από το ακροφύσιο	55
Γραφήματα για απόσταση 60cm από το ακροφύσιο	58
Γραφική αναπαράσταση της συμπεριφοράς του ανέμου στη μέση του ακροφυσίου.	61
Υπολογισμός τύρβης	64
Διαγράμματα τύρβης στη ροή του ανέμου κατά την έξοδο από το ακροφύσιο της αεροσήραγγας.....	65
Τύρβη στην ροή του ανέμου σε απόσταση 0cm από το ακροφύσιο.....	65
Τύρβη στην ροή του ανέμου σε απόσταση 15cm από το ακροφύσιο.....	68
Τύρβη στην ροή του ανέμου σε απόσταση 30cm από το ακροφύσιο.....	70
Τύρβη στην ροή του ανέμου σε απόσταση 45cm από το ακροφύσιο.....	73
Τύρβη στην ροή του ανέμου σε απόσταση 60cm από το ακροφύσιο.....	75
Γραφική απεικόνιση της διακύμανσης της τύρβης σε ποσοστό της % στο κέντρο κάθε πλαισίου μέτρησης.....	78
Κεφάλαιο 4	81
Συμπεράσματα-Παρατηρήσεις	81
Συμπεράσματα από τα γραφήματα στις ταχύτητας ανέμου.....	81

Αναλυτικές παρατηρήσεις για κάθε γράφημα ταχύτητας ανέμου.	81
Συμπεράσματα από τα γραφήματα τύρβης.	83
Προτάσεις για βελτίωση της διεξαγωγής.	85
Βιβλιογραφία.....	86
Πρωτογενής βιβλιογραφία.....	86
Δευτερογενής βιβλιογραφία.....	86

Σκοπός-Αντικείμενο: Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η καταγραφή και η ανάλυση του πεδίου ροής του ανέμου της αεροσήραγγας του Εργαστηρίου αιολικής ενέργειας του ΕΛΜΕΠΑ. Ο στόχος είναι να διερευνηθούν τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του πεδίου ροής της συγκεκριμένης αεροσήραγγας και να διερευνηθούν οι πιθανές απαραίτητες βελτιώσεις, προκειμένου να προσδιοριστούν οι ακριβείς συνθήκες των δοκιμών που διεξάγονται στο πεδίο δοκιμών της αεροσήραγγας.

Περίληψη Διπλωματικής.

Στη παρούσα πτυχιική εργασία, γίνεται προσέγγιση στα ποιοτικά χαρακτηριστικά του πεδίου ροής της αεροσήραγγας, του Εργαστηρίου αιολικής ενέργειας του ΕΛ.ΜΕ.ΠΑ. και να διερευνηθούν οι πιθανές απαραίτητες βελτιώσεις, προκειμένου να προσδιοριστούν οι ακριβείς συνθήκες των δοκιμών που διεξάγονται στο πεδίο δοκιμών της αεροσήραγγας. Πιο συγκεκριμένα εξετάστηκαν τα ιστορικά στοιχεία και η πρώτη εμφάνιση της αεροσήραγγας. Στη συνέχεια, αναλύθηκαν οι όροι της ανεμοσήραγγας και των τύπων που αυτή διακρίνεται με τα μειονεκτήματα και τα προτερήματα αυτών. Παράλληλα, σημειώθηκε η θεωρία σχετικά με την ροή-κίνηση του ρευστού και τα είδη της. Επιπλέον περιγράφηκαν λεπτομερώς η ονοματολογία του εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, καθώς και η σταδιακή διαδικασία για την διεξαγωγή του πειράματος. Τέλος καταγράφηκαν όλα τα αποτελέσματα σχετικά με την ταχύτητα του ανέμου, αλλά και αυτά της τύρβης στο ακροφύσιο της αεροσήραγγας του Εργαστηρίου, μαζί με τα συμπεράσματα που προκύπτουν από αυτά.

Work subject

The purpose of this thesis is to record and analyze the wind flow field of the wind tunnel of the Hellenic Mediterranean University Wind Energy Laboratory. The aim is to investigate the qualitative characteristics of the flow field of the wind tunnel and to investigate any improvements needed to determine the exact conditions of the tests carried out in the field of the tunnel test.

Summary of this work

Aim of this study was to approach the qualitative characteristics of the flow field of the wind tunnel, of the Hellenic Mediterranean University Wind Energy Laboratory, and explore possible improvements needed to determine the exact conditions of the tests conducted in the tests' field of the wind tunnel. In particular, the historical facts and the first appearance of the wind tunnel were examined. Then, the terms of the wind tunnel and the types of it were analyzed with their disadvantages and advantages. In parallel, the theory of fluid flow and its types were noted. Furthermore, the nomenclature of the equipment used during the measurements, and the step-by-step procedure were described in detail for conducting the experiment. Finally, all the wind speed and turbulence results were recorded at the Laboratory's wind tunnel nozzle, so the conclusions drawn from them.

Λέξεις κλειδιά: προφίλ ανέμου, αεροσήραγγες, μετρήσεις ταχύτητας ανέμου, αισθητήρες ταχύτητας ανέμου, wind profile measurement in wind tunnel, wind tunnel measurements. Static-Pitot tube, Hot-wire, iso standards for wind measurement

Κεφάλαιο 1

Ιστορικά στοιχεία

Οι αεροσήραγγες, σαν εργαλεία μελέτης του ανέμου, έγιναν ευρέως γνωστές στις αρχές του προηγούμενου αιώνα (20^ο αιώνα) από τους αδερφούς Ράιτ (Όλβριλ και Γουίλμπουρ Ράιτ), οι οποίοι ονομάστηκαν ως οι πατέρες της αεροναυπηγικής μετά τη κατασκευή της πρώτης πτητικής μηχανής. Όμως οι πρώτες αναφορές για την κατασκευή και χρήση αεροσήραγγας έγιναν στα τέλη του 19^ο αιώνα , από τον Γκυστάβ Άιφελ (1832-1923), ο οποίος κατασκεύασε τη πρώτη του δυναμική αεροσήραγγα ανοικτού βρόγχου στο Παρίσι για την μελέτη του ανέμου πάνω στον ομώνυμο πύργο. Μέχρι το τέλος του έτους 1912 ο Άιφελ είχε πραγματοποιήσει πάνω από 4000 μετρήσεις σε μοντέλα , θέτοντας έτσι νέα πρότυπα στην μελέτη του ανέμου.

Τι είναι η αεροσήραγγα

Αεροσήραγγα είναι μία διάταξη, που δίνει τη δυνατότητα να μελετηθεί η ροή του ρευστού-ανέμου αλλά και τα αποτελέσματα που προκύπτουν κατά την αλληλεπίδραση του πάνω μελέτης (π.χ αεροτομή). Η χρήση της αεροσήραγγας επιτρέπει στους ερευνητές να αναπαράγουν τεχνητά τις συνθήκες λειτουργίας για ένα στερεό (π.χ. πτερύγιο ανεμογεννήτριας) , υπό κλίμακα, κάτι που την καθιστά απαραίτητη σε εργαστήρια που ασχολούνται με θέματα αεροδυναμικής. Επιπρόσθετα, αποτελεί οικονομικό πλεονέκτημα στις μέρες μας η μελέτη-προσομοίωση μικρότερης κλίμακας κατασκευών.



Εικόνα 1. Προετοιμασία μοντέλου.

Στο εσωτερικό της αεροσήραγγας, με τη βοήθεια μίας πηγής ανέμου, (όπως είναι ένας ανεμιστήρας) δημιουργείται ένα στρωτό ρεύμα αέρος χωρίς στροβιλισμούς, και τέλος υπάρχει ένα σύστημα σωληνώσεων για την κατεύθυνση του ανέμου, το οποίο ποικίλει ανάλογα με το είδος της αεροσήραγγας.



Εικόνα 2. Μοντέλο έτοιμο για εξέταση.

Υποηχητική Αεροδυναμική Σήραγγα (Αεροσήραγγα)

Η αεροδυναμική σήραγγα είναι ένα από τα πιο σημαντικά εκπαιδευτικά βοηθήματα για την προετοιμασία των επιστημόνων. Τα βασικά μέρη μιας ολοκληρωμένης αεροδυναμικής σήραγγας αποτελούν:

- οι αγωγοί αέρα.
- το συγκρότημα παραγωγής ρεύματος αέρα.
- οι συσκευές μετρήσεων και υπολογισμών.

Ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας χωρίζονται σε:

Ανάλογα με την ταχύτητα που έχει ο αέρας στον θάλαμο δοκιμών, οι σήραγγες διακρίνονται σε **υποηχητικές** ή **μικρών ταχυτήτων** και σε **υπερηχητικές** ή **μεγάλων ταχυτήτων**. Επιπρόσθετα κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τον τρόπο κυκλοφορίας του αέρα μέσα στις σήραγγες αναλόγως αν είναι ανοικτού ή κλειστού κυκλώματος.

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

1. Την ταχύτητα της ροής στον θάλαμο μετρήσεων
2. Το είδος του θαλάμου μετρήσεων
3. Αν είναι ανοικτού ή κλειστού κυκλώματος

Άξια αναφοράς αποτελεί μια πιο αναλυτική παράθεση αυτών των ομάδων. Χωρίζονται, λοιπόν, ανάλογα με την ταχύτητα ροής σε:

α) Αεροσήραγγες χαμηλών αριθμών Mach ($0 < M < 0,2$),

β) Υποηχητικές αεροσήραγγες ($0,2 < M < 0,9$),

γ) Διηχητικές αεροσήραγγες ($0,5 < M < 1,5$),

δ) Υπερηχητικές αεροσήραγγες ($1,2 < M < 5$)

ε) Υπερ-υπερηχητικές αεροσήραγγες ($M > 5$).

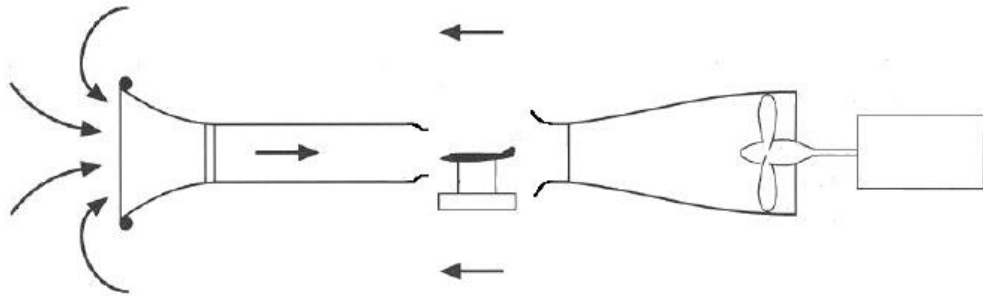
Συνοπτικά, η αεροδυναμική σήραγγα, ανοιχτού κυκλώματος (τύπου Eiffel) αποτελείται από ένα πλαίσιο κυψελών (honeycomb), στη μέση υπάρχει ένα πανί αποκατάστασης (screens) και στη έξοδο του διαχυτή υπάρχει ένας κινητήρας (η χρήση των παραπάνω γίνεται έτσι ώστε η ροή να είναι όσο το δυνατόν πιο ομοιόμορφη και λιγότερο στροβιλώδης). Εξάλλου η διατομή του τμήματος δοκιμών είναι στις υποχηητικές σήραγγες σταθερή σε όλο το μήκος. Σημαίνουσας αξίας αποτελεί η αναφορά του γεγονότος ότι το πρόβλημα της ομοιόμορφης και αστρόβιλης ροής μέσα στο χώρο των δοκιμών είναι χαρακτηριστικό στοιχείο για όλα τα είδη των σήραγγων. Το στροβιλιζόμενο ρεύμα, ακριβώς πίσω από τους ανεμιστήρες, ευθυγραμμίζεται με παρεμβολή κυψελών και πλαισίων υφασμάτων φίλτρων που έχουν σκοπό τη διάλυση των στροβίλων (έχοντας έτσι ως αποτέλεσμα την ελάττωση του στροβιλισμού του ρεύματος). Οι λείες εσωτερικές επιφάνειες του κυκλώματος εξυπηρετούν με τον πιο θετικό τρόπο στην ελάττωση του στροβιλισμού.

Η αεροσήραγγα χαρακτηρίζεται από έναν ιδιαίτερο τρόπο λειτουργίας, καθώς συλλέγει τον αέρα από το εξωτερικό περιβάλλον, ο οποίος διέρχεται διαμέσου του θαλάμου δοκιμών με σκοπό τη διεξαγωγή πειραμάτων· με το πέρας της διαδικασίας, αυτός αποβάλλεται στο φυσικό περιβάλλον. Η ταχύτητα του αέρα στο χώρο των δοκιμών πρέπει να ρυθμίζεται με τέτοιο τρόπο, ώστε να υπάρχει δυνατότητα εκτέλεσης πειραμάτων υπό διάφορες ταχύτητες. Οι υποχηητικές ταχύτητες ρυθμίζονται, συνήθως, με τη μεταβολή των στροφών του ανεμιστήρα που παράγει το ρεύμα εντός της σήραγγας.

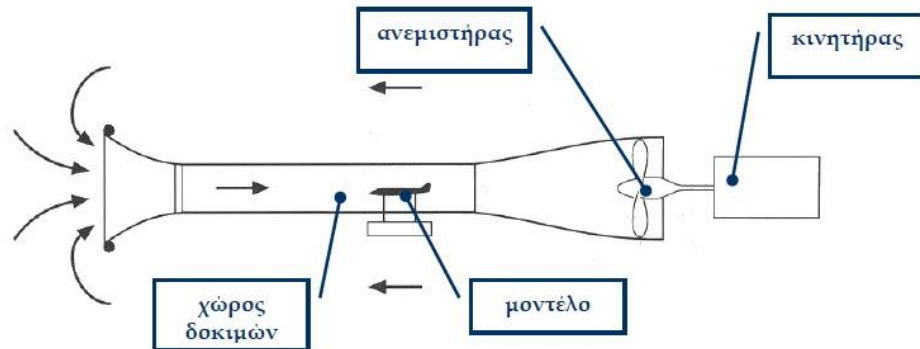
Κατηγορίες υποηχητικών αεροσηράγγων και ειδικά χαρακτηριστικά τους

Ο πιο απλός τύπος υποηχητικής αεροσήραγγας είναι αυτός του ανοικτού τύπου (open circuit). Οι αεροσήραγγες που έχουν διατομή θαλάμου από 60 εκατοστά και κάτω, είναι κυρίως ανοικτού κυκλώματος. 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).

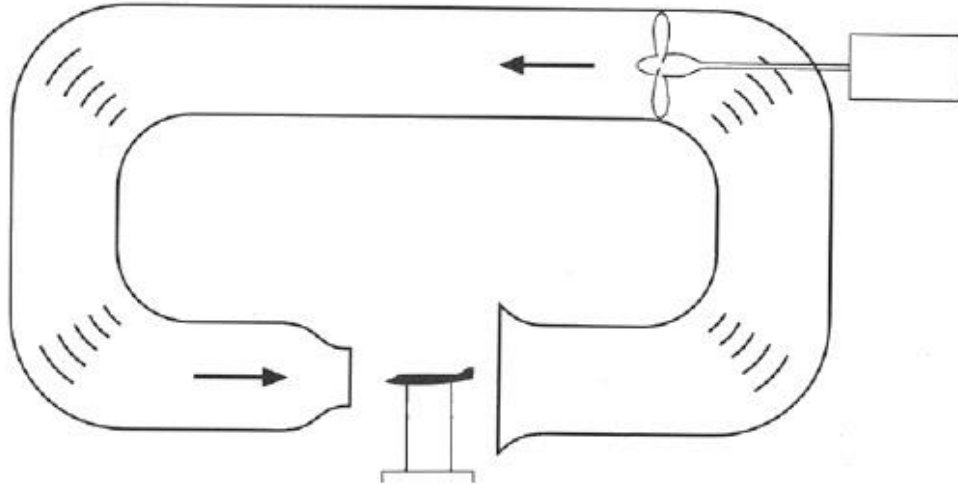


Εικόνα 3. Αεροσήραγγα ανοικτού κυκλώματος με ανοικτό χώροδοκιμών (openjet - opencircuit)

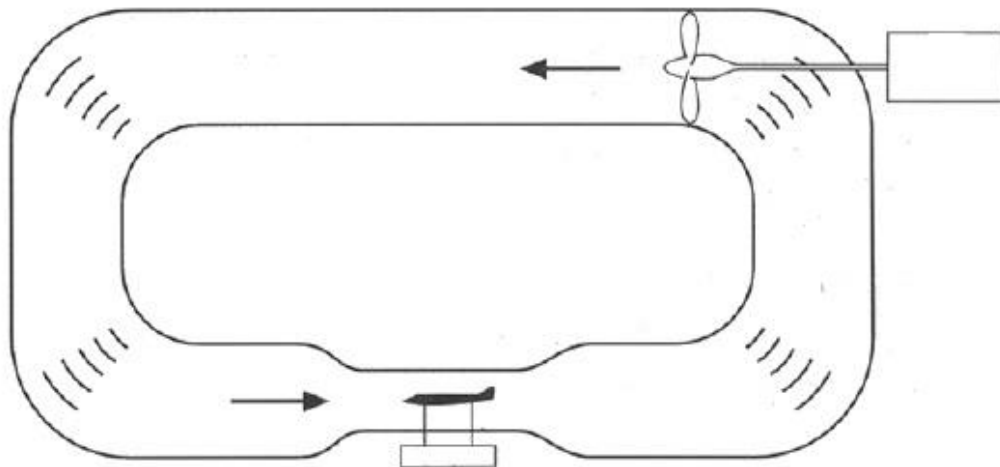


Εικόνα 4. Αεροσήραγγα ανοικτού κυκλώματος με ανοικτο χώρο δοκιμών (opencircuit-closejet)

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/ Gottingertype). 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*



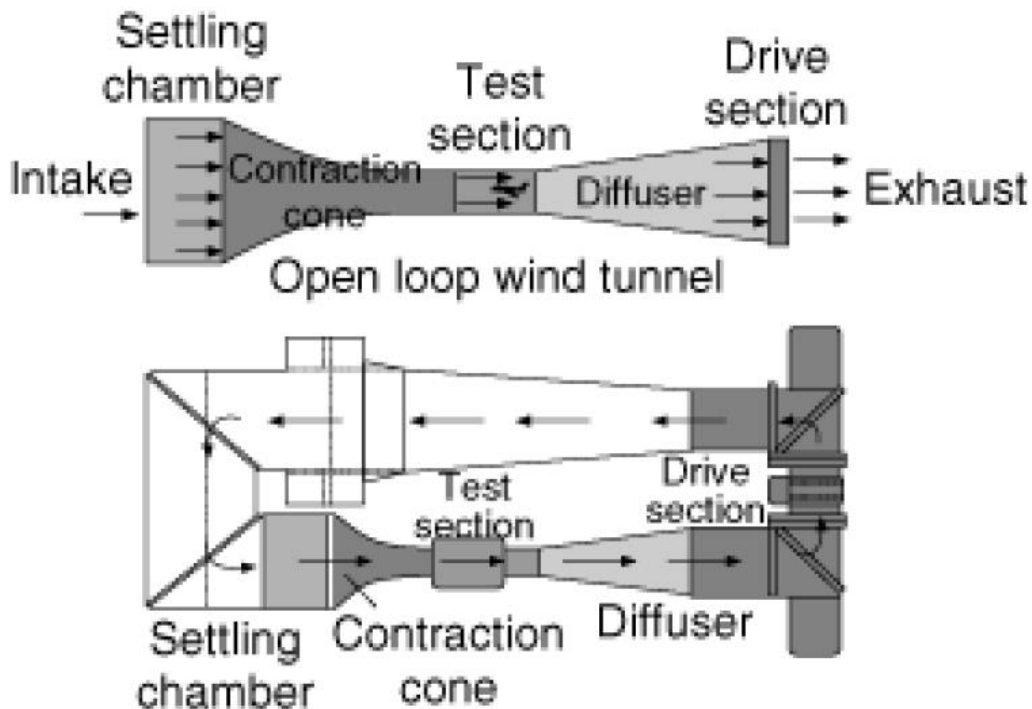
Εικόνα 5. Αεροσήραγγα κλειστού κυκλώματος με ανοικτό χώρο δοκιμών



Εικόνα 6. Αεροσήραγγα κλειστού κυκλώματος με κλειστό χώρο δοκιμών

Συγκρίνοντας τους δύο τύπους αεροσηράγγων , ανοικτού και κλειστού τύπου παρατηρούμε ότι στην περίπτωση της αεροσήραγγας κλειστού τύπου , η ροή του ανέμου παραμένει ανεπηρέαστη από εξωγενής παράγοντες, δίνοντας καλύτερο συντελεστή

ισχύος. Σε αντίθεση με αυτή του ανοικτού τύπου όπου η ροή του ανέμου επηρεάζεται δραματικά από εξωτερικούς παράγοντες.



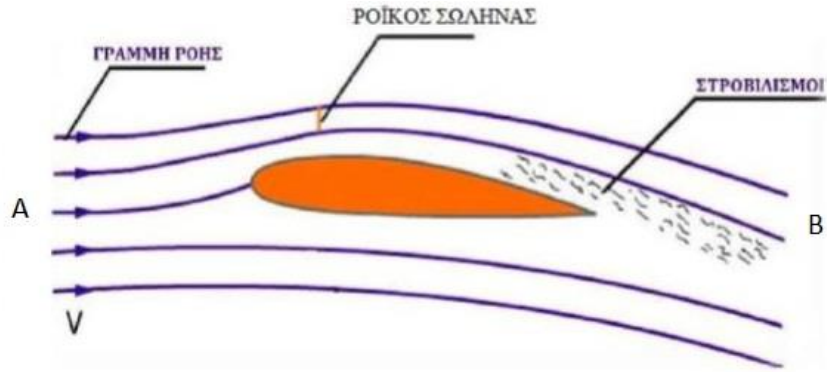
Εικόνα 7. Ειδιοποιός διαφορές μεταξύ, ανοικτού (άνω) και κλειστού (κάτω) κυκ αεροσηράγγων.

Βασικές Αρχές Αεροδυναμικής.

Η αεροδυναμική είναι η επιστήμη που έχει ως σκοπό τη μελέτη των νόμων που διέπουν τη ροή του ρευστού γύρω από σώματα αεροδυναμικού ενδιαφέροντος, (π.χ. πτερύγια ανεμογεννήτριας, αεροτομές). Συγκεκριμένα, μελετάει τις δυνάμεις που αναπτύσσονται πάνω σε αυτά, δημιουργώντας τεχνητά τις συνθήκες λειτουργίας τους. Η διαδικασία αυτή έχει ως στόχο την καταγραφή της κίνησης, συμπεριφοράς του σώματος στο περιβάλλον εργασίας έστω και τεχνητά.

Χαρακτηριστικά ροής

Ροή – Κίνηση Ρευστού: Ορίζεται ως η μεταφορά των μορίων του ρευστού από ένα αρχικό σημείο “Α” σε ένα τελικό σημείο “Β” (Α-Β πεδίο μελέτης). Η ροή ενός ρευστού σε σωματιδιακό επίπεδο, αποτελείται από ένα σύνολο από παράλληλες ευθύγραμμες μετατοπίσεις μορίων ρευστού. Ως εκ τούτου το πλήθος των θέσεων που καταλαμβάνουν τα μόρια του ρευστού, ονομάζονται τροχιά του ρευστού.

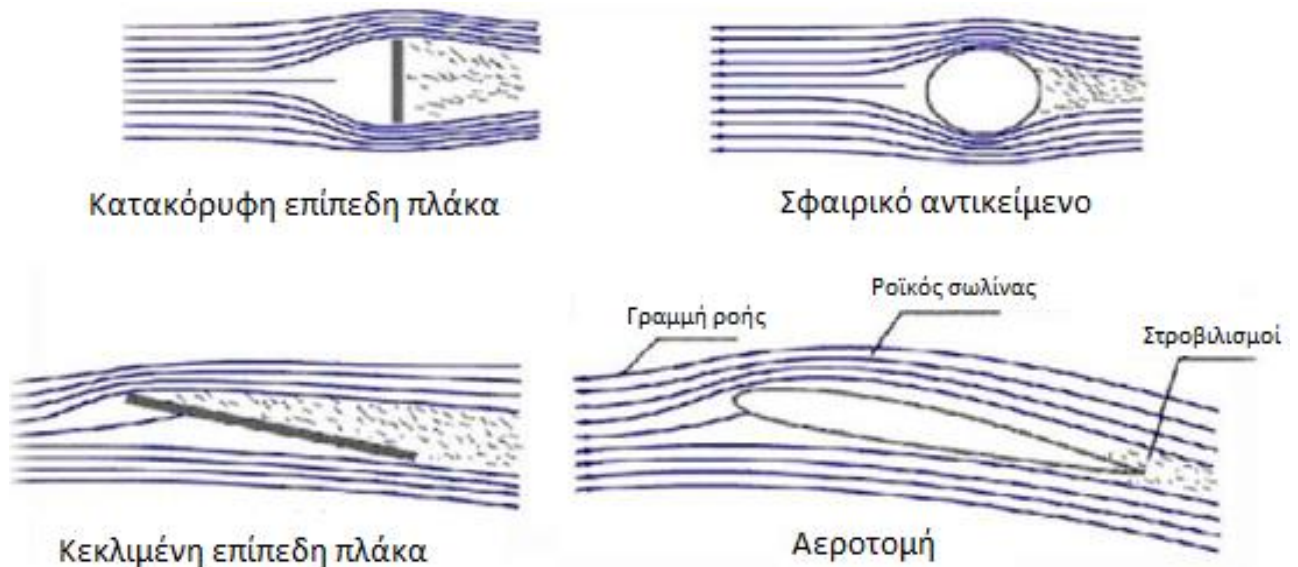


Εικόνα 8. Απεικόνιση ροής ανέμου γύρω από μια αεροτομή

Ροϊκός σωλήνας είναι ένας σωλήνας τα τοιχώματά του οποίου αποτελούνται από ροϊκές γραμμές

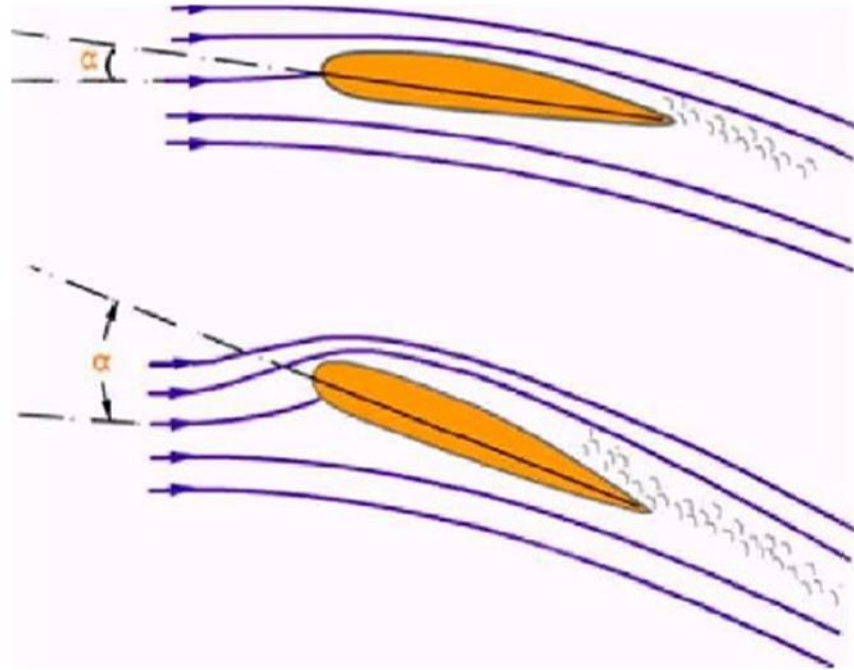
Συνεπώς η νοητή “γραμμή” που συνδέει τις διαδοχικές θέσεις αυτές και κατ’ επέκταση, είναι εφαπτόμενη στις ταχύτητες της \vec{V} . Λέγεται ροή του ρευστού.

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 9. Το σχήμα του αντικειμένου επιδρά σημαντικά στο είδος της ροής.

Άλλος παράγοντας που επηρεάζει τη μορφή των ροϊκών σωλήνων είναι και η γωνία προσβολής του ρευστού.



Εικόνα 10. Ο προσανατολισμός του αντικειμένου επιδρά σημαντικά στη ροή.

Κατηγορίες ροής

1. **Ιδανική Ροή:** Είναι η ροή που στο εσωτερικό της δεν ασκούνται τριβές ή αλλού είδους δυνάμεις. Τα ρευστά που πραγματοποιούν τέτοιου είδους ροές είναι υποθετικά ρευστά, έχοντας μηδενικό ιξώδες και ονομάζονται Ιδανικά Ρευστά.
2. **Πραγματική Ροή:** Είναι η ροή που στο εσωτερικό της ασκούνται διατμητικές τάσεις και δυνάμεις τριβής. Τα ρευστά που πραγματοποιούν τη ροή αυτή ονομάζονται Πραγματικά Ρευστά με ιξώδες και τα συναντάμε στη φύση
3. **Συμπιεστή ροή:** Ονομάζεται η ροή και τα την οποία η μεταβολές της πυκνότητας είναι σημαντικές. Τα φαινόμενα συμπίεσότητας κάνουν την εμφάνισή τους συνήθως σε υψηλές ταχύτητες. Όταν η ταχύτητα του ρευστού μεταβάλλεται σημαντικά, η πίεση συγχρόνως με τη πυκνότητα μεταβάλλονται σημαντικά.
4. **Ασυμπίεστη Ροή:** Ονομάζεται η ροή ενός ρευστού Ιδανικού η Πραγματικού και τα την οποία οι μεταβολές της πυκνότητας που λαμβάνουν χώρα σε όλη την έκταση του πεδίου ροής είναι αμελητέες.
5. **Στρωτή Ροή:** Ονομάζεται η ροή κατά την οποία το ρευστό κινείται ομαλά και κατά στρώματα χωρίς τα σωματίδια του ρευστού ενός στρώματος να μεταφέρονται σε άλλο γειτονικό. Δηλαδή σε αυτή τη ροή δεν έχουμε ανάμειξη μεταξύ γειτονικών στρωμάτων του ρευστού.
6. **Τυρβώδη Ροή:** Ονομάζεται η ροή κατά την οποία τα σωματίδια του ρευστού κινούνται σε απρόβλεπτες τροχιές και προς όλες τις κατευθύνσεις με αποτέλεσμα να γίνεται ανάμειξη των γειτονικών στρωμάτων του ρευστού.

Ο Αριθμός Reynolds

Μια ακόμη παράμετρος η οποία χαρακτηρίζει τη ροή του αέρα στρωτή ή τυρβώδης είναι ο αριθμός Reynolds, Re , ο οποίος για ένα αγωγό κυκλικής διατομής προκύπτει από τον τύπο:

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

d : Εσωτερική διάμετρος αγωγού (m).

ρ : Πυκνότητα (για αέρα $1,225 \text{ Kg/m}^3$ σε $T=15^\circ\text{C}$).

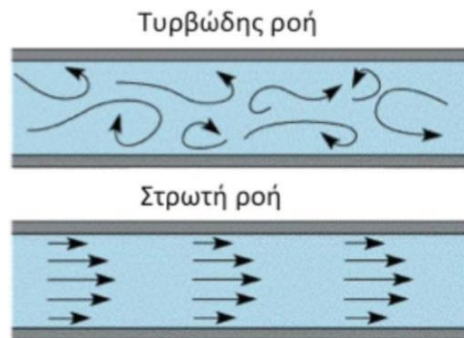
u : Ταχύτητα. (m/s)

μ : Δυναμικό ιξώδες (για αέρα $18 \times 10^{-5} \text{ Kg/m} \times \text{sec}$).

Κάνοντας αντικατάσταση του λόγου $\frac{\mu}{\rho}$ με το ν (κινηματικό ιξώδες) η παραπάνω εξίσωση στη συνέχεια γράφεται ως εξής

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

Και ο χαρακτηρισμός της ροής από στρωτή σε τυρβώδη γίνεται όταν ο αριθμός Reynolds υπερβεί μία κρίσιμη τιμή, $Re=2000$, που είναι γνωστή και ως **κρίσιμος αριθμός Reynolds**.



Εικόνα 11. Αναπαράσταση για την τυρβώδη και στρωτή ροή

Όπως φαίνεται από φυσικής πλευράς, ο Re εκφράζει 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 στροφέα 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 ν (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.

Κεφάλαιο 2

Περιγραφή πειράματος

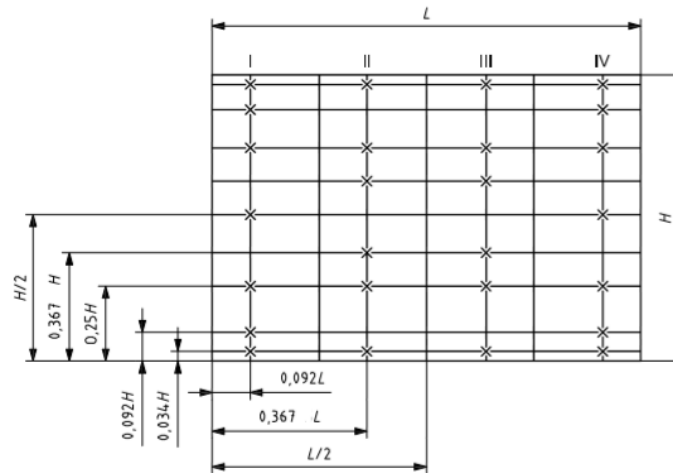
Για να διερευνηθεί το προφίλ της ταχύτητας του αέρα στην έξοδο της αεροσήραγγας, ακολουθήθηκε ένα διεθνές πρότυπο (ISO 3966).

Αρχικά επιλέχθηκαν να γίνουν μετρήσεις σε ίσες αποστάσεις από το ακροφύσιο εξόδου της αεροσήραγγας έτσι ώστε να ξέρουμε το τρισδιάστατο προφίλ. Οι αποστάσεις που θα τοποθετηθεί το πλαίσιο μετρήσεων, είναι, 0, 15, 30, 45 και 60 εκατοστά από την έξοδο της αεροσήραγγας. Σε κάθε απόσταση από τις παραπάνω, θα γίνουν μετρήσεις για ταχύτητες ανέμου 5, 10, 15, 20 και 25 m/s.

Η πορεία του πειράματος αυτού απορρέει από το διεθνές πρότυπο ISO 3966 με θέμα «Μέτρηση ροής ρευστού σε κλειστούς αγωγούς – Μέθοδος προφίλ ταχύτητας με τη χρήση στατικών σωλήνων Pitot»

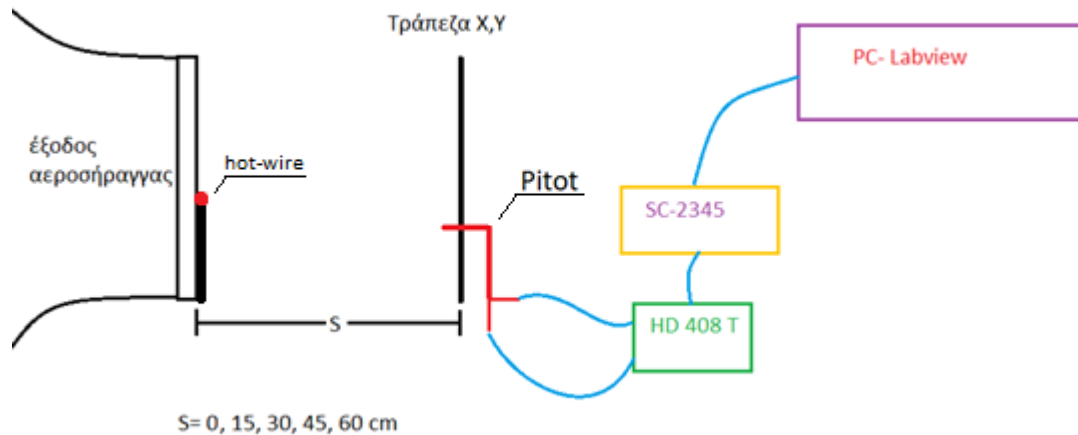
Διαδικασία μετρήσεων.

- Μέτρηση διαστάσεων της εξόδου της αεροσήραγγας.
- Καθορισμός 26 σημείων στην διατομή της εξόδου της αεροσήραγγας σύμφωνα με το πρότυπο ISO 3966 (+1 το σημείο του κέντρου).



Εικόνα 12. Τρόπος εύρεσης των σημείων μέτρησης (ISO 3966)

- Βαθμονόμηση αισθητήρων και γραμμής μέτρησης.
- Μέτρηση διαφορικής πίεσης (στατική και ολική πίεση) με τη χρήση του του σωλήνα Pitot και με τη βοήθεια του προγράμματος Lab View.
- Προσδιορισμός ταχύτητας ροής.
- Προσδιορισμός προφίλ ταχύτητας από τις τιμές που πάρθηκαν από τα σημεία στην διατομή της εξόδου ,αλλά, και με τη βοήθεια του λογισμικού Surfer 8.
- Υπολογισμός έντασης αναταραχής (τύρβης).



Εικόνα 13. Σχηματική αναπαράσταση πειράματος και της γραμμής μέτρησης.

Αισθητήρια μέτρησης

Σωλήνας Pitot-Prandtl

Ένα από τα βασικά εργαλεία μέτρησης της ταχύτητας του αέρα αποτελεί ο **σωλήνας Pitot**. Ο μετρητικός σωλήνας Pitot, ο οποίος πήρε το όνομα του προς τιμή του εφευρέτη, του Henri Pitot, αποτελείται ουσιαστικά από ένα κομμάτι σωλήνα του οποίου το ένα άκρο είναι ανοικτό. Τοποθετείται παράλληλα με τη ροή και με τρόπο ώστε το ανοικτό άκρο να είναι αντιμέτωπο με τη ροή. Το άλλο άκρο του σωλήνα συνήθως συνδέεται με μανόμετρο μέσω εύκαμπτου αγωγού. Όταν δεν υπάρχει ροή προς το μανόμετρο, το ρευστό στο ανοικτό άκρο του σωλήνα ακινητοποιείται, δημιουργείται σημείο ανακοπής και ως εκ τούτου, η πίεση εκεί προκύπτει να είναι 0, δηλαδή το άθροισμα της στατικής και της δυναμικής πίεσης:

$$P_{ολ} = P_{στατ} + \frac{1}{2} * \rho * U_{\infty}^2$$

[Όπου U_{∞} είναι η ταχύτητα της ροής και ρ είναι η (σταθερή) πυκνότητα του ρευστού.]

Παρακάτω παρουσιάζεται μια κλασική περίπτωση μέτρησης της ολικής πίεσης της ροής ρευστού σε κλειστό αγωγό. Ο σωλήνας Pitot είναι συνδεδεμένος με μανόμετρο τύπου U που περιέχει υγρό πυκνότητας $\rho_{μαν}$. Το ελεύθερο στόμιο του μανομέτρου είναι ανοικτό στο περιβάλλον, οπότε εκεί εφαρμόζεται η ατμοσφαιρική πίεση $P_{ατμ}$ (Εικόνα 14). Αρα

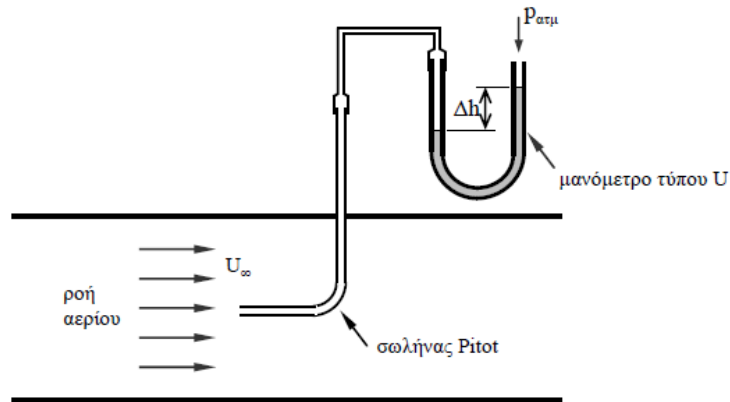
$$P_{ολ} = \rho_{μαν} * g * \Delta h + P_{ατμ}$$

Ακόμα μπορεί και να ζητείται η τιμή της ολικής πίεσης ως προς την ατμοσφαιρική, δηλαδή η σχετική ολική πίεση η οποία προκύπτει από μετατροπή της παραπάνω σχέσης:

$$(P_{ολ} - P_{ατμ}) = P_{μαν} * g * \Delta h$$

Άρα:

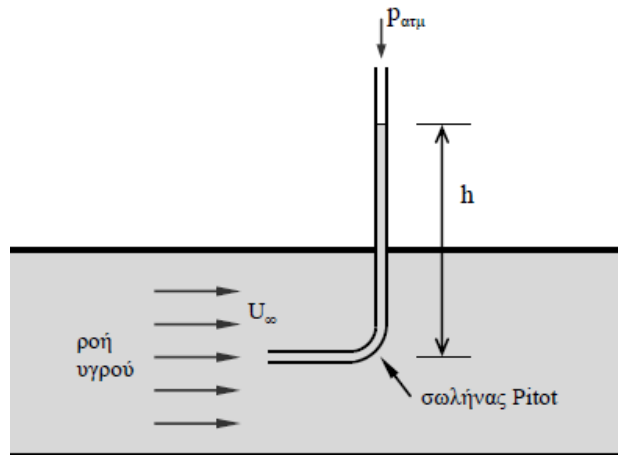
$$P_{σχ} = P_{μαν} * g * \Delta h$$



Εικόνα 14. Χρήση σωλήνα Pitot για τη μέτρηση της ολικής πίεσης ροής αερίου σε κλειστό αγωγό με μανόμετρο τύπου U

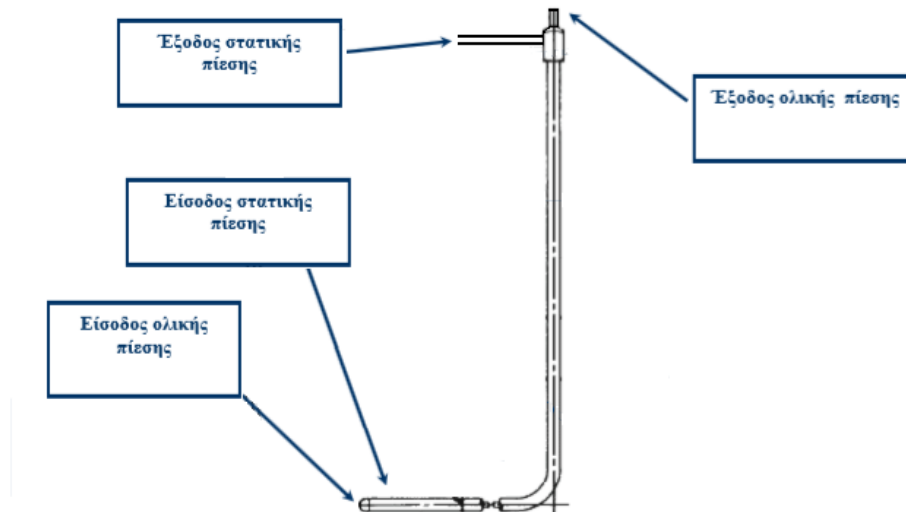
Παράλληλα αν ζητείται να μετρηθεί η τιμή της ολικής πίεσης της ροής «υγρού» σε κλειστό αγωγό, μπορεί να χρησιμοποιηθεί το σύστημα που φαίνεται στο εικόνα 15. Το υγρό μέσω του ανοικτού άκρου, εισέρχεται στο εσωτερικό του σωλήνα Pitot, και προωθείται στο κατακόρυφο στέλεχος σε ύψος h . Να σημειωθεί ότι το άνω άκρο του στελέχους είναι ανοικτό με πίεση = $P_{ατμ}$. Οπότε:

$$P_{ολ} = \rho_{υργού} * g * h + P_{ατμ}$$

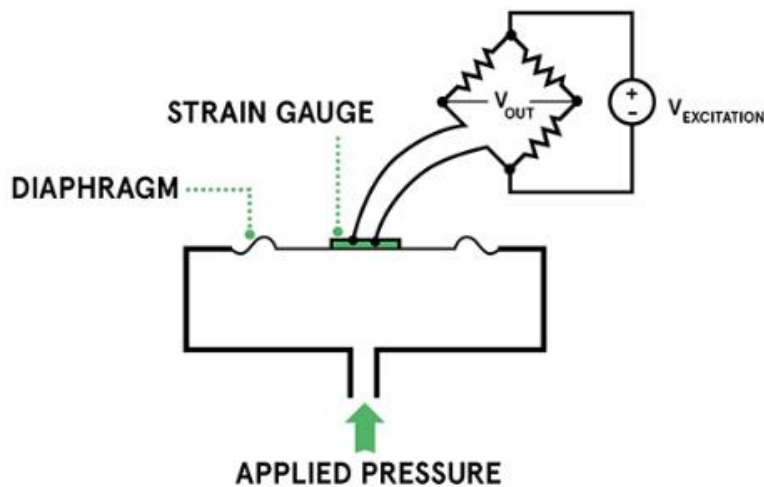


Εικόνα 15. Χρήση σωλήνα Pitot για τη μέτρηση της ολικής πίεσης ροής υγρού σε κλειστό αγωγό με κατακόρυφο στέλεχος

Διπλωματική εργασία «Αξιολόγηση του πεδίου ροής στο χώρο δοκιμών της αεροσήραγγας του Εργαστηρίου Αιολικής Ενέργειας του ΕΛΜΕΠΑ», Παχάκης Γεώργιος.



Εικόνα 16. Σωλήνας Pitot-Prandtl



Εικόνα 17. Οι μετρήσεις της πίεσης των πιεζοηλεκτρικών μετρητών πραγματοποιούνται χρησιμοποιώντας κύκλωμα γέφυρας Wheatstone

Θερμική ανεμομετρία (Hot wire)

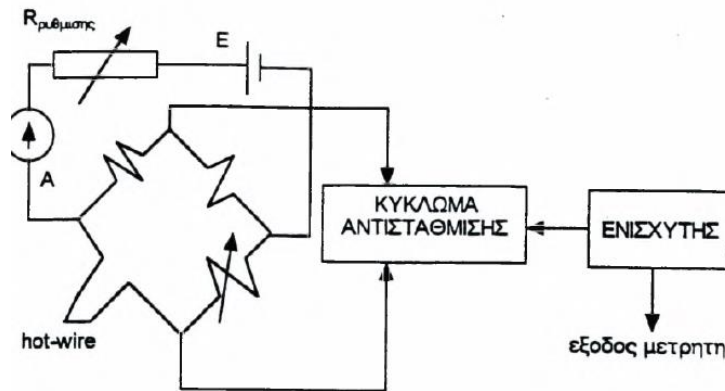
Το ανεμόμετρο θερμού σύρματος ή αλλιώς Hot wire είναι ένα αισθητήριο όργανο που ανιχνεύει τις αλλαγές της θερμοκρασίας με τη χρήση ενός σύρματος το οποίο είναι εκτεθειμένο στη κίνηση του ρευστού-αέρα. Το σύρμα αυτό λειτουργεί σαν

μια μεταβλητή αντίσταση, η τιμή της οποίας εξαρτάται από το υλικό κατασκευής του σύρματος αλλά και 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 κάτι που το καθιστά αξιόπιστο όργανο στην μέτρηση της ταχύτητας του ρευστού.

Τι είναι όμως αυτό που κάνει το hot wire χρήσιμο σε αυτή την εφαρμογή;

- Λόγω του μικρού του μεγέθους έχει μηδαμινή αλληλεπίδραση με την ροή του ανέμου.
- Η διακριτική του ικανότητα μετρήσεων καθώς και η μεγάλη ευαισθησία που έχει με μικρές ταχύτητες ανέμου.
- Υψηλή απόκριση σε ξαφνικές αλλαγές της ταχύτητας του ρευστού.
- Χαμηλό κόστος.

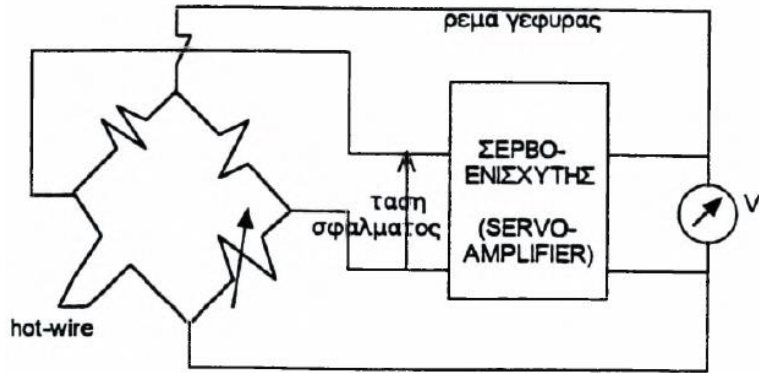
Διακρίνονται δύο τύποι λειτουργίας του ανεμομέτρου θερμικού νήματος. Ανάλογα με τον τρόπο που ελέγχεται το ηλεκτρικό ρεύμα που θερμαίνει τον αισθητήρα. Όπως φαίνεται και στις εικόνες 18 και 19, η πρώτη περίπτωση είναι η λειτουργία με σταθερό ρεύμα και η δεύτερη είναι με σταθερή θερμοκρασία. Στην πρώτη περίπτωση, το ανεμόμετρο σταθερού ρεύματος χρησιμοποιείται βασικά για μετρήσεις θερμοκρασίας, καθώς σταθερό ρεύμα μικρής τάσης εφαρμόζεται στο νήμα. Κάτω από τις συνθήκες αυτές, η ευαισθησία ταχύτητας είναι αμελητέα και ο αισθητήρας λειτουργεί σαν διάταξη αντίστασης-θερμοκρασίας, μερικές φορές αναφέρεται ως κρύο νήμα.



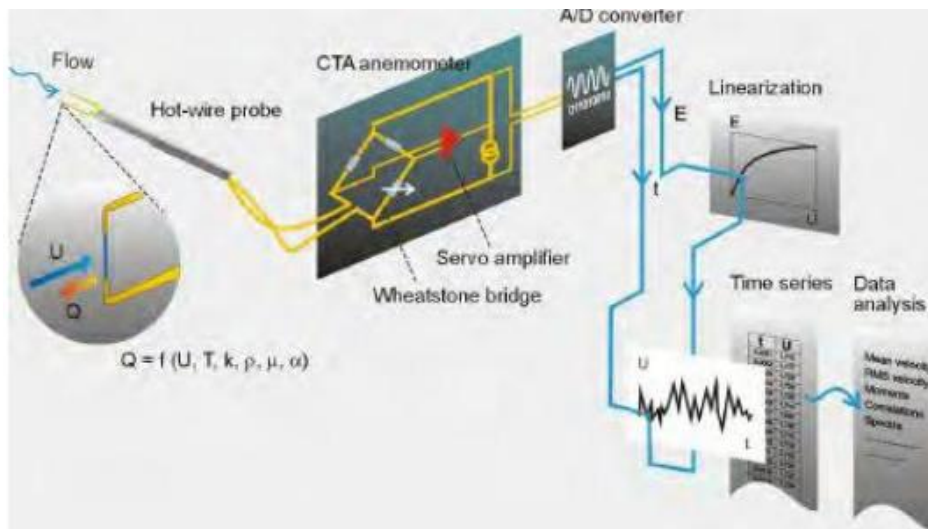
Εικόνα 18. Ανεμόμετρο σταθερού ρεύματος

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.

Διπλωματική εργασία «Αξιολόγηση του πεδίου ροής στο χώρο δοκιμών της αεροσήραγγας του Εργαστηρίου Αιολικής Ενέργειας του ΕΛΜΕΠΑ», Παχάκης Γεώργιος.



Εικόνα 19. Ανεμόμετρο σταθερής θερμοκρασίας



Εικόνα 20. Αναλυτική απεικόνιση γραμμής μέτρησης Ανεμομετρίας Θερμού Σύρματος (Hot-Wire).

Πιστοποίηση-Βαθμονόμηση αισθητήρων

Εξοπλισμός του εργαστηρίου που χρησιμοποιήθηκε:

1. Αεροσήραγγα του εργαστηρίου αιολικής ενέργειας του Τ.Ε.Ι. Κρήτης
2. Inverter



Εικόνα 21. Δεξιά είναι ο inverter και αριστερά ο γενικός διακόπτης

3. Ηλεκτρικός κινητήρας 18,5kW
4. Pitot-Prandtl
5. Ανεμόμετρο kimo
 - Κεντρική μονάδα VT200
 - Αισθητήριο θερμού σύρματος (Hot-wire)



Εικόνα 22. Κεντρική μονάδα Kimo VT200 μαζί με τα παρελκόμενα

6. Τράπεζα δύο (2) αξόνων x,y

Διπλωματική εργασία «Αξιολόγηση του πεδίου ροής στο χώρο δοκιμών της αεροσήραγγας του Εργαστηρίου Αιολικής Ενέργειας του ΕΛΜΕΠΑ», Παχάκης Γεώργιος.



Εικόνα 23. Τράπεζα 2 αξόνων XY

7. Διαφορικός αισθητήρας πίεσης (differential pressure transmitter HD408T)



Εικόνα 24. Differential pressure transmitter HD408T

Οι διαφορικοί αισθητήρες ατμοσφαιρικής πίεσης έχουν 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. Οι οποίες χαρακτηρίζονται για την εξαιρετική επαναληψιμότητα.

Παράλληλα το σήμα εξόδου που δίνει ο αισθητήρας ρυθμίζεται έτσι ώστε να παρέχει ρεύμα εξόδου γραμμικά ανάλογο της εφαρμοζόμενης διαφορικής πίεσης.

Οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες, είναι βαθμονομημένοι από το κατασκευαστή και είναι έτοιμοι για άμεση χρήση. Κυρίως χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της πίεσης χώρων υγειονομικού ενδιαφέροντος, μελέτη ροής, σε μηχανήματα συσκευασίας, αλλά και συστήματα ελέγχου εξαερισμού.

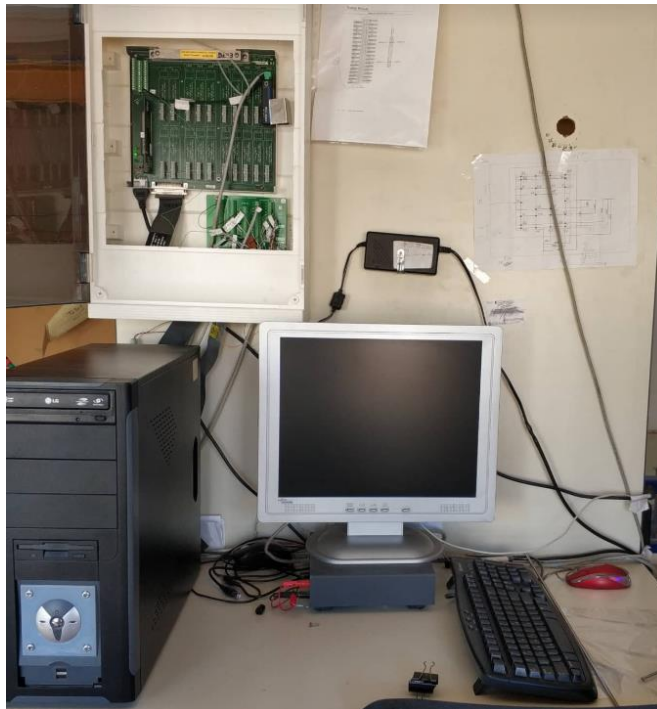
Να σημειωθεί ότι τα αισθητήρια HD 408T έχουν εύρος μέτρησης για πίεση 10mbar έως 2000mbar.

8. Πλακέτα διαμόρφωσης και ενίσχυσης σήματος δεδομένων SC-2345 (Signal conditioning) της National Instruments

Και όλα τα αισθητήρια συνδέονται πάνω σε:

9. Πλακέτα σύνδεσης αισθητήρων CB-68LP (Connection board)

10. Ηλεκτρονικός υπολογιστής με εγκατεστημένο Lab View v7.0



Εικόνα 25. Ηλεκτρονικός υπολογιστής μαζί με τον πίνακα συλλογής δεδομένων.

Διαδικασία βαθμονόμησης

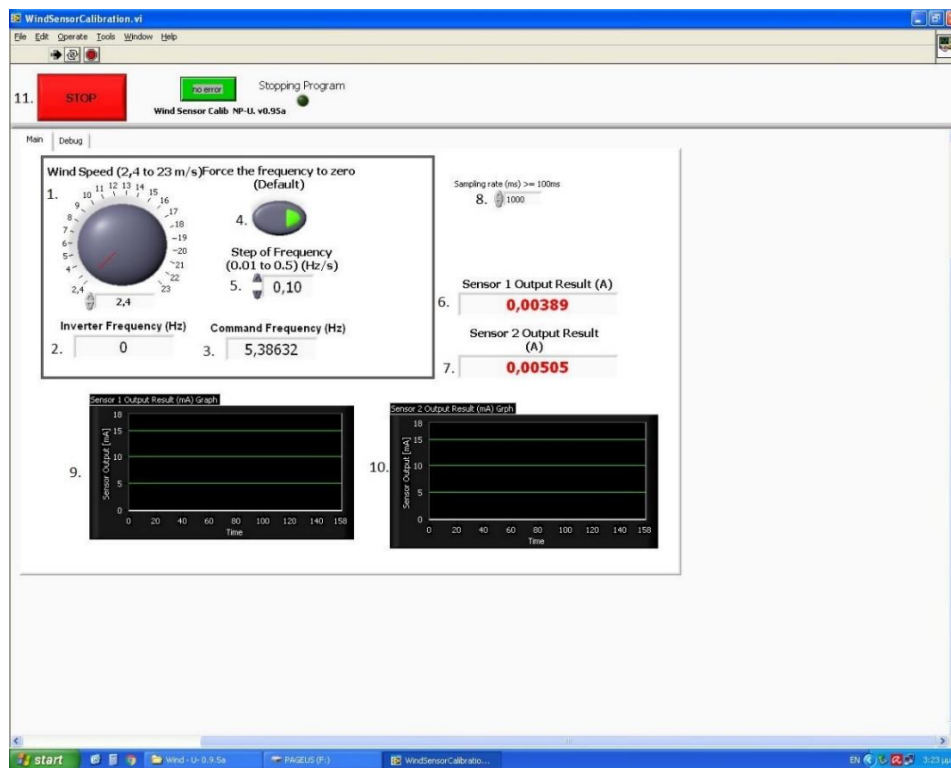
Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας της βαθμονόμησης αισθητηρίων και της γραμμής μέτρησης χρησιμοποιήθηκε ένα πρόγραμμα κατασκευασμένο σε Lab View, το οποίο μας παρουσιάζει σε αληθινό χρόνο τις μετρήσεις των αισθητηρίων Pitot και διαφορικού μετρητή πίεσης Static. Να σημειωθεί ότι η βαθμονόμηση βασίστηκε στο αισθητήριο Hot-wire καθώς το όργανο αυτό είναι βαθμονομημένο και έτοιμο προς χρήση.

Προετοιμασία Βαθμονόμησης.

Αρχικά ετοιμάζεται η διάταξη των αισθητήρων, όπως φαίνεται παραπάνω (εικόνα 27). Ο δέκτης του Hot-wire βρίσκεται στο κέντρο στο κέντρο της εξόδου της αεροσήραγγας. Το στόμιο του σωλήνα Pitot-Prandtl είναι τοποθετημένο σε απόσταση 5 φορές την διάμετρο του hot-wire, στο δεξί μέρος του εσωτερικού του ακροφυσίου της αεροσήραγγας.

Εν συνεχεία, στη επιφάνεια εργασίας του ηλεκτρονικού υπολογιστή, επιλέγουμε τον φάκελο Wind - U- 0.9.5a και ανοίγουμε το πρόγραμμα 'WindSensorCalibration.vi'

Παρακάτω φαίνεται το περιβάλλον του 'vi' αυτού.



Εικόνα 26. περιβάλλον 'vi'

1. **Wind Speed:** Περιστροφικό Indicator μέσω του οποίου γίνεται επιλογή πλασματικά της επιθυμητής ταχύτητας.

2. **Inverte Frequency**: Δείκτης συχνότητας Inverter όπου αναγράφεται η συχνότητα του εν ώρα λειτουργίας.
3. **Command Frequency**: Είναι η συχνότητα που έχει ως εντολή ο inverter ώστε να φτάσει την οριζόμενη ταχύτητα.
4. **Force the frequency to zero**: Πατώντας το κουμπί αυτό εξαναγκάζουμε τον Inverter να μηδενίσει τη συχνότητα του. Συνεπώς να σταματήσει και η παραγωγή ροής ανέμου μέσα στην αεροσήραγγα.
5. **Step of Frequency**: Μέσω αυτού γίνεται αυξομείωση της ταχύτητας μεταβολής (βήμα) της συχνότητας και μπορεί να πάρει τιμές από 0,01 έως 0,5 Hz/s.
6. **Sensor 1 Output Result (A)**: Ένδειξη διαφορικού αισθητηρίου πίεσης Static σε Ampere.
7. **Sensor 2 Output Result (A)**: Ένδειξη αισθητηρίου Pitot σε Ampere.
8. **Sample rate**: με το sample rate γίνεται ορισμός της δειγματοληψίας, δηλαδή το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί από μία μέτρηση στην άλλη.
9. **Sensor 1 Output Result (mA) Graph**: Στο γράφημα αυτό γίνεται δυνατή η παρακολούθηση της συμπεριφοράς της ταχύτητας στον διαφορικό αισθητήρα πίεσης (Static) ως προς το χρόνο.
10. **Sensor 2 Output Result (mA) Graph**: Στο γράφημα αυτό γίνεται δυνατή η παρακολούθηση της συμπεριφοράς της ταχύτητας στον σωλήνα Pitot ως προς το χρόνο.
11. **STOP**: Πατώντας το κουμπί αυτό, το πρόγραμμα σταματάει.



Εικόνα 27. Διάταξη Hotwire, Pitot και Static στην έξοδο της αεροσήραγγας

Πορεία μετρήσεων για την βαθμονόμηση

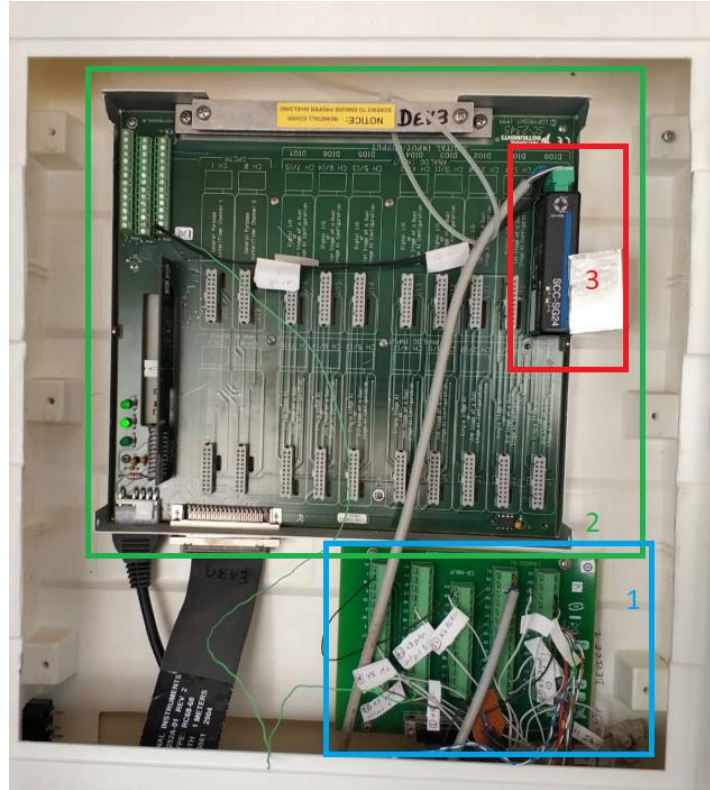
Το πεδίο ταχυτήτων που δίνει ο ανεμιστήρας είναι από σχεδόν 0 έως 30m/s. Λόγω της ευαισθησίας των οργάνων μέτρησης στις μεταβολές στην ροή του ανέμου, οι μετρήσεις έγιναν σε δύο στάδια. Πρώτη ομάδα μετρήσεων, 0 έως 10 m/s και η δεύτερη ομάδα από 11 έως 30m/s.

Στην πρώτη ομάδα μετρήσεων, λόγω της μικρής ταχύτητας ανέμου, έγινε καταγραφή των δεδομένων με βήμα ανά 1, για εξομάλυνση των μετρήσεων. Ενώ στην δεύτερη ομάδα η καταγραφή έγινε με βήμα ανά 2 λόγω της σαφώς μεγαλύτερης ταχύτητας του ανέμου, η ροή του οποίου επηρεάζεται ελάχιστα από τυχόν ριπές ανέμου από τον περιβάλλοντα χώρο του εργαστηρίου. Οι τιμές που εμφανίζονται στην οθόνη του υπολογιστή είναι σε Ampere. Τα σωληνάκια της ολικής και στατικής πίεσης από τα όργανα Pitot-Prandtl και Static συνδέονται σε διαφορικού αισθητήρες πίεσης (HD408T) στο κύκλωμα των οποίων υπάρχει γέφυρα Wheatstone, μετατρέποντας την πίεση σε Ampere (A). Τα σήματα αυτά οδηγούνται σε πλακέτα σύνδεσης αισθητήρων CB-68LP. Όπου στη συνέχεια καταλήγουν σε πλακέτα διαμόρφωσης και ενίσχυσης σήματος δεδομένων SC-2345 και τέλος γίνεται ρύθμιση του σήματος της τάσης εισόδου των αισθητήρων πίεσης με τη χρήση καρτών όπως είναι η SCC-SG24 (Εικόνα 29).



Εικόνα 28. Εσωτερικό διαφορικού αισθητήρα(HD408T) .

Διπλωματική εργασία «Αξιολόγηση του πεδίου ροής στο χώρο δοκιμών της αεροσήραγγας του Εργαστηρίου Αιολικής Ενέργειας του ΕΛΜΕΠΑ», Παχάκης Γεώργιος.



Εικόνα 29. Πινακας συλλογής δεδομένων. 1: CB-68LP, 2: SC2345, 3: SCC-SG24

Sensor 1 Output Result (A)
0,00389
Sensor 2 Output Result (A)
0,00505

Εικόνα 30. Ένδειξη για Static πάνω και για Pitot κάτω.

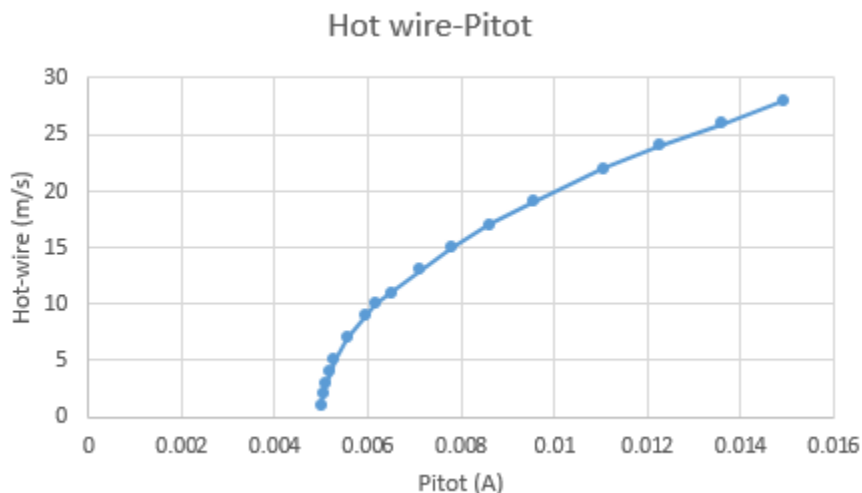
Να σημειωθεί ότι, οι ενδείξεις από τα όργανα έγιναν χειροκίνητα. Καθώς, το πρόγραμμα 'WindSensorCalibration.vi' δεν έχει λειτουργία αυτόματης καταγραφής. Παρακάτω γίνεται παράθεση των ενδείξεων.

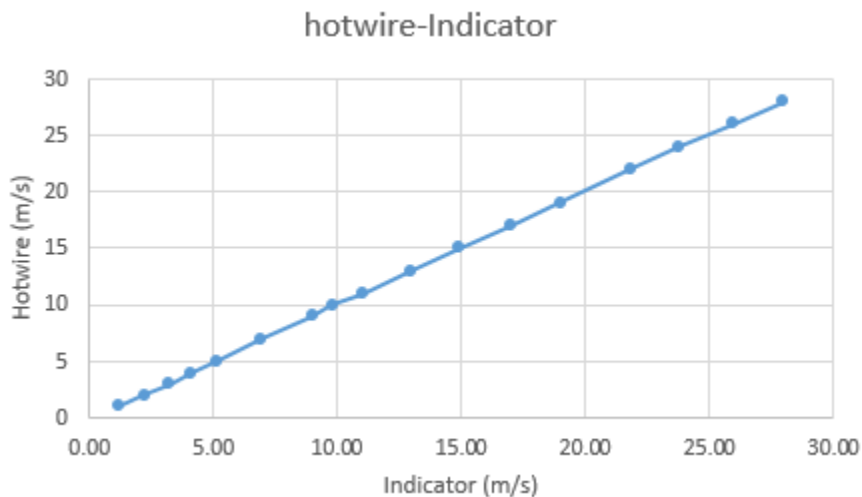
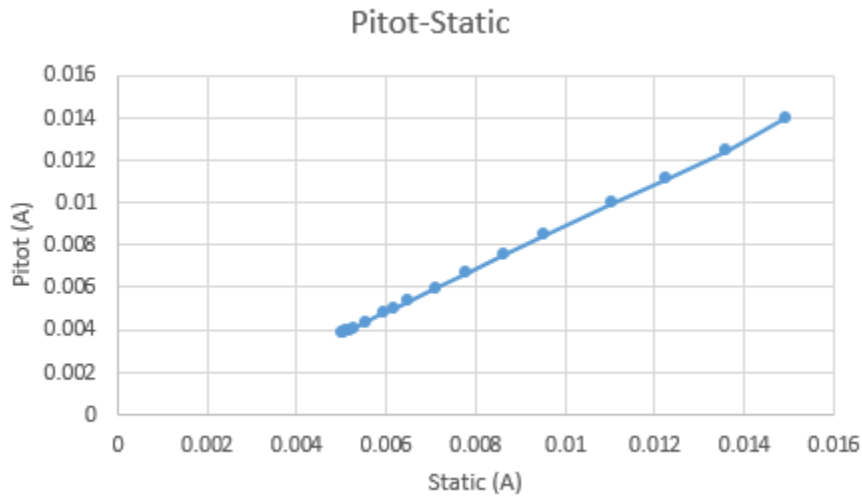
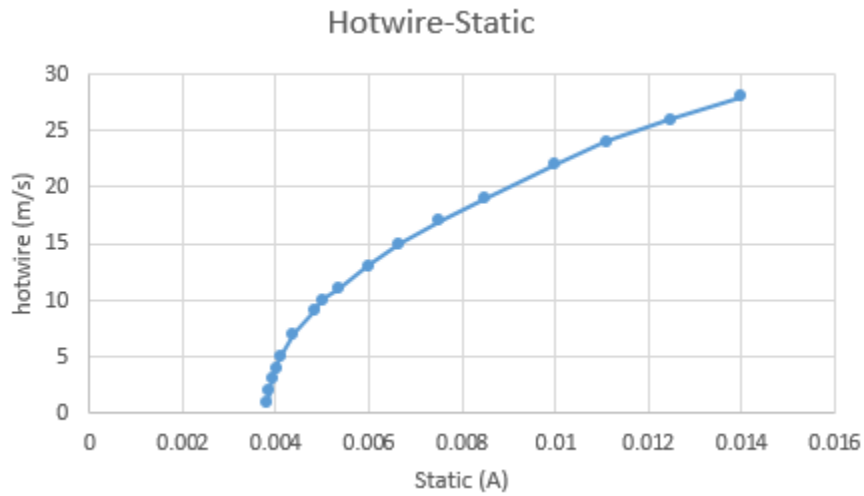
Διπλωματική εργασία «Αξιολόγηση του πεδίου ροής στο χώρο δοκιμών της αεροσήραγγας του Εργαστηρίου Αιολικής Ενέργειας του ΕΛΜΕΠΑ», Παχάκης Γεώργιος.

hotwire(m/s)	indicator	s1(A)	s2(A)
1	1,18	0,00383	0,00501
2	2,25	0,00387	0,00505
3	3,24	0,00393	0,00511
4	4,12	0,00401	0,00519
5	5,18	0,00410	0,00528
7	6,95	0,00439	0,00556
9	9,00	0,00483	0,00597
10	9,80	0,00500	0,00617
11	11,02	0,00534	0,00651
13	13,00	0,00599	0,00713
15	14,95	0,00666	0,00778
17	16,98	0,00751	0,00861
19	19,00	0,00849	0,00954
22	21,85	0,00999	0,01105
24	23,80	0,01110	0,01225
26	25,95	0,01247	0,01360
28	28,00	0,01400	0,01495
30	30,00	0,01600	0,01650

Πίνακας 1. Ενδείξεις από τα αισθητήρια Pitot και Static.

Στο τέλος των μετρήσεων βαθμονόμησης των αισθητηρίων Pitot-prandtl και static, κατασκευάστηκαν οι παρακάτω καμπύλες ένδειξης σε Ampere του εκάστοτε διαφορικού αισθητήρα σε σχέση με τη μετρούμενη ταχύτητα από το βαθμονομημένο ανεμόμετρο θερμού σύρματος:





Οι οποίες χαρακτηρίζονται από επαναληψιμότητα, καθώς κάθε επόμενη μέτρηση και γραφική παράσταση ταυτίζεται με τις προηγούμενες.

Επαλήθευση βαθμονόμησης

Μετά το πέρας της διαδικασίας ης βαθμονόμησης των αισθητηρίων Pitot και Static με την βοήθεια του Hot-wire και της καταγραφής των μετρήσεων μέσω του προγράμματος “WindSensorCalibration.vi” προέκυψαν οι παρακάτω πίνακες για τα όργανα Pitot και Static. .

sensor_mA	Speed_mps
3,827	1
3,870	2
3,930	3
4,010	4
4,117	5
4,390	7
4,830	9
5,340	11
5,990	13
6,663	15
7,510	17
8,490	19
9,990	22
11,100	24
12,467	26
14,000	28
16,000	30

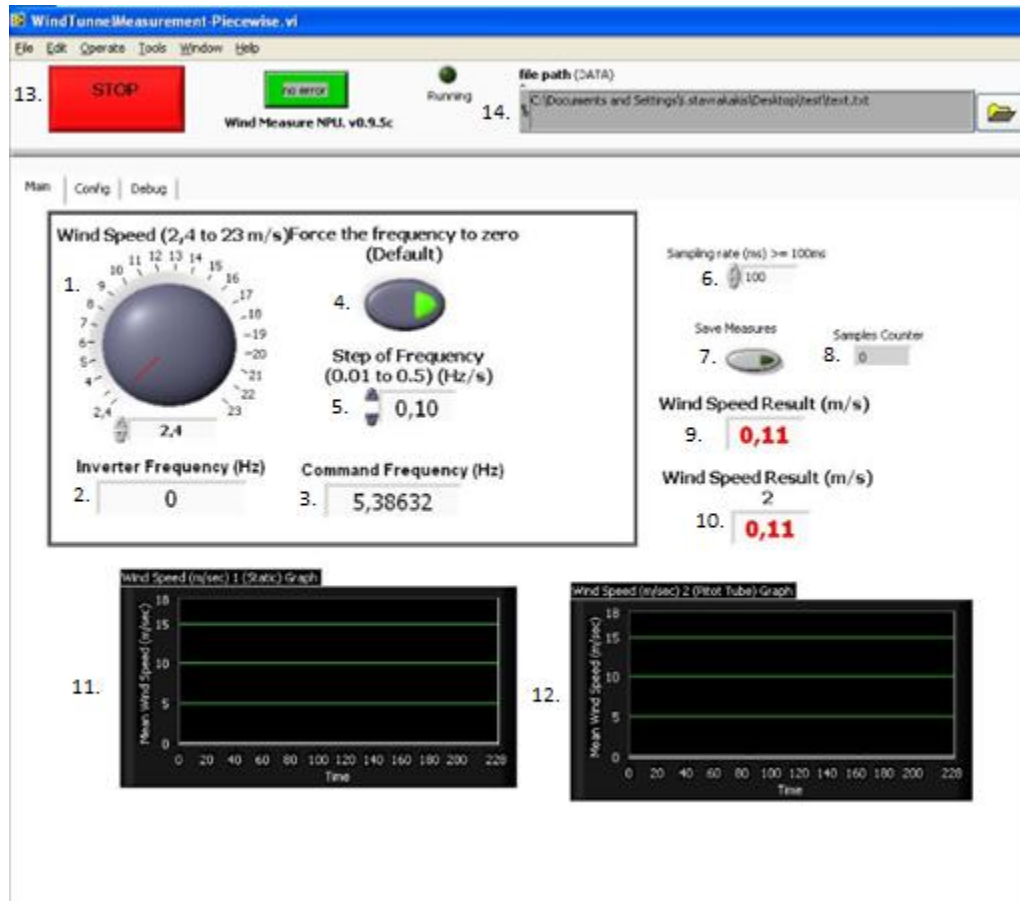
Πίνακας 2. Ατιστοιχία ταχύτητας ανέμου μέτρων ανα δευτερόλεπτα (m/s) με τιμές σε milliAmpere (mA) για το όργανο Static.

sensor_mA	Speed_mps
5,005	1
5,045	2
5,105	3
5,185	4
5,300	5
5,560	7
5,970	9
6,507	11
7,130	13
7,782	15
8,608	17
9,543	19
11,050	22
12,250	24
13,600	26
14,950	28
16,500	30

Πίνακας 3. Αντιστοιχία ταχύτητας ανέμου μέτρων ανα δευτερόλεπτα (m/s) με τιμές σε milliAmpere (mA) για το όργανο Pitot.

Στη συνέχεια τα αρχεία αυτά αποθηκεύτηκαν σε μορφή .txt (tab delimited), μορφή που δέχεται το πρόγραμμα για την επαλήθευση των μετρήσεων. Εν συνεχεία τα αρχεία αυτά τοποθετούνται στον φάκελο κλήσης αρχείων του προγράμματος, με όνομα “To Sensor Config”.

Παρακάτω γίνεται παράθεση του προγράμματος “WindTunnelMeasurement.vi” σε περιβάλλον προγραμματισμού Lab-View.

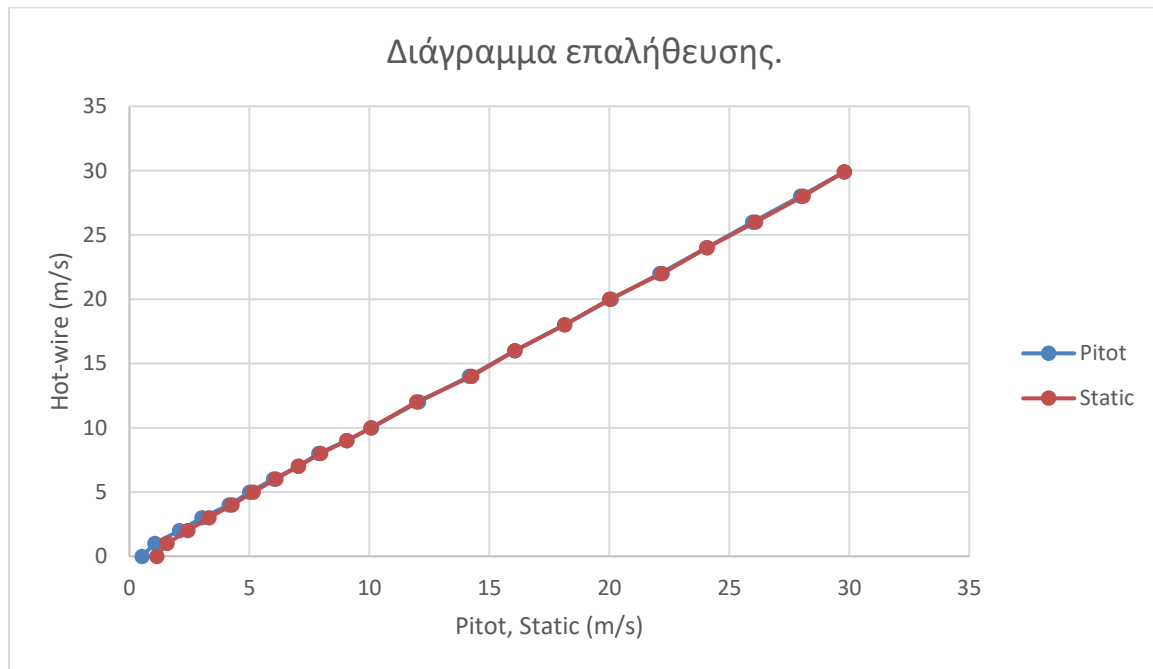


Εικόνα 31. Περιβάλλον "Vi"

1. **Wind Speed:** Περιτροφικό Indicator μέσω του οποίου γίνεται επιλογή πλασματικά της επιθυμητής ταχύτητας.
2. **Inverte Frequency:** Δείκτης συχνότητας Inverter όπου αναγράφεται η συχνότητα του εν ώρα λειτουργίας.
3. **Command Frequency:** Είναι η συχνότητα που έχει ως εντολή ο inverter ώστε να φτάσει την οριζόμενη ταχύτητα.
4. **Force the frequency to zero:** Πατώντας το κουμπί αυτό εξαναγκάζουμε τον Inverter να μηδενίσει τη συχνότητα του. Συνεπώς να σταματήσει και η παραγωγή ροής ανέμου μέσα στην αεροσήραγγα.
5. **Step of Frequency:** Μέσω αυτού γίνεται αυξομείωση της ταχύτητας μεταβολής (βήμα) της συχνότητας και μπορεί να πάρει τιμές από 0,01 έως 0,5 Hz/s.

6. **Sample rate:** με το sample rate γίνεται ορισμός της δειγματοληψίας, δηλαδή το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί από μία μέτρηση στην άλλη.
7. **Save Measures:** Πατώντας από το κουμπί γίνεται καταγραφή των τιμών της ταχύτητας ανέμου από τα όργανα Pitot και Static σε (m/s)
8. **Samples Counter:** Ζωντανή απεικόνιση αριθμού δειγμάτων
9. **Wind Speed Result (m/s) Static:** Ένδειξη διαφορικού αισθητηρίου πίεσης Static σε μέτρα ανά δευτερόλεπτα (m/s) .
10. **Wind Speed Result (m/s) Pitot tube:** Ένδειξη αισθητηρίου Pitot σε μέτρα ανά δευτερόλεπτα (m/s).
11. **Wind Speed (m/s) 1 Static Graph:** Στο γράφημα αυτό γίνεται δυνατή η παρακολούθηση της συμπεριφοράς της ταχύτητας στον διαφορικό αισθητήρα πίεσης (Static) ως προς το χρόνο.
12. **Wind Speed (m/s) 2 Pitot tube Graph:** Στο γράφημα αυτό γίνεται δυνατή η παρακολούθηση της συμπεριφοράς της ταχύτητας στον σωλήνα Pitot ως προς το χρόνο.
13. **STOP:** Πατώντας το κουμπί αυτό, το πρόγραμμα σταματάει.
14. **File path:** Εδώ γίνεται ορισμός του “μονοπατιού” αποθήκευσης των μετρήσεων των οργάνων μέτρησης σε μορφή κειμένου txt.

Από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα μεταξύ των Hot-wire, Pitot tube και Static.

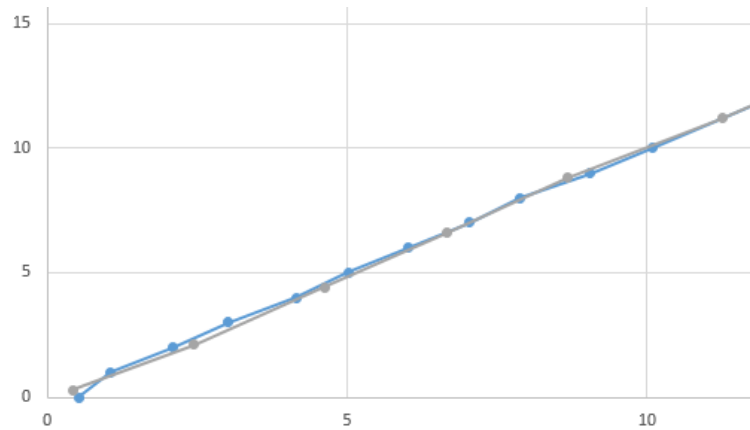


Εικόνα 32. διάγραμμα επαλήθευσης.

Παρατηρώντας το διάγραμμα προκύπτει το συμπέρασμα ότι έχουμε επαλήθευση των μετρήσεων, καθώς έχουμε ταύτιση των τιμών μεταξύ των οργάνων μέτρησης με αυτών του αισθητηρίου Hot-wire το οποίο είναι και το σημείο αναφοράς.

Διπλωματική εργασία «Αξιολόγηση του πεδίου ροής στο χώρο δοκιμών της αεροσήραγγας του Εργαστηρίου Αιολικής Ενέργειας του ΕΛΜΕΠΑ», Παχάκης Γεώργιος.

Παράλληλα παρατηρείται μια μικρή διακύμανση στις μετρήσεις σε μικρές ταχύτητες ανέμου. **Οι οποίες οφείλουν την ύπαρξή τους σε ριπές ανέμου μέσα στο χώρο του εργαστηρίου.**



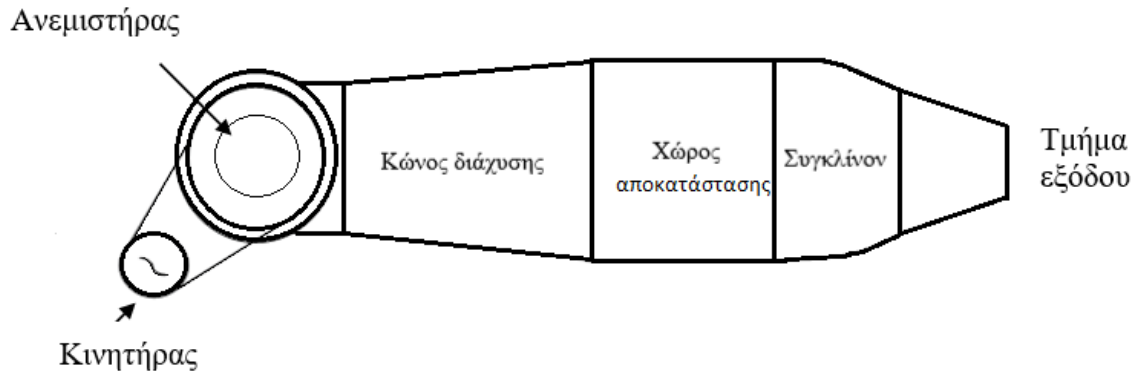
Εικόνα 33. Μικρές διακυμάνσεις μετρήσεων ταχύτητας ανέμου.

Τμήματα αεροσήραγγας εργαστηρίου

Η αεροσήραγγα του Εργαστηρίου αιολικής ενέργειας είναι ανοικτού τύπου με ανοικτό χώρο δοκιμών. Η διατομή του ακροφυσίου εξόδου είναι 65cm ύψος και 65cm πλάτος.



Εικόνα 34. Η αεροσήραγγα του εργαστηρίου



Εικόνα 35. τμήματα αεροσήραγγας

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

1. Τον ανεμιστήρα που πρόκειται για μια φυγοκεντρική αντλία, τύπου NICOTRA VRE ADH 710R με ισχύ 14,7kW, διαστάσεων 898x898 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 .



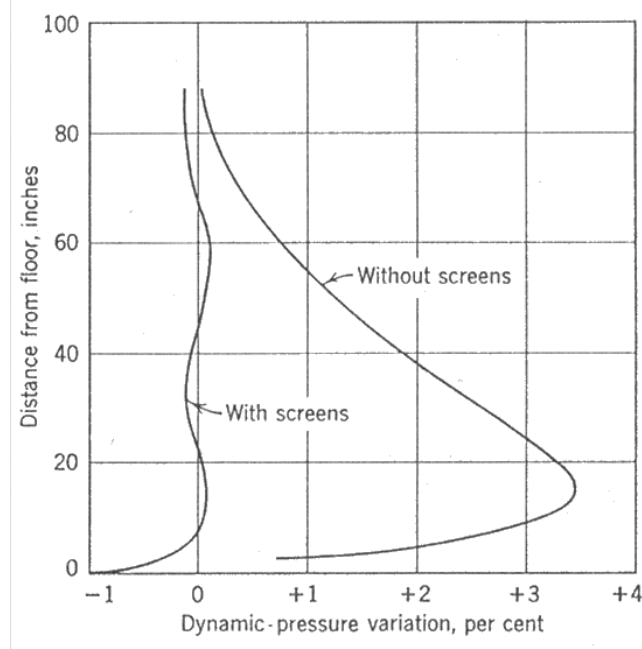
Εικόνα 36. Ο κινητήρας με τον ανεμιστήρα



Εικόνα 37. Ο inverter μαζί με τον γενικό διακόπτη

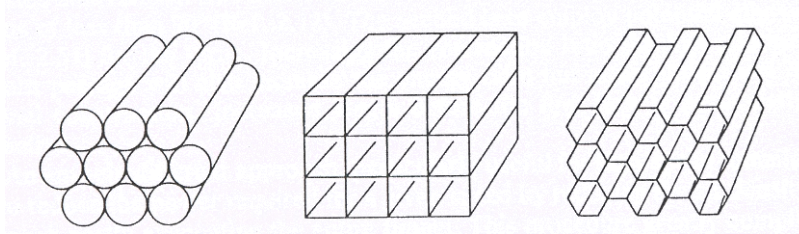
2. Το επόμενο τμήμα είναι ο κόνος διάχυσης της που έχει ως σκοπό τη μείωση της ταχύτητας της ροής του ανέμου.
3. Στη συνέχεια συναντάμε τον χώρο ή χώρο αποκατάστασης όπου η ροή από στροβιλώδης γίνεται στρωτή. Η μετατροπή αυτή γίνεται με τη βοήθεια ειδικών σιτών (screens) και κυψελών (Honeycombs).

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 38. Μεταβολή του προφίλ ταχύτητας με χρήση ή όχι σήτας.

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 39. Διάφορες κατηγορίες κυψελών

Η αεροσήραγγα του εργαστηρίου παλιότερα είχε δύο σήτες αλλά, τώρα έχει μία σήτα και μία διάταξη κυψελών τετραγωνικής 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 σιτών και των κυψελών στο χώρο αποκατάστασης όπου η ταχύτητα έχει τη χαμηλότερη τιμή.

4. Τέλος το συγκλίνον ακροφύσιο, στο τμήμα αυτό της αεροσήραγγας γίνεται βαθμιαία μείωση της διατομής με αποτέλεσμα την αύξηση της ταχύτητας της ροής.

O Inverter

Ο inverter της διάταξης είναι Siemens Micromaster 440 με δυνατότητα υποστήριξης από

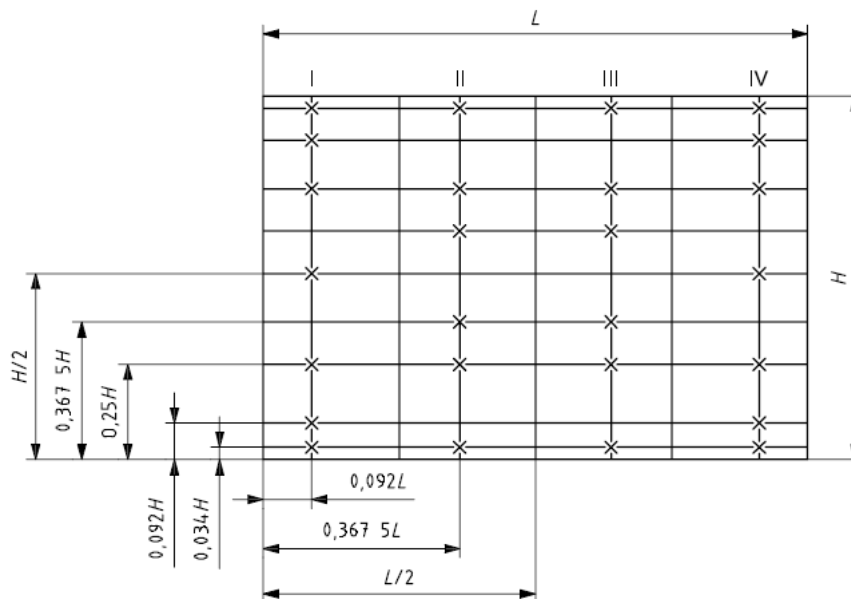
Πρότυπο μέτρησης

Η πιστοποίηση γίνεται με βάση το πρότυπο ISO 3966:2008 το οποίο αναφέρεται για μετρήσεις της ροής ρευστού σε κλειστούς αγωγούς καθώς και τη μέθοδο μέτρησης της ταχύτητας του αέρα με χρήση στατικού σωλήνα Pitot. Το πρότυπο αυτό καθορίζει ακόμα μια μέθοδο για τον προσδιορισμό του όγκου ροής σε κλειστό αγωγό για μια κανονική ροή:

- ενός ρευστού με σταθερή πυκνότητα ή που αντιστοιχεί σε έναν αριθμό Mach που δεν υπερβαίνει το 0,25,
- με ουσιαστικά ομοιόμορφη θερμοκρασία στασιμότητας στην εγκάρσια τομή μέτρησης,
- που ρέει πλήρως στον αγωγό,
- 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 40. Θέση των 26 σημείων μέτρησης σε αγωγό ορθογώνιας διατομής

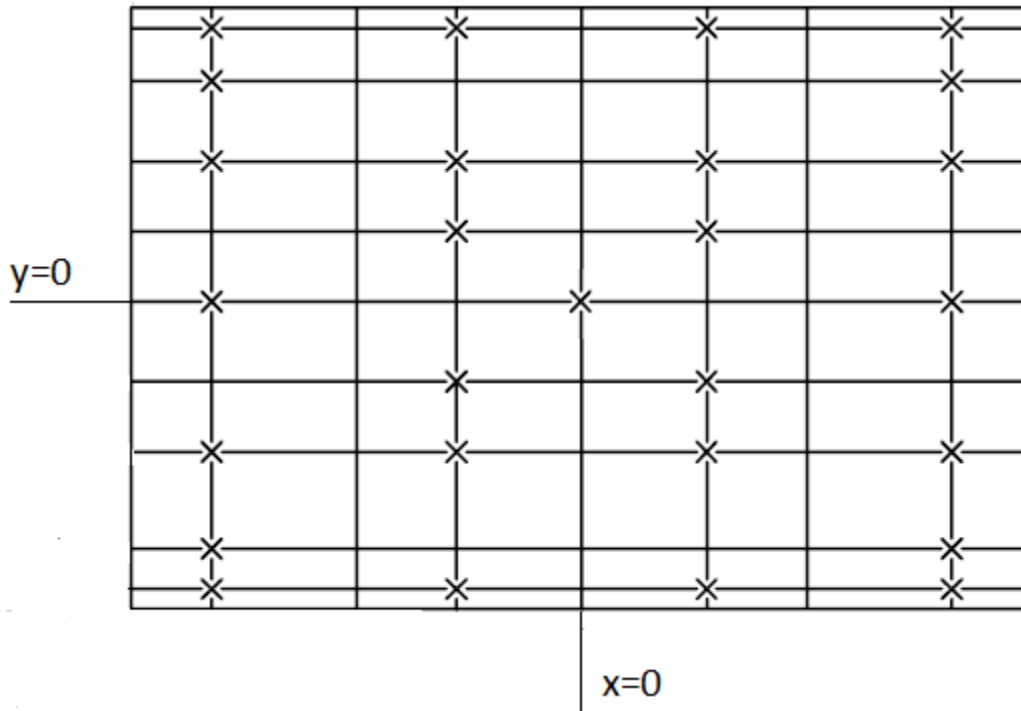
Επίσης, στο πρότυπο ISO 3966:2008 γίνεται παράθεση ενός πίνακα στον οποίο φαίνονται τα 26 σημεία μέτρησης καθώς και οι συντελεστές βαρύτητας που έχουν για την παραγωγή του προφίλ.

Διπλωματική εργασία «Αξιολόγηση του πεδίου ροής στο χώρο δοκιμών της αεροσήραγγας του Εργαστηρίου Αιολικής Ενέργειας του ΕΛΜΕΠΑ», Παχάκης Γεώργιος.

h/H	h/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 41. συντελεστές βαρύτητας σημείων.

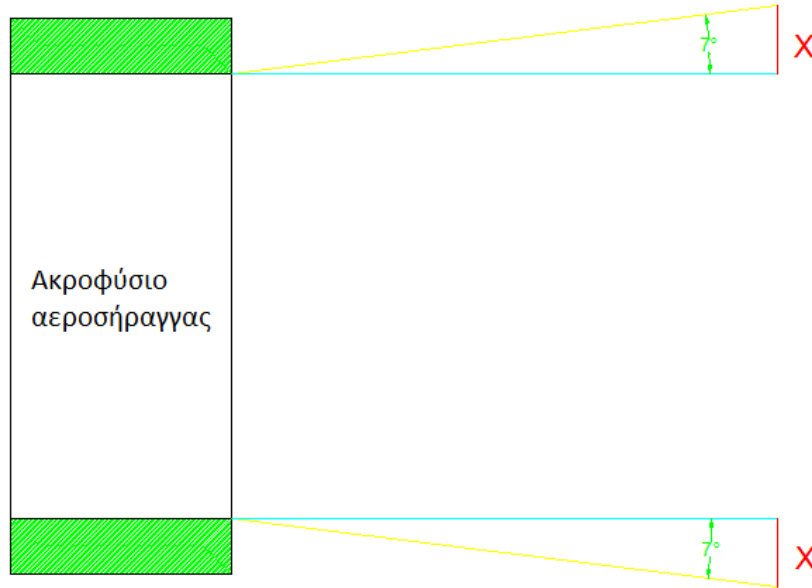
(Να σημειωθεί ότι στο πείραμα προστέθηκε και το κέντρο του ακροφυσίου της αεροσήραγγας. Σύνολο 27 σημεία μέτρησης).



Εικόνα 42. Προσδιορισμός των 27 σημείων μέτρησης στη διατομή του ακροφύσιου της αεροσήραγγας

Για την παραγωγή του προφίλ ανέμου, στην έξοδο της αεροσήραγγας του εργαστηρίου πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις, σε διάφορες αποστάσεις από το πλαίσιο της εξόδου. Οι αποστάσεις που έγιναν οι μετρήσεις είναι οι εξής: 0cm, 15cm, 30cm, 45cm, 60cm.

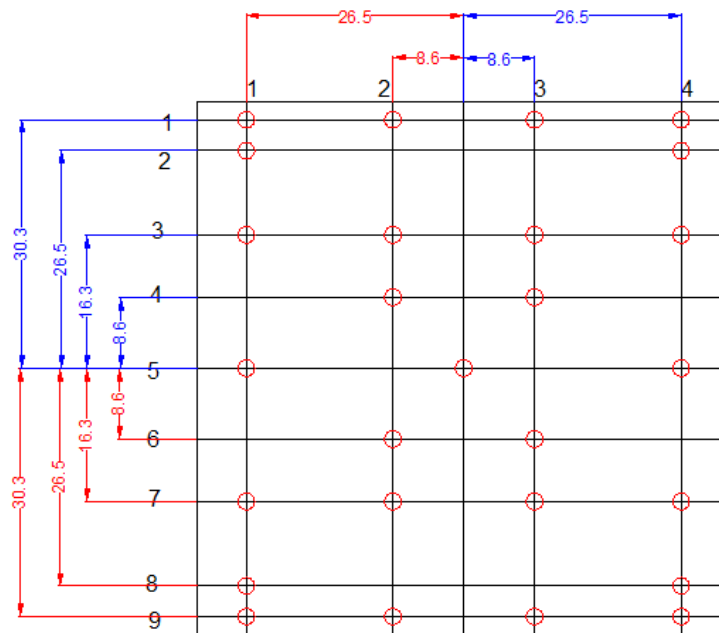
Σε κάθε μία από τις αποστάσεις αυτές από το ακροφύσιο της αεροσήραγγας, αντιστοιχεί και ένα πλαίσιο μετρήσεων 27 σημείων. Τα πλαίσια αυτά προέκυψαν από τον πολλαπλασιασμό της απόστασης, από το ακροφύσιο του εκάστοτε πλαισίου επί την εφαπτομένη γωνίας 7° . Η γωνία των 7° ουσιαστικά είναι η κλίση που αποκτάει η ροή του ανέμου κατά την έξοδο του από το ακροφύσιο.



Εικόνα 43. Σχηματική απεικόνιση της κλίσης που αποκτά η ροή μετά την έξοδο.

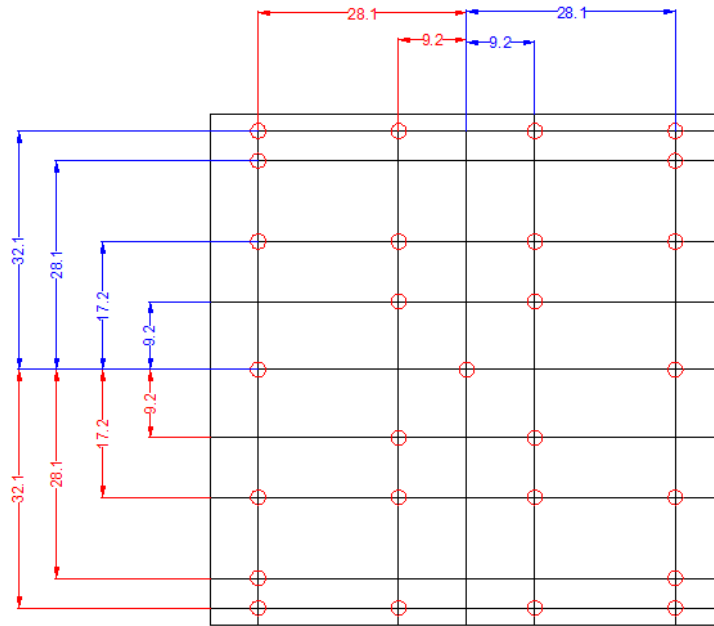
Στη συνέχεια υπολογίστηκαν τα πλαίσια των μετρήσεων, σε κάθε απόσταση από το ακροφύσιο.

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

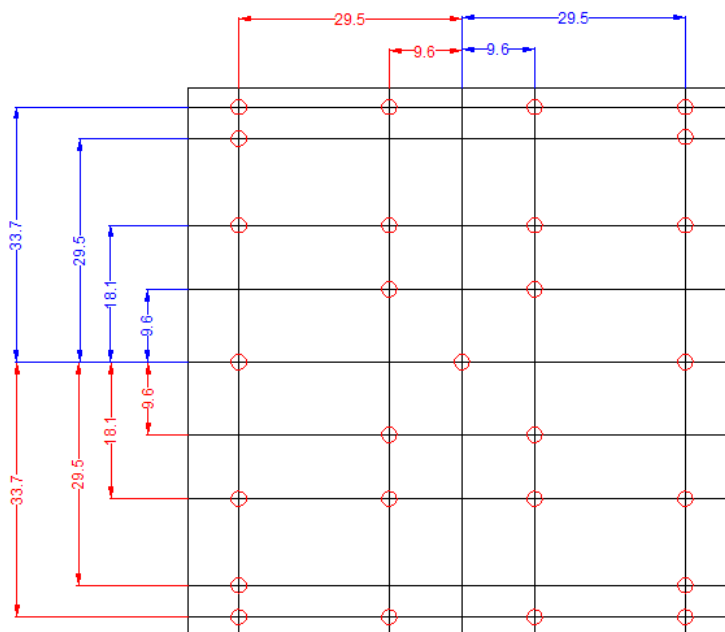


Εικόνα 44. Πλαίσιο μετρήσεων σε απόσταση 0cm από την έξοδο της αεροσήραγγας με διαστάσεις 65x65cm

Διπλωματική εργασία «Αξιολόγηση του πεδίου ροής στο χώρο δοκιμών της αεροσήραγγας του Εργαστηρίου Αιολικής Ενέργειας του ΕΛΜΕΠΑ», Παχάκης Γεώργιος.

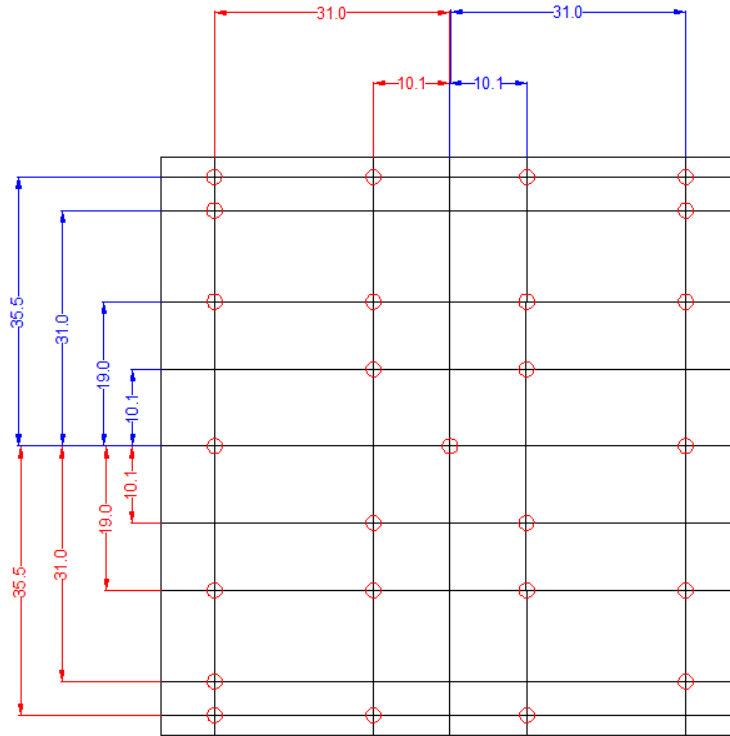


Εικόνα 45. Πλαίσιο μετρήσεων σε απόσταση 15cm από την έξοδο της αεροσήραγγας με διαστάσεις 68x68cm

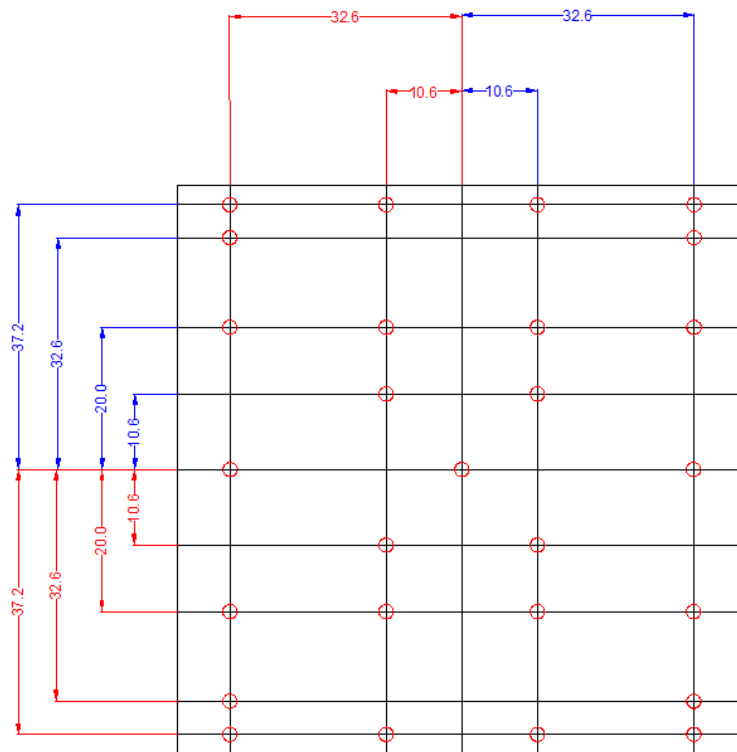


Εικόνα 46. Πλαίσιο μετρήσεων σε απόσταση 30cm από την έξοδο της αεροσήραγγας με διαστάσεις 72.4x72.4cm

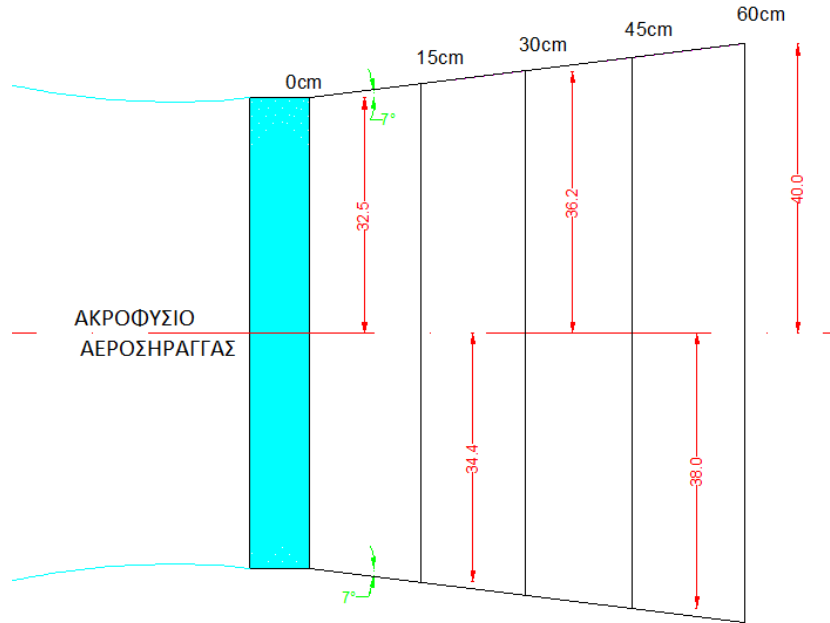
Διπλωματική εργασία «Αξιολόγηση του πεδίου ροής στο χώρο δοκιμών της αεροσήραγγας του Εργαστηρίου Αιολικής Ενέργειας του ΕΛΜΕΠΑ», Παχάκης Γεώργιος.



Εικόνα 47. Πλαίσιο μετρήσεων σε απόσταση 45cm από την έξοδο της αεροσήραγγας με διαστάσεις 76.1x76.1cm



Εικόνα 48. Πλαίσιο μετρήσεων σε απόσταση 60cm από την έξοδο της αεροσήραγγας με διαστάσεις 80x80cm



Εικόνα 49. Συνοψισμός πλαισίων μπροστά από το ακροφύσιο σε πλάγια όψη.

Πρωτόκολλο μέτρησης

Μετά από πολλές διεξαγωγές του πειράματος καταλήξαμε στην παρακάτω διαδικασία:

1. Προφύλαξη από εξωγενείς παράγοντες: Οι μετρήσεις της ταχύτητας του ανέμου 5 και 10 m/s πραγματοποιήθηκαν, έχοντας τη πόρτα του μπαλκονιού, την μεγάλη πόρτα καθώς και το παράθυρο δίπλα από το ακροφύσιο της αεροσήραγγας, όλα κλειστά. (δες τις παρακάτω εικόνες).

Οι μετρήσεις με ταχύτητα ανέμου 15 έως 25 m/s έγιναν, έχοντας τα παραπάνω ανοικτά.

Σημαντική Παρατήρηση: Σε όλες της μετρήσεις, το παράθυρο που βρίσκεται πίσω από τον ανεμιστήρα της αεροσήραγγας, ήταν πάντα ανοικτό (για την τροφοδοσία αέρα στην αεροσήραγγα)

Όλα τα παραπάνω ισχύουν για όλες τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν, στις καθορισμένες από το ακροφύσιο αποστάσεις

Διπλωματική εργασία «Αξιολόγηση του πεδίου ροής στο χώρο δοκιμών της αεροσήραγγας του Εργαστηρίου Αιολικής Ενέργειας του ΕΛΜΕΠΑ», Παχάκης Γεώργιος.



Εικόνα 50. πόρτα μπαλκονιού αριστερά και δεξιά παράθυρο ακροφύσιου



Εικόνα 51. Η μεγάλη πόρτα του εργαστηρίου. (είναι απέναντι από το ακροφύσιο)

2. Σωστή τοποθέτηση σωλήνα Pitot : Για την μεγιστοποίηση της ορθότητας της μέτρησης, πρέπει να υπάρχει σχολαστικότητα. Διότι ο σωλήνας Pitot πρέπει να είναι κάθετος στο επίπεδο της εξόδου και παράλληλα στην ροή του ανέμου. Ειδάλλως τα δεδομένα που θα καταγραφούν θα είναι άχρηστα.
3. Για να είναι μια μέτρηση σωστή: Θα πρέπει η ένδειξη στο hot-wire, να σταθεροποιηθεί στην επιθυμητή ταχύτητα ανέμου με στιγμιαίες αυξομειώσεις

- της τάξης των 0.1-0.2 m/s. Μόλις επιτευχθεί αυτό μπορούμε να προχωρήσουμε στην καταγραφή των μετρήσεων.
4. **Δειγματοληψία:** Λόγω του ότι στο διεθνές πρότυπο δεν γινόταν αναφορά για τον χρόνο καταγραφής των μετρήσεων σε κάθε σημείο. Έγινε αυθαίρετα η επιλογή, η διάρκεια κάθε μέτρησης να είναι 30 δευτερόλεπτα. Όμως σε επόμενη φάση αποδείχτηκε λάθος επιλογή, καθώς υπήρχαν αναταράξεις στο χώρο του εργαστηρίου. Οπότε μετά από δοκιμές αποφασίστηκε, το χρόνος καταγραφής να είναι **10 δευτερόλεπτα σε κάθε σημείο**, το οποίο έχοντας συχνότητα μέτρησης **100ms** αντιστοιχεί σε 100 δείγματα.
 5. **Καταγραφή μέτρησης:** Η καταγραφή των μετρήσεων γίνεται με το WindTunnelMeasurement.vi (εικόνα 31). Μετά την σταθεροποίηση της ένδειξης του Hot-wire, ενεργοποιούμε το κουμπί (save measures). Μετά το πέρας των 10 δευτερολέπτων απενεργοποιούμε το κουμπί πατώντας το ξανά. Τέλος καταγραφής σημείου.
 6. **Αποθήκευση μέτρησης:** Μετά την καταγραφή της μέτρησης, ακολουθώντας το File path υπάρχει ένα αρχείο txt, μέσα στο οποίο έχουν καταγραφεί τα δεδομένα της μέτρησης. Το αρχείο αυτό περιέχει ένα πίνακα με τρεις στήλες, η πρώτη στήλη είναι ο αύξων αριθμός, η δεύτερη είναι οι μετρήσεις από τον διαφορικό αισθητήρα στατικής πίεσης και η τρίτη στήλη είναι οι μετρήσεις από τον σωλήνα Pitot. Το εσωτερικό του αρχείου αυτού το αποθηκεύουμε σε ένα αρχείο excel. Μετά από κάθε αποθήκευση “σώζουμε” το αρχείο στο file path κενό!!!, έτσι ώστε να είναι έτοιμο για την καταγραφή του επόμενου σημείου στο εκάστοτε πλαίσιο μέτρησης.

Διπλωματική εργασία «Αξιολόγηση του πεδίου ροής στο χώρο δοκιμών της αεροσήραγγας του Εργαστηρίου Αιολικής Ενέργειας του ΕΛΜΕΠΑ», Παχάκης Γεώργιος.



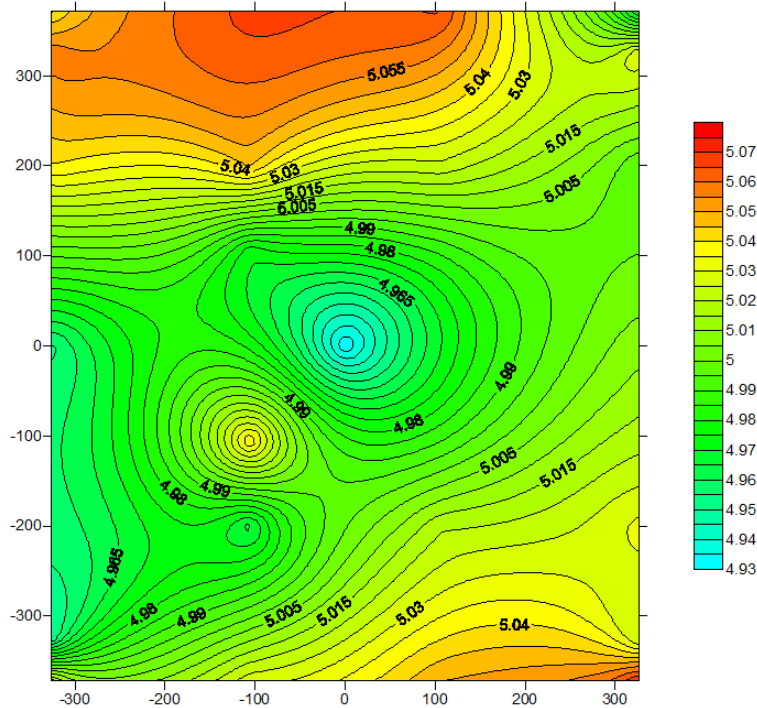
Εικόνα 52. ακροφύσιο αεροσήραγγας μαζί με τα όργανα μέτρησης και τράπεζα XY.

Κεφάλαιο 3

Διαγράμματα ταχυτήτων στην έξοδο της αεροσήραγγας

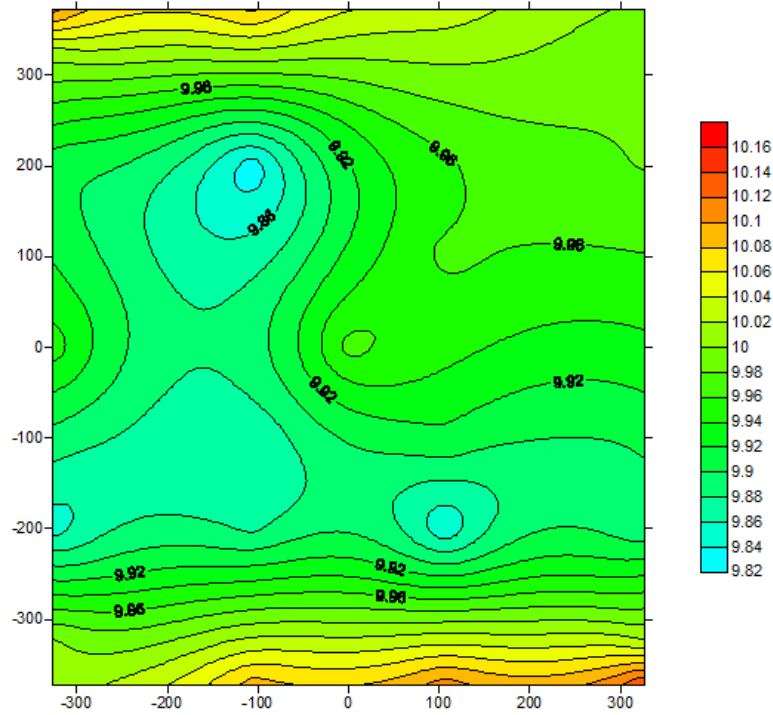
Τα διαγράμματα ταχυτήτων προέκυψαν από την επεξεργασία των μετρήσεων του ανέμου στο ακροφύσιο εξόδου της αεροσήραγγας με τη βοήθεια του προγράμματος Surfer 8 της Golden Software. Παρακάτω γίνεται παράθεση των εν λόγω διαγραμμάτων.

Γραφήματα για απόσταση 0cm από το ακροφύσιο.

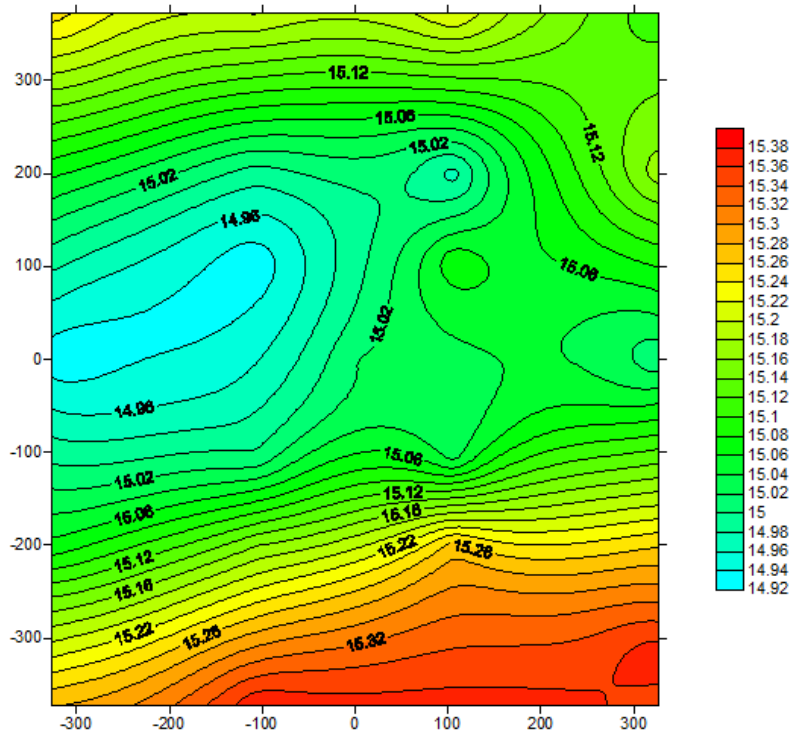


Γράφημα 1. Απεικόνιση πεδίου ροής σε απόσταση 0cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 5m/s

Διπλωματική εργασία «Αξιολόγηση του πεδίου ροής στο χώρο δοκιμών της αεροσήραγγας του Εργαστηρίου Αιολικής Ενέργειας του ΕΛΜΕΠΑ», Παχάκης Γεώργιος.

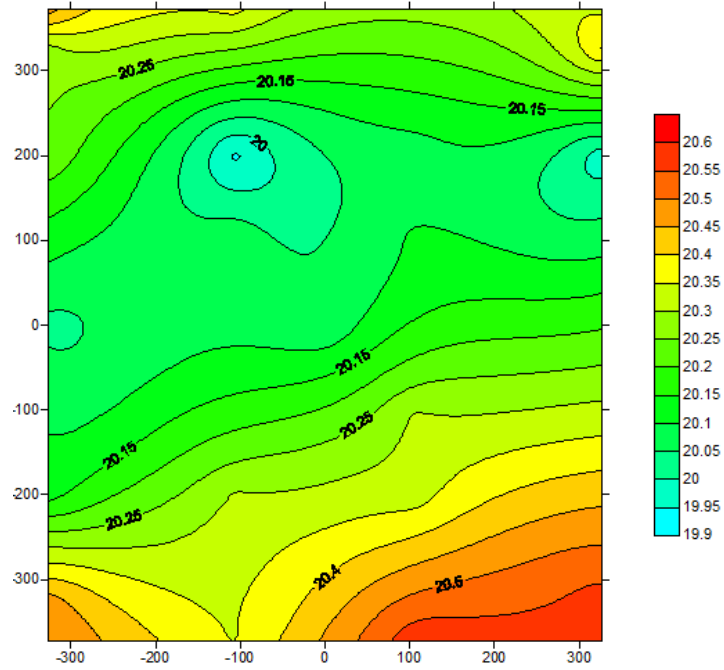


Γράφημα 2. Απεικόνιση πεδίου ροής σε απόσταση 0cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 10m/s

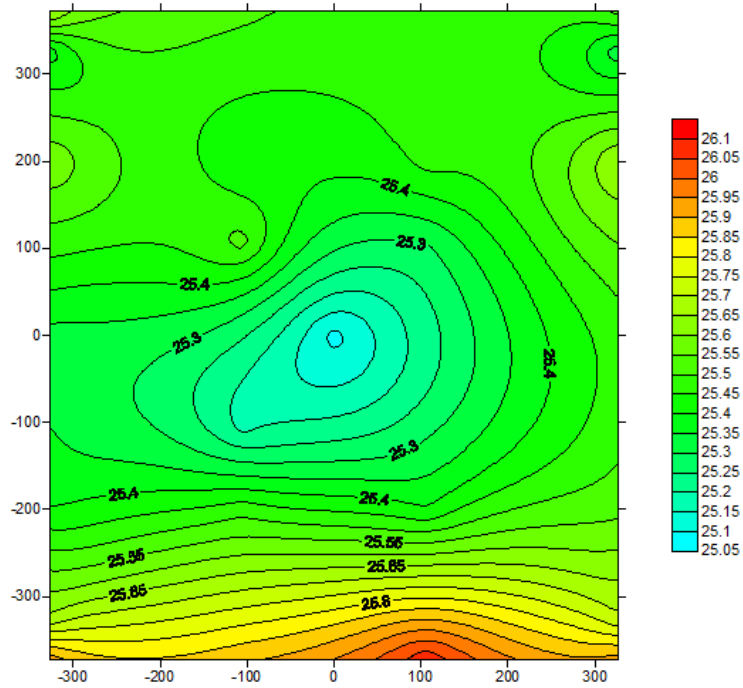


Γράφημα 3. Απεικόνιση πεδίου ροής σε απόσταση 0cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 15m/s

Διπλωματική εργασία «Αξιολόγηση του πεδίου ροής στο χώρο δοκιμών της αεροσήραγγας του Εργαστηρίου Αιολικής Ενέργειας του ΕΛΜΕΠΑ», Παχάκης Γεώργιος.

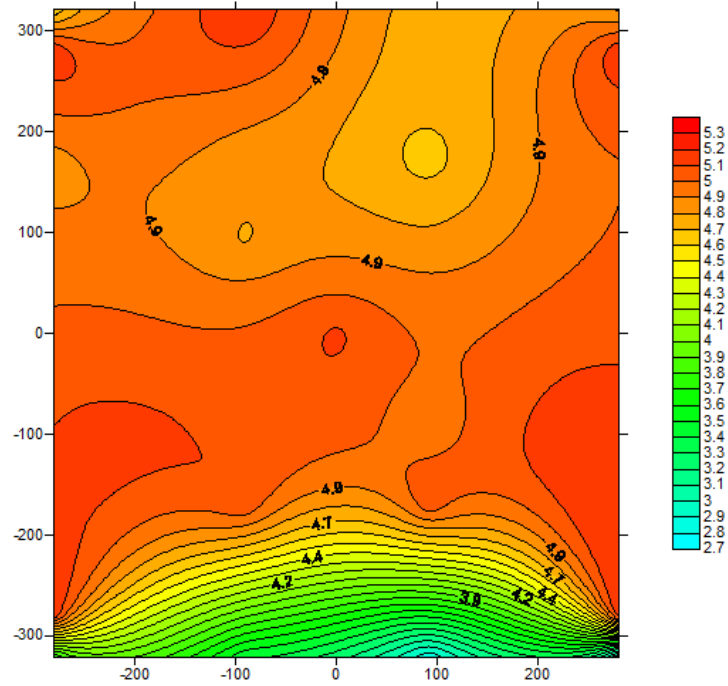


Γράφημα 4. Απεικόνιση πεδίου ροής σε απόσταση 0cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 20m/s

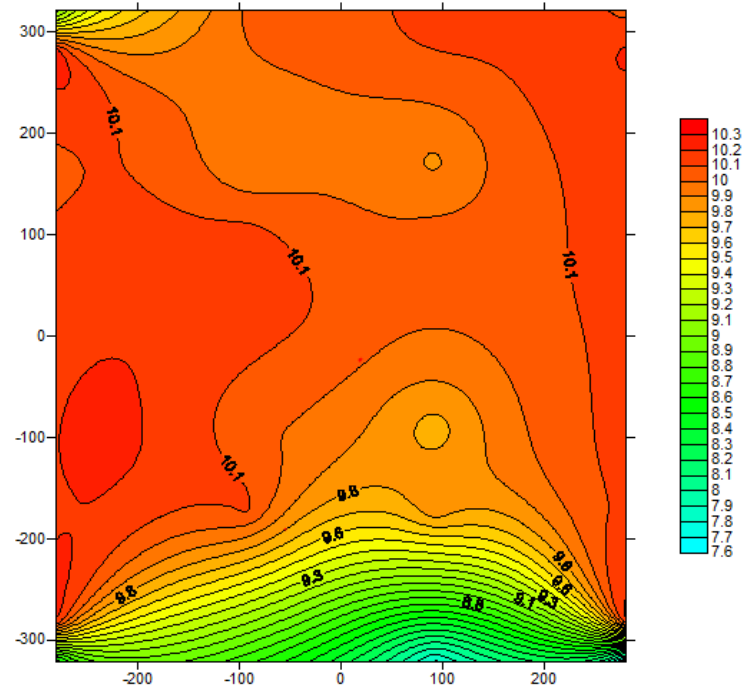


Γράφημα 5. Απεικόνιση πεδίου ροής σε απόσταση 0cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 25m/s

Γραφήματα για απόσταση 15cm από το ακροφύσιο.

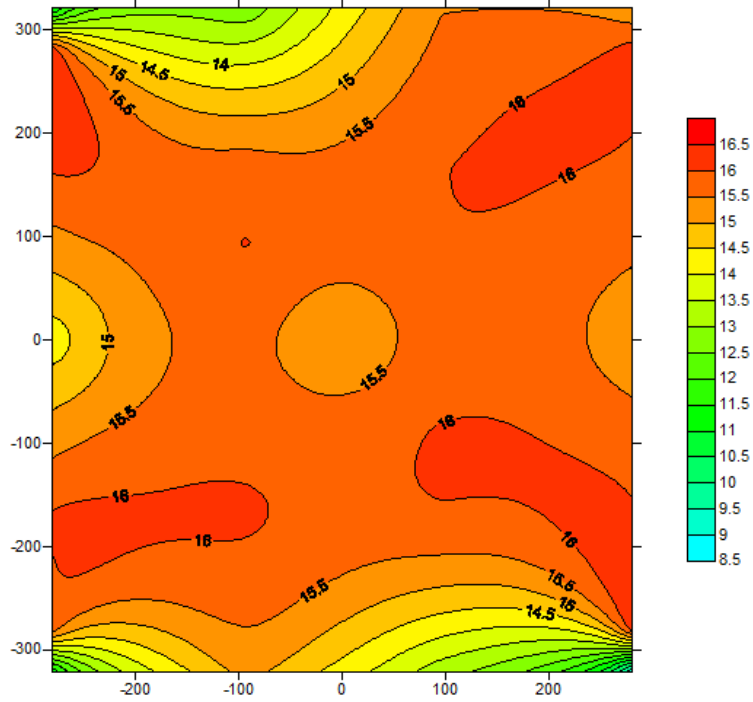


Γράφημα 6. Απεικόνιση πεδίου ροής σε απόσταση 15cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 5m/s

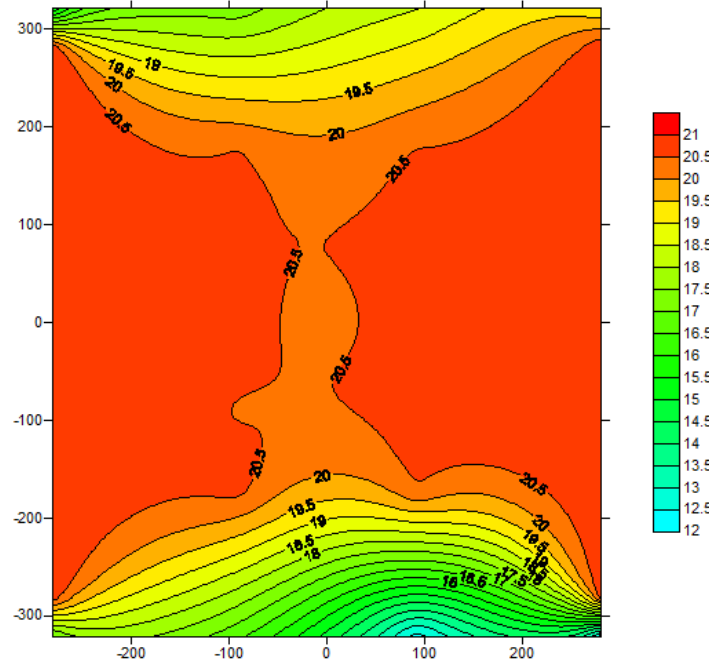


Γράφημα 7. Απεικόνιση πεδίου ροής σε απόσταση 15cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 10m/s

Διπλωματική εργασία «Αξιολόγηση του πεδίου ροής στο χώρο δοκιμών της αεροσήραγγας του Εργαστηρίου Αιολικής Ενέργειας του ΕΛΜΕΠΑ», Παχάκης Γεώργιος.

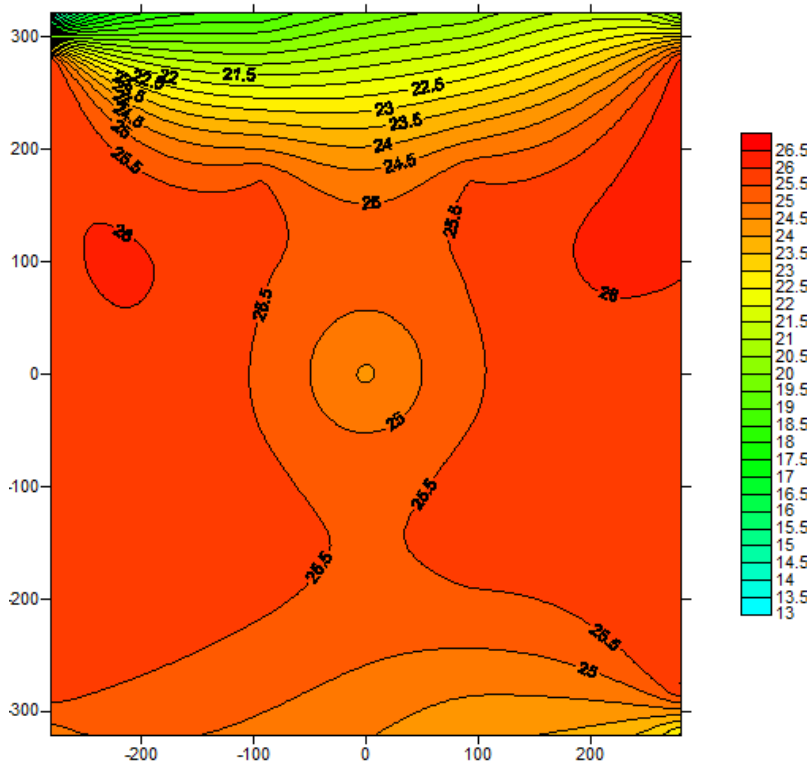


Γράφημα 8. Απεικόνιση πεδίου ροής σε απόσταση 15cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 15m/s



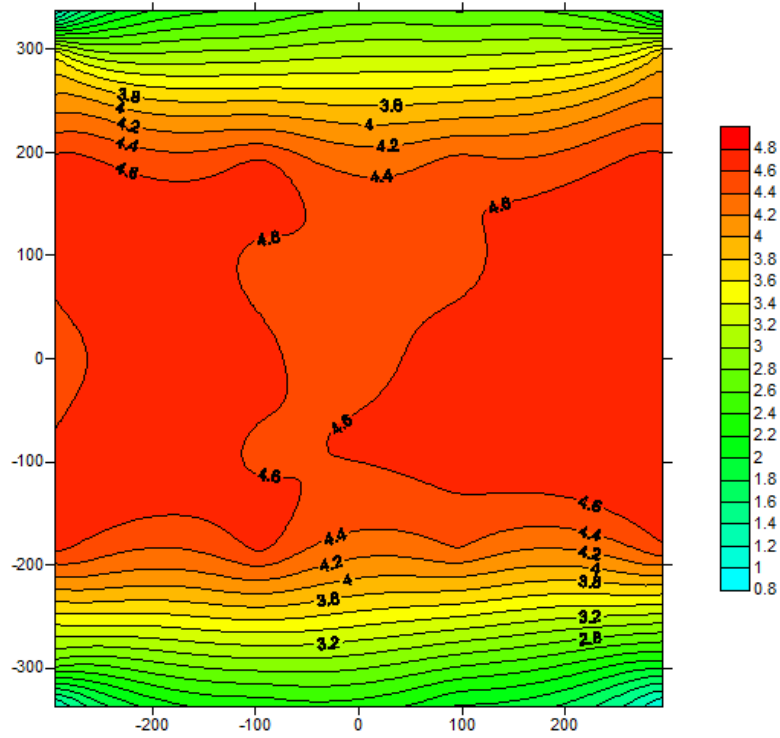
Γράφημα 9. Απεικόνιση πεδίου ροής σε απόσταση 15cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 20m/s

Διπλωματική εργασία «Αξιολόγηση του πεδίου ροής στο χώρο δοκιμών της αεροσήραγγας του Εργαστηρίου Αιολικής Ενέργειας του ΕΛΜΕΠΑ», Παχάκης Γεώργιος.

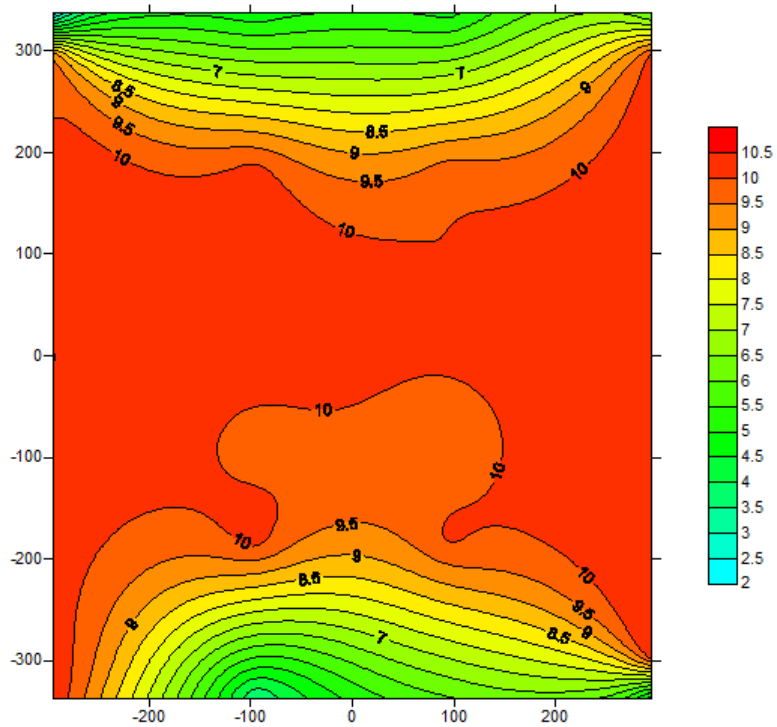


Γράφημα 10. Απεικόνιση πεδίου ροής σε απόσταση 15cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 25m/s

Γραφήματα για απόσταση 30cm από το ακροφύσιο.

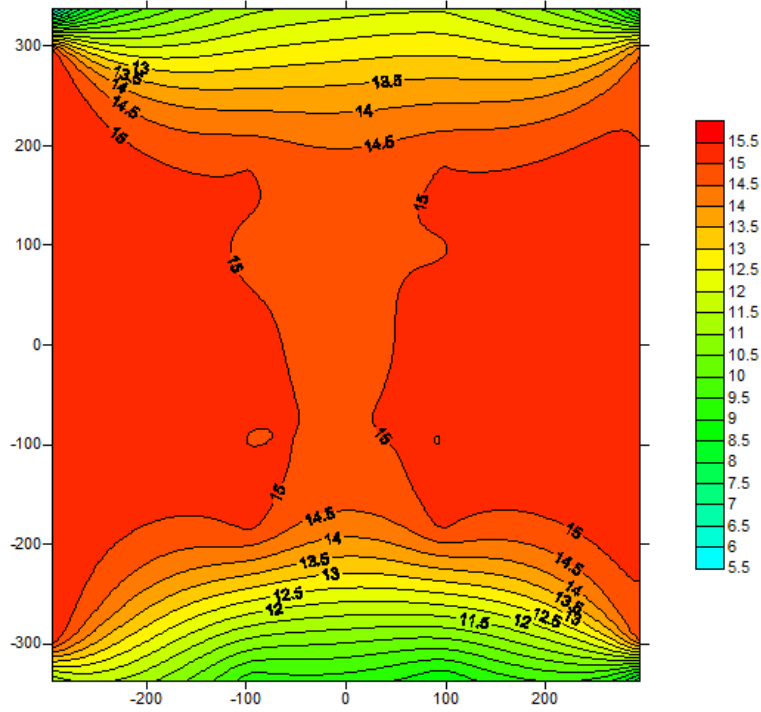


Γράφημα 11. Απεικόνιση πεδίου ροής σε απόσταση 30cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 5m/s

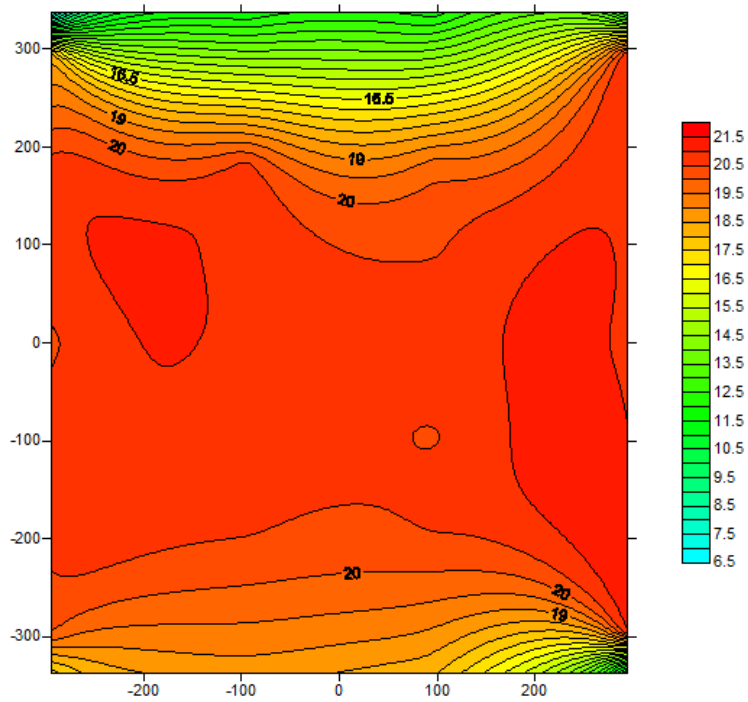


Γράφημα 12. Απεικόνιση πεδίου ροής σε απόσταση 30cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 10m/s

Διπλωματική εργασία «Αξιολόγηση του πεδίου ροής στο χώρο δοκιμών της αεροσήραγγας του Εργαστηρίου Αιολικής Ενέργειας του ΕΛΜΕΠΑ», Παχάκης Γεώργιος.

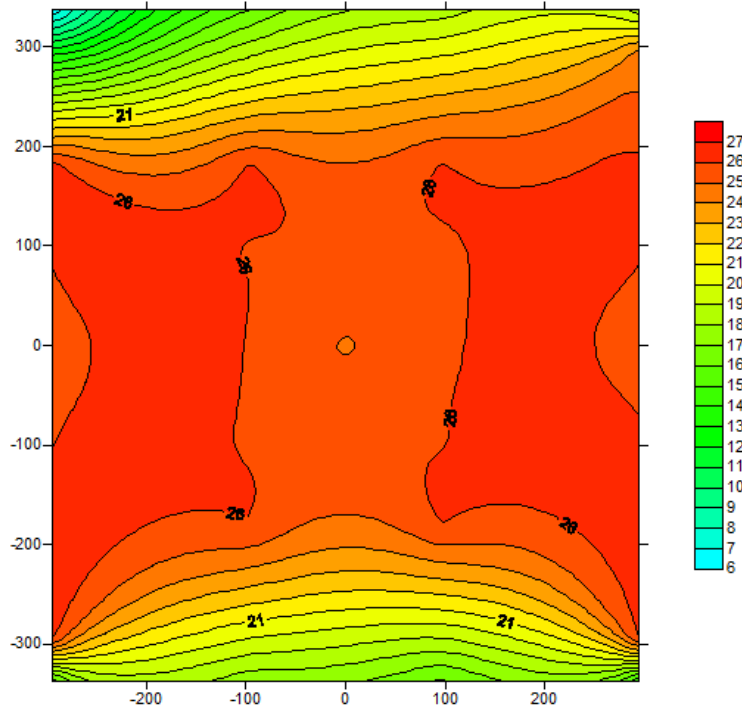


Γράφημα 13. Απεικόνιση πεδίου ροής σε απόσταση 30cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 15m/s



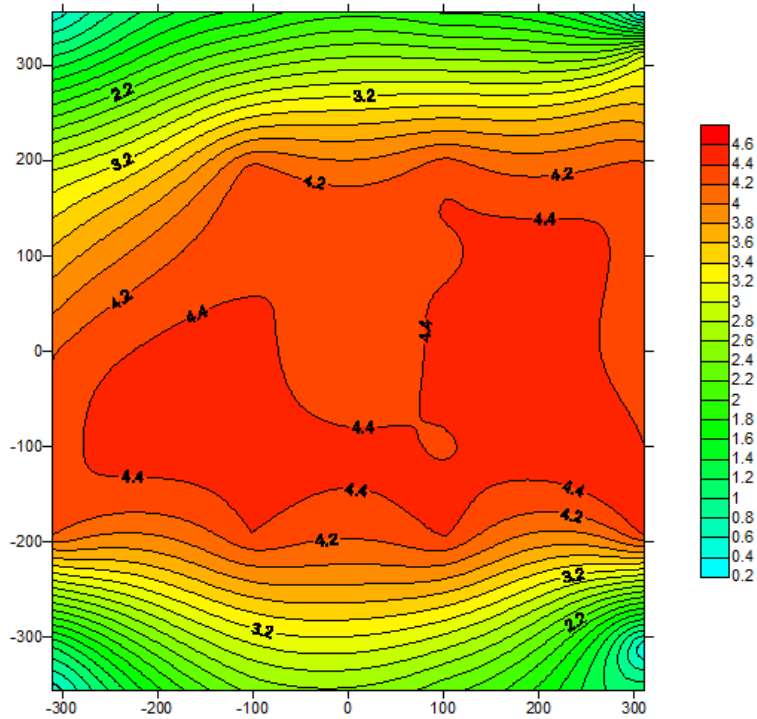
Γράφημα 14. Απεικόνιση πεδίου ροής σε απόσταση 30cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 20m/s

Διπλωματική εργασία «Αξιολόγηση του πεδίου ροής στο χώρο δοκιμών της αεροσήραγγας του Εργαστηρίου Αιολικής Ενέργειας του ΕΛΜΕΠΑ», Παχάκης Γεώργιος.



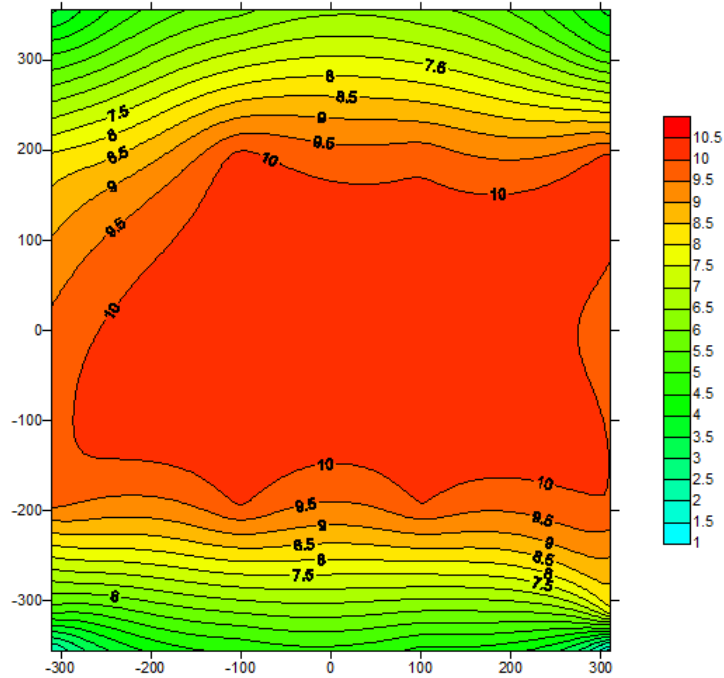
Γράφημα 15. Απεικόνιση πεδίου ροής σε απόσταση 30cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 25m/s

Γραφήματα για απόσταση 45cm από το ακροφύσιο

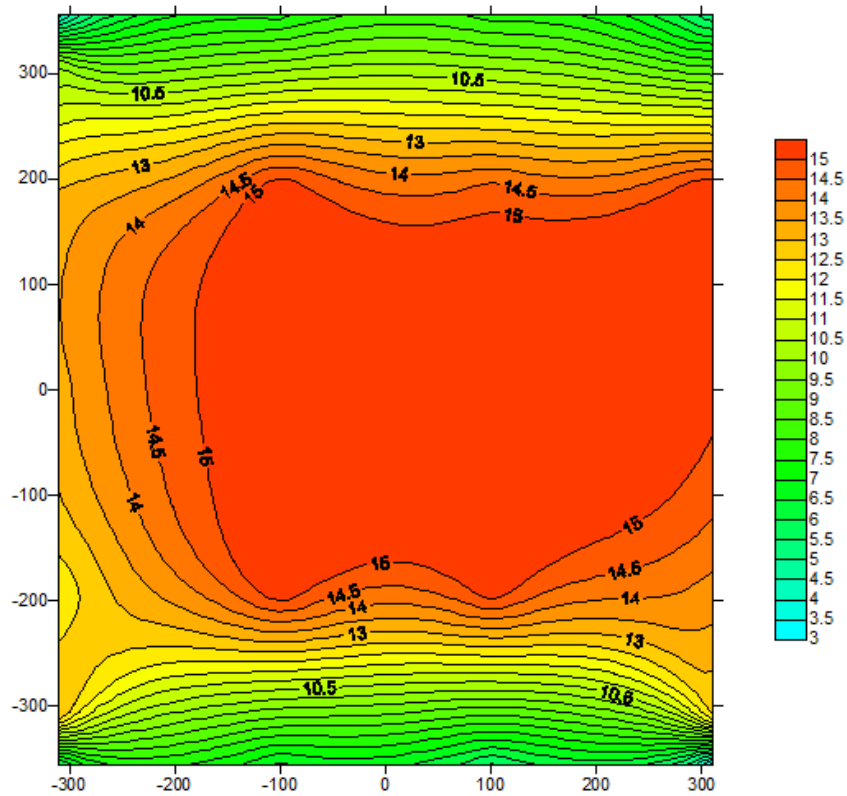


Γράφημα 16. Απεικόνιση πεδίου ροής σε απόσταση 45cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 5m/s

Διπλωματική εργασία «Αξιολόγηση του πεδίου ροής στο χώρο δοκιμών της αεροσήραγγας του Εργαστηρίου Αιολικής Ενέργειας του ΕΛΜΕΠΑ», Παχάκης Γεώργιος.

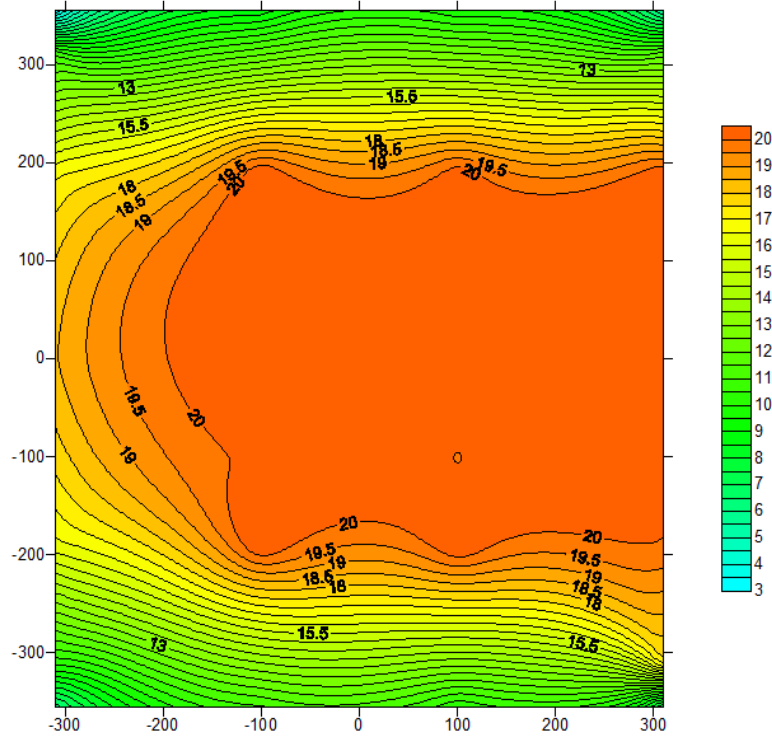


Γράφημα 17. Απεικόνιση πεδίου ροής σε απόσταση 45cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 10m/s

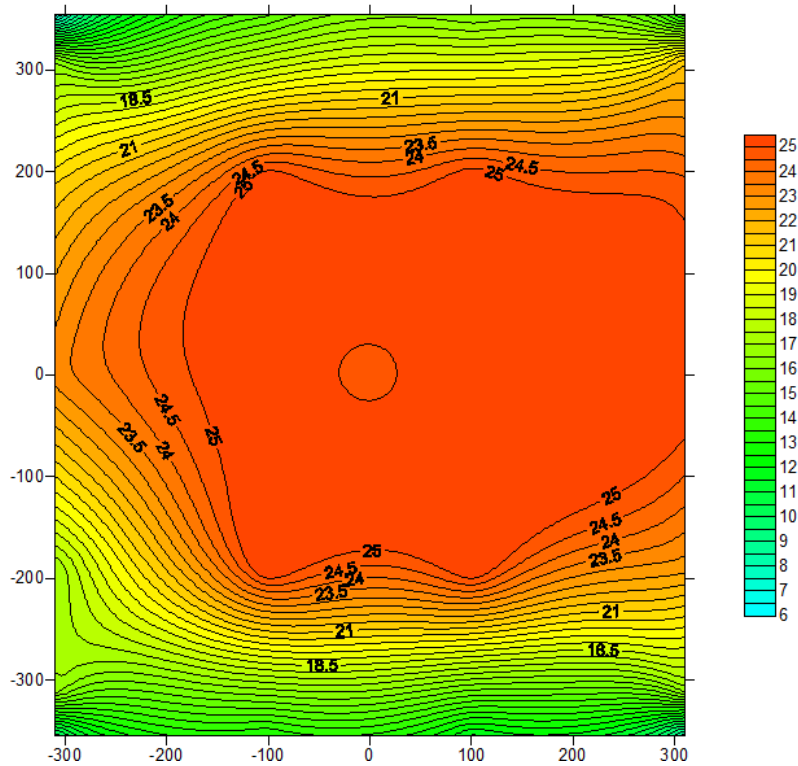


Γράφημα 18. Απεικόνιση πεδίου ροής σε απόσταση 45cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 15m/s

Διπλωματική εργασία «Αξιολόγηση του πεδίου ροής στο χώρο δοκιμών της αεροσήραγγας του Εργαστηρίου Αιολικής Ενέργειας του ΕΛΜΕΠΑ», Παχάκης Γεώργιος.

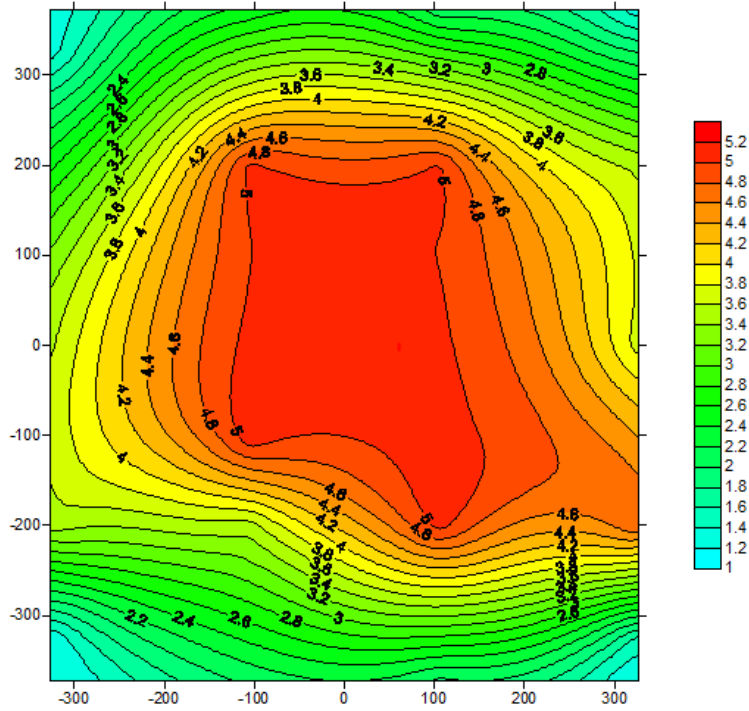


Γράφημα 19. Απεικόνιση πεδίου ροής σε απόσταση 45cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 20m/s

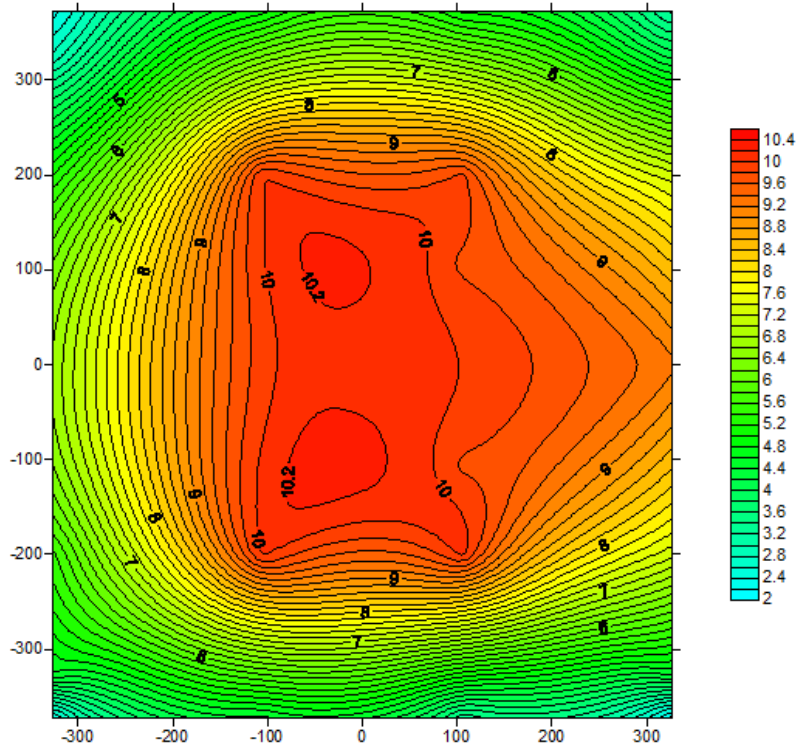


Γράφημα 20. Απεικόνιση πεδίου ροής σε απόσταση 45cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 25m/s

Γραφήματα για απόσταση 60cm από το ακροφύσιο

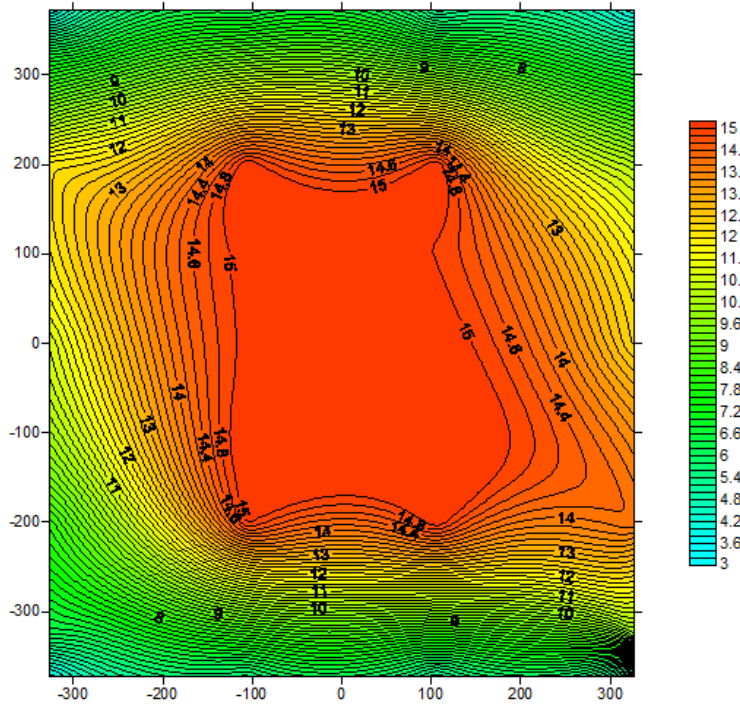


Γράφημα 21. Απεικόνιση πεδίου ροής σε απόσταση 60cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 5m/s

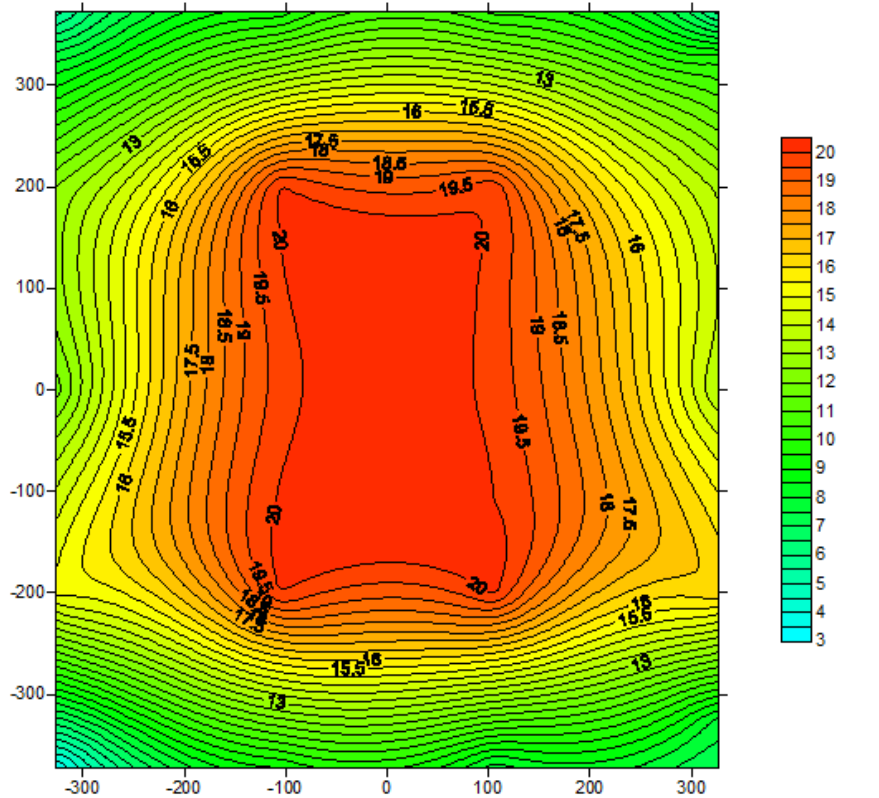


Γράφημα 22. Απεικόνιση πεδίου ροής σε απόσταση 60cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 10m/s

Διπλωματική εργασία «Αξιολόγηση του πεδίου ροής στο χώρο δοκιμών της αεροσήραγγας του Εργαστηρίου Αιολικής Ενέργειας του ΕΛΜΕΠΑ», Παχάκης Γεώργιος.



Γράφημα 23. Απεικόνιση πεδίου ροής σε απόσταση 60cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 15m/s

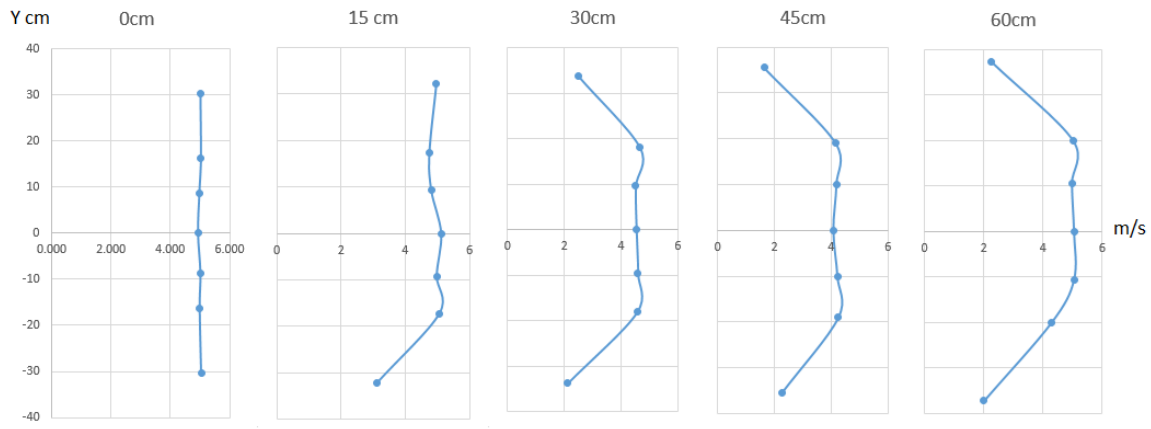


Γράφημα 24. Απεικόνιση πεδίου ροής σε απόσταση 60cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 20m/s

Γραφική αναπαράσταση της συμπεριφοράς του ανέμου στη μέση του ακροφυσίου.

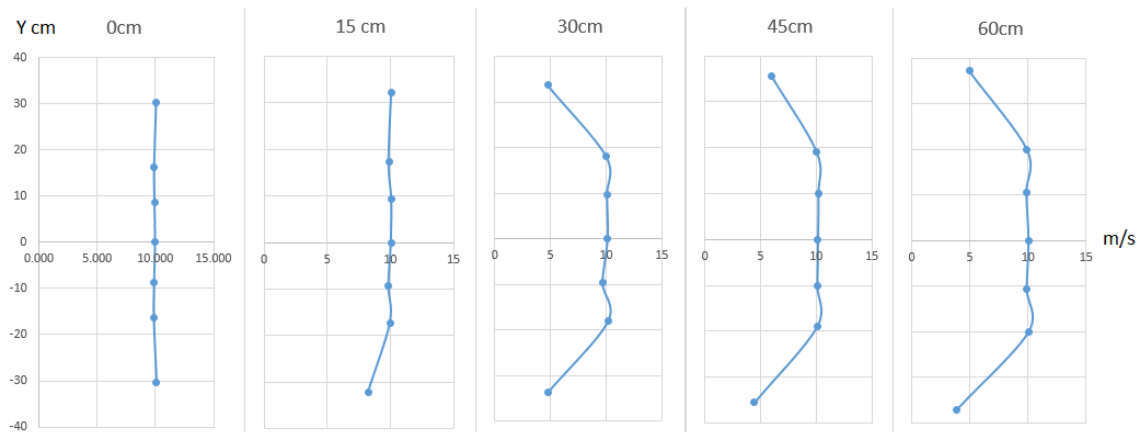
Για την αναπαραγωγή των παρακάτω διαγραμμάτων, χρησιμοποιήθηκαν τιμές ταχύτητας ανέμου, οι οποίες βρίσκονται στη κατακόρυφη ευθεία, που διέρχεται από το σημείο 0,0 του συστήματος συντεταγμένων, που έχει οριστεί στο ακροφύσιο της αεροσήραγγας.

Για ταχύτητα ανέμου 5m/s



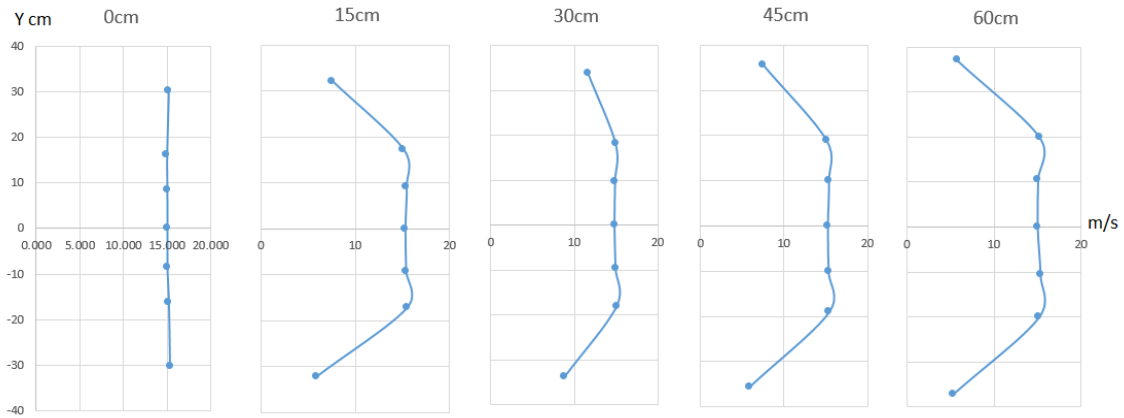
Γράφημα 26. Συμπεριφορά ταχύτητας ανέμου σε πλάγια όψη, για όλες στις αποστάσεις για ταχύτητα ανέμου 5m/s (για $x=0$).

Για ταχύτητα ανέμου 10m/s



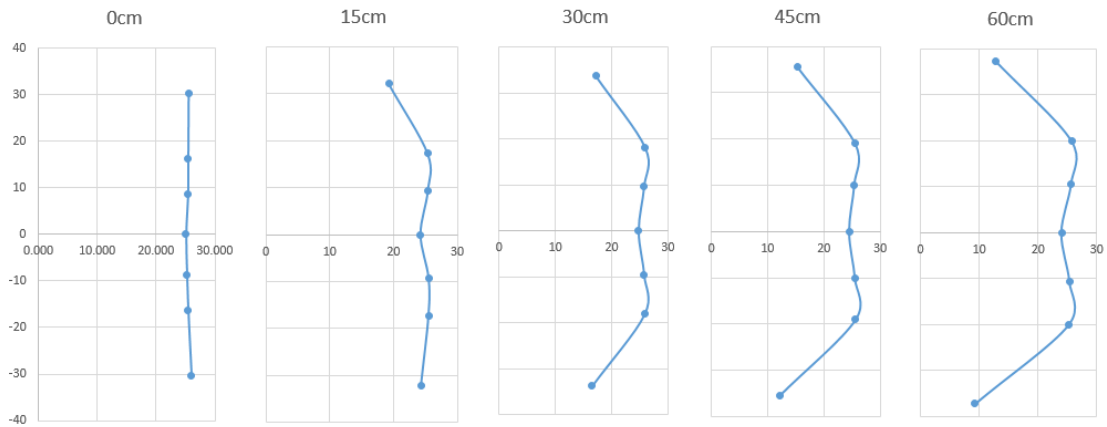
Γράφημα 27. Συμπεριφορά ταχύτητας ανέμου σε πλάγια όψη, για όλες στις αποστάσεις για ταχύτητα ανέμου 10m/s (για $x=0$).

Για ταχύτητα ανέμου 15m/s



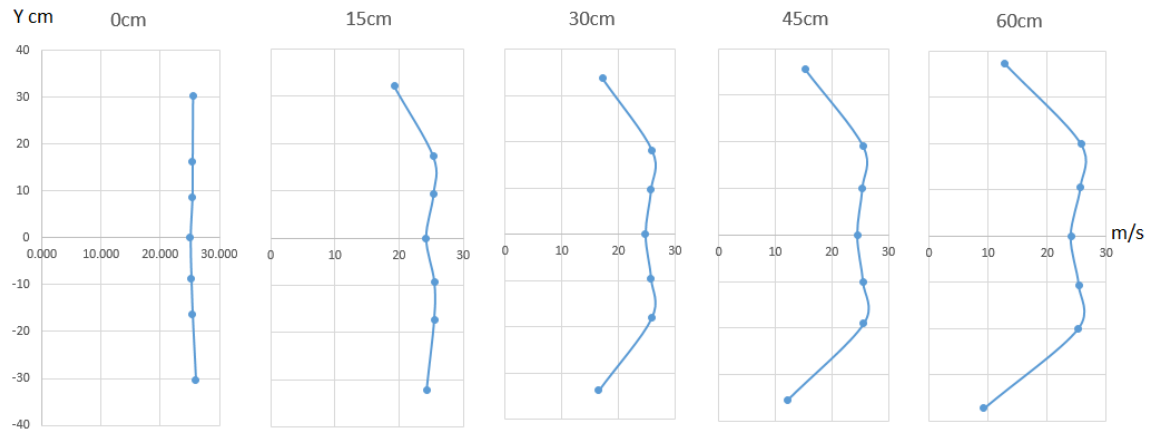
Γράφημα 28. Συμπεριφορά ταχύτητας ανέμου σε πλάγια όψη, για όλες στις αποστάσεις για ταχύτητα ανέμου 15m/s (για $x=0$).

Για ταχύτητα ανέμου 20m/s



Γράφημα 29. Συμπεριφορά ταχύτητας ανέμου σε πλάγια όψη, για όλες στις αποστάσεις για ταχύτητα ανέμου 20m/s (για $x=0$).

Για ταχύτητα ανέμου 25m/s



Γράφημα 30. Συμπεριφορά ταχύτητας ανέμου σε πλάγια όψη, για όλες στις αποστάσεις για ταχύτητα ανέμου 25m/s (για $x=0$).

Υπολογισμός τύρβης

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:

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

Η μέση ταχύτητα ουσιαστικά, είναι ο μέσος των μετρήσεων της ταχύτητας ανέμου για κάθε σημείο.

N: Το πλήθος των μετρήσεων.

V_n : Η ταχύτητα του ανέμου.

τυπική απόκλιση:

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

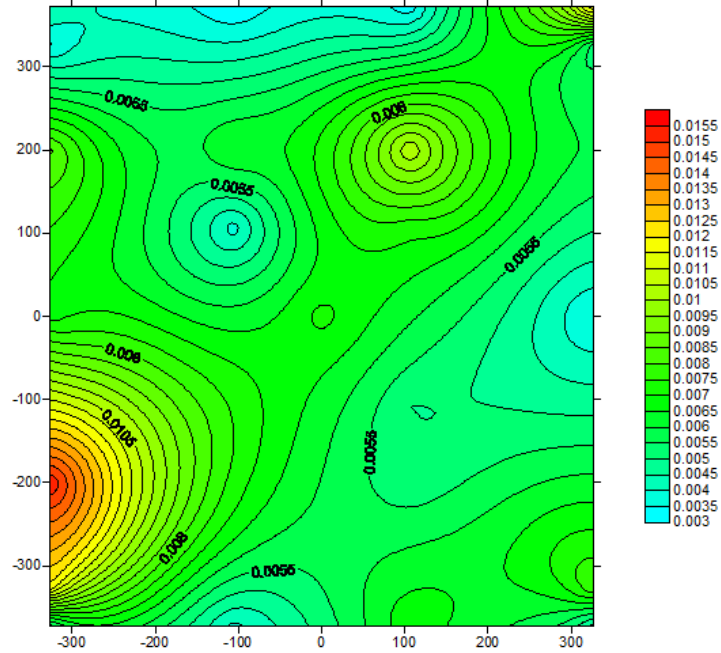
Και τέλος η τύρβη υπολογίζεται από τον τύπο :

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

Εφαρμόζοντας τους παραπάνω τύπους, σε κάθε ένα από τα σημεία των εκάστοτε πλαισίων μέτρησης. Προέκυψαν τα παρακάτω διαγράμματα για την τύρβη.

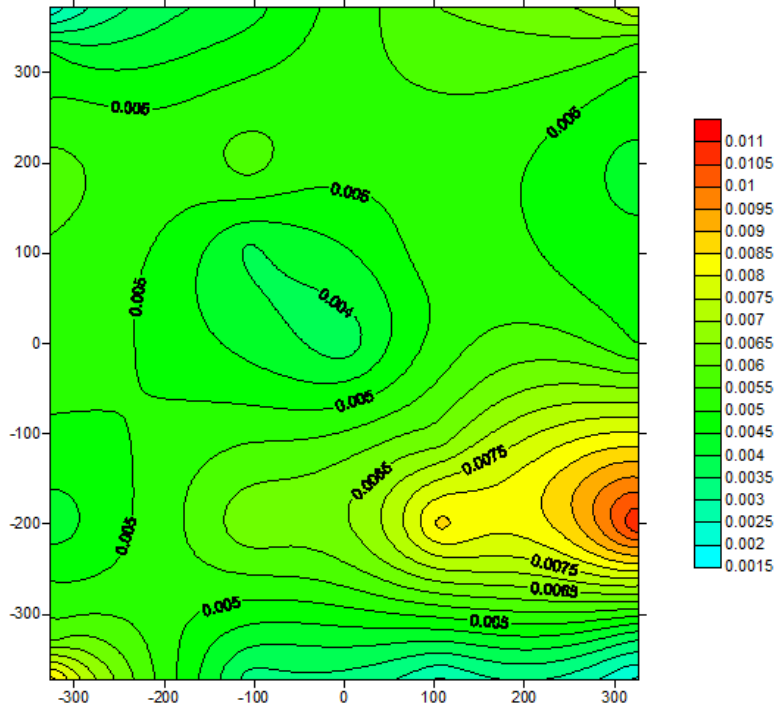
Διαγράμματα τύρβης στη ροή του ανέμου κατά την έξοδο από το ακροφύσιο της αεροσήραγγας.

Τύρβη στην ροή του ανέμου σε απόσταση 0cm από το ακροφύσιο.

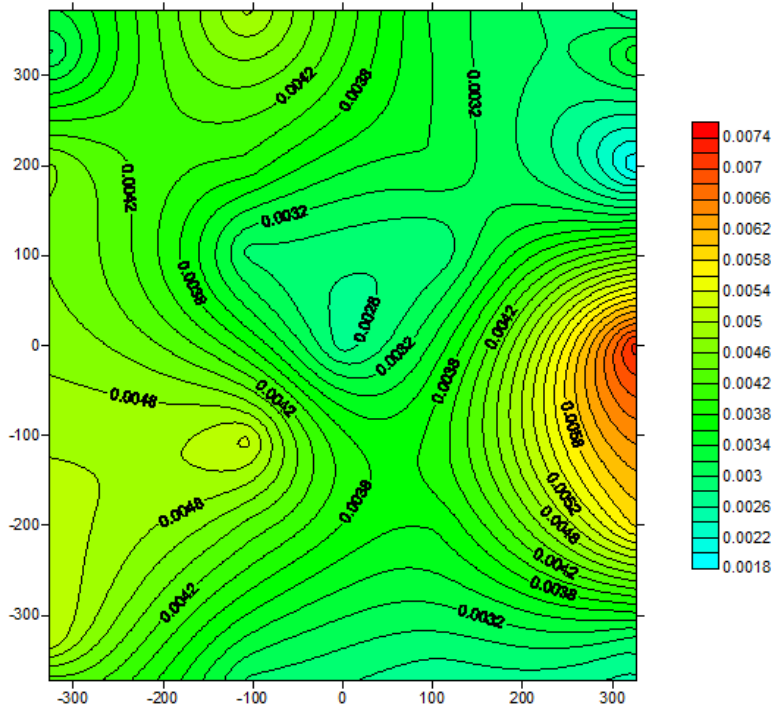


Γράφημα 31. Απεικόνιση τύρβης σε απόσταση 0cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 5m/s

Διπλωματική εργασία «Αξιολόγηση του πεδίου ροής στο χώρο δοκιμών της αεροσήραγγας του Εργαστηρίου Αιολικής Ενέργειας του ΕΛΜΕΠΑ», Παχάκης Γεώργιος.

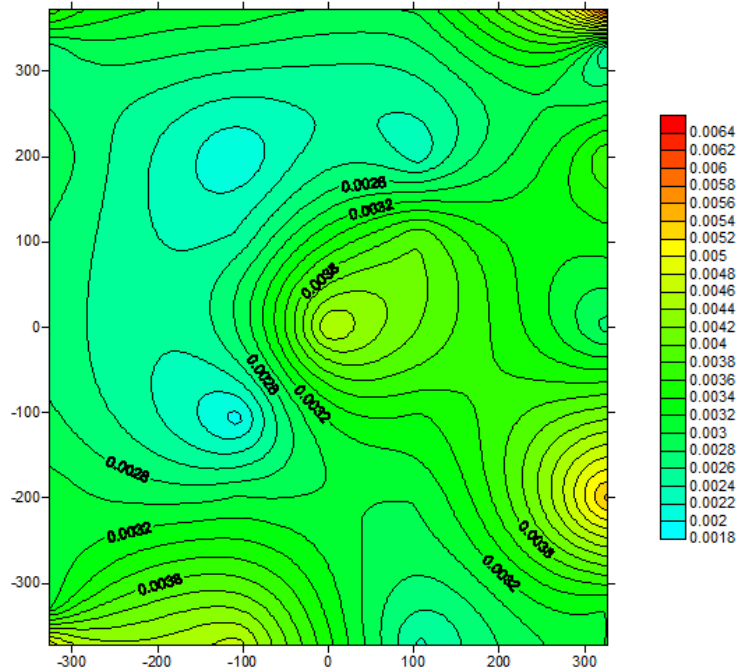


Γράφημα 32. Απεικόνιση τύρβης σε απόσταση 0cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 10m/s

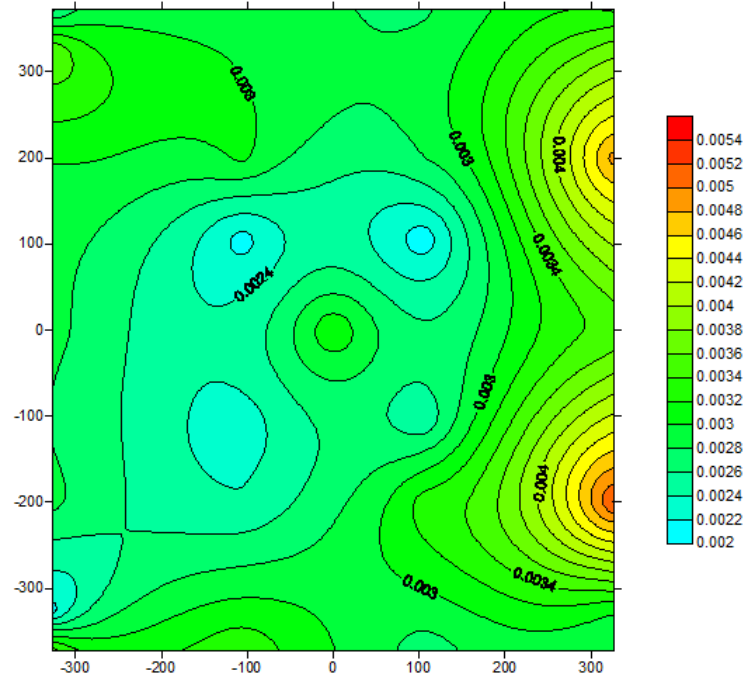


Γράφημα 33. Απεικόνιση τύρβης σε απόσταση 0cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 15m/s

Διπλωματική εργασία «Αξιολόγηση του πεδίου ροής στο χώρο δοκιμών της αεροσήραγγας του Εργαστηρίου Αιολικής Ενέργειας του ΕΛΜΕΠΑ», Παχάκης Γεώργιος.

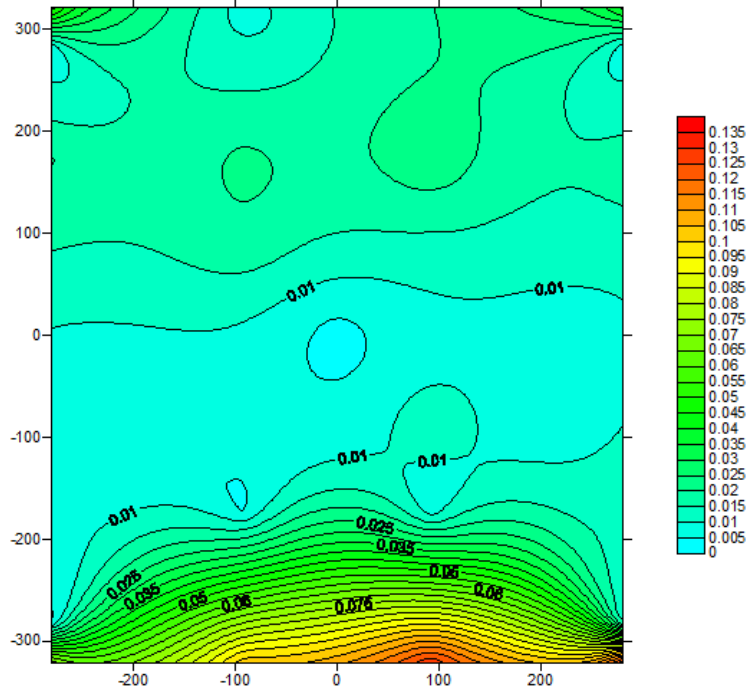


Γράφημα 34. Απεικόνιση τύρβης σε απόσταση 0.2m από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 20m/s

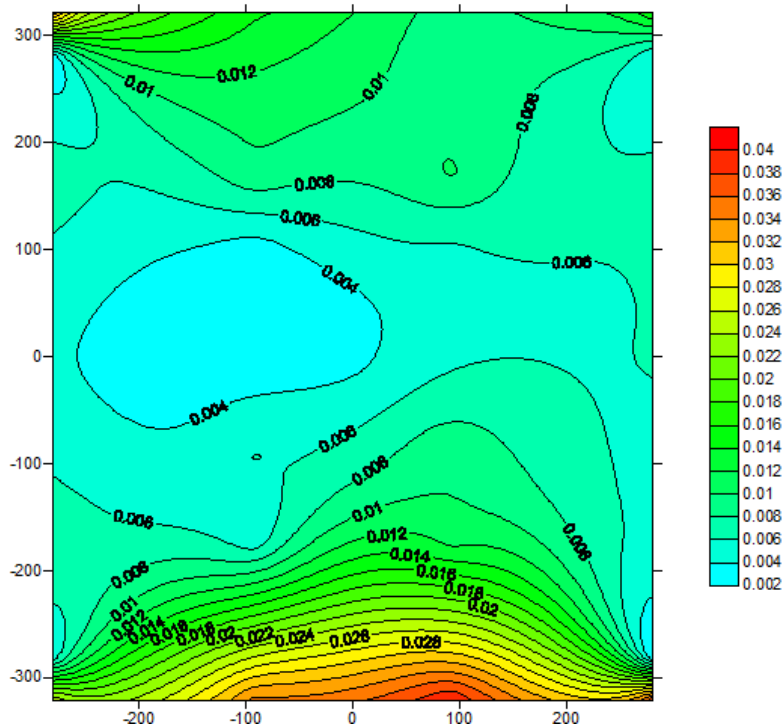


Γράφημα 35. Απεικόνιση τύρβης σε απόσταση 0.2m από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 25m/s

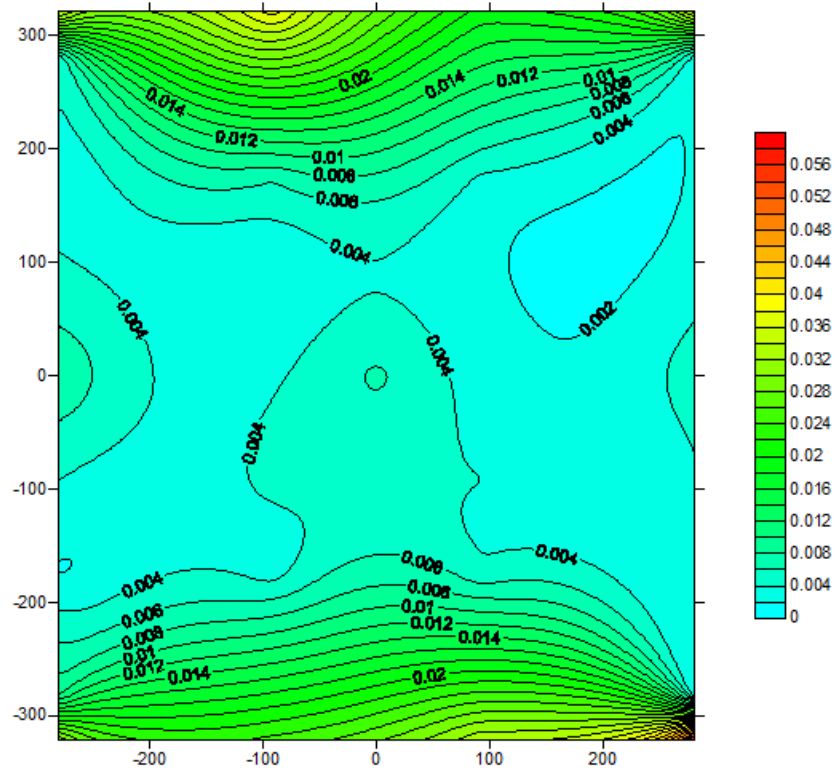
Τύρβη στην ροή του ανέμου σε απόσταση 15cm από το ακροφύσιο.



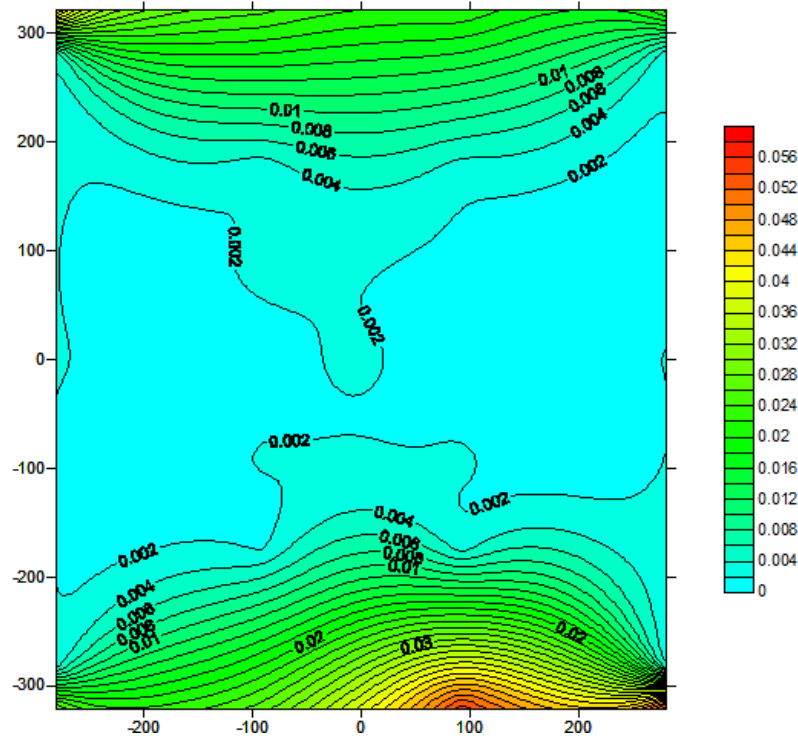
Γράφημα 36. Απεικόνιση τύρβης σε απόσταση 15cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 5m/s



Γράφημα 37. Απεικόνιση τύρβης σε απόσταση 15cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 10m/s

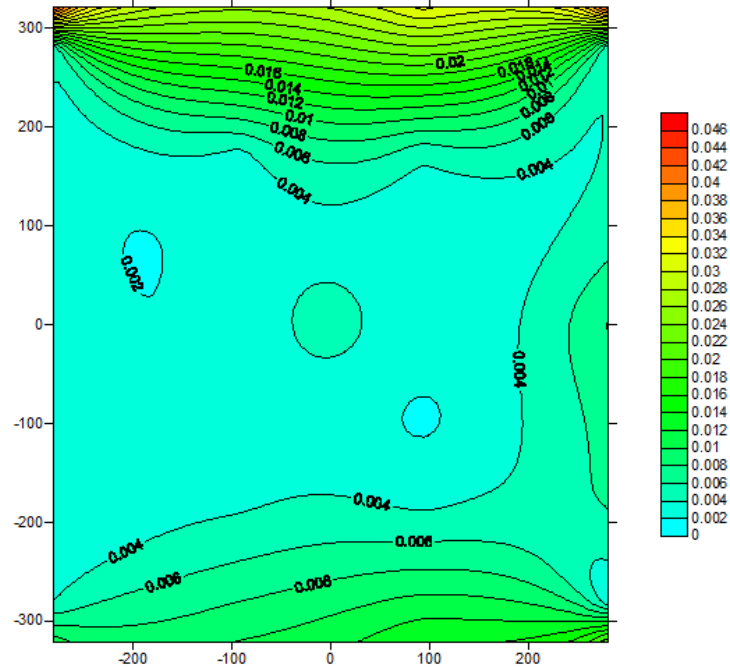


Γράφημα 38. Απεικόνιση τύρβης σε απόσταση 15cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 15m/s



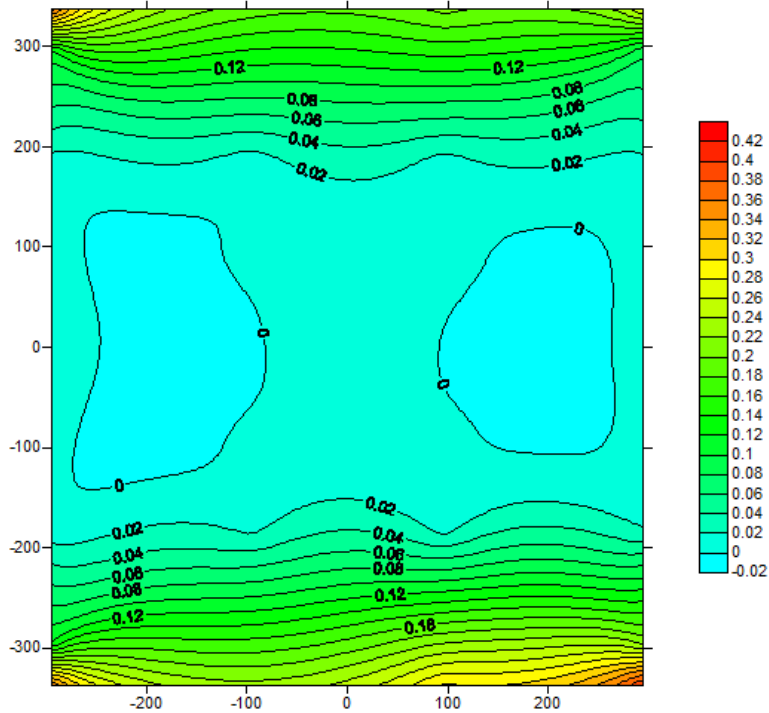
Γράφημα 39. Απεικόνιση τύρβης σε απόσταση 15cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 20m/s

Διπλωματική εργασία «Αξιολόγηση του πεδίου ροής στο χώρο δοκιμών της αεροσήραγγας του Εργαστηρίου Αιολικής Ενέργειας του ΕΛΜΕΠΑ», Παχάκης Γεώργιος.



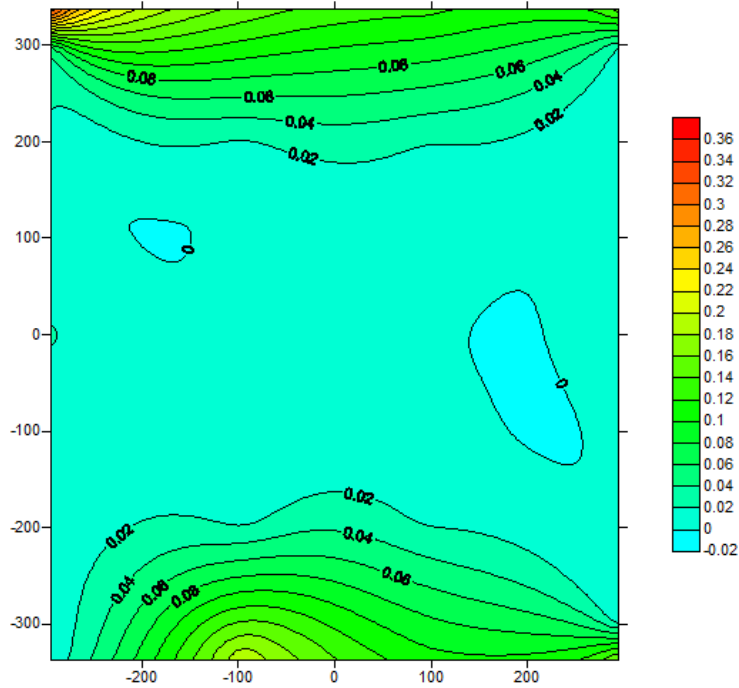
Γράφημα 40. Απεικόνιση τύρβης σε απόσταση 15cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 25m/s

Τύρβη στην ροή του ανέμου σε απόσταση 30cm από το ακροφύσιο.

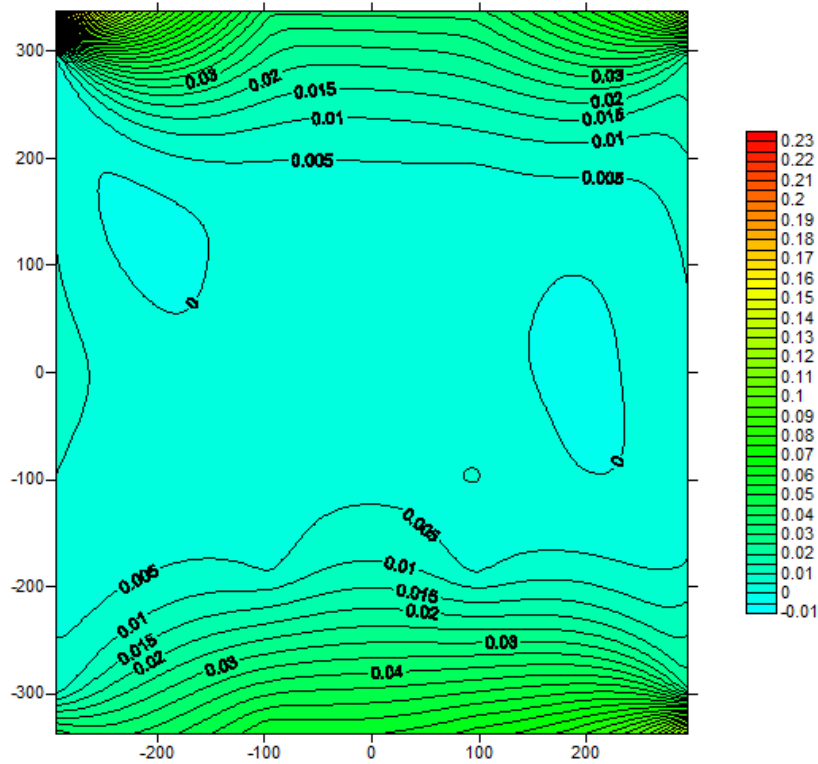


Γράφημα 41. Απεικόνιση τύρβης σε απόσταση 30cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 5m/s

Διπλωματική εργασία «Αξιολόγηση του πεδίου ροής στο χώρο δοκιμών της αεροσήραγγας του Εργαστηρίου Αιολικής Ενέργειας του ΕΛΜΕΠΑ», Παχάκης Γεώργιος.

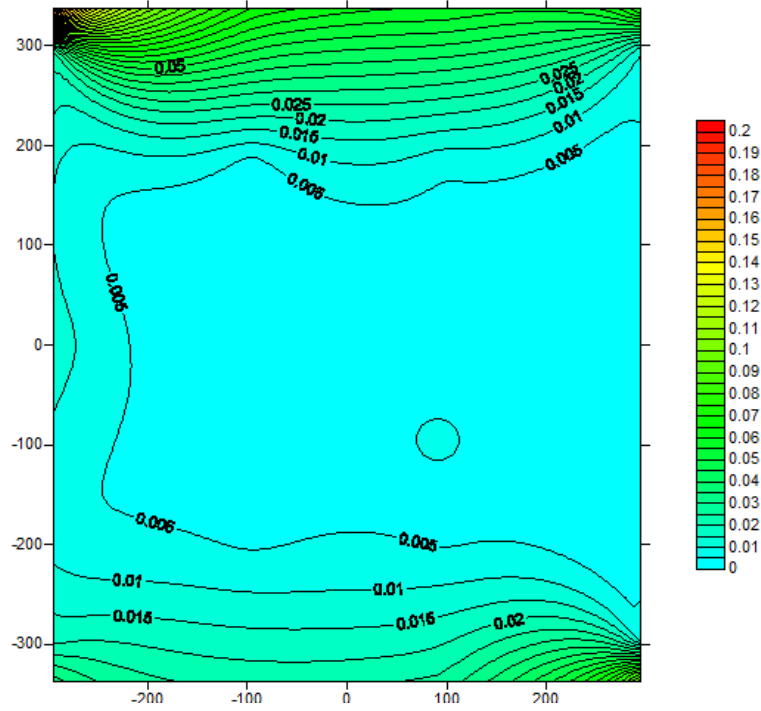


Γράφημα 42. Απεικόνιση τύρβης σε απόσταση 30cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 10m/s

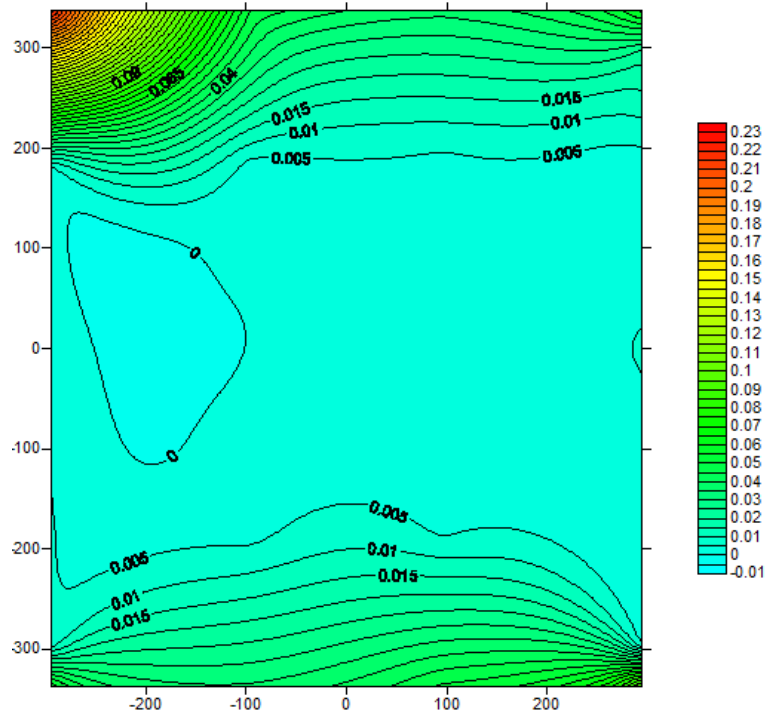


Γράφημα 43. Απεικόνιση τύρβης σε απόσταση 30cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 15m/s

Διπλωματική εργασία «Αξιολόγηση του πεδίου ροής στο χώρο δοκιμών της αεροσήραγγας του Εργαστηρίου Αιολικής Ενέργειας του ΕΛΜΕΠΑ», Παχάκης Γεώργιος.

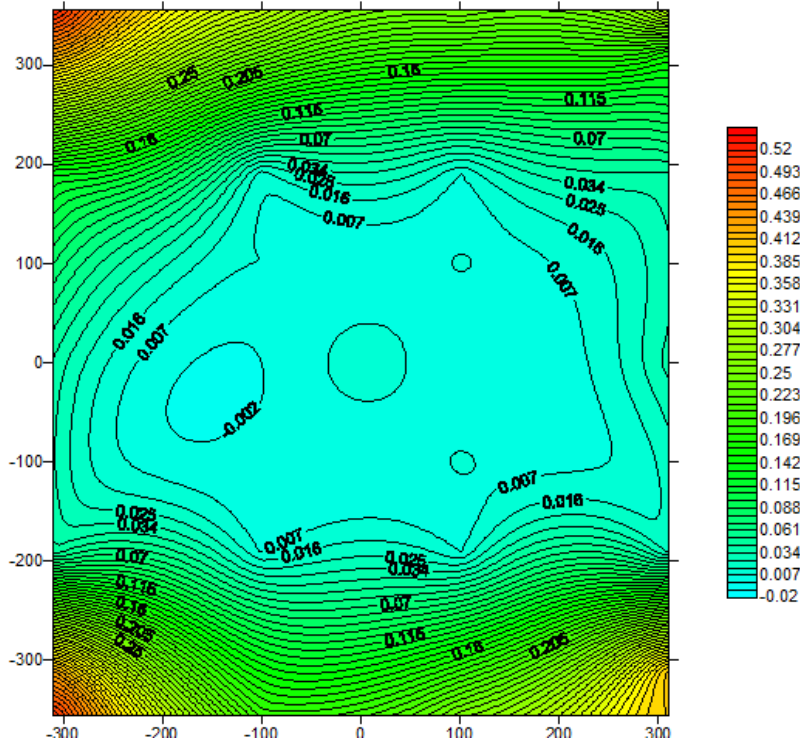


Γράφημα 44. Απεικόνιση τύρβης σε απόσταση 30cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 20m/s

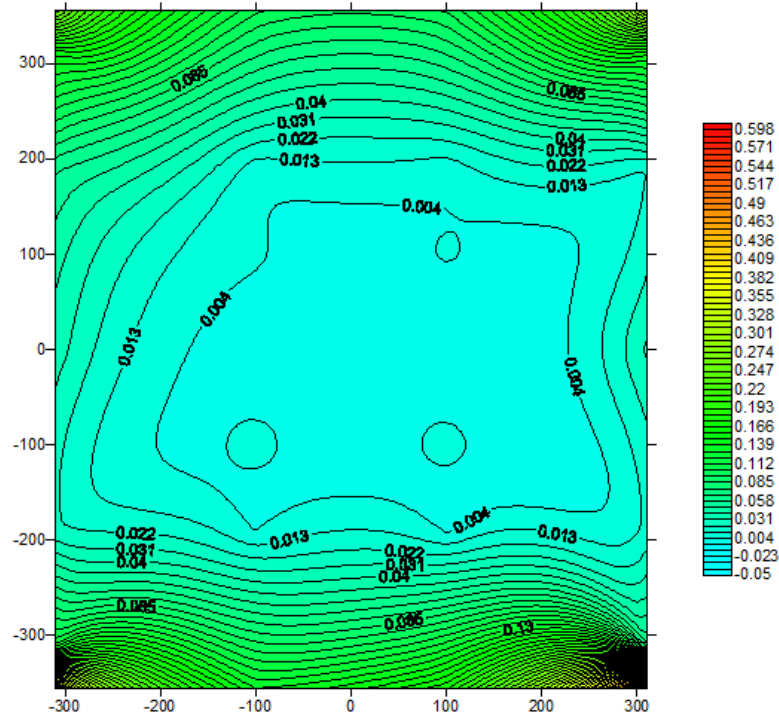


Γράφημα 45. Απεικόνιση τύρβης σε απόσταση 30cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 25m/s

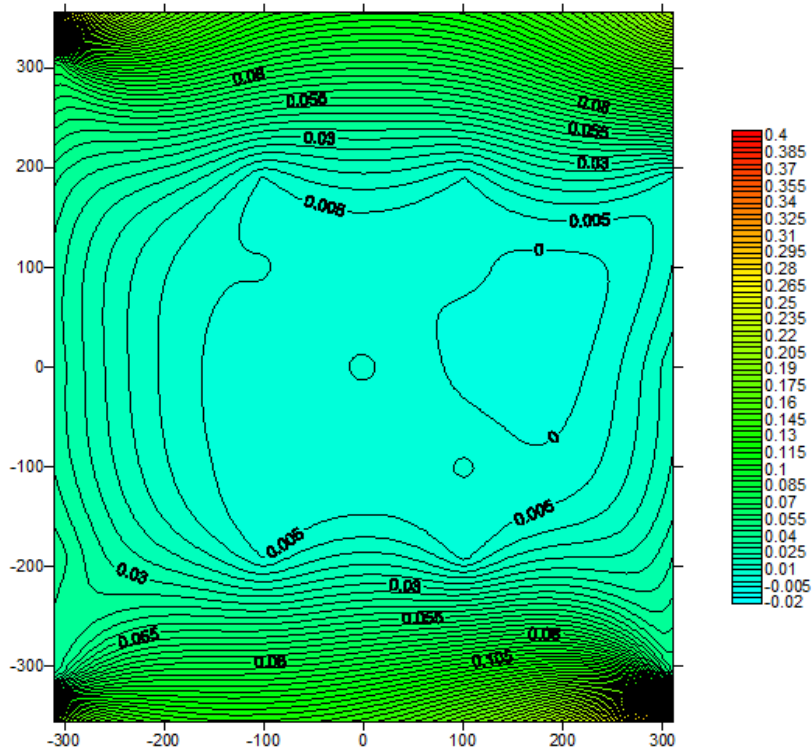
Τύρβη στην ροή του ανέμου σε απόσταση 45cm από το ακροφύσιο.



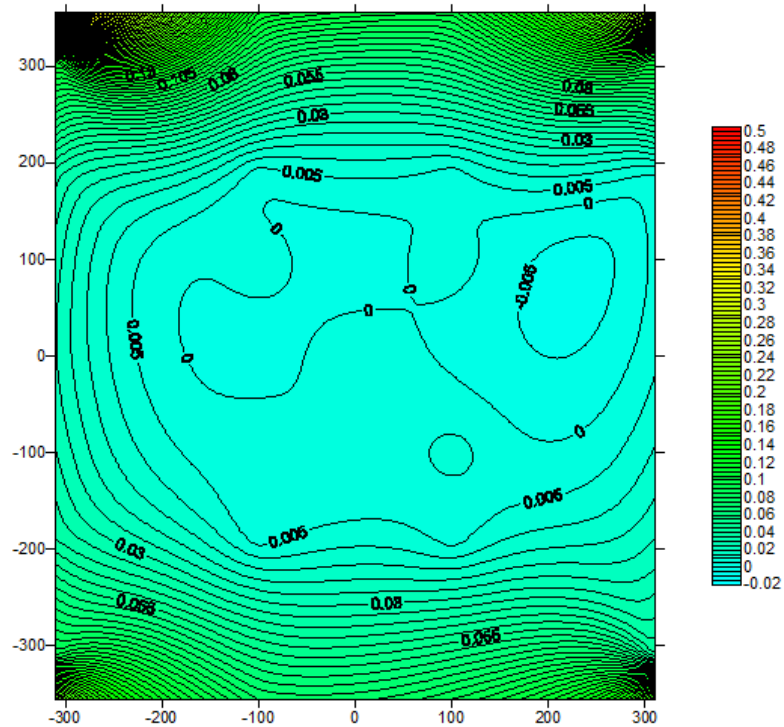
Γράφημα 46. Απεικόνιση τύρβης σε απόσταση 45cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 5m/s



Γράφημα 47. Απεικόνιση τύρβης σε απόσταση 45cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 10m/s

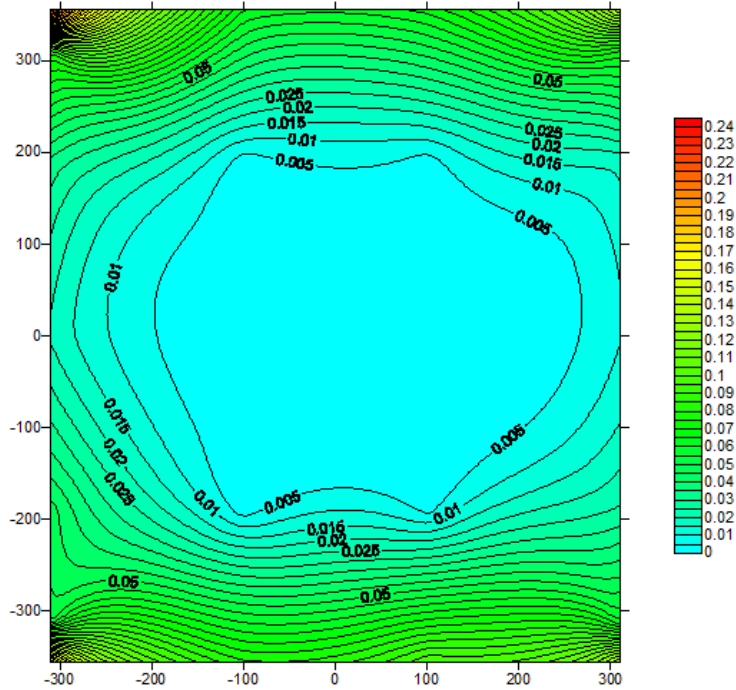


Γράφημα 48. Απεικόνιση τύρβης σε απόσταση 45cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 15m/s



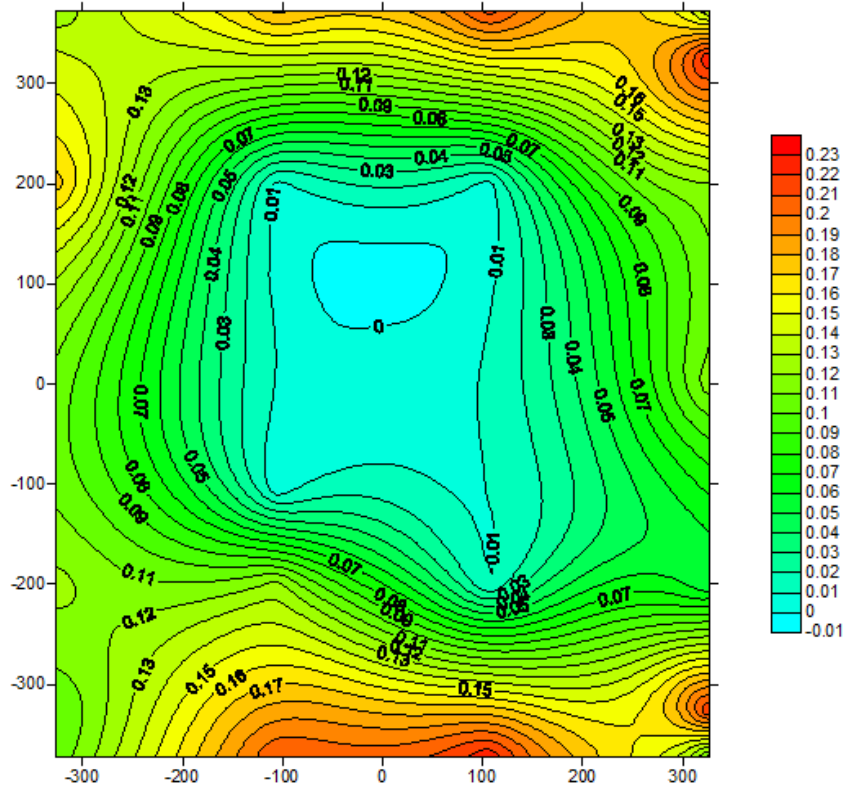
Γράφημα 49. Απεικόνιση τύρβης σε απόσταση 45cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 20m/s

Διπλωματική εργασία «Αξιολόγηση του πεδίου ροής στο χώρο δοκιμών της αεροσήραγγας του Εργαστηρίου Αιολικής Ενέργειας του ΕΛΜΕΠΑ», Παχάκης Γεώργιος.



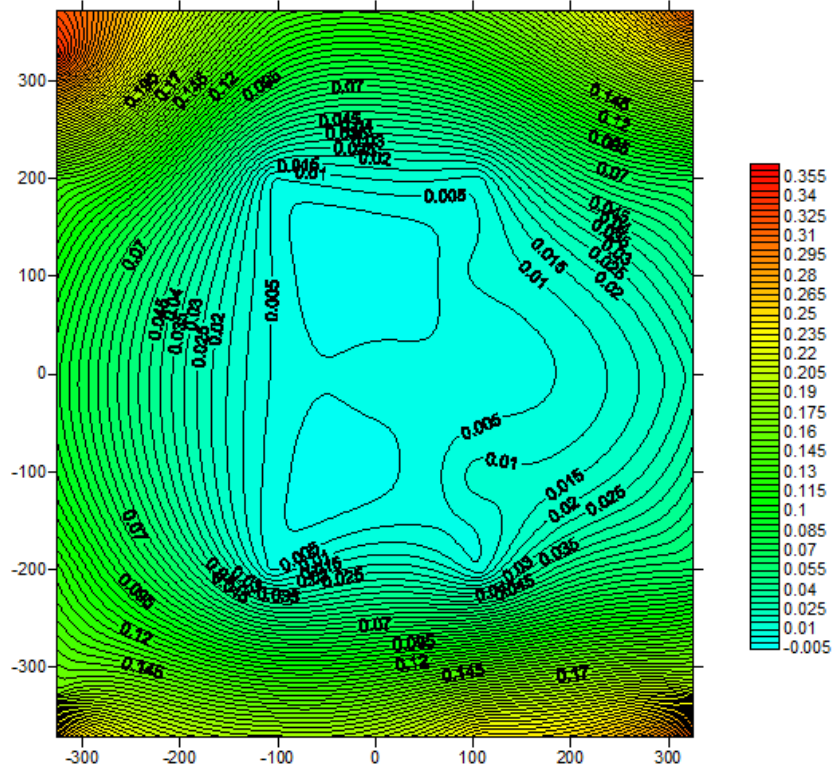
Γράφημα 50. Απεικόνιση τύρβης σε απόσταση 45cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 25m/s

Τύρβη στην ροή του ανέμου σε απόσταση 60cm από το ακροφύσιο.

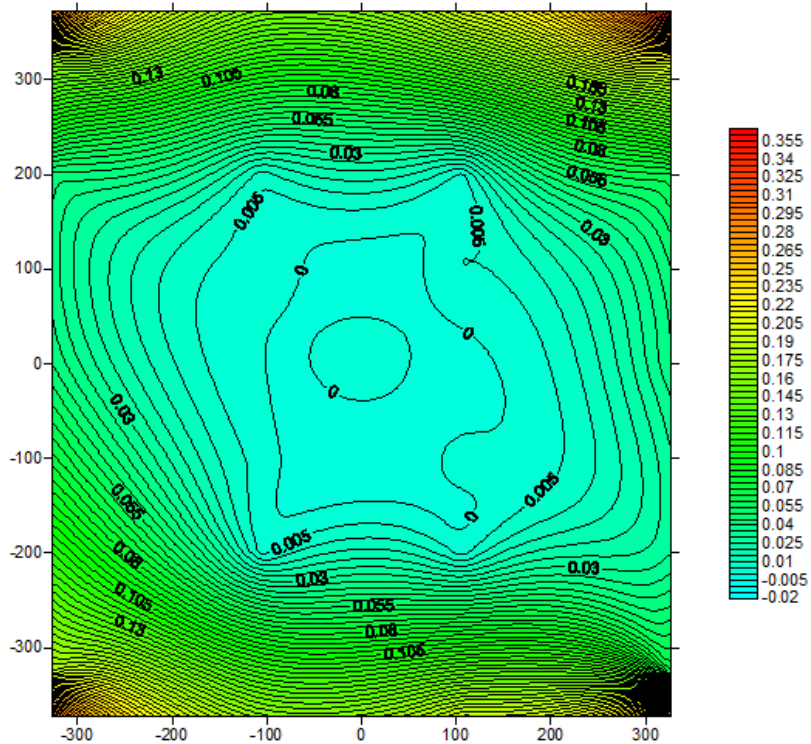


Γράφημα 51. Απεικόνιση τύρβης σε απόσταση 60cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 5m/s

Διπλωματική εργασία «Αξιολόγηση του πεδίου ροής στο χώρο δοκιμών της αεροσήραγγας του Εργαστηρίου Αιολικής Ενέργειας του ΕΛΜΕΠΑ», Παχάκης Γεώργιος.

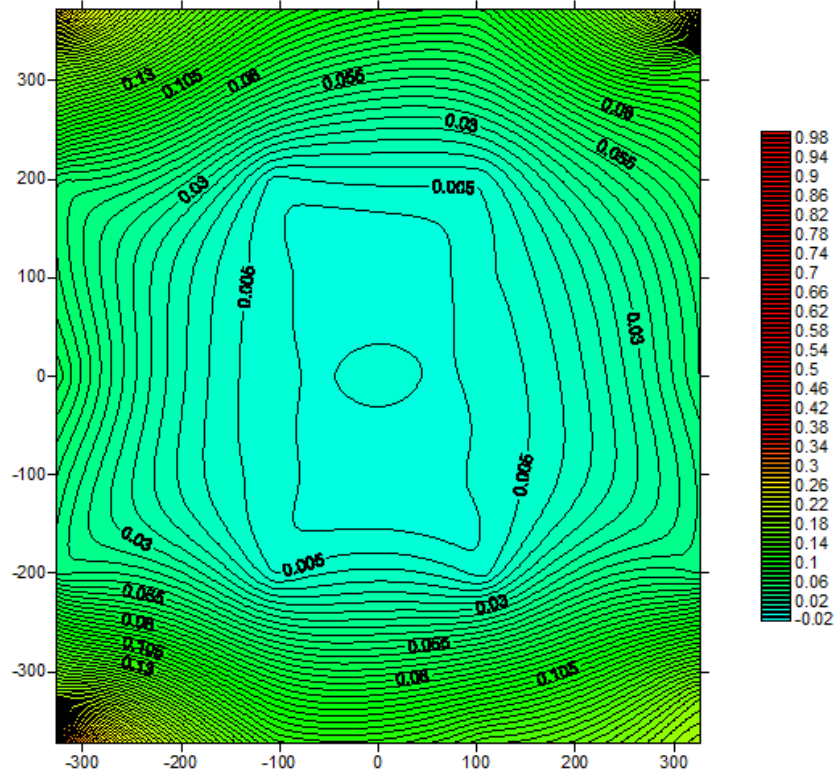


Γράφημα 52. Απεικόνιση τύρβης σε απόσταση 60cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 10m/s

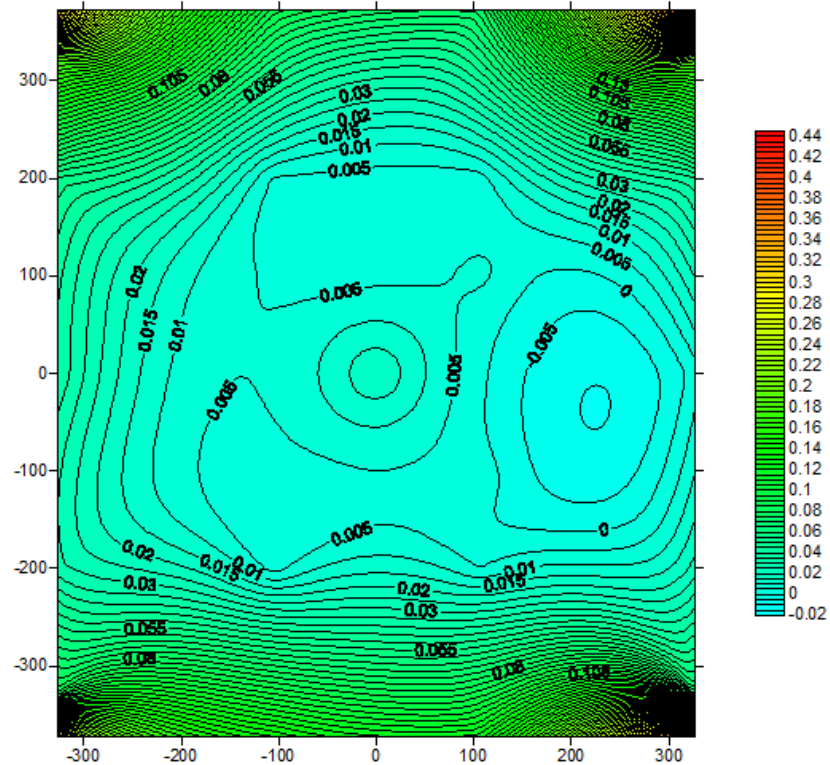


Γράφημα 53. Απεικόνιση τύρβης σε απόσταση 60cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 15m/s

Διπλωματική εργασία «Αξιολόγηση του πεδίου ροής στο χώρο δοκιμών της αεροσήραγγας του Εργαστηρίου Αιολικής Ενέργειας του ΕΛΜΕΠΑ», Παχάκης Γεώργιος.



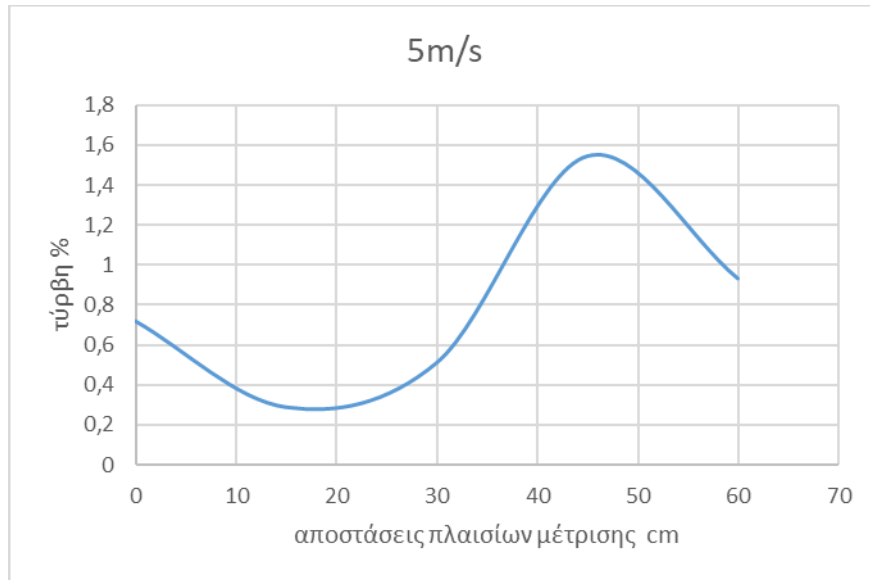
Γράφημα 54. Απεικόνιση τύρβης σε απόσταση 60cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 20m/s



Γράφημα 55. Απεικόνιση τύρβης σε απόσταση 60cm από το ακροφύσιο και ταχύτητα ανέμου 25m/s

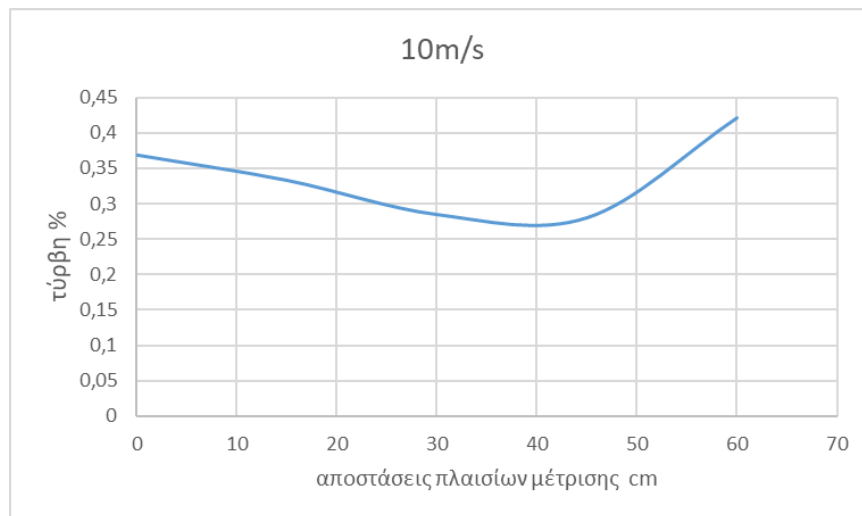
Γραφική απεικόνιση της διακύμανσης της τύρβης σε ποσοστό της % στο κέντρο κάθε πλαισίου μέτρησης

Για ταχύτητα 5m/s.



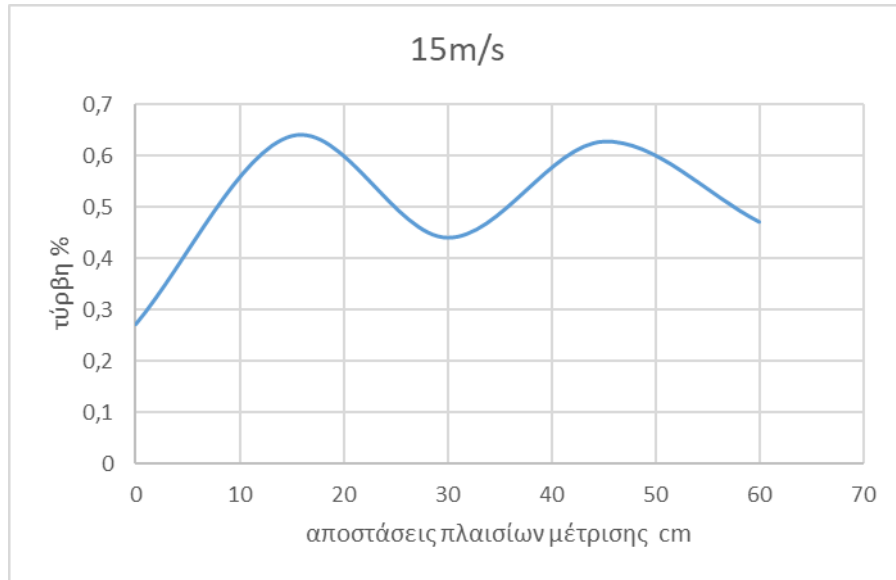
Γράφημα 56. Διακύμανση της τύρβης στο κέντρο του πλαισίου μέτρησης με εύρος τιμών 0,3 έως 1,6 % σε κάθε απόσταση από το ακροφύσιο της αεροσήραγγας.

Για ταχύτητα 10m/s.



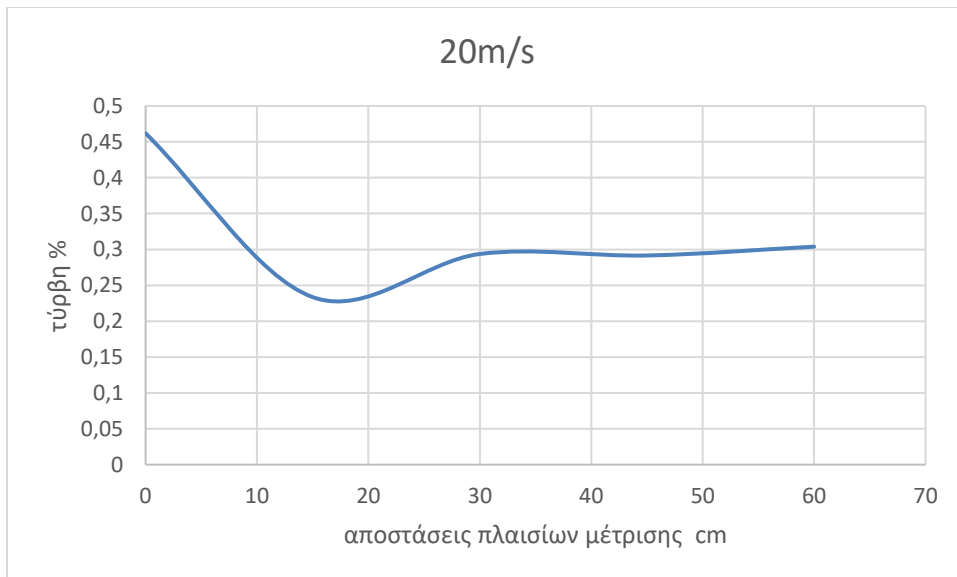
Γράφημα 57. Διακύμανση της τύρβης στο κέντρο του πλαισίου μέτρησης με εύρος τιμών 0,25 έως 0,4 % σε κάθε απόσταση από το ακροφύσιο της αεροσήραγγας.

Για ταχύτητα 15m/s.



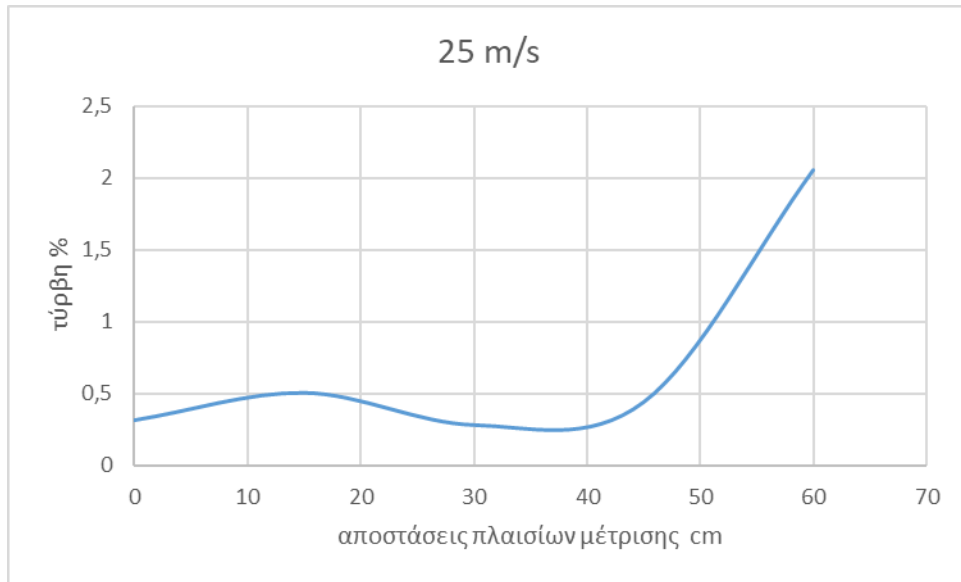
Γράφημα 58. Διακύμανση της τύρβης στο κέντρο του πλαισίου μέτρησης με εύρος τιμών 0,3 έως 0.65 % σε κάθε απόσταση από το ακροφύσιο της αεροσήραγγας.

Για ταχύτητα 20m/s.



Γράφημα 59. Διακύμανση της τύρβης στο κέντρο του πλαισίου μέτρησης με εύρος τιμών 0,45 έως 0,23 % σε κάθε απόσταση από το ακροφύσιο της αεροσήραγγας.

Για ταχύτητα 25

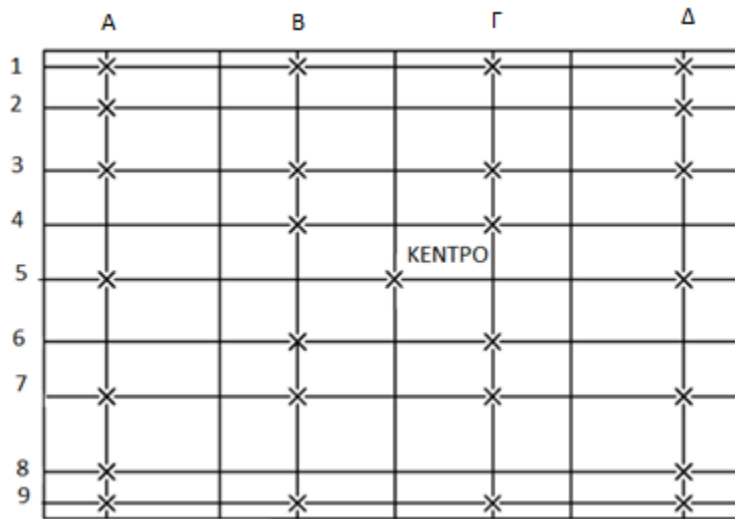


Γράφημα 60. Διακύμανση της τύρβης στο κέντρο του πλαισίου μέτρησης με εύρος τιμών 0,4 έως 2 % σε κάθε απόσταση από το ακροφύσιο της αεροσήραγγας.

Κεφάλαιο 4

Συμπεράσματα-Παρατηρήσεις

Συμπεράσματα από τα γραφήματα στις ταχύτητας ανέμου.



Εικόνα 53. Χαρτογράφηση διατομής ακροφυσίου

Εκ πρώτης όψεως των διαγραμμάτων για την ταχύτητα ανέμου, γίνεται φανερό ότι υπάρχει μια περιοχή γύρω από το κέντρο του ακροφυσίου με ακτίνα 20 cm, συμπεριλαμβάνοντας τα σημεία 3B, 3Γ, 7B, 7Γ, Η οποία είναι ιδανική για την πραγματοποίηση δοκιμών. Επίσης, να σημειωθεί ότι την απόσταση των 30cm από το επίπεδο εξόδου, έχουμε αλληλεπίδραση της ροής του ανέμου με το πάτωμα και το παράθυρο που βρίσκεται δίπλα από την αεροσήραγγα. Το οποίο, οφείλεται στην κλίση της ροής, κατά την έξοδο από το ακροφύσιο.

Αναλυτικές παρατηρήσεις για κάθε γράφημα ταχύτητας ανέμου.

1. Γραφήματα για απόσταση 0cm.

- Για ταχύτητα ανέμου 5m/s. Παρατηρούνται μικρές μεταβολές στις μετρήσεις, της τάξης του 1-2% στο κέντρο. Παράλληλα παρουσιάζονται και μεταβολές της τάξης του 5% στην περιφέρεια του γραφήματος
- Για ταχύτητα ανέμου 10m/s. Η ταχύτητα σε αυτή την περίπτωση είναι πιο ομαλή με διακυμάνσεις της τάξης του 2%. Όμως και σε αυτό το γράφημα υπάρχουν διακυμάνσεις στην ταχύτητα του ανέμου, οι οποίες είναι της τάξης του 7% και βρίσκονται πάλι στην περιφέρεια, περιοχή που μας είναι αδιάφορη.
- Για ταχύτητα ανέμου 15m/s. Υπάρχουν σε όλη την έκταση του γραφήματος μεταβολές της τάξης 2-4%. Παρατηρείται μια περιοχή μεταξύ των Α και Β, όπου έχουμε μία πτώση στην ταχύτητα κατά 8%. Πιθανόν θα υπήρξε κάποια ριπή ανέμου κατά την μέτρηση της περιοχής αυτής.
- Για ταχύτητα ανέμου 20 m/s. Η συμπεριφορά του αέρα εξισορροπείται με διακύμανση γύρω από το κέντρο με τιμή 1-3%.

- Για ταχύτητα ανέμου 25 m/s. Η συμπεριφορά του ανέμου βελτιώνεται σημαντικά με μεταβολές του ποσοστού του 2-3%.

2. Γραφήματα για απόσταση 15cm.

- Για ταχύτητα ανέμου 5m/s. Οι μεταβολές στην ταχύτητα είναι μικρές. Επίσης και σε αυτή την περίπτωση υπάρχουν στο κάτω μέρος του γραφήματος αναταράξεις στη ροή του ανέμου της τάξης του 10%.
- Για ταχύτητα ανέμου 10m/s. Όμοια με το γράφημα των 5m/s.
- Για ταχύτητα ανέμου 15m/s. Σε αυτή τη περίπτωση έχουμε πιο ομαλή ροή ανέμου με μικρές μεταβολές. Ακόμα είναι άξιο αναφοράς ότι στις γωνίες έχουμε απώλειες στην ταχύτητα σε ποσοστό πάνω από 20%.
- Για ταχύτητα ανέμου 20m/s. Η συμπεριφορά του ανέμου είναι ομοιόμορφη
- Για ταχύτητα ανέμου 25m/s. Όμοια με το γράφημα των 20m/s.

3. Γραφήματα για απόσταση 30cm.

- Για ταχύτητα ανέμου 5m/s. Έχει δημιουργηθεί μία περιοχή στο εσωτερικό του ακροφυσίου, όπου υπάρχει μία μεταβολή της τάξης του 10%. Παράλληλα παρατηρείται διακύμανση στο άνω και κάτω (2 και πάνω, 6 και κάτω) μέρος του ακροφυσίου, το οποίο οφείλεται στην κλίση της ροής διότι , το επίπεδο μέτρησης είναι σαφώς πιο μακριά από το ακροφύσιο της αεροσήραγγας.
- Για ταχύτητα ανέμου 10 και 15 m/s . Η συμπεριφορά της ροής του ανέμου είναι όμοια με αυτή για ταχύτητα 5m/s.
- Για ταχύτητα ανέμου 20m/s. Ομοίως με τη συμπεριφορά της ροής για τις ταχύτητες 5 10 και 15 m/s. Όμως σε αυτή τη περίπτωση παρατηρείται μια μεταβολή στη κάτω δεξιά γωνία, της τάξης του 50%. Μάλλον, θα προκλήθηκε από ριπή ανέμου από το παράθυρο, που βρίσκεται εκεί.
- Για ταχύτητα ανέμου 25m/s. Η ροή εξισορροπείται και ισχύει ότι και στις περιπτώσεις των ταχυτήτων 5, 10, 15m/s.

4. Γραφήματα για απόσταση 45cm.

- Για ταχύτητα ανέμου 5m/s. Λόγω της απομάκρυνσης από το ακροφύσιο, το άνω και κάτω τμήματα (πάνω από τον οριζόντιο 3* και κάτω από οριζόντιο7*) αλληλεπιδρούν εσθήτα με το πλαίσιο της αεροσήραγγας, παρατηρείται μείωση στην ταχύτητα σε ποσοστό περίπου 40% ενώ γύρω από το κέντρο η ροή διατηρείται σταθερή με μεταβολές της τάξης του 20%.
- Για ταχύτητα ανέμου 10m/s. Ομοίως με τη περίπτωση για ταχύτητα 5m/s. Όμως σε αυτή τη περίπτωση η ταχύτητα στο κέντρο διατηρείται σταθερή στα 10m/s σε μεγάλη έκταση του γραφήματος.
- Για ταχύτητα ανέμου 15m/s. Η συμπεριφορά της ροής είναι ομοιόμορφα κατανομημένη στη περιοχή ενδιαφέροντος, μεταξύ των οριζοντίων 3* και 7*.Επίσης φαίνεται μια διαφυγή της ροής από τα δεξιά λόγω του παραθύρου. Οι διακυμάνσεις που πραγματοποιούνται είναι της τάξης 10-20%
- Για ταχύτητα ανέμου 20m/s. Ομοίως με την περίπτωση των 15m/s.

➤ Για ταχύτητα ανέμου 25m/s. Ομοίως με τις περιπτώσεις 15 και 20m/s.

5. Γραφήματα για απόσταση 60cm.

Σε αυτή την απόσταση από το ακροφύσιο, η ωφέλιμη περιοχή μελέτης είναι αρκετά μικρή και βρίσκεται μεταξύ των σημείων 3B, 3Γ, 7B, 7Γ όπου η ροή του ανέμου παραμένει σταθερή, σε αντίθεση με την υπόλοιπη επιφάνεια των γραφημάτων, όπου η ταχύτητα μειώνεται με ρυθμό 20%.

Οπότε λόγω των παραπάνω δεν υπάρχει περιθώριο ανάλυσης σε αυτή την ομάδα γραφημάτων. Καθώς η ταχύτητα στην αξιοποιήσιμη περιοχή, είναι σταθερή και χωρίς διακυμάνσεις.

Συμπεράσματα από τα γραφήματα τύρβης.

1. Για την απόσταση των 0cm

- **Στα 5m/s.** Η τύρβη έχει αρκετά καλές τιμές σε όλο το πεδίο ροής της τάξης 0,003-0,0155. Κάτι που δεν το περιμέναμε
- **Στα 10m/s.** Οι τιμές της τύρβης και σε αυτή την περίπτωση είναι ικανοποιητικές. Διότι δεν ξεπερνάνε την τιμή 0,02 που σαν άνω όριο
- **Στα 15m/s.** Ομοίως την περίπτωση των 10m/s. Όμως υπάρχει μια τιμή που φτάνει στο 0,02 στο σημείο 5Δ.
- **Στα 20m/s.** Η τύρβη βρίσκεται σε χαμηλά επίπεδα <0,02
- **Στα 25m/s.** Ομοίως με τα 20 m/s

2. Για την απόσταση των 15cm

- **Στα 5m/s** Η τύρβη είναι αρκετά χαμηλά σε όλα τα σημεία (<0,02). Εκτός από τα σημεία 7A, 7B, 7Γ, 7Δ και κάτω όπου έχει τιμές από 0,025 έως 0,135
- **Στα 10m/s** Ομοίως με τα 5m/s. Αλλά τώρα στο κάτω μέρος(8A, 8B)και κάτω η τύρβη έχει τιμές 0,024 έως 0,04.
- **Στα 15m/s** συμπεριφορά βελτιώνεται με τιμές μικρότερες του 0,002
- **Στα 20m/s** Όμοια με τα 15 m/s.
- **Στα 25m/s** Οι τιμές της τύρβης παραμένουν αρκετά χαμηλά στο εσωτερικό του γραφήματος σε αντίθεση με τις τιμές στις γωνίες όπου παίρνουν τιμές κοντά στο 0.04

3. Για την απόσταση των 30cm

- **Στα 5m/s** Οι τιμές είναι κάτω του 0,02 σε όλο το πεδίο που ασχολούμαστε (μεταξύ των οριζοντίων 3 και 7), Έξω από το πεδίο αυτό η τιμή της τύρβης ξεπερνά το 0,04.
- **Στα 10m/s** Ομοίως με 5m/s.
- **Στα 15m/s** Οι τιμές είναι κάτω του 0,02 στη περιοχή εντός των οριζοντίων 3 και 7 .
- **Στα 20m/s.** Οι τιμές είναι κάτω του 0,02 κοντά στο κέντρο
- **Στα 25 m/s.** Ομοίως με τα 20m/s.

4. Για την απόσταση των 45cm

- **Στα 5m/s** Η τύρβη με τιμές μικρότερες του 0,02 βρίσκεται στη περιοχή γύρο από το κέντρο μεταξύ των οριζοντίων 4 και 6
- **Στα 10m/s.** Ομοίως τα 5m/s.
- **Στα 15m/s.** Στη περιοχή εντός των οριζοντίων 4 και 6, η τιμή της τύρβης παραμένει χαμηλά (<0,02). Ενώ εκτός έχει τιμές που ξεπερνούν το 0,325
- **Στα 20 και 25 m/s.** ισχύει ότι και στη περίπτωση των 15m/s.

5. Για την απόσταση των 60cm,

Σε αυτή την κατηγορία δεν υπάρχουν μεγάλες διαφορές στα γραφήματα τύρβης. Οπότε σε αυτή την απόσταση παρατηρούμε ότι, το πεδίο στο οποίο η τιμή της τύρβης είναι μικρότερη του 0,02, είναι συγκεντρωμένο σε μία περιοχή ακτίνας 30cm από το κέντρο.

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 3B, 3Γ και 7B, 7Γ καθώς εκεί παρατηρείται η καλύτερη συμπεριφορά όσον αφορά την ταχύτητα και την τύρβη ταυτόχρονα

Προτάσεις για βελτίωση της διεξαγωγής.

- Θα πρότεινα να τοποθετηθούν γωνίες, στην εσωτερική διατομή του ακροφυσίου της αεροσήραγγας, ούτως ώστε, να μετατραπεί από τετραγωνική σε εξαγωνική διατομή. Με αυτό τον τρόπο θα εξομαλυνθεί η ροή του ανέμου κατά την έξοδο, το οποίο θα έχει ως αποτέλεσμα μία πιο στρωτή ροή.



Γράφημα 61. Ενδεικτική τοποθέτηση γωνιών για την δημιουργία εξαγωνικής διατομής.

- Επίσης στο κομμάτι των μετρήσεων. Πιστεύω πως είναι επιτακτική η ανάγκη κατασκευής ένας μηχανισμός πάκτωσης του σωλήνα Pitot πάνω στην τράπεζα XY, έτσι ώστε να μειωθούν οι μικροδονήσεις κατά την μέτρηση. Οι οποίες σε μεγάλες ταχύτητες είναι καταστροφικές
- Παράλληλα με το προηγούμενο, είναι ανάγκη να βρεθεί ένας τρόπος διατήρησης της καθετότητας του σωλήνα Pitot ως προς τη διατομή του ακροφυσίου. Διότι, σε αυτό το “κομμάτι” μπλέκεται ο ανθρώπινος παράγοντας, που πολλές φορές είναι αστάθμητος κάνοντας σφάλματα.
- Τέλος για την καλύτερη ομαλοποίηση της ροής του ανέμου, στο εσωτερικό της αεροσήραγγας θα πρότεινα να γίνεται καθαρισμός του πιο συχνά.
- Περιοδική συντήρηση στα εξαρτήματα της αεροσήραγγας. Όπως είναι τα σωληνάκια πίεσης των οργάνων Pitot και Static.

Βιβλιογραφία

Πρωτογενής βιβλιογραφία

Δ.Γ. Παπανίκας, 2010. *Εφαρμοσμένη Ρευστομηχανική*. MEDIA GIRU. ΠΑΤΡΑ-ΑΘΗΝΑ.

Δευτερογενής βιβλιογραφία

- <https://www.wikipedia.org/>
- <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/WindTunnel/history.html>
- <https://www.nasa.gov/audience/forstudents/k-4/stories/nasa-knows/what-are-wind-tunnels-k4.html>
- https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CE%B5%CF%81%CE%BF%CE%B4%CF%85%CE%BD%CE%B1%CE%BC%CE%B9%CE%BA%CE%AE_%CF%83%CE%AE%CF%81%CE%B1%CE%B3%CE%B3%CE%B1
- <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:3966:ed-2:v1:en>
- https://en.wikipedia.org/wiki/Pitot_tube
- https://en.wikipedia.org/wiki/Reynolds_number
- <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>