

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

*Καταγραφή αεροδυναμικής
συμπεριφοράς
αεροσήραγγας με ανεμόμετρο
θερμού νήματος*

Επιμέλεια : Χατζηκόστα Μαγδαληνή

Υπεύθυνος Καθηγητής :
Μπούρης Δημήτριος

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

Διπλωματική Εργασία

«Καταγραφή αεροδυναμικής συμπεριφοράς αεροσήραγγας με ανεμόμετρο θερμού νήματος»

Επιμέλεια : Χατζηκώστα Μαγδαληνή

Α.Π.Θ. - ΤΜΗΜΑ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ
ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΠΟΡΩΝ
Αριθμ. Εισαγ.: 1460.....
Ημερομηνία: 7/4/05.....

Υπεύθυνος Καθηγητής : Μπούρης Δημήτριος

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο	8
ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΜΕ ΑΝΕΜΟΜΕΤΡΟ ΘΕΡΜΟΥ ΝΗΜΑΤΟΣ	9
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	9
1.1.1 Ο ΣΩΛΗΝΑΣ ΡΙΤΟΤ	10
1.1.2 Ο ΣΩΛΗΝΑΣ ΡΙΤΟΤ-STATIC	10
1.1.3 ΤΟ ΑΝΕΜΟΜΕΤΡΟ ΘΕΡΜΟΥ ΝΗΜΑΤΟΣ	12
1.2 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΟΡΓΑΝΟΥ	13
1.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΟΡΓΑΝΟΥ	23
1.3.1 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΟΡΓΑΝΟΥ ΜΕ ΣΤΑΘΕΡΟ ΡΕΥΜΑ	24
1.3.2 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΟΡΓΑΝΟΥ ΜΕ ΣΤΑΘΕΡΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ	31
1.3.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΤΑΘΕΡΑΣ ΧΡΟΝΟΥ	36
1.4 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	38
1.4.1 ΟΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ	39
1.4.2 ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ	52
1.4.3 ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΗΜΑΤΩΝ	57
1.5 ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΟΡΓΑΝΟΥ	60
1.6 Η ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ	67
1.6.1 ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΟΥ ΣΤΙΣ ΔΙΑΤΑΡΑΧΕΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ	68

1.6.2 ΟΙ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΤΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΟΥ ΣΕ ΤΥΡΒΩΔΕΣ ΠΕΔΙΟΡΟΗΣ	69
1.6.3 ΔΟΚΙΜΗ ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΟΥ ΠΑΛΜΟΥ	74
1.6.4 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΧΡΗΣΗΣ ΘΕΡΜΟΥ ΝΗΜΑΤΟΣ	76
1.7 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΙΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	86
1.8 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΕΙΔΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ	89
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο	90
ΤΑ ΟΡΓΑΝΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΚΑΙ Η ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ	90
2.1 ΤΟ ΜΕΤΡΗΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ	91
2.1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	92
2.1.2 ΤΟ ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΟ ΣΥΣΤΗΜΑ	93
Ο ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ	93
ΤΟ ΚΑΛΩΔΙΟ ΤΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	96
ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΤΗΡΙΞΗΣ ΤΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ	96
Η ΓΕΦΥΡΑ	97
ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗΣ	98
2.2 ΚΑΡΤΑ ΑΝΑΛΟΓΙΚΟΥ — ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ	100
2.3 Ο ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΤΗΣ ΣΗΜΑΤΟΣ	102
2.4 Ο ΣΩΛΗΝΑΣ ΡΙΤΟΤ	103
2.5 Η ΑΕΡΟΣΗΡΑΓΓΑ	105

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο **110**

**ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΣΤΗΝ ΑΕΡΟΣΗΡΑΓΓΑ ΜΕ ΑΝΕΜΟΜΕΤΡΟ
ΘΕΡΜΟΥ ΝΗΜΑΤΟΣ** **110**

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ 111

3.2 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ 111

3.2.1 ΠΡΩΤΗ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ 111

3.2.2 ΔΕΥΤΕΡΗ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ 126

3.2.3 ΤΡΙΤΗ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ 142

3.3 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΣΤΗΝ
ΑΕΡΟΣΗΡΑΓΓΑ 155

3.3.1 ΡΟΗ ΣΕ ΑΓΩΓΟ ΜΗ ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ 155

3.3.2 ΔΙΑΝΟΜΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΣΤΑ 7 m/s 166

3.3.3 ΔΙΑΝΟΜΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΣΤΑ 4 m/s 177

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο **188**

ΚΡΙΤΙΚΗ, ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ **188**

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο **192**

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ **192**

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας έγινε για πρώτη φορά προσπάθεια να καταγραφεί η αεροδυναμική συμπεριφορά της αεροσήραγγας, που διαθέτει το τμήμα Μηχανικών Διαχείρισης Ενεργειακών Πόρων, με χρήση ανεμόμετρου θερμού νήματος. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε με τη διεξαγωγή μιας σειράς πειραματικών μετρήσεων, οι οποίες έλαβαν χώρα στην αεροσήραγγα του εργαστηρίου που διαθέτει το τμήμα. Οι πειραματικές μετρήσεις έγιναν κατά τη διάρκεια της άνοιξης (Απρίλιος – Μάιος) και του φθινοπώρου (Σεπτέμβριος) του έτους 2004. Κατά τη διάρκειά τους τυχόν προβλήματα που παρουσιάστηκαν έγινε προσπάθεια να αντιμετωπιστούν με τον πλέον ενδεδειγμένο τρόπο και τα μέσα που υπήρχαν διαθέσιμα. Μάλιστα απαραίτητη κρίθηκε η αντικατάσταση του αρχικού ανεμιστήρα της αεροσήραγγας, από νέο ανεμιστήρα, λόγω ατυχήματος σε άλλη εργαστηριακή άσκηση.

Η εργασία αποτελείται από πέντε κεφάλαια:

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται από τη βιβλιογραφία η γενική μεθοδολογία μέτρησης ταχύτητας με τη χρήση ανεμομέτρου θερμού νήματος. Παράλληλα γίνεται αναφορά στις διατάξεις που είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν κατά τη διάρκεια των πειραματικών μετρήσεων. Το δεύτερο κεφάλαιο αναφέρεται στις συσκευές του εργαστηρίου και την διάταξή τους, όπως αυτές χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια των πειραματικών μετρήσεων. Στο τρίτο κεφάλαιο μπορεί κανείς να δει τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων, καθώς και το προφίλ ταχύτητας της αεροσήραγγας που προκύπτει. Το τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζει τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις πειραματικές μετρήσεις, κριτική πάνω σε αυτά, αλλά και τι μπορεί να πραγματοποιηθεί στο μέλλον, πάνω στα ίδια πλαίσια με τη συγκεκριμένη εργασία, δηλαδή με χρήση της αεροσήραγγας.

γας, του ανεμομέτρου θερμού νήματος και τον υπόλοιπων διατάξεων. Τέλος στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στη βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια της συγκεκριμένης εργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΜΕ ΑΝΕΜΟΜΕΤΡΟ ΘΕΡΜΟΥ ΝΗΜΑΤΟΣ

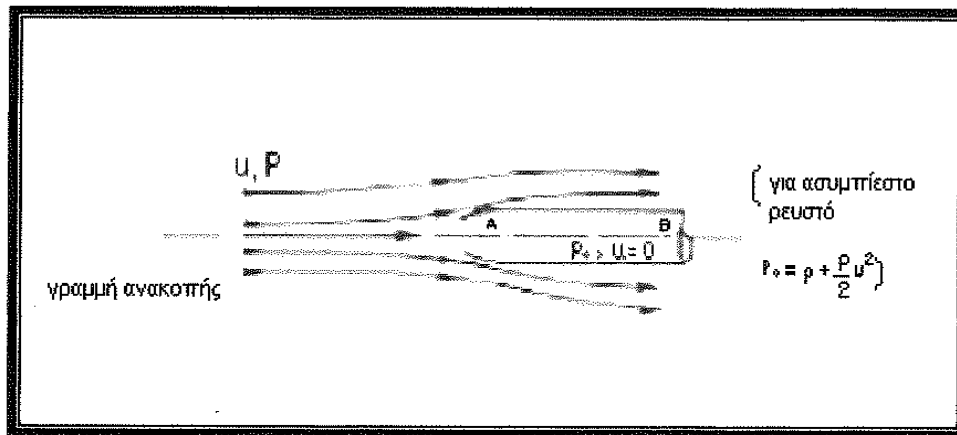
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Για τη μελέτη φαινομένων ροής είναι απαραίτητο, πέρα από τη μέτρηση παροχής όγκου ή μάζας, να είναι γνωστή η τιμή αλλά και η διεύθυνση της ταχύτητας μέσα σε ένα πεδίο ροής. Κάτι τέτοιο μπορεί να γίνει με όργανα που μετρούν την ταχύτητα αλλά και τα χαρακτηριστικά της τύρβης. Τα όργανα μέτρησης της ταχύτητας διαιρούνται σε δύο κατηγορίες:

- Στα όργανα που τοποθετούνται μέσα στο πεδίο ροής όπως είναι τα όργανα μέτρησης διαφοράς πίεσης (ο σωλήνας pitot-static, ο σωλήνας pitot, οι σωλήνες yaw) και το ανεμόμετρο θερμού νήματος.
- Στα όργανα που μετράνε χωρίς να επηρεάζουν το πεδίο ροής όπως όργανα που χρησιμοποιούν ακτίνες ή ακτινοβολίες, όπως οπτικές ακτίνες, ακτίνες Χ, ακτινοβολία γ (το laser Doppler ανεμόμετρο, το ανεμόμετρο δύο εστιών L2F).

1.1.1 Ο ΣΩΛΗΝΑΣ ΡΙΤΟΤ

Ο σωλήνας pitot χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά από τον Γάλλο Pitot το 1732 σε μετρήσεις της ταχύτητας του νερού στον ποταμό Σηκουάνα. Είναι ένας απλός σωλήνας, του οποίου το ένα άκρο είναι ανοικτό προς το ρευστό ενώ το άλλο συνδέεται σε μανόμετρο. Ο σωλήνας pitot τοποθετούμενος παράλληλα προς το ρεύμα ρευστού καταγράφει την ολική πίεσή του δεδομένου ότι το ρευστό στο άνοιγμά του ηρεμεί, δηλαδή εκεί βρίσκεται το σημείο ανακοπής στο οποίο η ταχύτητα του ρευστού είναι μηδενική. Στο σχήμα 1.1 φαίνεται σχηματικά η τυπική διάταξη ενός σωλήνα pitot.



Σχήμα 1.1 : Ο σωλήνας Pitot.

1.1.2 Ο ΣΩΛΗΝΑΣ ΠΙΤΟΤ-STATIC

Με το σωλήνα pitot-static, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια των πειραματικών μετρήσεων, μετράται η δυναμική πίεση p_d σε μια θέση εντός του πεδίου ροής. Ο σωλήνας είναι συνδυασμός του προηγούμενου, που μετράει ολική πίεση, με μια μέτρηση της στατικής πίεσης έτσι ώστε να προκύψει η δυναμική πίεση από τη σχέση:

$$\text{δυναμική πίεση} = \text{ολική πίεση} - \text{στατική πίεση}$$

Ισχύει:

$$p_d = \rho \cdot U^2 / 2 \quad (1.1)$$

όπου:

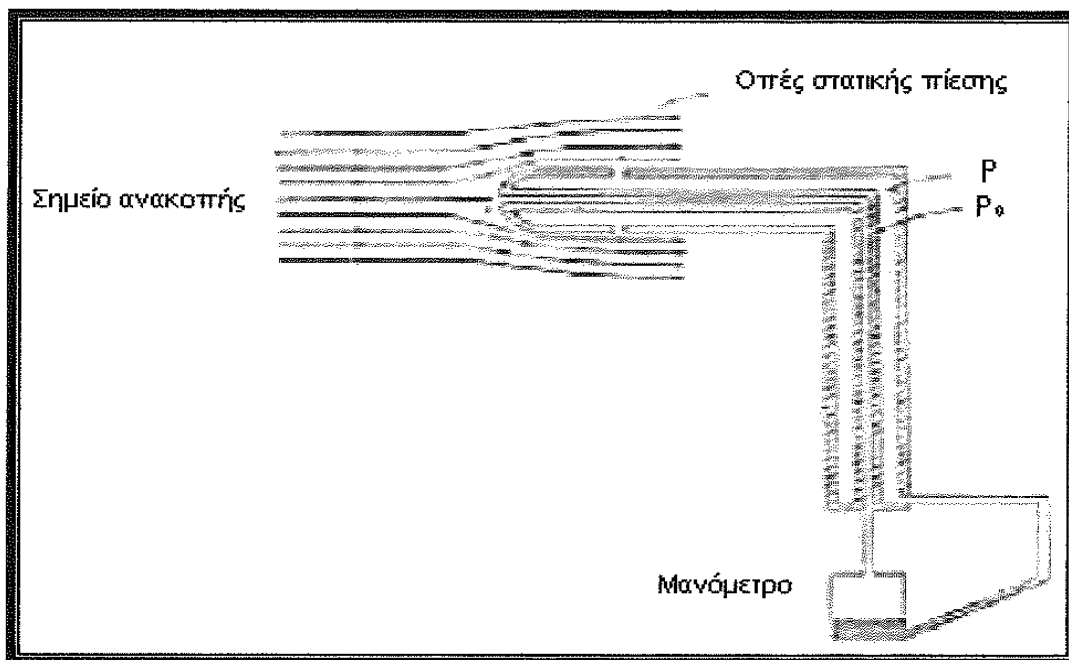
ρ : η πυκνότητα του ρευστού και

U : η ταχύτητά του.

Από τη σχέση αυτή προσδιορίζεται τελικά η ταχύτητα του ρευστού:

$$U = \sqrt{\frac{2p_d}{\rho}} \quad (1.2)$$

Ο σωλήνας αποτελείται από δύο ομοαξονικούς σωλήνες, εκ των οποίων ο εσωτερικός μετρά την ολική πίεση p_o στο σημείο ανακοπής, ενώ ο εξωτερικός χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της στατικής πίεσης, με μια σειρά οπών που βρίσκονται στην περιφέρειά του. Η διαφορά πιέσεων μετρούμενη σε ένα μανόμετρο δίνει την τιμή της ταχύτητας. Στο σχήμα 1.2 φαίνεται η τυπική διάταξη ενός σωλήνα pitot-static. Διακρίνονται οι οπές του εξωτερικού σωλήνα και το σημείο ανακοπής.

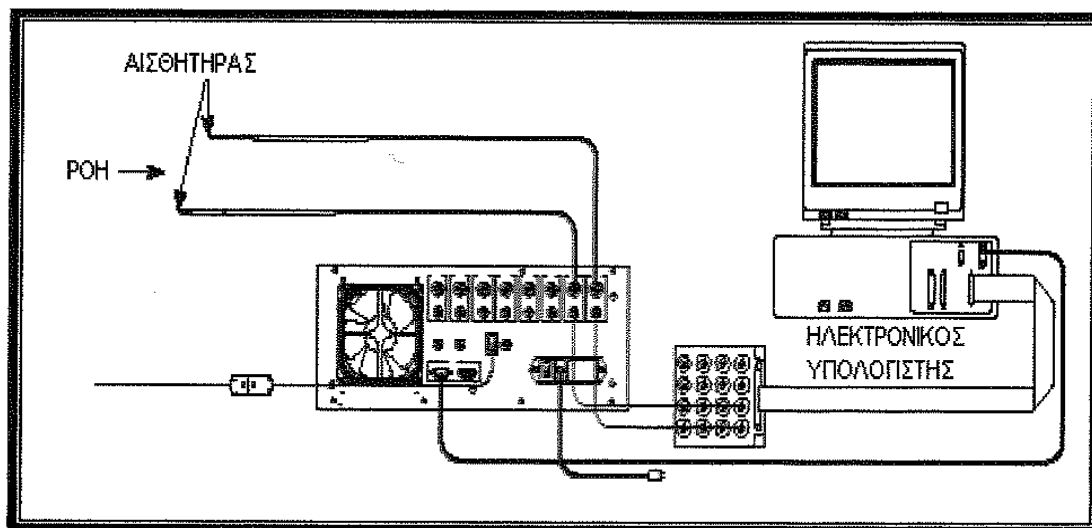


Σχήμα 1.2 : Ο σωλήνας Pitot-Static.

1.1.3 ΤΟ ΑΝΕΜΟΜΕΤΡΟ ΘΕΡΜΟΥ ΝΗΜΑΤΟΣ

Το ανεμόμετρο θερμού νήματος δίνει τη δυνατότητα μέτρησης ταχύτητας, η τιμή της οποίας μεταβάλλεται με το χρόνο. Είναι ένα κατάλληλο όργανο για τη μέτρηση μέσων μεγεθών ταχύτητας αλλά και χαρακτηριστικών τύρβης. Χρησιμοποιείται δηλαδή για τη μέτρηση ταχυτήτων, οι

οποίες μεταβάλλονται με το χρόνο, με σκοπό τον προσδιορισμό της μέσης τιμής και του ποσοστού τύρβης. Η ικανότητά του αυτή αποτελεί και το κύριο του πλεονέκτημα σε σχέση με άλλα μετρητικά όργανα, όπως ο σωλήνας Pitot ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για τη μέτρηση της μέσης τιμής της ταχύτητας και για ροή με μικρό ποσοστό τύρβης, ώστε η μέτρηση να είναι ακριβής. Το όργανο στην αρχική του μορφή παρουσιάστηκε στο πρώτο μισό του 20^{ου} αιώνα και αποτελεί ένα από τα βασικότερα εργαλεία για τη μελέτη της τύρβης. Η μέθοδος αυτή αποτελεί τα τελευταία χρόνια την κύρια μέθοδο πειραματικής μελέτης πεδίων ροής που παρουσιάζουν είτε πρακτικό, είτε θεωρητικό ενδιαφέρον (για παράδειγμα ώστε να γίνει έλεγχος της ορθότητας των μαθηματικών μοντέλων προσομοίωσης της τύρβης της ροής). Στο σχήμα 1.3 φαίνεται η τυπική διάταξη ενός ανεμομέτρου θερμού νήματος.

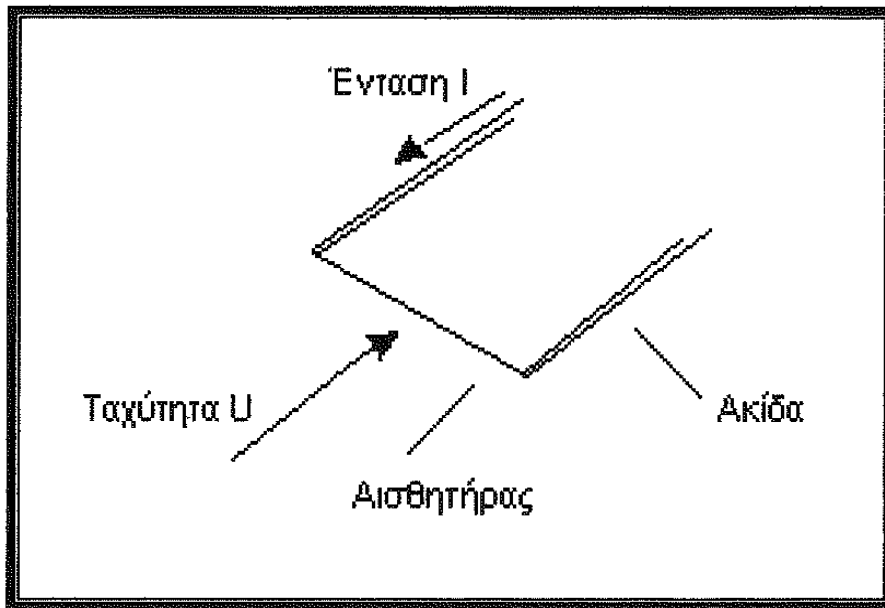


Σχήμα 1.3 : Τυπική διάταξη θερμού νήματος.

1.2 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΟΡΓΑΝΟΥ

Το ανεμόμετρο θερμού νήματος λειτουργεί βάσει της μεταφοράς θερμότητας από έναν αισθητήρα θερμότητας, το θερμό νήμα (hot-wire) ή τη θερμή επιφάνεια (hot-film), στο ρευστό που τον περιβάλλει, καθώς η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή, φαινόμενο που λαμβάνει χώρα σε αυτή την περίπτωση, συνδέεται πρώτιστα με την ταχύτητα του ρευστού. Με τον όρο μετάδοση θερμότητας με συναγωγή εννοείται η μετάδοση θερμότητας από ή προς ένα μέσο που ρέει. Με άλλα λόγια, στην μεταφορά ενέργειας με την μικροσκοπική μοριακή κίνηση, προστίθεται η μεταφορά ενέργειας λόγω της μακροσκοπικής κίνησης του ρευστού. Συγκεκριμένα παρουσιάζεται το φαινόμενο της εξαναγκασμένης συναγωγής καθώς έχουμε ροή γύρω από ένα αντικείμενο για λόγους που δεν έχουν να κάνουν μόνο με τη διαφορά θερμοκρασίας – πυκνότητας, όπως στη «φυσική κυκλοφορία».

Η μέτρηση της ταχύτητας του ρευστού σε ένα συγκεκριμένο σημείο γίνεται τοποθετώντας το νήμα στο σημείο αυτό και διοχετεύοντας το απαραίτητο ποσό ενέργειας. Η απαιτούμενη ενέργεια δίδεται συνήθως ως ηλεκτρική ενέργεια και το νήμα θερμαίνεται από ηλεκτρικό ρεύμα έντασης I που διέρχεται από αυτό, λόγω του φαινομένου Joule. Το ποσοστό της θερμότητας που χάνεται εξαρτάται από την πλεονάζουσα θερμότητα του αισθητήρα, τα φυσικά και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του, καθώς και από τα χαρακτηριστικά του ρευστού που τον περιβάλλει. Το αισθητήριο διατηρείται σε διαφορετική θερμοκρασία από το ρευστό, συνήθως υψηλότερη ή αν το ρευστό είναι πολύ υψηλής θερμοκρασίας χαμηλότερη. Λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας το νήμα ψύχεται, οπότε αλλάζει η ηλεκτρική του αντίσταση. Στο σχήμα 1.4 απεικονίζεται σχηματικά ο αισθητήρας ενός ανεμομέτρου θερμού νήματος.



Σχήμα 1.4 : Σχηματική απεικόνιση αισθητήρα ανεμόμετρου θερμού νήματος.

Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται σε ασυμπίεστο ρευστό το οποίο ρέει γύρω από τον αισθητήρα. Κατά τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από τον αισθητήρα παράγεται θερμότητα ίση με:

$$Q = I^2 R_w \quad (1.3)$$

όπου:

Q : το ποσό της θερμότητας που παράγεται,

R_w : η αντίσταση του νήματος και

I : η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος.

Σε κατάσταση ισορροπίας η θερμότητα που παράγεται είναι ίση με εκείνη που απάγεται από το ρευστό, δηλαδή ισχύει:

$$I^2 R_w = hA(T_w - T_f) \quad (1.4)$$

όπου:

h : ο συντελεστής συναγωγής,

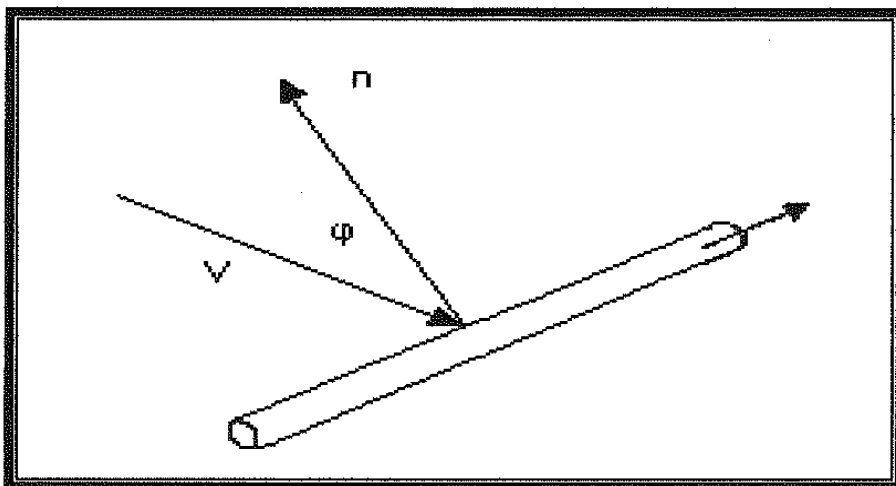
A : η επιφάνεια,

T_w : η θερμοκρασία του νήματος και

T_f : η θερμοκρασία του ρευστού.

Οι δείκτες w και f σημαίνουν αντίστοιχα νήμα (wire) και ρευστό (fluid). Ο συντελεστής συναγωγής h είναι συνάρτηση της ταχύτητας του ρευστού, της διαφοράς θερμοκρασίας ανάμεσα στο ρευστό και στο στοιχείο, της γεωμετρίας του στοιχείου και φυσικά της φύσης του ρευστού.

Η γενική μορφή του αισθητήρα είναι το νήμα διαμέτρου d , μήκους 2ℓ και στο επίπεδο που ορίζεται από το νήμα και το διάνυσμα της ταχύτητας, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 1.5.



Σχήμα 1.5 : Σχηματική απεικόνιση του πιο συνηθισμένου τύπου αισθητήρα.

Για νήμα απείρου μήκους η εναλλαγή θερμότητας εξαρτάται, όσον αφορά την ταχύτητα, από την συνιστώσα $V_n = V \cos \phi$. Δεδομένου όμως ότι για πρακτικές μετρήσεις ο λόγος $2l/d$ είναι της τάξεως του 100 για θερμό νήμα και 15 για κυλινδρικές επιφάνειες (hot-films) θα πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν και η συνιστώσα $V_s = V \sin \phi$ στους υπολογισμούς μετάδοσης θερμότητας. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν σχέσεις που περιγράφουν τη εναλλαγή θερμότητας ανάμεσα σε κύλινδρο και ρευστό. Με τη βοήθεια αδιάστατων αριθμών έχουμε την παρακάτω συνάρτηση:

$$Nu = f(Re, Pr, \frac{T_w}{T_f}, Gr, Ma, 2l/d, a, \phi) \quad (1.5)$$

όπου:

$$Nu : \text{ο αριθμός Nusselt} \quad \left(\frac{h \cdot d}{k_f} \right) \quad (1.6)$$

$$Re : \text{ο αριθμός Reynolds} \quad \left(\frac{\rho_f \cdot u \cdot d}{\mu_f} \right) \quad (1.7)$$

$$Pr : \text{ο αριθμός Prandtl} \quad \left(\frac{c_p \mu_f}{k_f} \right) \quad (1.8)$$

$$Gr : \text{ο αριθμός Grashof} \quad \left(\frac{g d^3 (T_w - T_f)}{\nu_f^2} \right) \quad (1.9)$$

$$Ma : \text{ο αριθμός Mach} \quad \left(\frac{u}{\sqrt{\gamma \cdot R \cdot T}} \right) \quad (1.10)$$

a : ο λόγος υπερθέρμανσης του νήματος $\left(\frac{T_w - T_f}{T_f} \right)$ (1.11)

φ : η γωνία της ταχύτητας και του άξονα του νήματος στο επίπεδο που ορίζεται από το νήμα και το διάνυσμα της ταχύτητας.

l : μήκος νήματος,

d : διάμετρος νήματος.

Ο αριθμός Nusselt της ροής εξαρτάται από τις παρακάτω παραμέτρους:

- Την ταχύτητα της ροής.
- Τις φυσικές ιδιότητες του ρευστού.
- Τη διάμετρο του νήματος.
- Τις φυσικές ιδιότητες του νήματος.
- Τη θερμοκρασιακή διαφορά νήματος και ρευστού.

Τις περισσότερες φορές οι ιδιότητες του ρευστού υπολογίζονται στη μέση θερμοκρασία T_f .

Στην περίπτωση που το ρευστό είναι ασυμπιέστο, ισχύει η σχέση:

$$Nu = 0.42Pr^{0.26} + 0.57Pr^{0.33}Re^{0.5} \quad (1.12)$$

και καλύπτουν την περιοχή για:

$$0.71 \leq Pr \leq 525$$

$$2 \leq Nu \leq 20$$

Για αέρα η εξίσωση γίνεται:

$$Nu = (A + BRe^n) [(T_w + T_f) / 2T_f]^{0.17} \quad (1.13)$$

σχέση που αναπτύχθηκε από τον Collis και Williams. Οι διάφοροι συντελεστές εδώ είναι συνάρτηση του αριθμού Reynolds του νήματος έτσι για την περιοχή $0.02 \leq Re \leq 44$ ισχύουν:

$$n = 0.45, \quad A = 0.24, \quad B = 0.56$$

ενώ για $44 \leq Re \leq 140$ ισχύουν:

$$n = 0.51, \quad A = 0, \quad B = 0.48$$

Η ασυνέχεια για $Re \cong 44$ οφείλεται στην εμφάνιση στην περιοχή αυτή δινών πίσω από το νήμα, που αυξάνουν την εναλλαγή θερμότητας.

Για μετρήσεις όπου πρέπει να ληφθεί υπ' όψη και η άνωση (Buoyancy effects), όταν δηλαδή: $Re \leq Gr^{1/n}$ όπου $n=3$ για αέρα και $n=2-3$ για υγρά, τότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι προηγούμενες σχέσεις με την προϋπόθεση όμως ότι ο αριθμός Reynolds θα αντικατασταθεί με τον ακόλουθο Re_{ef} :

$$Re_{ef}^2 = Re^2 + (0.9Gr^{0.418})^2 \quad (1.14)$$

Τέλος, για την περίπτωση υπερηχητικών ροών ισχύει η σχέση:

$$Nu_o = (A Re_o^{1/2} - B)(1 - ca) \quad (1.15)$$

όπου:

$$A = 0.580, \quad B = 0.795, \quad c = 0.18$$

και ο δείκτης o αναφέρεται σε συνθήκες ολικές.

Για πρακτικές μετρήσεις η σχέση μπορεί να γραφεί σαν:

$$RI^2 / (R - R_a) = A(1 + 0.49a) + B(1 + 0.12a) V_n^{0.45} \quad (1.16)$$

όπου:

R : είναι η αντίσταση του νήματος,

I : είναι η ένταση του ρεύματος και

A, B : είναι σταθερές που έχουν σχέση με το ρευστό και το νήμα.

Πολύ πριν επιβληθεί η χρήση των προηγούμενων σχέσεων δόθηκε για πρώτη φορά από τον King το 1914 η εξίσωση:

$$Nu = A + B u_{ef}^{0.45} \quad (1.17)$$

Πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι οι παραπάνω σχέσεις ισχύουν με την προϋπόθεση ότι ο αριθμός Knudsen (Kn), που ορίζεται σαν:

$$Kn = \lambda / d \quad (1.18)$$

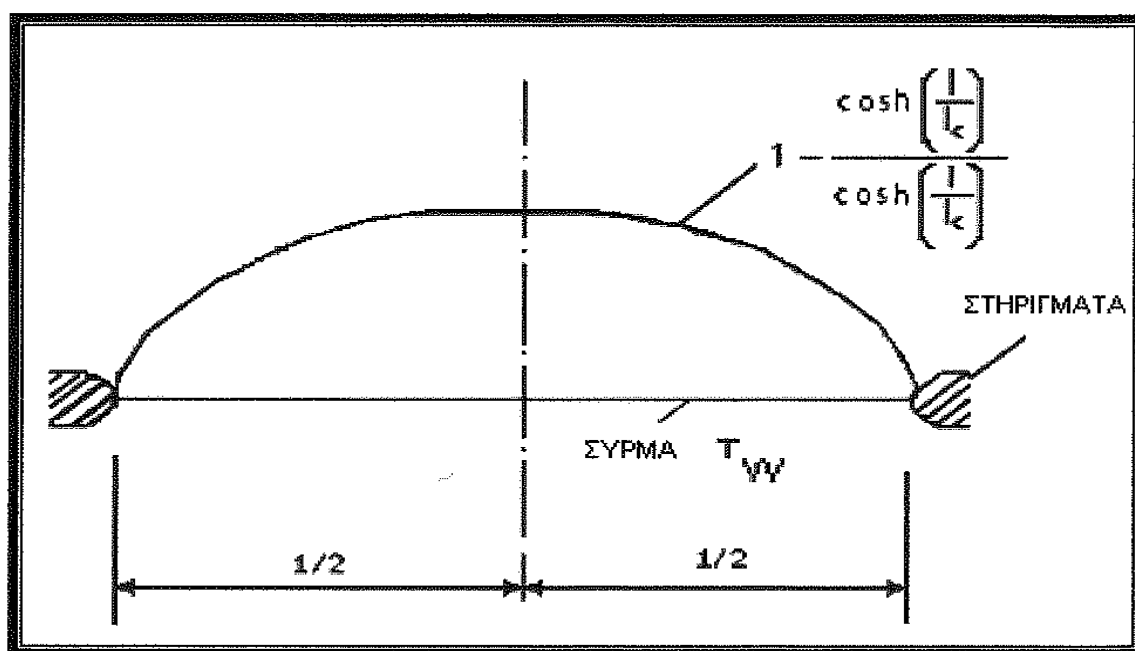
είναι μικρότερος του 0.015, όπου λ είναι η μέση ελεύθερη μοριακή διαδρομή (molecular mean free path). Για θερμοκρασία $T = 20$ °C ισχύει

$\rho\lambda = 6.4 \cdot 10^{-3} \text{ [N/m]}$ και για ατμοσφαιρική πίεση και $d = 5 \cdot 10^{-6} \text{ m}$, $\kappa\eta = 0,013$.

Η σχέση που δόθηκε από τον King ισχύει με τις προϋποθέσεις:

- Του άπειρου μήκους νήματος
- Του χρονικά αμετάβλητου θερμοκρασιακού πεδίου.

Τα στηρίγματα του νήματος, για λόγους μηχανικής αντοχής, γίνονται μεγάλων διαστάσεων σε σχέση με τη διάμετρο του νήματος, όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.6.



Σχήμα 1.6 : Διανομή θερμοκρασίας στο νήμα.

Έτσι το ηλεκτρικό ρεύμα που περνάει από το νήμα δεν τα θερμαίνει και συνεπώς αυτά έχουν τη θερμοκρασία του ρευστού. Στα άκρα λοιπόν του νήματος επιβάλλεται ως «οριακή συνθήκη» η θερμοκρασία του ρευστού, έτσι η διανομή της θερμοκρασίας κατά μήκος του νήματος δεν είναι σταθερή και υπάρχει μεταφορά θερμότητας, δηλαδή ψύξη του νήματος,

όχι μόνο λόγω της ταχύτητας του ρευστού, δηλαδή με συναγωγή, αλλά και λόγω αγωγιμότητας προς τα στηρίγματα του νήματος.

Για την εύρεση της διανομής θερμοκρασίας στο νήμα, θεωρώντας χρονικά αμετάβλητο θερμοκρασιακό πεδίο και κάνοντας θερμικό ισοζύγιο με μήκος dz , προκύπτει συνήθη διαφορική εξίσωση 2^{ας} τάξης της οποίας η λύση είναι:

$$\frac{T - T_f}{T_\infty - T_f} = 1 - \frac{\cosh \frac{z}{l_c}}{\cosh \frac{1}{2l_c}} \quad (1.19)$$

όπου:

T_∞ : η θερμοκρασία που θα είχε το νήμα αν είχε άπειρο μήκος

και

l_c : το «ψυχρό» μήκος του νήματος:

με:

$$l_c = \frac{d}{2} \sqrt{\frac{R_w k_w}{R_a k_f} \frac{1}{Nu}} \quad (1.20)$$

όπου:

R_a : η αντίσταση του νήματος σε κάποια θερμοκρασία αναφοράς,

k_f : ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του ρευστού

και

k_w : ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του νήματος.

Η θερμοκρασία που μεταφέρεται με αγωγή στα στηρίγματα του νήματος αποτελεί το 15% αυτής που μεταφέρεται με συναγωγή, το ποσοστό δε είναι προφανώς συνάρτηση του λόγου l/d . Παραπέρα θεωρητικοί υπολογισμοί φανερώνουν ότι για σταθερή αντίσταση νήματος R_w , ο λόγος l/l_c αυξάνει με την αύξηση της ταχύτητας. Μπορεί επίσης να υπολογιστεί η βέλτιστη τιμή l/l_c έτσι ώστε να επιτευχθεί σχεδόν σταθερή θερμοκρασία στο μεγαλύτερο μέρος του νήματος. Ένας τέτοιος υπολογισμός δείχνει ότι ο λόγος l/l_c πρέπει να είναι μεγαλύτερος του 5. Επίσης ο λόγος l/d εξαρτάται και από το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένο το νήμα. Έτσι για νήματα πλατίνας-ιριδίου ο λόγος l/d πρέπει να είναι μεγαλύτερος του 200, για δε νήματα βολφραμίου ακόμα μεγαλύτερος (γιατί k_w βολφράμιο = 2.5 k_w πλ). Επομένως οι εμπειρικές σχέσεις που αναφέρθηκαν ως νόμος του King, αποτελούν ένδειξη τάξης μεγέθους των σταθερών A και B καθώς και του εκθέτη, οπότε κάθε αισθητήριο χρειάζεται τη δική του βαθμονόμηση για τον προσδιορισμό των σταθερών A, B και του συντελεστή ή του γενικευμένου νόμου του King.

1.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΟΡΓΑΝΟΥ

Όταν η ροή είναι τυρβώδης τότε η στιγμιαία τιμή ταχύτητας γράφεται:

$$u = \bar{u} + u' \quad (1.21)$$

Η διαταραχή της ταχύτητας προκαλεί διαταραχή και στο ρυθμό ψύξης του νήματος, άρα και στη θερμοκρασία του νήματος και στην ένταση του ρεύματος που διέρχεται μέσα από το νήμα. Θα ισχύουν λοιπόν οι αντίστοιχες σχέσεις:

$$I = \bar{I} + i \quad (1.22)$$

$$R_w = \bar{R}_w + r_w \quad (1.23)$$

Έτσι η σχέση:

$$\frac{I^2 R_w}{R_w - R_f} = A + Bu^n \quad (1.24)$$

με διαφορίση και αντικατάσταση των διαφορικών dI, dR_w και du με i, r_w και u' δίνει τη σχέση:

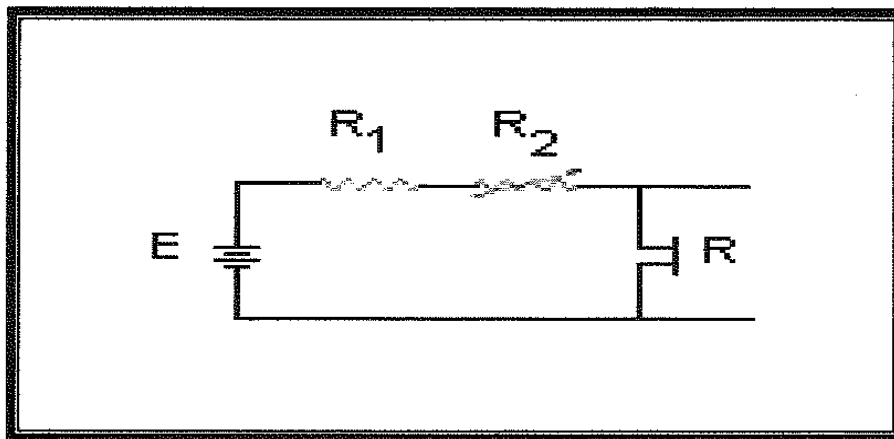
$$\frac{\bar{R}_w}{\bar{R}_w - R_f} 2\bar{I}i - \bar{I}^2 \left[\frac{R_f r_w}{(\bar{R}_w - R_f)^2} \right] = Bn\bar{u}^{n-1}u' \quad (1.25)$$

Υπάρχουν δύο τρόποι λειτουργίας που έχουν χρησιμοποιηθεί μέχρι σήμερα:

- Το ρεύμα που διαρρέει το αισθητήριο σύστημα με κατάλληλη ηλεκτρονική διάταξη να διατηρείται σταθερό (λειτουργία σταθερού ρεύματος).
- Η μέση θερμοκρασία του αισθητήρα, άρα και η ηλεκτρική του αντίσταση να διατηρείται σταθερή (λειτουργία σταθερής θερμοκρασίας).

1.3.1 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΟΡΓΑΝΟΥ ΜΕ ΣΤΑΘΕΡΟ ΡΕΥΜΑ

Αρχικά χρησιμοποιήθηκε η διάταξη του ανεμόμετρου σταθερού ρεύματος, που παρουσιάζεται στο σχήμα 1.7, ενώ αργότερα χρησιμοποιήθηκε η διάταξη του ανεμόμετρου σταθερής θερμοκρασίας λόγω των πλεονεκτημάτων που διαθέτει έναντι του ανεμόμετρου σταθερού ρεύματος.



Σχήμα 1.7 : Διάταξη θερμού νήματος σταθερού ρεύματος.

Στη λειτουργία με σταθερό ρεύμα το θερμό νήμα είναι συνδεδεμένο σε σειρά με ωμική αντίσταση πολύ μεγαλύτερη από τη δική του (για παράδειγμα 1000 φορές μεγαλύτερη), με αποτέλεσμα η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος που το διαρρέει να είναι ουσιαστικά σταθερή αν και η ωμική του αντίσταση μεταβάλλεται, καθώς μεταβάλλεται και η ταχύτητα του ρευστού.

Η έξοδος του οργάνου είναι η πτώση τάσης στα άκρα της αντίστασης του νήματος e . Η μεταβλητή αντίσταση του σχήματος 1.7 χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση της έντασης του ρεύματος που διαρρέει το νήμα.

Εάν η ταχύτητα του ρευστού αυξηθεί, τότε ο συντελεστής συναγωγής h θα αυξηθεί, με αποτέλεσμα να απάγεται με μεγαλύτερο ρυθμό η θερμότητα από το νήμα και έτσι η θερμοκρασία του να μειωθεί όπως και η ωμική του αντίσταση, άρα και η πτώση τάσης στα άκρα της αντίστασης. Παρατηρεί κανείς δηλαδή ότι η ευαισθησία του οργάνου είναι αρνητική. Καθώς η θερμοκρασία του νήματος μειώνεται, μειώνεται και η θερμοκρασιακή διαφορά νήματος και ρευστού (εφόσον η θερμοκρασία του ρευστού παραμένει σταθερή), έως ότου επέλθει ισορροπία μεταξύ της παραγόμενης θερμότητας και της απαγόμενης θερμότητας από το ρευστό.

Ένα μέρος της παραγόμενης θερμότητας, λόγω του φαινομένου Joule από την ηλεκτρική αντίσταση του θερμού νήματος, αποθηκεύεται στο νήμα και ένα άλλο απάγεται προς το ρευστό, (αμελώντας βεβαίως μια μικρή ποσότητα θερμότητας η οποία διοχετεύεται προς τα στηρίγματα του νήματος, συνήθως 15%). Η βασική εξίσωση επομένως που αφορά τη λειτουργία του θερμού νήματος σταθερού ρεύματος είναι:

$$R_w I^2 = mc \frac{dT_w}{dt} + \pi dl (A + B \sqrt{U_{ef}}) (T_w - T_f) \quad (1.26)$$

Εάν οι στιγμιαίες τιμές της ωμικής αντίστασης του νήματος, της θερμοκρασίας του και της ταχύτητας του ρευστού δίδονται ως άθροισμα της μέσης τιμής τους και μιας διακύμανσης γύρω από αυτή, ισχύει ότι:

$$R_w = \bar{R}_w + R'_w, \quad T_w = \bar{T}_w + T'_w, \quad U_{ef} = \bar{U}_{ef} + u_{ef} \quad (1.27)$$

τότε η εξίσωση (1.26) γράφεται:

$$(\bar{R}_w + R'_w)I^2 = mc \frac{d(\bar{T}_w + T'_w)}{dt} + \pi dl (A + B\sqrt{\bar{U}_{ef} + u_{ef}})(\bar{T}_w + T'_w + T_f) \quad (1.28)$$

Χρησιμοποιώντας το ανάπτυγμα Taylor για τον όρο $\sqrt{\bar{U}_{ef} + u_{ef}}$ προκύπτει:

$$\sqrt{\bar{U}_{ef} + u_{ef}} = \sqrt{\bar{U}_{ef}} + \frac{u_{ef}}{2\sqrt{\bar{U}_{ef}}} + 0(u_{ef}^2) \quad (1.29)$$

η εξίσωση μετατρέπεται σε:

$$R'_w I^2 = mc \frac{dT'_w}{dt} + \pi dl \frac{B}{2\sqrt{\bar{U}_{ef}}} (\bar{T}_w - T_f) u_{ef} + T'_w (A + B\sqrt{\bar{U}_{ef}}) \pi dl \quad (1.30)$$

δεδομένου ότι για τις μέσες τιμές των μεγεθών ισχύει η σχέση (1.26).

Είναι γνωστό ότι η ωμική αντίσταση μεταβάλλεται γραμμικά με τη θερμοκρασία, δηλαδή ισχύει η σχέση:

$$R_w = R_o [1 + a(T_w - T_o)] \quad (1.31)$$

Εάν από τη σχέση (1.31) επιλυθεί η θερμοκρασία συναρτήσει της ωμικής αντίστασης, η σχέση (1.30) γράφεται:

$$R'_w I^2 = \frac{mc}{aR_o} \frac{dR'_w}{dt} + \frac{\pi dl B}{2\sqrt{\bar{U}_{ef}}} \left(\frac{\bar{R}_w - R_f}{R_o a} \right) u_{ef} + \frac{R'_w}{R_o a} (A + B\sqrt{\bar{U}_{ef}}) \pi dl \quad (1.32)$$

Εάν πολλαπλασιαστούν και τα δύο μέλη της εξίσωσης (1.32) επί την ένταση του ρεύματος I και συμβολιστεί με e η διακύμανση της πτώσης τάσης στα άκρα της αντίστασης του θερμού νήματος, δηλαδή:

$$e = R'_w I \quad (1.33)$$

τότε η εξίσωση (1.32) γράφεται ως εξής:

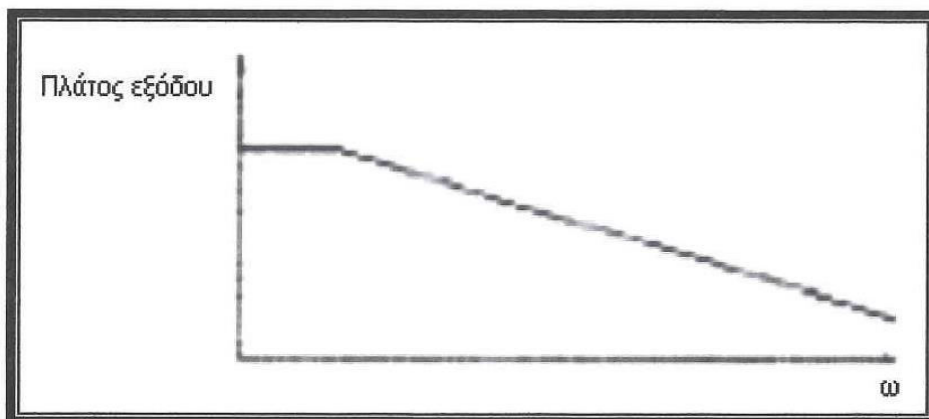
$$\tau \frac{de}{dt} + e = ku_{ef} \quad (1.34)$$



όπου:

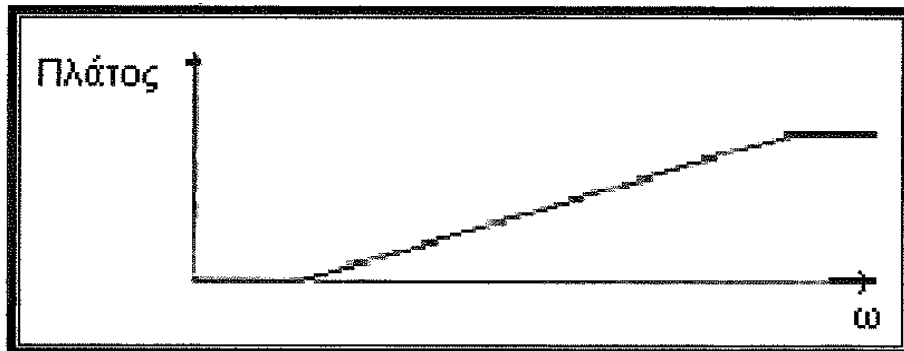
$$\tau = \frac{mc}{\pi dl(A + B\sqrt{U_{ef}}) - aR_o I^2} \quad \text{και} \quad k = \frac{-\pi dl BI(\bar{R}_w - R_f)}{2\sqrt{U_{ef}}[\pi dl(A + B\sqrt{U_{ef}}) - aR_o I^2]} \quad (1.35)$$

Παρατηρεί κανείς δηλαδή ότι το θερμό νήμα σταθερού ρεύματος συμπεριφέρεται ως όργανο πρώτης τάξεως, με σταθερά χρόνου τ (sec) και ευαισθησία k (volt/(m/sec)). Η σταθερά χρόνου είναι αντιστρόφως ανάλογη του μέτρου της ταχύτητας, όπως και η ευαισθησία του. Όσο αυξάνει η συχνότητα μεταβολής της ταχύτητας του ρευστού (για παράδειγμα όπως σε ένα τυρβώδες πεδίο ροής), τόσο το πλάτος της μετρούμενης ταχύτητας από το όργανο ελαττώνεται ακόμη και αν το πραγματικό πλάτος παραμένει αμετάβλητο. Στο σχήμα 1.8 φαίνεται η απόκριση μιας διάταξης σταθερού ρεύματος.



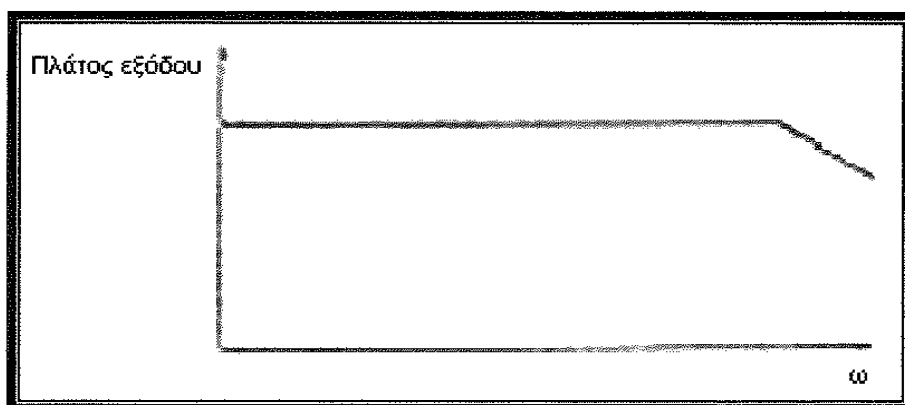
Σχήμα 1.8 : Απόκριση διάταξης σταθερού ρεύματος.

Η σταθερά χρόνου αυτών των οργάνων δεν μπορεί να μειωθεί πολύ κάτω από 1 msec και επομένως η απόκρισή τους είναι καλή για συχνότητες το πολύ μέχρι 160 Hz. Επομένως, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση πεδίων ροής υψηλών συχνοτήτων. Το σφάλμα αυτό μπορεί να μετριασθεί χρησιμοποιώντας ηλεκτρονική διάταξη αντιστάθμισης, η δράση της οποίας παρουσιάζεται στο σχήμα 1.9.



Σχήμα 1.9 : Δράση διάταξης αντιστάθμισης.

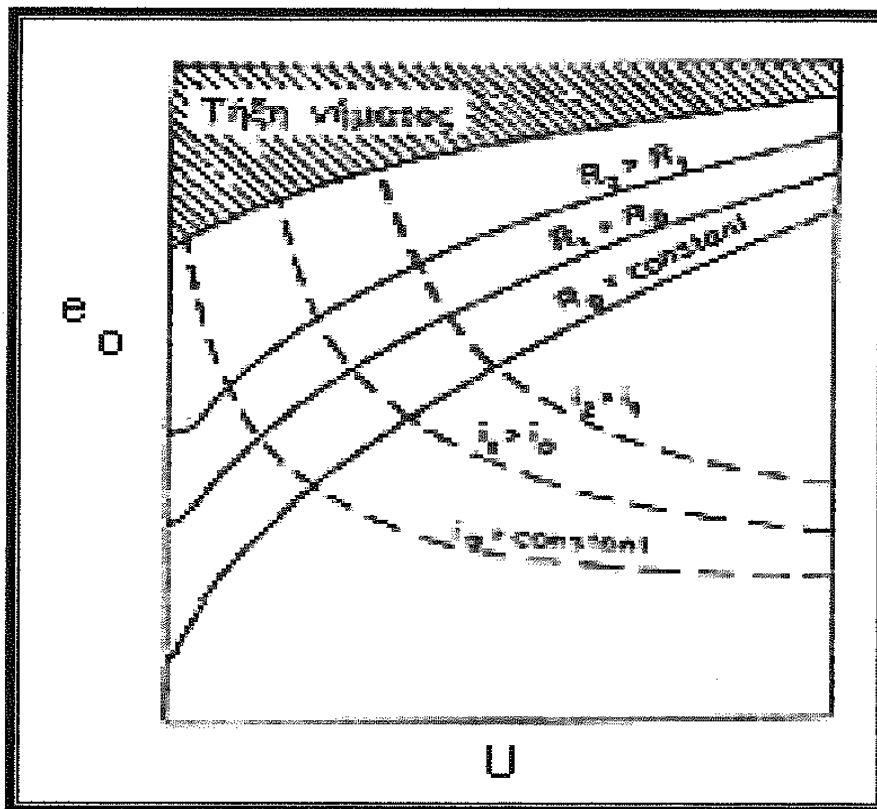
Η ηλεκτρονική διάταξη αντιστάθμισης συνδεόμενη στην έξοδο της διάταξης (σχήμα 1.7) προκαλεί τέτοια αύξηση του πλάτους, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.10, ώστε όταν μεταβάλλεται η συχνότητα της ταχύτητας του ρευστού να διατηρείται σταθερό το πλάτος της τάσης εξόδου του οργάνου.



Σχήμα 1.10 : Απόκριση διάταξης σταθερού ρεύματος με χρήση διάταξης αντιστάθμισης.

Εν τούτοις, επειδή η σταθερά χρόνου του οργάνου εξαρτάται από το μέτρο της ταχύτητας του ρευστού, βάσει της οποίας πρέπει να γίνει αντίστοιχα η ρύθμιση της διάταξης αντιστάθμισης, η παραπάνω λύση δεν είναι πάντα εφικτή, όταν για παράδειγμα το μέτρο της ταχύτητας μεταβάλλεται κατά τυχαίο τρόπο με τον χρόνο. Επίσης ένα άλλο μειονέκτημα που παρουσιάζει η διάταξη αυτή είναι ότι εάν η ταχύτητα του ρευστού ξαφνικά μειωθεί, τότε επειδή η ένταση του ρεύματος θα παραμείνει ίδια, η παραγόμενη ενέργεια Joule δεν θα απορροφηθεί από το ρευστό προκαλώντας τήξη του νήματος. Για τους λόγους αυτούς το θερμό νήμα σταθερού ρεύματος αντικαταστάθηκε από τη διάταξη θερμού νήματος σταθερής θερμοκρασίας, του οποίου η σταθερά χρόνου είναι ανεξάρτητη της ταχύτητας του ρευστού και πολύ μικρότερη από τη σταθερά χρόνου της διάταξης σταθερού ρεύματος.

Στο σχήμα 1.11 παρουσιάζεται ένα τυπικό διάγραμμα τάσης εξόδου – ταχύτητας ρευστού μιας διάταξης σταθερού ρεύματος για τρεις εντάσεις ρεύματος.



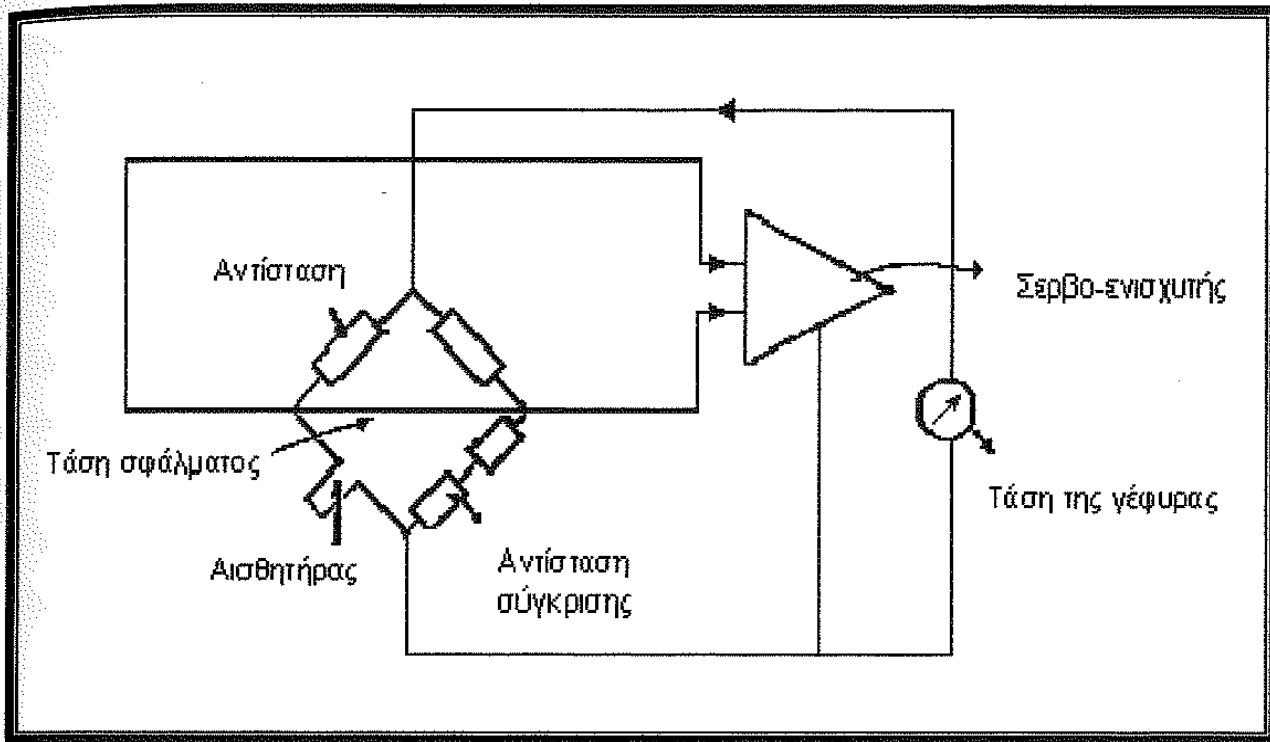
Σχήμα 1.11 : Έξοδος διάταξης σταθερού ρεύματος.

Η γραμμοσκιασμένη περιοχή του διαγράμματος αντιστοιχεί σε καταστάσεις τήξης του νήματος λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται. Στο ίδιο διάγραμμα παρουσιάζονται αντίστοιχες καμπύλες όταν η αντίσταση του νήματος είναι σταθερή.

1.3.2 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΟΡΓΑΝΟΥ ΜΕ ΣΤΑΘΕΡΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ

Στη διάταξη του ανεμομέτρου σταθερής θερμοκρασίας η θερμοκρασία του νήματος διατηρείται σταθερή μέσω ενός ηλεκτρονικού συστήματος ανάδρασης. Συγκεκριμένα το θερμό νήμα αποτελεί έναν από τους τέσσερις κλάδους μιας γέφυρας Wheatstone, στην οποία ενισχυτής τάσης αναλαμβάνει την ισορροπία της γέφυρας, όταν η ωμική αντίσταση του

νήματος μεταβάλλεται στιγμιαία λόγω της μεταβαλλόμενης ταχύτητας του ρευστού. Στο σχήμα 1.12 εμφανίζεται το απλοποιημένο διάγραμμα λειτουργίας ενός ανεμομέτρου σταθερής θερμοκρασίας.



Σχήμα 1.12 : Απλοποιημένο διάγραμμα λειτουργίας ανεμομέτρου σταθερής θερμοκρασίας.

Δηλαδή εάν υποθεθεί ότι η ταχύτητα του ρευστού αυξάνει, η ωμική αντίσταση του νήματος θα μειωθεί λόγω της ψύξης του, η πτώση τάσης στα άκρα του V_{BG} θα μειωθεί και επομένως η πτώση τάσης V_{AB} στα άκρα του ενισχυτή τάσης θα αυξηθεί, διότι $V_{AB} = V_{AG} - V_{BG}$. Η έξοδος του ενισχυτή είναι μια τάση πολλαπλάσια της εισόδου του η οποία εφαρμόζεται στα άκρα ΑΓ της γέφυρας Wheatstone. Η αυξημένη αυτή τάση προκαλεί αύξηση του ρεύματος το οποίο διέρχεται από το νήμα και συνεπώς, θέρμανση του νήματος, αύξηση της ωμικής του αντίστασης, αύξηση της πτώσης τάσης στα άκρα του, δηλαδή της V_{BG} , με αποτέλεσμα να επέλθει τελικά μηδενισμός της διαφοράς της τάσης εισόδου του ενισχυτή τάσης V_{AB} , δηλαδή να επέλθει ισορροπία στη γέφυρα. Με άλλα λόγια, εφόσον

η θερμοκρασία του νήματος διατηρείται σταθερή, εάν αυξηθεί η ταχύτητα του ρευστού, πρέπει η παραγόμενη θερμότητα από το νήμα να αυξηθεί, λόγω αύξησης της απαγόμενης από το ρευστό θερμότητας. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω αύξησης της έντασης του ρεύματος, η οποία γίνεται σχεδόν ακαριαία μέσω του ενισχυτή τάσης. Αντιστοίχως, εάν η ταχύτητα του ρευστού μειωθεί πρέπει να μειωθεί και η ένταση του ρεύματος κ.ο.κ. Μέσω της ηλεκτρονικής διάταξης του ενισχυτή τάσης αποδεικνύεται ότι η σταθερά του οργάνου είναι πολύ μικρότερη από εκείνη του ανεμομέτρου σταθερού ρεύματος, γεγονός που επιτρέπει την ανεπιφύλακτη χρήση του οργάνου για μετρήσεις γρήγορων μεταβολών ταχύτητας της τάξης των 100 kHz.

Η έξοδος του οργάνου E , είναι η πτώση τάσης $V_{ΑΓ}$. Εφόσον η γέφυρα ισορροπεί θα ισχύει:

$$E^2 = (R_\ell + R_w)^2 I_w^2 \quad (1.36)$$

όπου I_w είναι η ένταση του ρεύματος που διαρρέει το νήμα.

Η παραγόμενη θερμότητα από το νήμα δίδεται από τη σχέση:

$$R_w I_w^2 = \pi d l h (T_w - T_f) = \pi d l (A + B \sqrt{U_{ef}}) (T_w - T_f) \quad (1.37)$$

Επειδή η αντίσταση συνδέεται γραμμικά με τη θερμοκρασία, η σχέση (1.37) γράφεται:

$$R_w I_w^2 = \pi d l (A + B \sqrt{U_{ef}}) (R_w + R_f) / (R_o a) \quad (1.38)$$

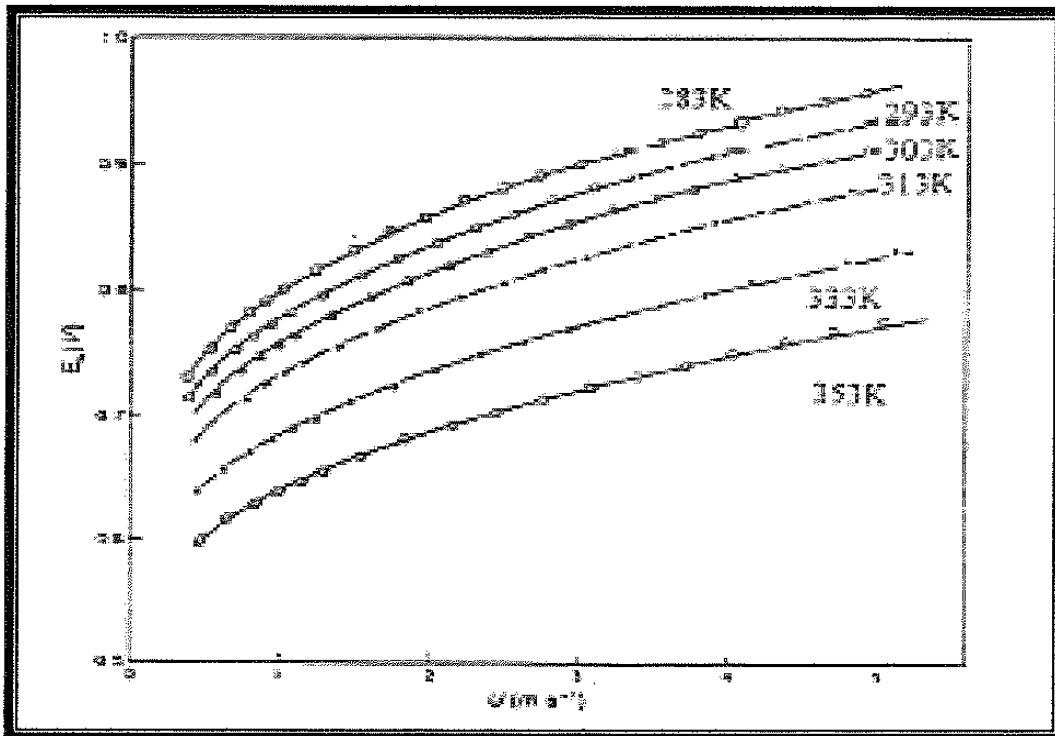
συνεπώς:

$$E^2 = (A + B\sqrt{U_{ef}}) \pi d \ell (R_w - R_f) (R_e + R_w)^2 / (R_w R_o a) \quad (1.39)$$

Από την τελευταία σχέση προκύπτουν τρία συμπεράσματα:

α) Η σχέση εισόδου-εξόδου του οργάνου είναι μη-γραμμική, δηλαδή το θερμό νήμα αποτελεί μη γραμμικό όργανο.

Στο σχήμα 1.13 παρουσιάζονται έξι καμπύλες βαθμονόμησης ενός νήματος, οι οποίες αντιστοιχούν σε έξι διαφορετικές θερμοκρασίες ρευστού, δηλαδή 283K, 293K, 303K, 313K, 333K και 353K, με θερμοκρασία νήματος 473K.



Σχήμα 1.13 : Καμπύλες βαθμονόμησης για διάφορες θερμοκρασίες ρευστού.

Αυξανόμενης της θερμοκρασίας του ρευστού, δηλαδή μειούμενης της θερμοκρασιακής διαφοράς νήματος-ρευστού, η τάση εξόδου μειώνεται,

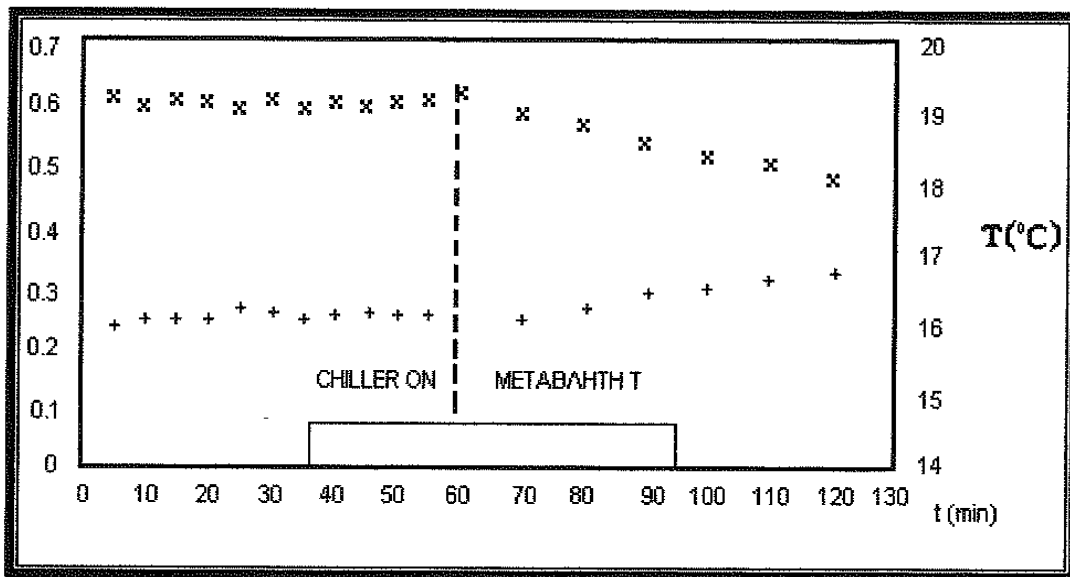
δεδομένου ότι η απαγόμενη θερμότητα είναι μικρότερη και επομένως και η ένταση του ρεύματος που διέρχεται από το θερμό νήμα είναι μικρότερη.

β) Παραγωγίζοντας τη σχέση (1.39) ως προς την ταχύτητα U_{ef} , προκύπτει ότι η παράγωγος $\frac{\partial E}{\partial U_{ef}}$, δηλαδή η ευαισθησία του οργάνου μειώνεται, μειούμενης της θερμοκρασιακής διαφοράς θερμού νήματος-ρευστού.

Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητο η θερμοκρασιακή αυτή διαφορά να είναι μεγάλη, συνήθως 200 °C, σε μετρήσεις στον αέρα. Η θερμοκρασία του νήματος μπορεί να ρυθμιστεί μέσω της μεταβλητής αντίστασης της γέφυρας Wheatstone.

γ) Παραγωγίζοντας τη σχέση (1.39) ως προς την θερμοκρασία του ρευστού T_f , προκύπτει ότι η παράγωγος $\frac{\partial E}{\partial T_f}$, δηλαδή η ευαισθησία του οργάνου σε μεταβολή της θερμοκρασίας του ρευστού αυξάνεται όταν η θερμοκρασιακή διαφορά θερμού νήματος-ρευστού μειώνεται.

Συνέπεια αυτού είναι ότι εάν το θερμό νήμα χρησιμοποιείται ως μέσον μέτρησης της θερμοκρασίας και όχι της ταχύτητας του ρευστού, πρέπει η θερμοκρασία του να μη διαφέρει πολύ από τη θερμοκρασία του ρευστού. Στο σχήμα 1.14 παρουσιάζεται η έξοδος ενός θερμού νήματος, όταν η θερμοκρασία του ρευστού είναι σταθερή και όταν αυτή αυξάνεται. Στη δεύτερη περίπτωση για αύξηση της θερμοκρασίας του ρευστού από 16 σε 17 °C η ταχύτητα φαίνεται να μειώνεται από 0.6 σε 0.46 m/s δηλαδή κατά 20% περίπου.



Σχήμα 1.14 : Επίδραση μεταβολής θερμοκρασίας ρευστού.

Μια άλλη συνέπεια της παραπάνω διαπίστωσης είναι η εμφάνιση σφάλματος στις μετρήσεις ταχυτήτων σε νερό μέσω θερμού νήματος. Αυτό συμβαίνει διότι για να μην εμφανιστούν φυσαλίδες στο νερό λόγω βρασμού η θερμοκρασία του νήματος διατηρείται σχετικά χαμηλή (περίπου 60 °C), δηλαδή η θερμοκρασιακή διαφορά νήματος-ρευστού είναι μικρή. Έτσι εάν η ταχύτητα του ρευστού είναι για παράδειγμα σταθερή, μικρή μεταβολή της θερμοκρασίας του ρευστού προκαλεί μεταβολή της εξόδου του οργάνου, η οποία εσφαλμένα μεταφράζεται ως αλλαγή της ταχύτητας του ρευστού. Συνεπώς στην περίπτωση αυτή είναι αναγκαία η χρήση διάταξης διατήρησης σταθερής θερμοκρασίας του ρευστού.

1.3.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΤΑΘΕΡΑΣ ΧΡΟΝΟΥ

Ένα μέρος της παραγόμενης θερμότητας από το θερμό νήμα διοχετεύεται στο ρευστό ενώ το υπόλοιπο αποθηκεύεται σε αυτό. Η διαφορά που υπάρχει μεταξύ του ανεμομέτρου σταθερού ρεύματος και σταθερής θερμοκρασίας είναι ότι στη δεύτερη περίπτωση η ένταση του ρεύματος που διέρχεται από το νήμα μεταβάλλεται πολύ σε σχέση με την ωμική αντί-

σταση του θερμού νήματος. Δηλαδή ισχύουν οι σχέσεις:

$$R_w = \bar{R}_w + R'_w, T_w = \bar{T}_w + T'_w, U_{ef} = \bar{U}_{ef} + u_{ef}, I = \bar{I} + I' \quad (1.40)$$

όπου: $R'_w \ll I'$.

Η δράση του διαφορικού ενισχυτή του ανεμομέτρου σταθερής θερμοκρασίας είναι η διατήρηση της θερμοκρασίας, δηλαδή της ωμικής αντίστασης του θερμού νήματος σε μια σταθερή τιμή. Αυξομειώσεις της ταχύτητας του ρευστού προκαλούν αναγκαστικά μεταβολές της ωμικής αντίστασης του νήματος όχι όμως μεγάλες, διότι οι μικρομεταβολές της ωμικής αντίστασης ανιχνεύονται αμέσως από τον ενισχυτή με αποτέλεσμα το ρεύμα που περνά από αυτό να μεταβάλλεται, έτσι ώστε να επανέρχεται γρήγορα η ωμική αντίσταση στην προηγούμενη τιμή της. Συγκεκριμένα, όταν η ωμική αντίσταση μειωθεί λόγω της αύξησης της ταχύτητας του ρευστού, δηλαδή $R'_w < 0$ τότε το ρεύμα αυξάνει, δηλαδή $I' > 0$ και το αντίθετο όταν η αντίσταση μειωθεί, δηλαδή ισχύει η σχέση:

$$I' = -G\bar{I}R'_w \quad (1.41)$$

όπου G, η σταθερά ενίσχυσης του ενισχυτή.

Με βάση τις εξισώσεις (1.26), έως (1.40) προκύπτει:

$$\begin{aligned} \bar{R}_w \bar{I}^2 + \bar{R}_w \bar{I} I' + \bar{I}^2 R'_w = \frac{mc}{aR_o} \frac{dR'_w}{dt} + \pi dl \left[A + B\sqrt{\bar{U}_{ef}} + B\frac{u_{ef}}{2\sqrt{\bar{U}_{ef}}} \right] [\bar{T}_w - T_f] + \\ T'_w \pi dl \left[A + B\sqrt{\bar{U}_{ef}} + B\frac{u_{ef}}{2\sqrt{\bar{U}_{ef}}} \right] \end{aligned} \quad (1.42)$$

Αμελώνοντας τους όρους δευτέρας τάξεως και αντικαθιστώντας τη θερμο-

κρασία με την ωμική αντίσταση του νήματος (βλ. σχέση 1.31) η σχέση (1.42) σε συνδυασμό με τη σχέση (1.41) γράφεται:

$$\tau \frac{dR'_w}{dt} + R'_w = ku_{ef} \quad (1.43)$$

όπου:

$$\tau = \frac{mc}{\pi dl \left[A + B\sqrt{U_{ef}} \right] - aR_o \bar{I}^2 + 2aR_o \bar{I}^2 G \bar{R}_w} \quad (1.44)$$

και

$$k = - \frac{B\pi dl [\bar{R}_w - R_f] \tau}{mc 2\sqrt{U_{ef}}} \quad (1.45)$$

Η σταθερά χρόνου του ανεμομέτρου σταθερής θερμοκρασίας (βλ. σχέση 1.44) είναι μικρότερη από την αντίστοιχη του νήματος σταθερού ρεύματος (βλ. σχέση 1.35) λόγω της μεγαλύτερης τιμής του παρονομαστή κατά τον όρο $2aR_o \bar{I}^2 G \bar{R}_w$. Πρακτικά επιτυγχάνονται σταθερές χρόνου της τάξεως του 1 msec (λόγω της μεγάλης τιμής της ενίσχυσης G) που σημαίνει ότι η απόκριση του ανεμομέτρου είναι σταθερή μέχρι και 100kHz.

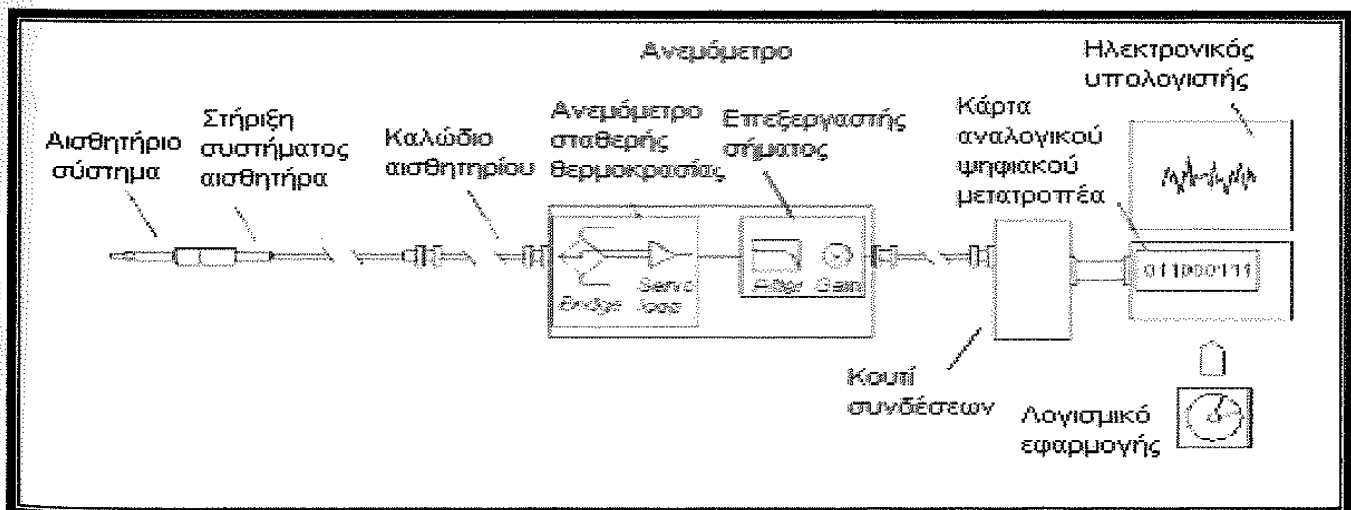
1.4 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Η ανάπτυξη των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων επέτρεψε την κατασκευή πολυπλοκότερων μετρητικών διατάξεων θερμαινόμενου νήματος και παράλληλα πιο ευαίσθητων, ώστε να είναι δυνατή η μέτρηση διπλών ή τριπλών συσχετίσεων ταχυτήτων, φασμάτων ενέργειας της τύρβης, πυκνοτήτων πιθανότητας κ.ά. με εξαιρετική πειραματική ακρίβεια.

Κάθε μετρητικό σύστημα θερμού νήματος ή θερμής επιφάνειας (hot-film) αποτελείται από τρία μέρη:

- Το αισθητήριο σύστημα (probe).
- Το σύστημα τροφοδοσίας.
- Το σύστημα επεξεργασίας σημάτων.

Στο σχήμα 1.15 παρουσιάζεται μια τυπική μετρητική αλυσίδα, όπως αυτή μπορεί να παρουσιαστεί με σχηματικό τρόπο.



Σχήμα 1.15 : Σχηματική απεικόνιση μιας τυπικής μετρητικής αλυσίδας.

1.4.1 ΟΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ

Οι αισθητήρες επιλέγονται συνήθως ανάλογα με:

- Το ρευστό μέσο (υγρό ή αέριο) που περιβάλλει τον αισθητήρα.
- Τον αριθμό των συνιστωσών ταχύτητας που πρέπει να μετρηθούν.
- Τις αναμενόμενες τιμές ταχύτητας.
- Τον αριθμό των παραμέτρων που πρέπει να μετρηθούν.
- Την ένταση της τύρβης και την αυξομείωση της συχνότητας στη ροή.
- Τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας.
- Την ακρίβεια των αποτελεσμάτων.
- Τον διαθέσιμο χώρο γύρω από το σημείο μέτρησης.

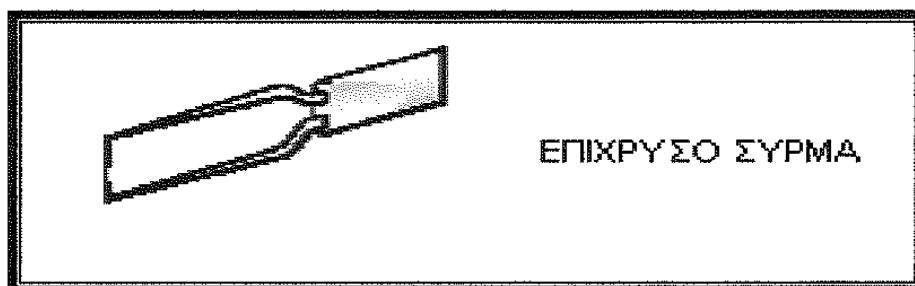
Οι αισθητήρες είναι διαθέσιμοι σε τέσσερις μορφές:

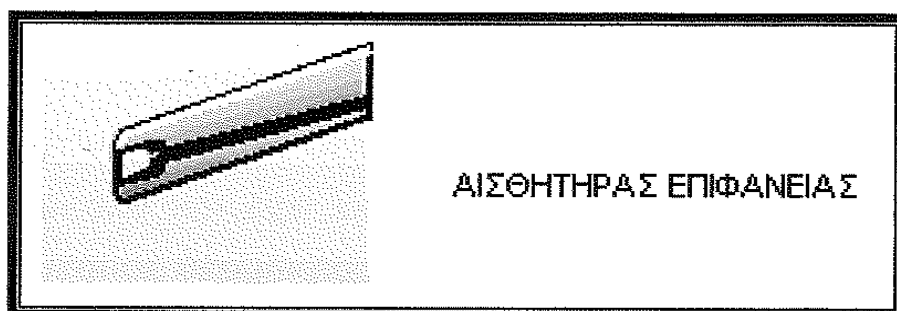
- Τα πολύ μικρού μεγέθους νήματα που χρησιμοποιούνται σε ροή αέρα με ένταση τύρβης μέχρι 5 – 10%. Έχουν την υψηλότερη απόκριση συχνότητας, μπορούν να επισκευαστούν και είναι ο πιο οικονομικός τύπος αισθητήρα.
- Τα επίχρυσα νήματα που χρησιμοποιούνται σε ροή αέρα με ένταση τύρβης μέχρι 20 – 25%. Η απόκριση συχνότητας είναι κατώτερη σε σχέση με τους προηγούμενους αισθητήρες και σε

περίπτωση βλάβης μπορούν να επισκευαστούν.

- Οι αισθητήρες νήματος με επικαλυμμένη επιφάνεια που είναι κατάλληλοι για εφαρμογές στον αέρα και στο νερό. Είναι πιο ανθεκτικοί σε σχέση με τους λεπτούς συρμάτινους αισθητήρες και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε λιγότερο καθαρό αέρα. Επίσης είναι επισκευάσιμοι.
- Οι αισθητήρες επιφάνειας για εφαρμογές στον αέρα και στο νερό. Έχουν μέτρια προς χαμηλή απόκριση συχνότητας. Είναι ο πιο ανθεκτικός τύπος αισθητήρων αλλά σε περίπτωση βλάβης είναι δύσκολη η επισκευή τους.

Στο σχήμα 1.16 απεικονίζονται σχηματικά ορισμένοι τύποι θερμού νήματος.





Σχήμα 1.16 : Διάφοροι τύποι θερμού νήματος.

Η διάμετρος των αισθητήρων νήματος μπορεί να είναι από 0.0038 mm ως 0.005 mm και το μήκος τους από 1 mm ως 2 mm, ενώ συνήθως κατασκευάζονται από τουνγκστένιο (Tungsten) επενδεδυμένο με λεπτό στρώμα πλατίνας. Το θερμό νήμα στηρίζεται και τροφοδοτείται με ρεύμα από δύο ακίδες κατασκευασμένες συνήθως από ανοξείδωτο χάλυβα. Μέρος του νήματος καλύπτεται έτσι ώστε να είναι αυστηρά καθορισμένο το μήκος του στοιχείου μέτρησης και να μειωθεί όσο είναι δυνατόν η επίδραση της παρουσίας των ακίδων κοντά στο μετρητικό στοιχείο. Εκτός από το τουνγκστένιο (Tungsten) που έχει υψηλό θερμικό συντελεστή αντίστασης 0.004/ °C μπορεί να χρησιμοποιηθεί επίσης βολφράμιο με θερμικό συντελεστή αντίστασης 0.004/ °C, πλατίνα με θερμικό συντελεστή αντίστασης 0.0038/ °C ή κράμα πλατίνας-ιριδίου σε αναλογία 90/10 με θερμικό συντελεστή αντίστασης 0.0016/ °C.

Συγκεκριμένα, από τα υλικά αυτά το βολφράμιο έχει υψηλό θερμικό συντελεστή αντίστασης και υψηλή αντοχή. Παρουσιάζει όμως το μειονέκτημα της γρήγορης οξειδωσης στις υψηλές θερμοκρασίες, δηλαδή σε

θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 300 °C. Η μικρότερη διάμετρος νήματος από βολφράμιο που έχει κατασκευαστεί είναι 2.5 μm.

Η πλατίνα παρουσιάζει καλό θερμικό συντελεστή αντίστασης και δεν οξειδώνεται εύκολα. Έχει όμως το μειονέκτημα της μικρής μηχανικής αντοχής στις υψηλές θερμοκρασίες. Η μικρότερη διάμετρος νήματος από πλατίνα που έχει κατασκευαστεί είναι 0.5 μm.

Το κράμα πλατίνας-ιριδίου αποτελεί μια μέση λύση δεδομένου ότι δεν οξειδώνεται εύκολα και έχει καλή αντοχή. Νήματα από το κράμα αυτό χρησιμοποιούνται σε θερμοκρασίες απαγορευτικές για τα άλλα είδη.

Στον πίνακα 1.1 παρουσιάζονται ορισμένα τυπικά χαρακτηριστικά για διάφορα υλικά κατασκευής αισθητηρίων.

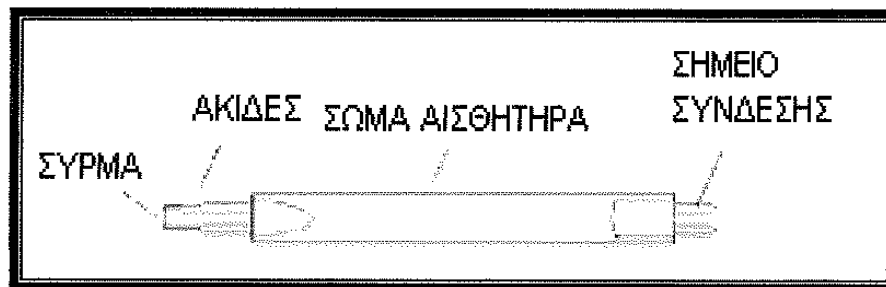
ΥΛΙΚΟ	ΤΑΣΗ ΘΡΑΥΣΗΣ N/cm ²	ΜΕΓΙΣΤΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ	ΚΑΣΣΙ-ΤΕΡΟ ΚΟΛΛΗΣΗ	ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ	ΣΥΡΜΑ WOLLASTROM	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΔΙΑΘΕΣΙΜΗ ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ	ΘΕΡΜΙΚΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΑΝΑ °C	ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ohm-cm στους 0 °C	ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ kW/cm°C
ΒΟΛΦΡΑΜΙΟ	250000	300°C (οξειδωση)	ΟΧΙ	ΝΑΙ	ΟΧΙ	2.5 μm	0.004	4.9 · 10 ⁻⁶	1.9
ΠΛΑΤΙΝΑ	30000	1200 °C (τήξη 1750 °C)	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	1 μm	0.0038	9.8 · 10 ⁻⁶	0.7
ΠΛΑΤΙΝΑ-ΙΡΙΔΙΟ (90/10)	60000	1400 °C (τήξη 1600 °C)	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	0.6 μm	0.0016	19 · 10 ⁻⁶	0.4

Πίνακας 1.1 : Τυπικά χαρακτηριστικά για διάφορα υλικά κατασκευής αισθητηρίων.

Τα κριτήρια επιλογής του υλικού κατασκευής του αισθητήρα είναι:

- Μεγάλη μηχανική αντοχή.
- Υψηλό σημείο τήξης.
- Δυνατότητα συγκόλλησης.
- Χαμηλό συντελεστή αγωγιμότητας.
- Δυσκολία οξειδωσης.
- Ευκολία κατασκευής νήματος σε πολύ μικρές διαμέτρους.

Στο σχήμα 1.17 παρουσιάζεται το αισθητήριο σύστημα.



Σχήμα 1.17 : Το αισθητήριο σύστημα (probe).

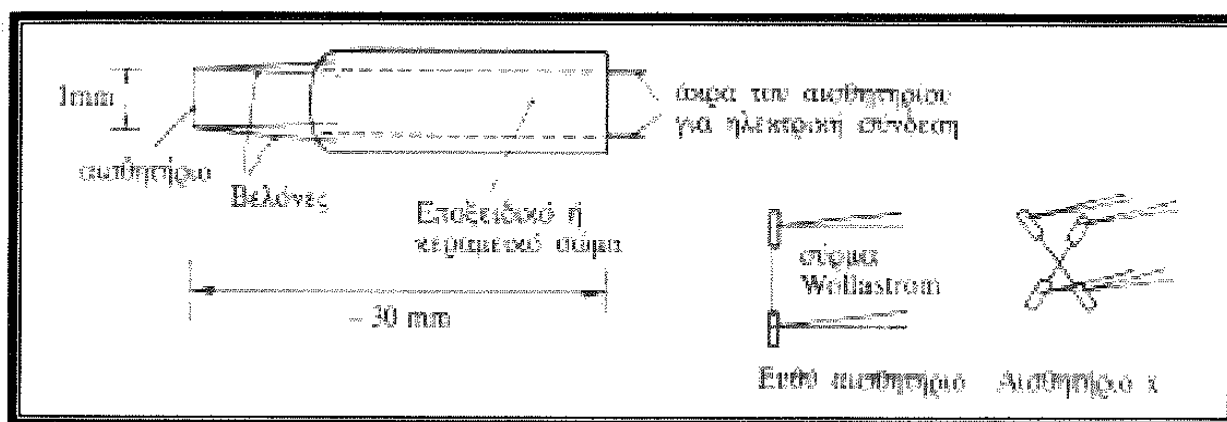
Κατά τη σχεδίαση ενός θερμού νήματος, η επιλογή της διαμέτρου και του μήκους του, προκύπτει από την ικανοποίηση διαφόρων αντιφατικών απαιτήσεων όπως:

- α) Το μήκος πρέπει να είναι μικρό για να έχουμε καλύτερη χωρική διακριτικότητα και μικρότερα αεροδυναμικά φορτία.
- β) Το μήκος πρέπει να είναι μεγάλο ώστε οι θερμικές απώλειες προς τις ακίδες που στηρίζουν το νήμα να είναι περιορισμένες, η θερμοκρα-

σιακή κατανομή κατά το μήκος του νήματος πιο ομοιόμορφη και η επίδραση των ακίδων μικρή.

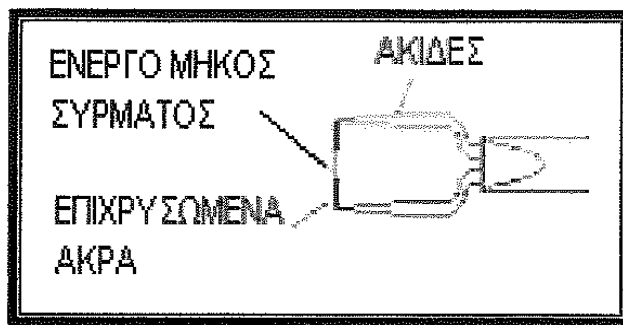
- γ) Η διάμετρος πρέπει να είναι μικρή για να μην εμφανίζεται το φαινόμενο έκλυσης δινών που προκαλεί θόρυβο στις μετρήσεις, ο χρόνος απόκρισης να είναι μικρός λόγω της μικρότερης θερμικής αδράνειας και η χωρική διακριτικότητα καλύτερη.
- δ) Η διάμετρος πρέπει να είναι μεγάλη για λόγους αντοχής και για την αποφυγή επικάθησης σκόνης.

Κάποιες τυπικές μορφές αισθητήρων παρουσιάζονται στο σχήμα 1.18.



Σχήμα 1.18 : Τυπικές μορφές αισθητήρων.

Τα επίχρυσα νήματα, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.19, έχουν το ίδιο ενεργό μήκος αλλά, είναι κατασκευασμένα από χαλκό και επιπλέον έχουν επίχρυσωμένες άκρες σε μήκος 3 mm, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί τυχόν παρέμβαση λόγω των ακίδων.



Σχήμα 1.19 : Επιχρυσωμένο νήμα.

Οι αισθητήρες με επικαλυμμένη επιφάνεια είναι κατασκευασμένοι από ίνες χαλαζία. Έχουν διάμετρο 70 μm περίπου και ενεργό μήκος 1.2 mm καλυμμένο από ένα λεπτό φιλμ νικελίου, το οποίο με τη σειρά του προστατεύεται από ένα επίστρωμα χαλαζία. Η στήριξη γίνεται επίσης σε ακίδες.

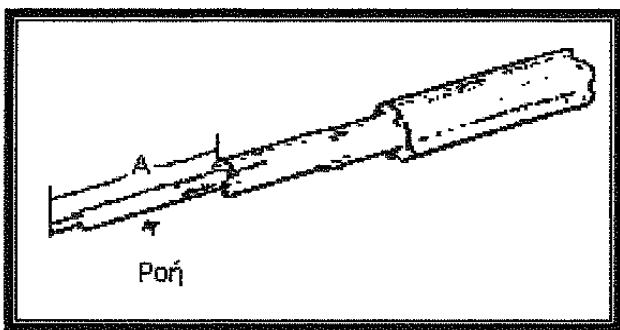
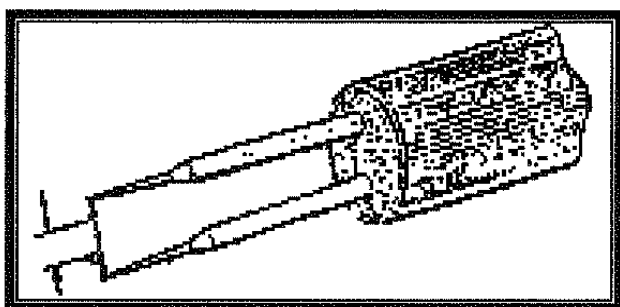
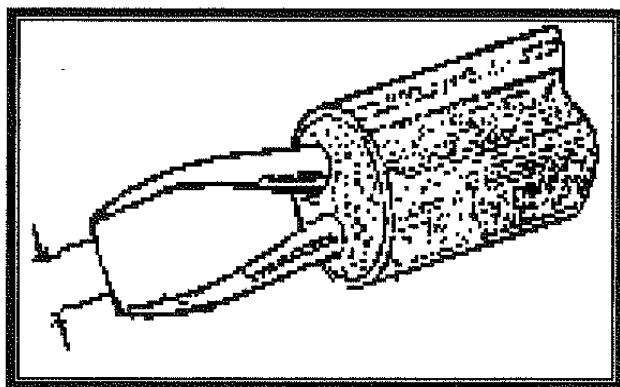
Οι αισθητήρες επιφάνειας (hot-film probes) αποτελούνται από ένα κεραμικό υλικό, πλατίνα σε quartz κ.ά.

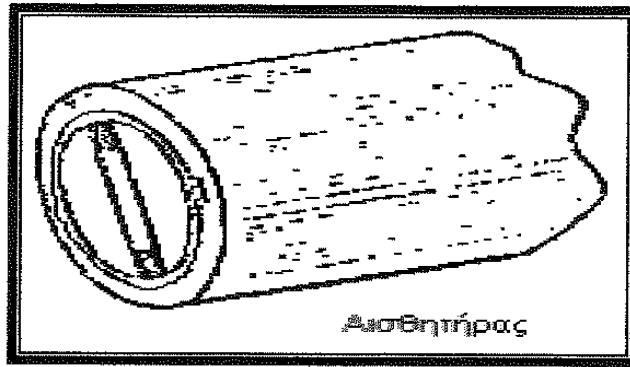
Από πλευράς διαμέτρου αισθητήρα είναι σαφώς πιο μεγάλη η διάμετρος του κυλινδρικού αισθητήρα, η οποία είναι στα 0.025mm, γεγονός που έχει σαν αποτέλεσμα μικρότερη απόκριση συχνότητας και αδυναμία προσέγγισης κοντά σε επιφάνειες.

Τα πλεονεκτήματα βέβαια σε σχέση με το θερμό νήμα είναι ότι ο αισθητήρας επιφάνειας είναι πιο ανθεκτικός σε σωματίδια που πιθανόν να υπάρχουν μέσα στο πεδίο ροής και που μπορεί να τον καταστρέψουν χτυπώντας επάνω του. Επίσης ότι μπορεί να διαμορφωθεί σε όποια μορφή απαιτείται από το πείραμα.

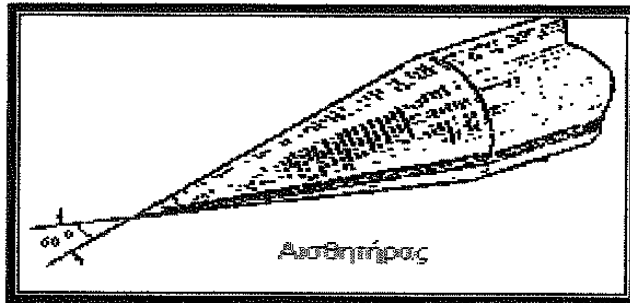
Το σχήμα των ακίδων και η θέση τους σε σχέση με το κυρίως σώμα του συστήματος που το στηρίζει ποικίλει σύμφωνα με τις ανάγκες της μέτρησης. Έτσι, υπάρχουν αισθητήρες για μέτρηση κοντά σε στερεά όρια, δηλαδή μέσα σε οριακά στρώματα λόγω των κατάλληλων στηριγμάτων

που διαθέτουν τα οποία, αφενός επιτρέπουν την προσέγγιση κοντά σε στερεό όριο και αφετέρου δεν επηρεάζουν την μέτρηση λόγω της παρουσίας τους. Ανάλογα με την εφαρμογή επομένως επιλέγεται και ο καταλληλότερος τύπος αισθητήρα. Διάφορες μορφές που μπορεί να έχουν οι αισθητήρες παρουσιάζονται στο σχήμα 1.20.

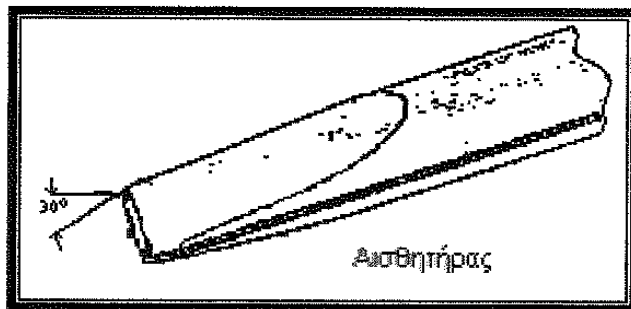




Αισθητήρας



Αισθητήρας

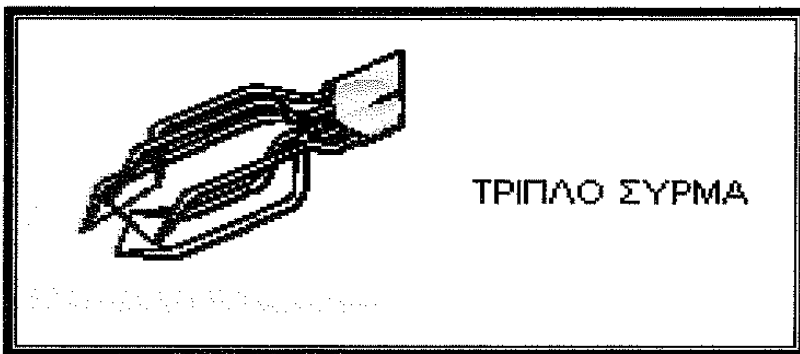
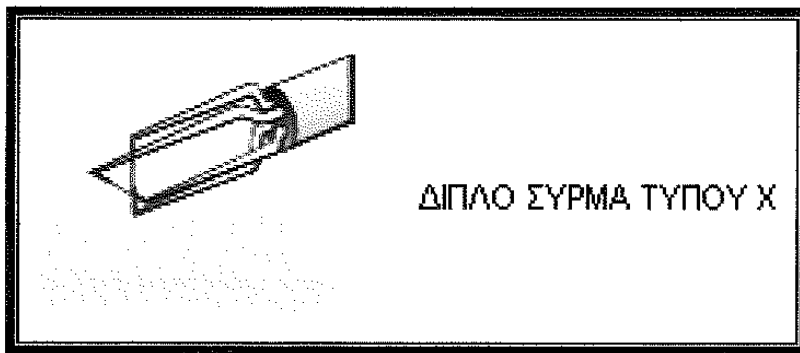


Αισθητήρας

Σχήμα 1.20 : Διάφοροι τύποι αισθητήρων οι οποίοι επιλέγονται ανάλογα με την εφαρμογή.

Μερικές φορές στο ίδιο σύστημα στήριξης μπορεί να υπάρχουν δύο θερμά νήματα διατεταγμένα σε σχήμα Χ ή ακόμη και τρία νήματα κάθετα το ένα στο άλλο, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.21. Τέτοια σύνθετα νήματα χρησιμοποιούνται κυρίως για μέτρηση των χαρακτηριστικών τυρβώδους ροής. Έτσι υπάρχουν διαθέσιμοι αισθητήρες με απλό, διπλό και τριπλό αισθητήριο άκρο, ανάλογα με τον αριθμό των συρμάτων που έχουν. Δεδομένου ότι οι αισθητήρες αποκρίνονται και στην τιμή και στην κατεύθυνση του διανύσματος της ταχύτητας, τα δεδομένα και για τις δύο μπο-

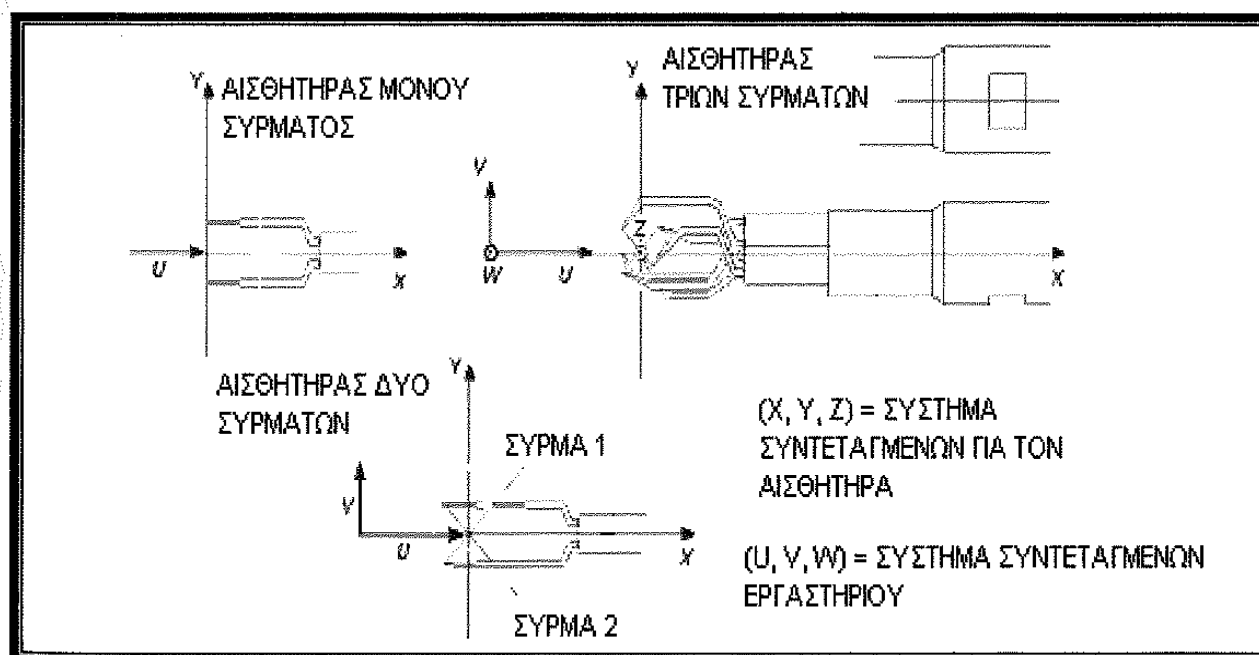
ρούν να ληφθούν μόνο όταν τοποθετούνται δύο ή περισσότεροι αισθητήρες κάτω από διαφορετικές γωνίες στο διάνυσμα ροής.



Σχήμα 1.21 : Αισθητήρες με ένα, δύο και τρία νήματα. Νήματα αυτού του τύπου χρησιμοποιούνται κυρίως για μέτρηση των χαρακτηριστικών τυρβώδους ροής.

Οι απλοί αισθητήρες μονού νήματος χρησιμοποιούνται για μονοδιάστατες ροές μίας κατεύθυνσης. Είναι διαθέσιμοι με ακίδες σε διάφορες γεωμετρίες, κάτι που επιτρέπει στο όργανο να τοποθετηθεί σωστά με τον αισθητήρα κάθετα και τις ακίδες παράλληλα στη ροή. Επίσης υπάρχουν

αισθητήρες μονού νήματος οι οποίοι παρουσιάζουν γωνία 45° μεταξύ του αισθητήρα και του άξονα ελέγχου του οργάνου. Χρησιμοποιούνται για τριδιάστατες στάσιμες ροές, όπου το διάνυσμα της ταχύτητας μένει μέσα σε έναν κώνο 90° . Κατά τη μέτρηση πρέπει να υπάρχει η δυνατότητα περιστροφής τους. Οι αισθητήρες με δύο νήματα είναι δύο ειδών: αυτοί σε σχήμα Χ για δυδιάστατες ροές, όπου το διάνυσμα της ταχύτητας μένει στο όριο $\pm 45^\circ$ σε σχέση με τον άξονα ελέγχου του οργάνου και οι αισθητήρες με διαχωριζόμενα νήματα για δυδιάστατες ροές, όπου το διάνυσμα της ταχύτητας μένει στο όριο $\pm 90^\circ$ σε σχέση με τον άξονα ελέγχου του οργάνου. Τέλος υπάρχουν και αισθητήρες με τρία νήματα: Για τις διδιάστατες ροές, όπου το διάνυσμα ταχύτητας μένει μέσα σε έναν κώνο ανοίγματος γωνίας 70° γύρω από τον άξονα ελέγχου του οργάνου, που αντιστοιχεί σε μια ένταση τύρβης 15%, αλλά και αισθητήρες κατάλληλοι για πλήρως αντιστραμμένες δυδιάστατες ροές. Η αποδεκτή γωνία είναι $\pm 180^\circ$. Στο σχήμα 1.22 απεικονίζονται σχηματικά αισθητήρες με ένα, δύο και τρία νήματα.



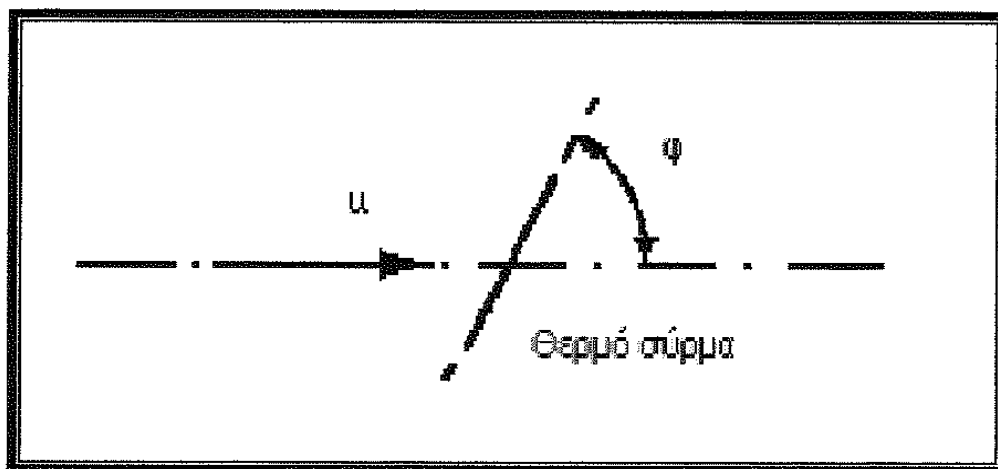
Σχήμα 1.22 : Σχηματική απεικόνιση αισθητήριων συστημάτων με ένα, δύο και τρία νήματα.

Η παρουσία των ακίδων και του πεπερασμένου μήκους του νήματος επηρεάζει σημαντικά τη σχέση ανάμεσα στο συντελεστή μετάδοσης θερμότητας h και την ταχύτητα. Πειραματικά βρέθηκε ότι και η παράλληλη συστούσα στο νήμα παίζει κάποιο ρόλο στην ψύξη του νήματος.

Γενικότερα μπορεί κανείς να θεωρήσει μια ενεργό ταχύτητα V_{eff} που ικανοποιεί τις εξισώσεις ψύξης του θερμού νήματος και η οποία συνδέεται με τις πραγματικές συστούσες της ταχύτητας με τις ακόλουθες σχέσεις:

$$V_{eff}^2 = V^2 (\sin^2\varphi + k^2 \cos\varphi) \quad (1.46)$$

όπου φ είναι η γωνία που σχηματίζει η ταχύτητα με τον άξονα του νήματος όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.23.



Σχήμα 1.23 : Απεικόνιση της γωνίας φ , γωνία που σχηματίζει η ταχύτητα με τον άξονα του νήματος.

$$U_{eff}^2 = U^2 (\sin^2\theta + k_2^2 \cos\theta) \quad (1.47)$$

για $\varphi=90^\circ$ όπου θ είναι η γωνία pitch που σχηματίζεται ανάμεσα στο επίπεδο που ορίζεται από το διάνυσμα της ταχύτητας και τον άξονα του νήματος και το επίπεδο των ακίδων.

Οι τιμές k και k_2 εξαρτώνται από τη γεωμετρία του αισθητήρα και βρίσκονται με βαθμονόμηση. Τυπικές τιμές είναι:

$$k=1.03 - 1.1$$

και

$$k_2=0.2$$

Γενικότερα η U_{eff} μπορεί να θεωρηθεί σαν:

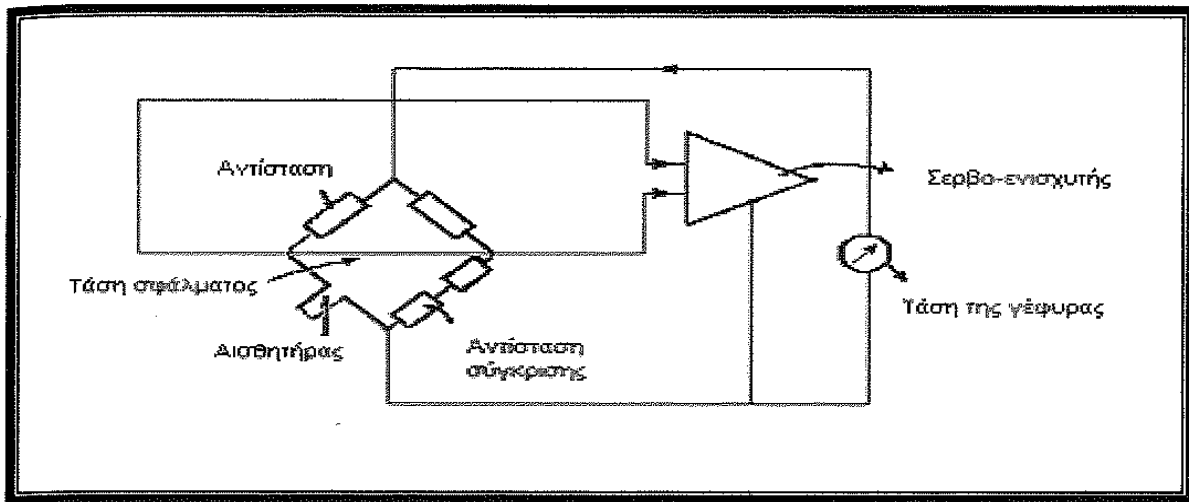
$$U_{eff}^2 = U_n^2 + k^2 U_s^2 \quad (1.48)$$

όπου U_n η κάθετη στο νήμα και U_s η παράλληλη συνιστώσα της ταχύτητας. Στην περίπτωση αυτή το k είναι της τάξεως του 0.2.

1.4.2 ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ

Το σύστημα τροφοδοσίας ουσιαστικά αποτελείται από ένα σύστημα γέφυρας το οποίο βέβαια διαφέρει στις απαιτήσεις ανάμεσα στη λειτουργία σταθερής θερμοκρασίας ή σταθερού ρεύματος.

Στο σχήμα 1.24 φαίνεται το απλοποιημένο διάγραμμα της λειτουργίας ανεμομέτρου σταθερής θερμοκρασίας.



Σχήμα 1.24 : Απλοποιημένο διάγραμμα λειτουργίας ανεμομέτρου σταθερής θερμοκρασίας.

Αποτελείται από μια γέφυρα Wheatstone και ένα σερβο-ενισχυτή. Ο αισθητήρας μαζί με μια από τις αντιστάσεις του επάνω κλάδου (top-resistance) αποτελούν το ενεργητικό μέρος της γέφυρας, ενώ το παθητικό αποτελείται από την άλλη αντίσταση του επάνω κλάδου καθώς και τις αντιστάσεις σύγκρισης και εξισορρόπησης των διαφόρων καλωδίων συνθέσεων.

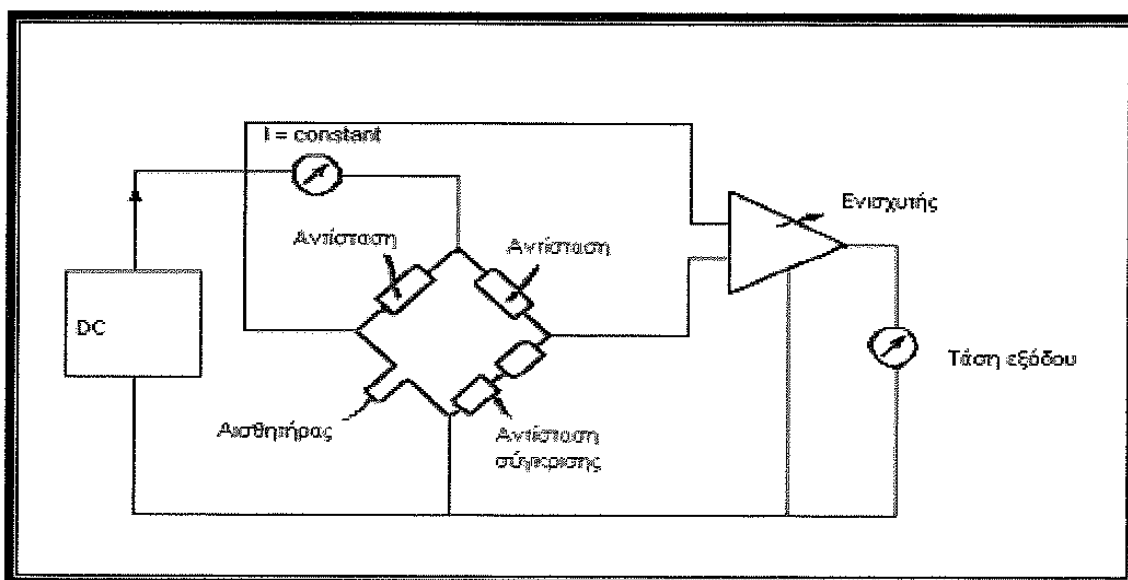
Όταν η γέφυρα ισορροπεί, τότε η διαφορά δυναμικού στην οριζόντια διαγώνιο της γέφυρας είναι μηδέν. Μεταβολή όμως της ροής γύρω από τον αισθητήρα προκαλεί μεταβολές στην αντίστασή του και επομένως εμφανίζεται μια διαφορά δυναμικού στην οριζόντια διαγώνιο η οποία χρησιμοποιείται σαν είσοδος στον σερβο-ενισχυτή. Αυτός στην έξοδο παράγει, αφ' ενός ένα σήμα που επηρεάζει την τάση στην κατακόρυφη διαγώνιο ώστε να κρατηθεί η θερμοκρασία του αισθητήρα σταθερή, αφ' ετέρου παράγει μια τάση που είναι συνάρτηση της μεταβολής της ενέργειας στον αισθητήρα.

Η ένταση του ρεύματος που είναι διαθέσιμη στην έξοδο του σερβο-ενισχυτή για τη μέτρηση εξαρτάται από τον λόγο των αντιστάσεων

στην κορυφή της γέφυρας. Για λόγο 1:20 το ρεύμα που χάνεται είναι μόνο 5% αλλά υπάρχει πρόβλημα απόκρισης συχνότητας. Ο αισθητήρας αποτελεί μέρος της γέφυρας. Επομένως μεταβολή της αντίστασης του αισθητήρα, προκαλεί μια διαφορά δυναμικού στην οριζόντια διαγώνιο, που είναι συνάρτηση της ταχύτητας του ρευστού.

Για λόγο αντιστάσεων (Bridge ratio) 1:1 η γέφυρα είναι τελείως συμμετρική και ικανή να μετρήσει μεταβολές ταχύτητας με πολύ μεγάλη συχνότητα, όμως η διαθέσιμη ένταση είναι μόνο 50% γιατί το υπόλοιπο καταναλώνεται στο παθητικό μέρος της γέφυρας.

Στο σχήμα 1.25 φαίνεται η διάταξη του ανεμόμετρου σταθερού ρεύματος.



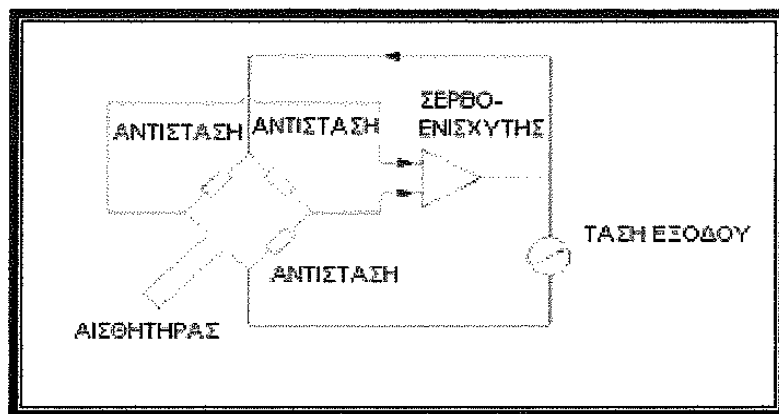
Σχήμα 1.25 : Τυπική διάταξη ανεμόμετρου σταθερού ρεύματος.

Ο αισθητήρας είναι συνδεδεμένος με μια πηγή DC μεγάλης εσωτερικής αντίστασης ώστε οι μεταβολές της αντίστασης στο νήμα να μη επηρεάζουν την ένταση του ρεύματος. Ο αισθητήρας παράλληλα αποτελεί μέρος της γέφυρας. Μεταβολή επομένως στην αντίσταση του αισθητήρα προ-

καλεί μια διαφορά δυναμικού στην οριζόντια διαγώνιο της γέφυρας, που είναι συνάρτηση της ταχύτητας του ρευστού.

Η διάταξη λειτουργίας με σταθερό ρεύμα δεν είναι κατάλληλη για μετρήσεις ταχύτητας που μεταβάλλεται με υψηλή συχνότητα γιατί η απόκριση συχνότητας είναι μικρή. Συνήθως ανεμόμετρα που λειτουργούν με σταθερή ένταση χρησιμοποιούνται για την μέτρηση της θερμοκρασίας. Στην περίπτωση αυτή η ένταση του ρεύματος μέσα από τον αισθητήρα μειώνεται πολύ, έτσι ώστε το νήμα να μην είναι ευαίσθητο σε μεταβολές της ταχύτητας, αλλά μόνο σε μεταβολές της θερμοκρασίας.

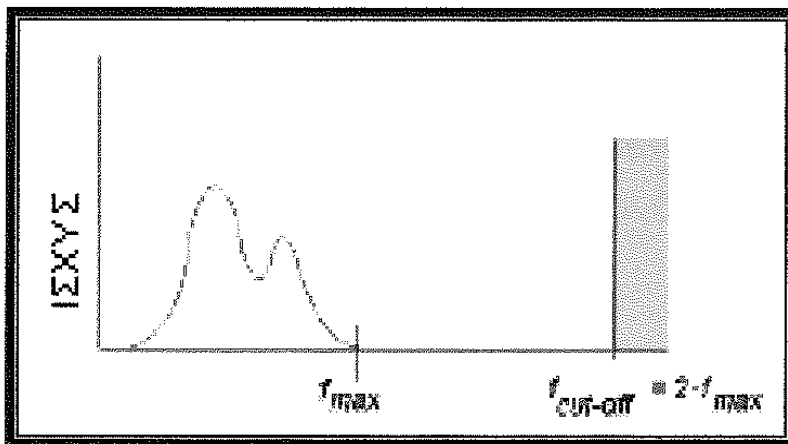
Για οποιαδήποτε πειραματική εφαρμογή, στην οποία χρησιμοποιείται το ανεμόμετρο θερμού νήματος, είναι σημαντικό να είναι κανείς σίγουρος ότι η διάταξη λειτουργεί στο απαραίτητο εύρος ταχυτήτων, ότι τα αποτελέσματα που παρέχει είναι σταθερά και αξιόπιστα καθώς και ότι η παραγωγή θορύβου ή τυχόν άλλων παρεμβολών είναι χαμηλές και αντιμετωπίζονται με κατάλληλες διατάξεις φίλτρων. Ανάλογα με την εφαρμογή, αλλά και το κόστος, γίνεται η επιλογή της γέφυρας και του σερβοενισχυτή ώστε τα τελικά αποτελέσματα να είναι ορθά και αξιόπιστα. Στο σχήμα 1.26 απεικονίζεται μια ακόμα τυπική διάταξη ενός ανεμόμετρου θερμού νήματος.



Σχήμα 1.26 : Τυπική διάταξη ανεμόμετρου θερμού νήματος.

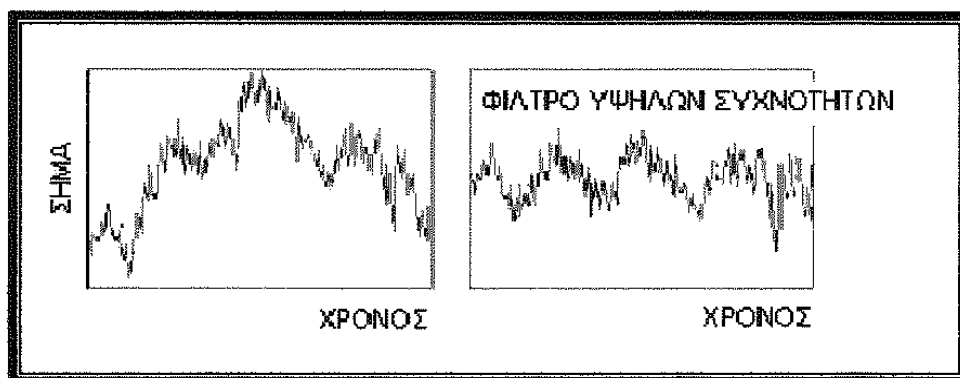
Η επιλογή των φίλτρων γίνεται επίσης ανάλογα με την εφαρμογή και τη συχνότητα των παρασιτικών σημάτων. Σε περιπτώσεις ηλεκτρικού σήματος, αυτό γίνεται με ένα φίλτρο με συνδυασμό αντίστασης και πυκνωτή. Οι τέσσερις βασικοί τύποι φίλτρων είναι:

- Το φίλτρο χαμηλών συχνοτήτων (low pass), που επιτρέπει να περάσουν συχνότητες κάτω από μια ορισμένη τιμή και παρουσιάζεται στο σχήμα 1.27.



Σχήμα 1.27 : Φίλτρο χαμηλών συχνοτήτων (low pass).

- Το φίλτρο υψηλών συχνοτήτων (high pass), που επιτρέπει να περάσουν συχνότητες μόνο πάνω από μια συγκεκριμένη τιμή συχνότητας και παρουσιάζεται στο σχήμα 1.28.



Σχήμα 1.28 : Φίλτρο υψηλών συχνοτήτων (high pass).

- Το φίλτρο ζώνης (band pass) που επιτρέπει να περνάνε συχνότητες μιας ορισμένης περιοχής συχνοτήτων και
- Το φίλτρο απόρριψης ζώνης (band rejection) που επιτρέπει να περνάνε το σύνολο των συχνοτήτων εκτός μιας περιοχής.

1.4.3 ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΗΜΑΤΩΝ

Σκοπός του συστήματος επεξεργασίας είναι ο υπολογισμός της μέσης ταχύτητας και της τύρβης από το σήμα εξόδου του ανεμομέτρου.

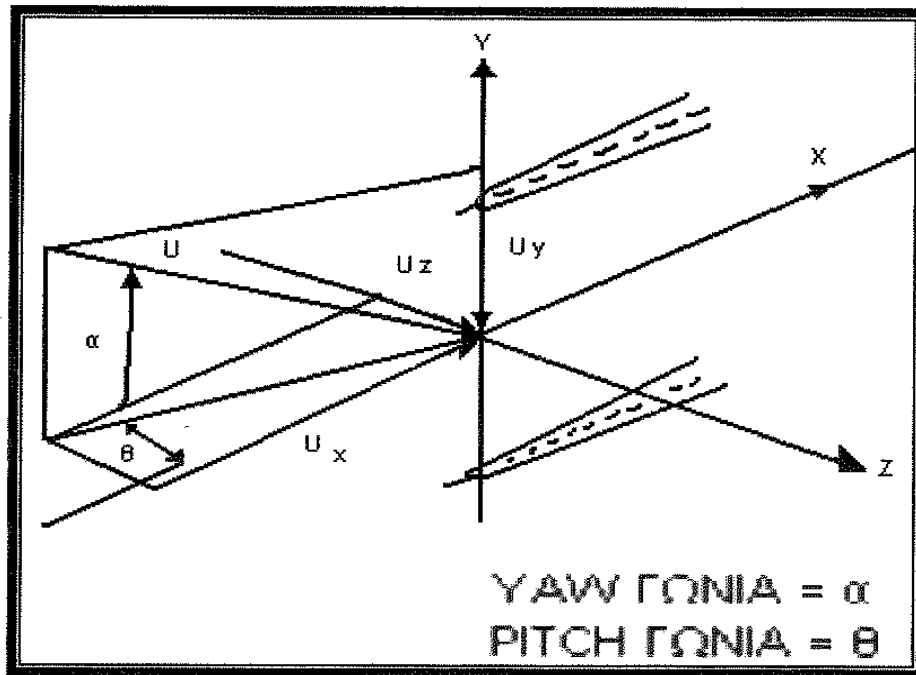
Το σήμα εξόδου E είναι μια τάση που μετριέται κατά μήκος μιας αντίστασης φορτίου, μεταβάλλεται με το χρόνο και συνδέεται με τη στιγμιαία ταχύτητα με τη σχέση:

$$E^2 = A + Bu_{eff}^n \quad (1.49)$$

Το σύστημα επεξεργασίας συνήθως περιλαμβάνει:

- Κύκλωμα γραμμοποίησης (linearizer).
- Κύκλωμα ολοκλήρωσης για προκαθορισμένο χρόνο T .
- Κύκλωμα υπολογισμού της RMS.

Τα παραπάνω κυκλώματα μπορεί είτε να είναι ξεχωριστές μονάδες είτε να αναπληρωθούν με κάποιο πρόγραμμα ηλεκτρονικού υπολογιστή (software). Η βάση όμως για την επεξεργασία του σήματος έγκειται στη βαθμονόμηση του συστήματος από την οποία θα προκύψουν οι σταθερές A , B και n καθώς και η επίδραση της γωνίας yaw και pitch στο U_{eff} . Στο σχήμα 1.29 φαίνεται το διάνυσμα της ταχύτητας, οι τρεις συνιστώσες της ταχύτητας και οι γωνίες yaw και pitch.



Σχήμα 1.29 : Το διάνυσμα της ταχύτητας και οι τρεις συνιστώσες της.

Η επιλογή του υπολογιστή που χρησιμοποιείται για τις μετρήσεις με ανεμόμετρο θερμού νήματος δεν είναι κανονικά κρίσιμη. Η ταχύτητα και χωρητικότητα της μνήμης είναι συνήθως περισσότερο από ικανοποιητική για τις περισσότερες εφαρμογές. Είναι εντούτοις σημαντικό, να εξασφαλιστεί ότι το σύνολο των συστημάτων είναι συμβατά και λειτουργούν κάτω από τα ίδια προγράμματα εφαρμογών και ότι είναι δυνατή η επικοινωνία μεταξύ των συστημάτων και του οργάνου.

Κύκλωμα γραμμοποίησης (linearizer).

Η σχέση μεταξύ της τάσης εξόδου και ταχύτητας:

$$E^2 = E_0^2 + Bu^n \quad (1.50)$$

είναι δύσκολη στη χρήση της για τον υπολογισμό της ταχύτητας u από την τάση εξόδου E , ιδιαίτερα όταν πρόκειται να υπάρχουν πλήθος μετρήσεων και σε περιπτώσεις ροών υψηλής τύρβης. Στην τελευταία περίπτωση ο υπολογισμός της τύρβης της ροής εισάγει σημαντικά σφάλμα-

τα από την αγνόηση συσχετίσεων ταχυτήτων μεγαλύτερων της 2^{ης} τάξης.

Έτσι, σήμερα με την ανάπτυξη της ηλεκτρονικής χρησιμοποιούνται κυκλώματα γραμμοποίησης σήματος, τα οποία έχουν ως είσοδο την τάση E και ως έξοδο την τάση που είναι ανάλογη της στιγμιαίας ταχύτητας u που είναι κάθετη στο νήμα (αυτό σε πρώτη προσέγγιση).

Αφού έχουν δοθεί στο κύκλωμα γραμμοποίησης ως σταθερές οι τιμές E_o, B και n , αυτός εκτελεί με τη σειρά τις παρακάτω «πράξεις»

- Τετραγωνισμός του σήματος εισόδου, $E \rightarrow E^2$
- Αφαίρεση σταθερής ποσότητας $E^2 - E_o^2$
- Διαίρεση, $\frac{E^2 - E_o^2}{B}$
- Λογαρίθμιση $\log\left(\frac{E^2 - E_o^2}{B}\right)$
- Διαίρεση με τον n $\frac{1}{n} \log\left(\frac{E^2 - E_o^2}{B}\right)$
- Αντιλογαρίθμιση, $\log^{-1}\left[\frac{1}{n} \log\left(\frac{E^2 - E_o^2}{B}\right)\right] \rightarrow$ τάση εξόδου

Έτσι λοιπόν στην έξοδο προκύπτει η τάση εξόδου κυκλώματος γραμμοποίησης $E_{\gamma\rho}$ που είναι $E_{\gamma\rho} = S U_{\phi}$, όπου S η σταθερά μετατροπής τάσης σε ταχύτητα και $U_{\phi} = \sqrt{(U + u)^2 + v^2}$

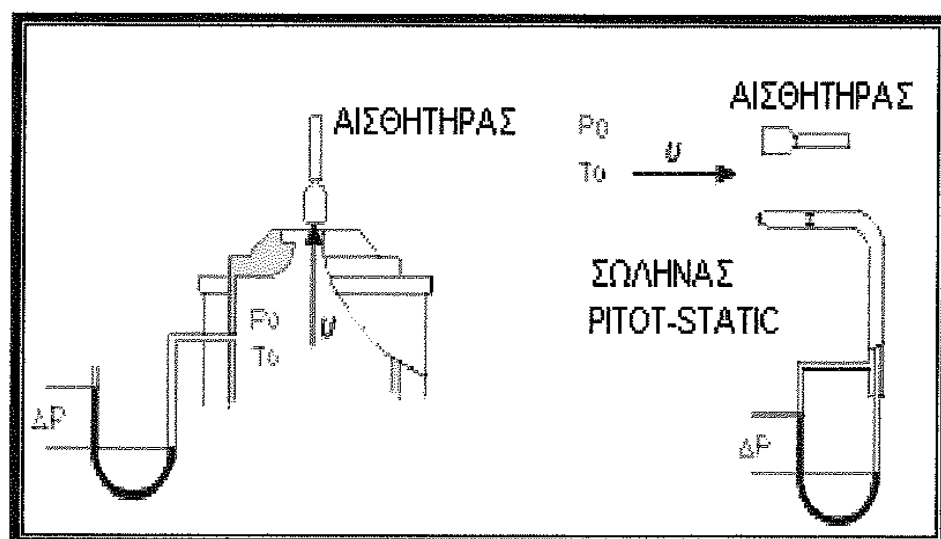
1.5 ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΟΡΓΑΝΟΥ

Ο ρόλος της βαθμονόμησης είναι ιδιαίτερα σημαντικός σε ότι αφορά την ακρίβεια και την ταχύτητα με τις οποίες μπορεί να πραγματοποιηθεί ένα πείραμα. Με τη βαθμονόμηση αναπτύσσεται μια σχέση ανάμεσα στα σήματα εισόδου και εξόδου του οργάνου. Συγκεκριμένα για το ανεμόμετρο θερμού νήματος η βαθμονόμηση καθορίζει τη σχέση μεταξύ της εξόδου του οργάνου και της ταχύτητας ροής. Κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης πρέπει όλες οι παράμετροι εκτός από μία, αυτής που επιθυμεί κανείς να μελετήσει την επίδραση, να παραμείνουν σταθερές κατά τη διάρκειά της. Βαθμονόμηση επομένως είναι η σύγκριση ενός προτύπου μέτρησης ή ενός οργάνου, με ένα άλλο πρότυπο ή όργανο, ώστε να αναφερθεί ή να εξαλειφθεί με ρύθμιση οποιαδήποτε απόκλιση στην ορθότητα του συγκρινόμενου αντικειμένου. Ορθότητα είναι ο βαθμός συμφωνίας μεταξύ της τιμής που μετριέται κατά τη διεξαγωγή της δοκιμής και της πραγματικής τιμής της μετρούμενης ποσότητας, καθώς οποιαδήποτε απόκλιση μεταξύ των δύο τιμών οδηγεί σε λανθασμένα αποτελέσματα και συμπεράσματα.

Οι τύποι των σφαλμάτων που μπορούν να προκύψουν είναι δύο ειδών. Το πρώτο είναι το λεγόμενο συστηματικό σφάλμα, που λέγεται επίσης και μεροληπτικότητα. Αυτό το σφάλμα είναι το ίδιο για κάθε ανάγνωση μιας δεδομένης μέτρησης και μπορεί να διορθωθεί με βαθμονόμηση. Ο δεύτερος τύπος είναι το λεγόμενο τυχαίο σφάλμα, που οφείλεται σε ακρίβεια του οργάνου. Το σφάλμα αυτό είναι στατιστικό. Σε κάθε τιμή που μετράται, αντιστοιχεί μια μέση τιμή και μια κατανομή τιμών γύρω από αυτήν. Επανάληψη, επομένως, μιας μέτρησης, θα δώσει μια διαφορετική τιμή αλλά φυσικά μέσα στα στατιστικά όρια της κατανομής που έχει γίνει αποδεκτή. Επομένως, για το τυχαίο σφάλμα δεν μπορεί να γίνει διόρ-

θωση. Δεδομένης μιας μετρήσεως, το μόνο που μπορεί να γίνει για το τυχαίο σφάλμα, θα είναι να δοθούν τα όρια μέσα στα οποία θα βρίσκεται η πραγματική τιμή.

Ένα σύστημα βαθμονόμησης δεν θεωρείται μέρος της μετρητικής αλυσίδας. Διαδραματίζει, εντούτοις, έναν σημαντικό ρόλο σε ότι αφορά την ακρίβεια και την ταχύτητα, με τις οποίες μπορεί να πραγματοποιηθεί ένα πείραμα. Για τη βαθμονόμηση του ανεμόμετρου θερμού νήματος θα πρέπει να εκτεθεί ο αισθητήρας σε ένα πεδίο γνωστών ταχυτήτων και να γίνει καταγραφή του σήματος εξόδου σαν συνάρτηση της ταχύτητας και των γωνιών yaw και pitch. Η διαδικασία συνήθως εκτελείται σε αεροσήραγγα, στην οποία πρόκειται να πραγματοποιηθούν και τα πειράματα, με τη βοήθεια σωλήνα Pitot-Static, σχηματική απεικόνιση του οποίου παρουσιάζεται στο σχήμα 1.30, ώστε να υπάρχει ταχύτητα αναφοράς.

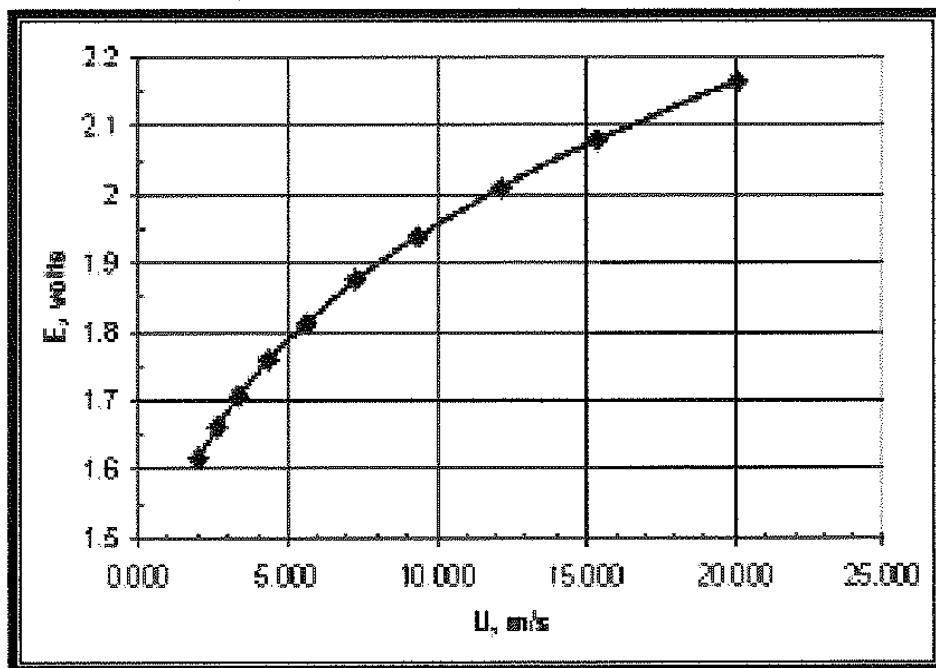


Σχήμα 1.30 : Ο σωλήνας pitot-static.

Η βαθμονόμηση καθορίζει τη σχέση μεταξύ της εξόδου του οργάνου και της ταχύτητας ροής. Κατά τη διάρκεια της πραγματοποιούνται μετρήσεις σε ένα σύνολο γνωστών ταχυτήτων U και για κάθε τιμή ταχύτητας καταγράφονται οι αντίστοιχες τιμές τάσης E , δίνοντας μια καμπύλη (E, U) . Είναι σημαντικό να παρακολουθεί κανείς τις τιμές της θερμοκρασίας

κατά τη διάρκεια της βαθμονόμησης. Εάν ποικίλλουν από τη βαθμονόμηση στη μέτρηση μπορεί να είναι απαραίτητο να διορθωθούν τα δεδομένα για διάφορες τιμές θερμοκρασίας. Είναι δηλαδή αναγκαίο να υπάρχει ένας αισθητήρας θερμοκρασίας με απόκριση ικανή ώστε να παρακολουθεί τις μεταβολές στην τιμή της.

Στο σχήμα 1.31 παρουσιάζεται η γραφική παράσταση της σχέσης ανάμεσα στην ταχύτητα U και το σήμα E για ένα αισθητήρα.



Σχήμα 1.31 : Γραφική παράσταση της σχέσης μεταξύ της ταχύτητας U και της τάσης E .

Η ταχύτητα U , μέγεθος και διεύθυνση, μετριέται χωριστά με κάποιο όργανο μεγάλης ακρίβειας και κάτω από συνθήκες χαμηλής τύρβης. Πρέπει εδώ να υπογραμμισθεί ότι το σύστημα θα πρέπει να βαθμονομηθεί στην περιοχή ταχυτήτων και με το ρευστό που πρόκειται να γίνει η μέτρηση γιατί επέκταση της καμπύλης βαθμονόμησης σε χαμηλότερες κυρίως ταχύτητες είναι προβληματική.

Για την βαθμονόμηση σε σχετικά υψηλές ταχύτητες (από 2 m/s ως 50 m/s), ο αισθητήρας τοποθετείται σε αεροσήραγγα χαμηλής τύρβης όπου η U μετριέται με σωλήνα Pitot-Static, στο κέντρο μιας δέσμης ρευστού και κοντά στην έξοδο από το στόμιο όπου η διανομή της ταχύτητας είναι ομοιόμορφη σε ένα Venturi.

Για χαμηλές ταχύτητες όπου ο σωλήνας Pitot χάνει την ευαισθησία του, η βαθμονόμηση μπορεί να γίνει:

- Με τη βοήθεια Venturi γνωστού λόγου β , όπου ο Pitot-Static τοποθετείται στο στενό μέρος υψηλών ταχυτήτων, ενώ το θερμό νήμα τοποθετείται στη μεγάλη διάμετρο. Από την ένδειξη του Pitot και τον λόγο των εμβαδών μπορεί να υπολογίσει κανείς την ταχύτητα στη θέση του θερμού νήματος.
- Με τη βοήθεια περιστρεφόμενου βραχίονα, όπου το θερμό νήμα τοποθετείται σε βραχίονα που περιστρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα σε ακίνητο αέρα. Τότε η ταχύτητα U είναι ίση με την περιφερειακή ταχύτητα του βραχίονα. Μεταβάλλοντας τις στροφές μπορεί κανείς να βαθμονομήσει με ακρίβεια το θερμό νήμα σε χαμηλές ταχύτητες.

Η διαδικασία της βαθμονόμησης είναι απαραίτητο να διεξάγεται πάντοτε πριν από μια πειραματική εφαρμογή.

Η εμπειρική σχέση των Collins και Williams γράφεται:

$$Nu \left[\frac{T_f + T_w}{2T_f} \right]^{-0.17} = 0.24 + 0.54 Re^{0.45} \quad (1.51)$$

όπου:

$$Nu = \frac{\dot{q}_w}{\pi d(T_w - T_f)} \text{ και } Re = \frac{\rho u d}{\mu} \quad (1.52)$$

Αλλά το ποσόν της καταναλισκόμενης θερμότητας είναι: $\dot{q}_w = I^2 R_w$, και $R_w = R_o [1 + a(T_w + T_o)]$ έτσι προκύπτει:

$$\frac{R_w - R_f}{T_w - T_f} = aR_o = \text{σταθ.} \quad (1.53)$$

όπου R_f η αντίσταση του νήματος στη θερμοκρασία του ρευστού.

Ισχύει:

$$Nu \sim \frac{I^2 R_w}{R_w - R_f} \quad (1.54)$$

οπότε η σχέση των Collins και Williams παίρνει γενικότερα τη μορφή:

$$\frac{I^2 R_w}{R_w - R_f} = A' + B' U^n \quad \text{ή} \quad E^2 = A + B u^n = E_o^2 + B u^n \quad (1.55)$$

όπου:

$$0.45 < n < 0.5$$

και

E: η πτώση τάσης στα άκρα του θερμαινόμενου νήματος.

Οι σταθερές A και B που προσδιορίζονται με τη βαθμονόμηση του οργάνου περιέχουν τη θερμοκρασία του ρευστού, τη θερμοκρασία του νήματος, τις φυσικές ιδιότητες του νήματος και του ρευστού, τις διαστάσεις

του νήματος και την επίδραση της αγωγιμότητας προς τις ακίδες του νήματος.

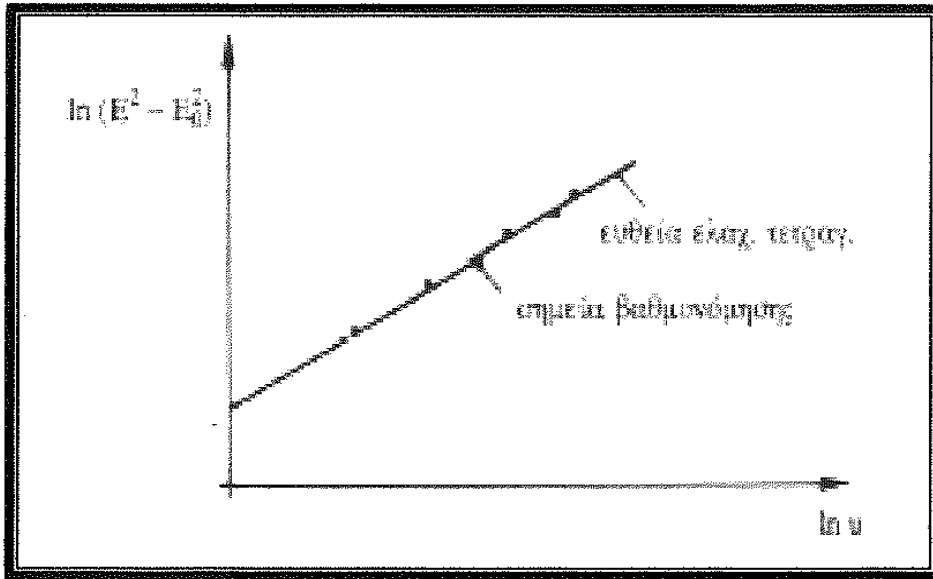
Η βαθμονόμηση του οργάνου γίνεται με τη χρήση ενός ρεύματος χαμηλής τύρβης. Το νήμα τοποθετείται στο ρεύμα του αέρα του οποίου η ταχύτητα μετράται με σωλήνα Pitot-Static και ταυτόχρονα καταγράφεται η τάση E του οργάνου. Οι μετρήσεις αυτές επαναλαμβάνονται για τουλάχιστον 5 διαφορετικές ταχύτητες οι οποίες πρέπει να καλύπτουν πλήρως την περιοχή ταχυτήτων στην οποία θα χρησιμοποιηθεί το όργανο.

Λογαριθμίζοντας τη σχέση (1.55) προκύπτει:

$$\ln(E^2 - A) = \ln B + n \ln U \quad (1.56)$$

Αν οι μετρήσεις τοποθετηθούν σε λογαριθμικό χαρτί όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 1.32, αφού ληφθεί η τάση E_0 που αντιστοιχεί σε ταχύτητα ροής μηδέν, προκύπτει μια ευθεία. Η κλίση της ευθείας που διέρχεται πιο κοντά στα σημεία μέτρησης (ελάχιστα τετράγωνα), ισούται με τον εκθέτη n του νόμου του King ($E^2 = E_0^2 + Bu^n$) και από την ευθεία υπολογίζονται και οι σταθερές A και B ($E_0^2 = A$). Κατά τη μέτρηση με το θερμό νήμα είναι πλέον δυνατή η μετατροπή της καταγραφόμενης τάσης εξόδου του οργάνου σε δρώσα ταχύτητα:

$$U_{ef} = \left(\frac{E^2 - A}{B} \right)^{1/n} \quad (1.57)$$



Σχήμα 1.32 : Ευθεία βαθμονόμησης θερμού νήματος.

1.6 Η ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ

- Η απόκριση της συχνότητας του συστήματος εξαρτάται:
- Από το χρόνο που χρειάζεται μια μεταβολή να περάσει από το νήμα, $\tau \cong d/\bar{U}$.
- Από το χρόνο που απαιτείται η μεταβολή αυτή να περάσει μέσα από το οριακό στρώμα του νήματος.
- Τη θερμική αδράνεια του νήματος που είναι συνάρτηση του μεγέθους του υλικού.
- Το ηλεκτρονικό σύστημα ανάδρασης που επιταχύνει την ισορροπία.

Όσον αφορά την θερμική αδράνεια του συστήματος αυτή εξαρτάται από το μέγεθος του νήματος και το σχήμα του αισθητήρα. Είναι προφανές ότι όσο μικρότερος ο αισθητήρας, τόσο μεγαλύτερη η απόκριση συχνότητας. Για αισθητήρα 5 μm από τουγκστένιο, το όριο είναι περίπου 500 Hz.

Το σύστημα ανάδρασης, σερβο-ενισχυτής όταν το ανεμόμετρο λειτουργεί με σταθερή θερμοκρασία μπορεί να επιταχύνει την επίτευξη ισορροπίας, έτσι ώστε το ανεμόμετρο να μπορεί να ακολουθήσει μεταβολές της τάξης των 25 KHz. Αυτό βέβαια απαιτεί προσεκτική ρύθμιση των χαρακτηριστικών του ενισχυτή για κάθε συγκεκριμένο αισθητήρα. Συνήθως αυτό επιτυγχάνεται με την προσομοίωση του σήματος του αισθητήρα με παλμούς υψηλής συχνότητας και κατάλληλη εν συνεχεία ρύθμιση των χαρακτηριστικών αντιστάσεων και των επαγωγών του σερβο-ενισχυτή.

1.6.1 ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΟΥ ΣΤΙΣ ΔΙΑΤΑΡΑΧΕΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ

Το νήμα λόγω της πεπερασμένης θερμοχωρητικότητας του δεν ανταποκρίνεται ακαριαία στις μεταβολές ταχύτητας του ρευστού, δηλαδή η τάση εξόδου E είναι χρονικά μετατοπισμένη ως προς τις διαταραχές της ροής. Για να εκτιμηθεί η απόκριση συχνότητας του αισθητηρίου κανείς εξετάζει το νήμα θεωρώντας άπειρο μήκος κατά τη μεταβατική φάση. Για νήμα πολύ μεγάλου μήκους η εξίσωση του θερμικού ισοζυγίου γράφεται:

$$Cp_w \left(\rho_w \frac{\pi d_w^2}{4} \right) \frac{dT_w}{dt} = I^2 R_a [1 + a(T_w - T_f)] - \pi k_f \ell_f (T_w - T_f) Nu \quad (1.58)$$

όπου a ο συντελεστής θερμικής μεταβολής της αντίστασης.

Η εξίσωση αυτή είναι διαφορική εξίσωση πρώτης τάξης ως προς T_w (θεωρώντας το I^2 σε πρώτη προσέγγιση σταθερό) και η λύση της προφανώς περιέχει εκθετικό όρο της μορφής $\exp(-t/M)$ όπου M σταθερά με διαστάσεις χρόνου.

$$M = \frac{m_w Cp_w}{I^2 R_a a - \pi k_f \ell_w Nu} = \frac{m_w Cp_w R_w}{k_f \ell_w Nu R_a} \quad (1.59)$$

όπου:

$$m_w = \rho_w \frac{\pi d_w^2}{4} \ell_w$$

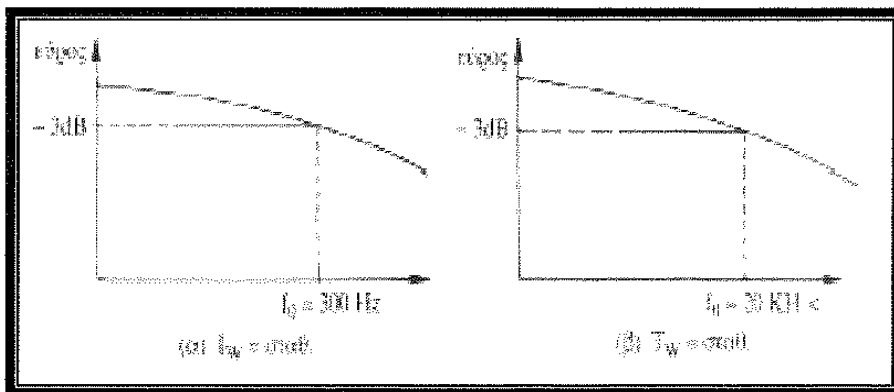
Η ημιτονοειδής μεταβολή του αριθμού Nusselt με συχνότητα ω σταθερού πλάτους, έχει ως συνέπεια το εύρος της θερμοκρασίας του νήματος να είναι ανάλογο του:

$$\frac{1}{1 + \omega^2 M^2} \quad (1.60)$$

δηλαδή παρατηρείται ότι η απόκριση του νήματος, άρα και της τάσης εξόδου E , δεν είναι γραμμική, διότι εξαρτάται από τη συχνότητα ω . Αν όμως η χρονική σταθερά του νήματος M είναι πολύ μικρή τότε η επίδραση είναι αμελητέα. Όμως με κατάλληλη ηλεκτρονική διάταξη μπορεί να διορθωθεί αυτή η παραμόρφωση της τάσης εξόδου.

Η χρονική σταθερά M για τυπικά νήματα είναι της τάξης $0.3 \cdot 10^{-3}$ sec. Για να επιτευχθούν μικρότερες τιμές του M πρέπει να χρησιμοποιηθούν μικρές διαμέτροι νήματος και μικρούς λόγους υπερθέρμανσης (μείωση όμως του λόγου μειώνει την ευαισθησία του οργάνου).

Στο σχήμα 1.33 (α) παρουσιάζεται η καμπύλη απόκρισης του αισθητηρίου που λειτουργεί με σταθερό ρεύμα για διάφορες συχνότητες, ενώ στο σχήμα 1.33 (β) για λειτουργία σταθερής θερμοκρασίας.



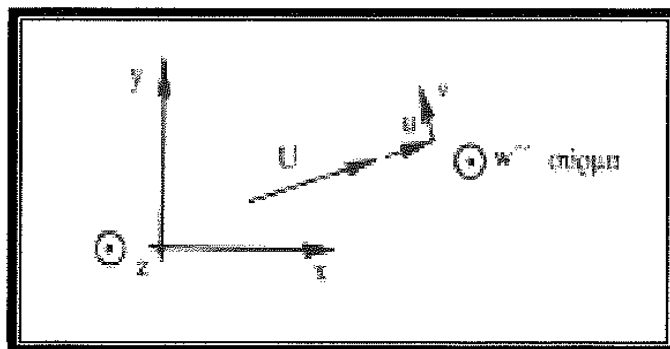
Σχήμα 1.33 : Καμπύλη απόκρισης του αισθητηρίου.

Από την σύγκριση των καμπυλών απόκρισης φαίνεται ότι η λειτουργία του αισθητηρίου με σταθερή θερμοκρασία είναι καλύτερη (η τύρβη καλύπτει συνήθως την περιοχή συχνότητας έως 10 kHz, ενώ η απόκριση του αισθητηρίου στις συχνότητες μεταβολής ταχύτητας στην περίπτωση (β) είναι επίπεδη χωρίς παραμόρφωση).

1.6.2 ΟΙ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΤΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΟΥ ΣΕ ΤΥΡΒΩΔΕΣ ΠΕΔΙΟ ΡΟΗΣ

α) Αισθητήριο κάθετο στη ροή

Έστω διδιάστατη ροή στο επίπεδο xy το δε νήμα κάθετο στο επίπεδο αυτό, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 1.34.



Σχήμα 1. 34 : Ταχύτητα κάθετη στο νήμα.

Αν U είναι η μέση τιμή της ταχύτητας και u, v, w οι διαταραχές της ταχύτητας, τότε η ψύξη του νήματος θα οφείλεται στη στιγμιαία ταχύτητα η οποία είναι κάθετη στο νήμα, δηλαδή στην ταχύτητα:

$$U_{\varphi} = \sqrt{(U + u)^2 + v^2} \quad (1.61)$$

οπότε θα ισχύει η σχέση:

$$E_{\gamma} = S U_{\varphi} \quad (1.62)$$

ή

$$E_{\gamma} = S [(U + u)^2 + v^2]^{1/2} \quad (1.63)$$

Η προηγούμενη σχέση γράφεται:

$$E_\gamma = \bar{E} + e \quad (1.64)$$

οπότε:

$$\bar{E} + e = SU \left\{ 1 + 2 \frac{u}{U} + \frac{u^2 + v^2}{U^2} \right\}^{1/2} \cong SU \left\{ 1 + 2 \frac{u}{U} + \frac{v^2}{U^2} \right\}^{1/2} \quad (1.65)$$

Ανάπτυγμα της παράστασης μέσα στην αγκύλη δίνει:

$$\left\{ 1 + 2 \frac{u}{U} + \frac{v^2}{U^2} \right\}^{1/2} = 1 + \frac{u}{U} + \frac{v^2}{2U^2} - \frac{uv^2}{2U^3} \quad (1.66)$$

Οπότε θα ισχύει ότι:

$$\bar{E} = SU \left\{ 1 + \frac{\bar{v}^2}{2U^2} - \frac{\bar{uv}^2}{2U^3} + \dots \right\} \quad (1.67)$$

ή

$$e = SU \left\{ \frac{u}{U} + \frac{v^2}{2U^2} - \frac{uv^2}{2U^3} - \frac{\bar{v}^2}{2U^2} - \frac{\bar{uv}^2}{2U^3} \dots \right\} \quad (1.68)$$

ή

$$\sqrt{e^2} = SU \left[\frac{\bar{u}^2}{U^2} + \frac{\bar{v}^4}{4U^4} + \frac{\bar{u}^2 \bar{v}^4}{4U^6} + \frac{\bar{v}^2}{4U^4} + \frac{\bar{uv}^2}{4U^6} + \dots + \frac{\bar{uv}^2}{2U^3} \right] \quad (1.69)$$

Προσεγγίζοντας τις εκφράσεις για το \bar{E} και $\sqrt{e^2}$ και αγνοώντας όρους α-

νώτερους της 2^{ης} τάξης, προκύπτουν οι επόμενες σχέσεις:

$$\bar{E} = SU \left\{ 1 + \frac{\bar{v}^2}{2U^2} \right\} \quad (1.70)$$

ή απλούστερα:

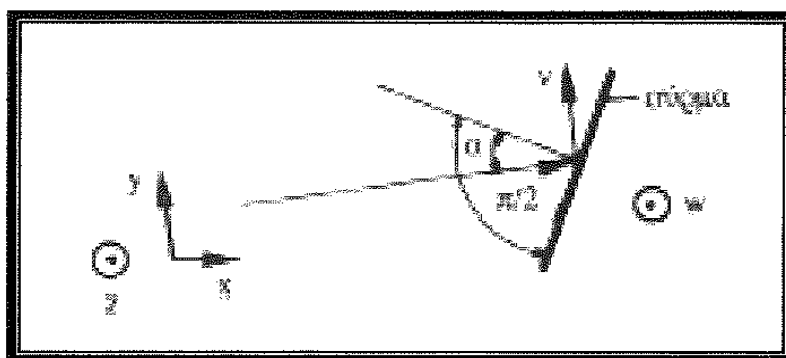
$$\bar{E} = SU, \quad \text{αν } \frac{\bar{v}^2}{U^2} \ll 1 \quad (1.71)$$

$$\sqrt{e^2} = SU \left\{ \frac{\bar{u}^2}{U^2} \right\}^{1/2} = S\sqrt{u^2} \quad (1.72)$$

Έτσι λοιπόν με γνωστές τις τιμές \bar{E} και $\sqrt{e^2}$ μπορούν να υπολογιστούν η μέση τιμή ταχύτητας καθώς και ο βαθμός τύρβης της ροής $\sqrt{u^2}/U$.

β) Αισθητήριο υπό γωνία ως προς τη ροή (στο επίπεδο της διδιάστατης ροής)

Έστω διδιάστατη ροή στο επίπεδο xy . Η μέση ταχύτητα της ροής είναι U οι δε διαταραχές u, v, w . Το νήμα βρίσκεται στο επίπεδο xy η δε κάθετος σε αυτό σχηματίζει γωνία α με τη μέση ταχύτητα U , όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 1. 35.



Σχήμα 1.35 : Επίπεδο U , νήμα.

Έστω ότι η ψύξη του νήματος οφείλεται στη συνιστώσα της ταχύτητας που είναι κάθετη σε αυτό. Συνεπώς η συνιστώσα της ταχύτητας παράλληλα προς το νήμα δεν έχει, σε πρώτη προσέγγιση, επίδραση στην ψύξη του νήματος. Άρα η φαινόμενη ταχύτητα U_ϕ είναι:

$$\begin{aligned}
 U_\phi &= \left\{ [(U+u)\cos a - v\sin a]^2 + w^2 \right\}^{1/2} \\
 &= U \cos a \left\{ \left[1 + \left(\frac{u}{U} - \frac{v}{U} \operatorname{tga} \right) \right]^2 + \frac{w^2}{U^2 \cos^2 a} \right\}^{1/2} = \\
 &U \cos a \left\{ 1 + \frac{u}{U} - \frac{v}{U} \operatorname{tga} + \frac{w^2}{2U^2 \cos^2 a} - 0(3) \right\} \quad (1.73)
 \end{aligned}$$

Από τη σχέση αυτή προκύπτει ότι:

$$\bar{E} = SU \cos a \left\{ 1 + \frac{\bar{w}^2}{2U^2 \cos^2 a} \right\} \quad (1.74)$$

$$e = SU \cos a \left\{ \frac{u}{U} - \frac{v}{U} \operatorname{tga} + \frac{w^2}{2U^2 \cos^2 a} - \frac{\bar{w}^2}{2U^2 \cos^2 a} \right\} \quad (1.75)$$

ή

$$\sqrt{e^2} \cong SU \cos a \left\{ \frac{\bar{u}^2}{U^2} + \frac{\bar{v}^2}{U^2} \operatorname{tg}^2 a - 2 \frac{\bar{u}\bar{v}}{U^2} \operatorname{tga} \right\}^{1/2} \quad (1.76)$$

Οι δύο εξισώσεις για τα \bar{E} και $\sqrt{e^2}$ έχουν άγνωστους τις ποσότητες: U , a , \bar{u}^2 , \bar{v}^2 , $\bar{u}\bar{v}$ και \bar{w}^2 , δηλαδή 6 ποσότητες. Για τρεις θέσεις του νήματος,

για παράδειγμα κάθετα στο επίπεδο xy και πάνω στο επίπεδο xy και σε γωνίες α και $\alpha+45^\circ$, προκύπτουν 6 εξισώσεις οπότε μπορούν να προσδιοριστούν: η μέση ταχύτητα, η θέση της, η τύρβη της ροής καθώς και η τάση Reynolds $-\overline{uv}$ διδιάστατου πεδίου ροής.

Τα μεγέθη αναφέρονται σε σύστημα συντεταγμένων συνδεδεμένο με την ταχύτητα U , μπορούν όμως να δοθούν τα αντίστοιχα μεγέθη σε άλλο σύστημα συντεταγμένων.

Παρόμοια ανάλυση για τριδιάστατο πεδίο ροής είναι ακόμα πιο πολύπλοκη. Στην περίπτωση μέτρησης σε διδιάστατο πεδίο ροής η χρήση νήματος τύπου X , διευκολύνει τη μέτρηση διότι σε κάθε θέση λαμβάνονται συγχρόνως δύο μετρήσεις σε γωνία $\alpha+45^\circ$ και $\alpha-45^\circ$, οι δε εξισώσεις απόκρισης για διπλό αισθητήριο στην περίπτωση που τα νήματα βρίσκονται σε γνωστές γωνίες $\alpha=45^\circ$ και $\alpha=-45^\circ$ ως προς τη μέση ταχύτητα απλοποιούνται στις εξής:

$$\bar{E}_{45^\circ} = SU \frac{\sqrt{2}}{2} \left\{ 1 + \frac{\overline{w^2}}{U^2} \right\} \quad (1.77)$$

$$\bar{E}_{-45^\circ} = SU \frac{\sqrt{2}}{2} \left\{ 1 + \frac{\overline{w^2}}{U^2} \right\} \quad (1.78)$$

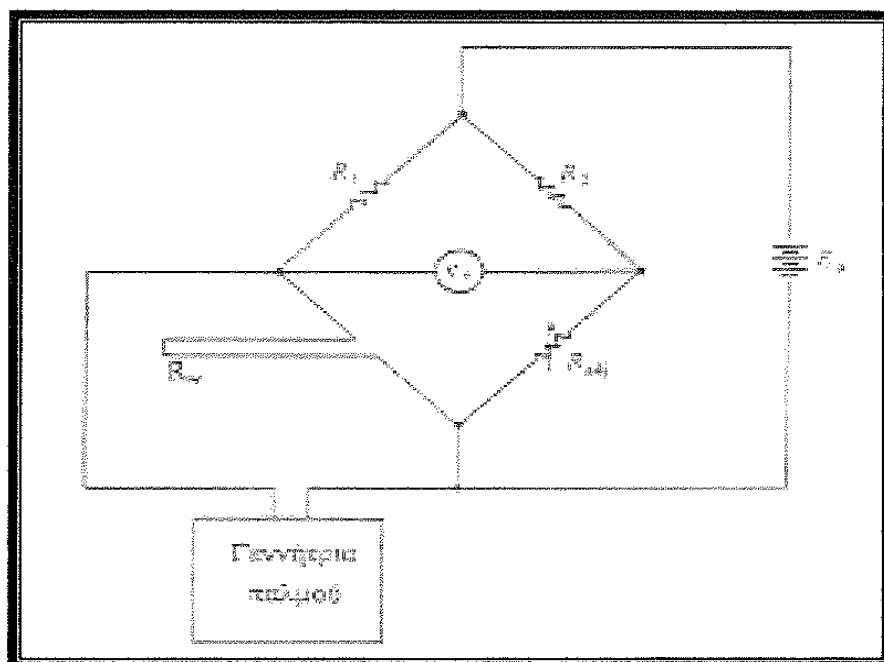
$$\sqrt{e_{45^\circ}^2} = SU \frac{\sqrt{2}}{2} \left\{ \frac{\overline{u^2}}{2U^2} + \frac{\overline{v^2}}{2U^2} - \frac{\overline{uv}}{2U^2} \right\} \quad (1.79)$$

$$\sqrt{e_{-45^\circ}^2} = SU \frac{\sqrt{2}}{2} \left\{ \frac{\overline{u^2}}{2U^2} + \frac{\overline{v^2}}{2U^2} - \frac{\overline{uv}}{2U^2} \right\} \quad (1.80)$$

Οι ενδείξεις τάσης $\sqrt{e_{45^\circ}^2}$, προκύπτουν την ίδια χρονική στιγμή, οπότε απλή αφαίρεση δίδεται η τάση Reynolds (\overline{uv}) με την προϋπόθεση ότι τα νήματα είναι απολύτως όμοια μεταξύ τους ώστε να ισχύει: $S_{45^\circ} = S_{-45^\circ}$

1.6.3 ΔΟΚΙΜΗ ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΟΥ ΠΑΛΜΟΥ

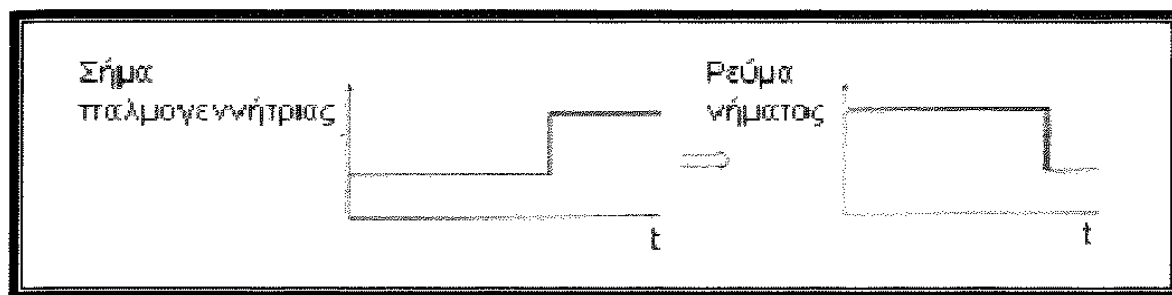
Η δοκιμή αυτή γίνεται για βελτιστοποίηση της απόκρισης ενός συστήματος θερμού νήματος. Κατά τη δοκιμή αυτή μια γεννήτρια τετραγωνικού παλμού τοποθετείται παράλληλα με το νήμα, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.36, με αποτέλεσμα να προστίθεται ένας τετραγωνικός παλμός στο ρεύμα θέρμανσης του νήματος.



Σχήμα 1.36 : Δοκιμή τετραγωνικού παλμού.

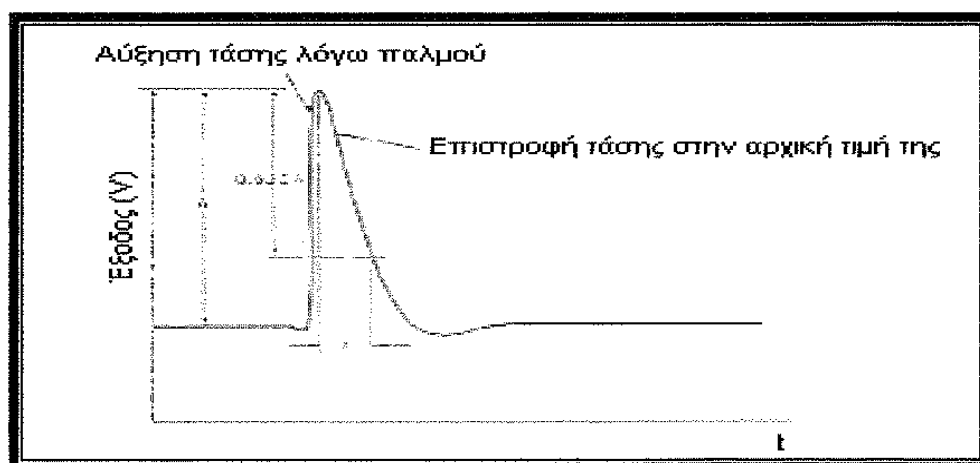
Όταν το ρεύμα αυτό αυξηθεί τότε θα παύσει να υφίσταται ισορροπία στη γέφυρα Wheatstone, οπότε ο ενισχυτής της γέφυρας θα το μειώσει στην αρχική του τιμή. Το ίδιο ακριβώς συμβαίνει όταν η ταχύτητα του ρευστού μειωθεί, δηλαδή το σύστημα ανάδρασης του οργάνου μειώνει αμέσως την ένταση του ρεύματος. Επομένως για να ελεγχθεί πόσο γρήγορα

μεταβάλλεται το ρεύμα σε μια απότομη μεταβολή της ταχύτητας του ρευστού κανείς αυξάνει βηματικά την ένταση του ρεύματος και παρατηρεί σε πόσο χρόνο αυτή θα μειωθεί στην αρχική της τιμή, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.37.



Σχήμα 1.37 : Απόκριση συστήματος ανάδρασης στον τετραγωνικό παλμό.

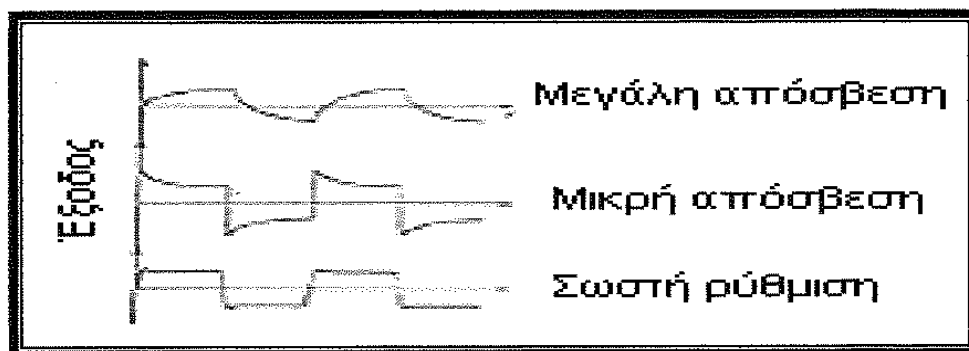
Στο σχήμα 1.38 παρουσιάζεται η πτώση τάσης που ακολούθησε μια βηματική αύξηση του ρεύματος του τετραγωνικού παλμού.



Σχήμα 1.38 : Έξοδος ανεμομέτρου. Δοκιμή τετραγωνικού παλμού.

Από την καμπύλη αυτή υπολογίζεται η σταθερά χρόνου του συστήματος, δηλαδή ο χρόνος για να μειωθεί η τάση κατά 63.2% της τελικής της μεταβολής. Στο σχήμα 1.39 παρουσιάζονται τρεις κυματομορφές εξόδου

κατά τη δοκιμή τετραγωνικού παλμού εκ των οποίων στην πρώτη φαίνεται ότι η απόσβεση του συστήματος είναι πολύ μεγάλη, στη δεύτερη πολύ μικρή, ενώ η τελευταία είναι η ιδανική.



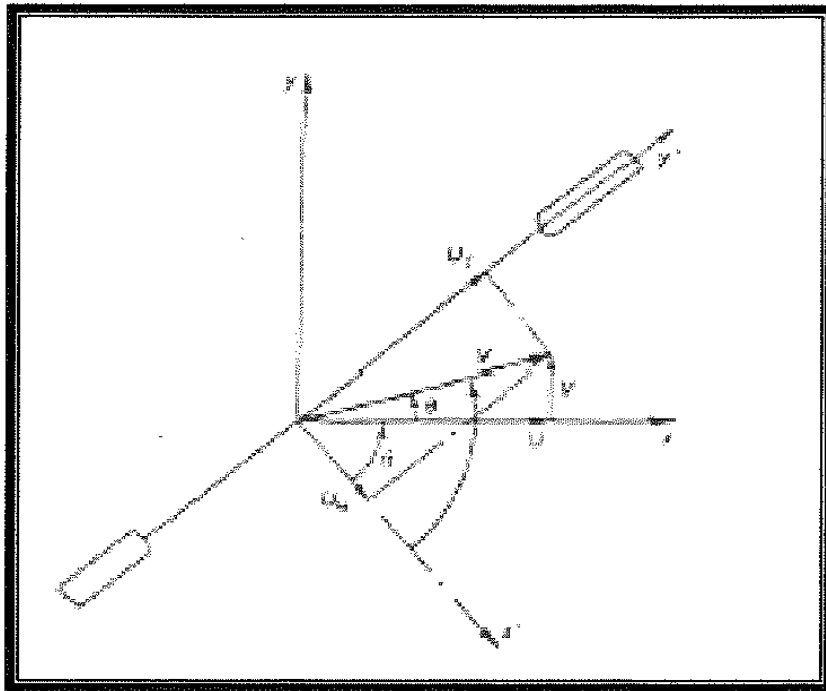
Σχήμα 1.39 : Έξοδος ανεμομέτρου. Δοκιμή τετραγωνικού παλμού. Ρύθμιση συστήματος ανάδρασης.

Πρέπει να τονιστεί ότι η έξοδος του οργάνου επηρεάζεται από το μήκος του καλωδίου που συνδέει το θερμό νήμα με την ηλεκτρονική διάταξη. Για παράδειγμα μεγάλο μήκος καλωδίου σημαίνει υψηλή αυτεπαγωγή η οποία σε γρήγορες μεταβολές όπως εκείνες ενός τετραγωνικού παλμού παραμορφώνει το σήμα εξόδου.

1.6.4 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΧΡΗΣΗΣ ΘΕΡΜΟΥ ΝΗΜΑΤΟΣ

α) Μέτρηση τάσεων Reynolds με τη βοήθεια θερμού νήματος

Σε ρεύμα ρευστού μέσης ταχύτητας \bar{U} και με διαταραχές ταχύτητας u , v , w τοποθετείται θερμό νήμα έτσι ώστε η κάθετος προς αυτό να σχηματίζει γωνία α με την κύρια κατεύθυνση της ροής, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.40.



Σχήμα 1.40 : Νήμα υπό γωνία a ως προς ρεύμα ρευστού.

Προηγουμένως έχει βρεθεί, μέσω της διαδικασίας βαθμονόμησης του νήματος, η σχέση που συνδέει την τάση εξόδου του με τη δρώσα ταχύτητα, δηλαδή:

$$U_{ef} = \left(\frac{E^2 - A}{B} \right)^{1/n}.$$

Η δρώσα ταχύτητα, εάν το διάνυσμα της ταχύτητας είναι (U, V, W) , δίδεται από τη σχέση:

$$\begin{aligned} U_{ef}^2 &= (U \cos a - V \sin a)^2 + k_1^2 (U \sin a + V \cos a)^2 + k_2^2 W^2 = \\ &= U^2 (\cos^2 a + k_1^2 \sin^2 a) + V^2 (\sin^2 a + k_1^2 \cos^2 a) - UV(1 - k_1^2) \sin 2a + k_2^2 W^2 \end{aligned} \quad (1.81)$$

Στην περίπτωση αυτή ισχύει:

$$U = \bar{U} + u, \quad V = v \quad \text{και} \quad W = w,$$

δεδομένου ότι:

$$\bar{V} = 0 \text{ και } \bar{W} = 0.$$

Συνεπώς η σχέση (1.81) γράφεται:

$$U_{ef}^2 = (\bar{U} + u)^2 F^2 + v^2 FF^2 - (\bar{U} + u)v(1 - k_1^2)\sin 2a + k_2^2 w^2 \quad (1.82)$$

όπου:

$$F^2 = \cos^2 a + k_1^2 a$$

και

$$FF^2 = \sin^2 a + k_1^2 \cos^2 a.$$

Αμελώντας τους όρους u^2 , v^2 , uv , w^2 η δρώσα ταχύτητα γράφεται:

$$U_{ef} = \left[\bar{U}^2 F^2 + 2\bar{U}uF^2 - \bar{U}v(1 - k_1^2)\sin 2a \right]^{1/2} \quad (1.83)$$

Επειδή ισχύει η σχέση:

$$(x + dx)^{1/2} \approx \sqrt{x} + \frac{1}{2\sqrt{x}} dx,$$

θεωρώντας ότι:

$$x = \bar{U}^2 F^2$$

και

$$dx = 2\bar{U}uF^2 - \bar{U}v(1 - k_1^2)\sin 2a$$

η δρώσα ταχύτητα μπορεί να γραφεί:

$$U_{ef} = F[\bar{U} + u - vG] \quad (1.84)$$

όπου:

$$G = \frac{(1 - k_1^2) \sin 2a}{2F} \quad (1.85)$$

Εάν θεωρηθεί ότι η δρώσα ταχύτητα είναι ίση με το άθροισμα της μέσης τιμής της και μιας διαταραχής, δηλαδή:

$$U_{ef} = \bar{U}_{ef} + u_{ef} \quad (1.86)$$

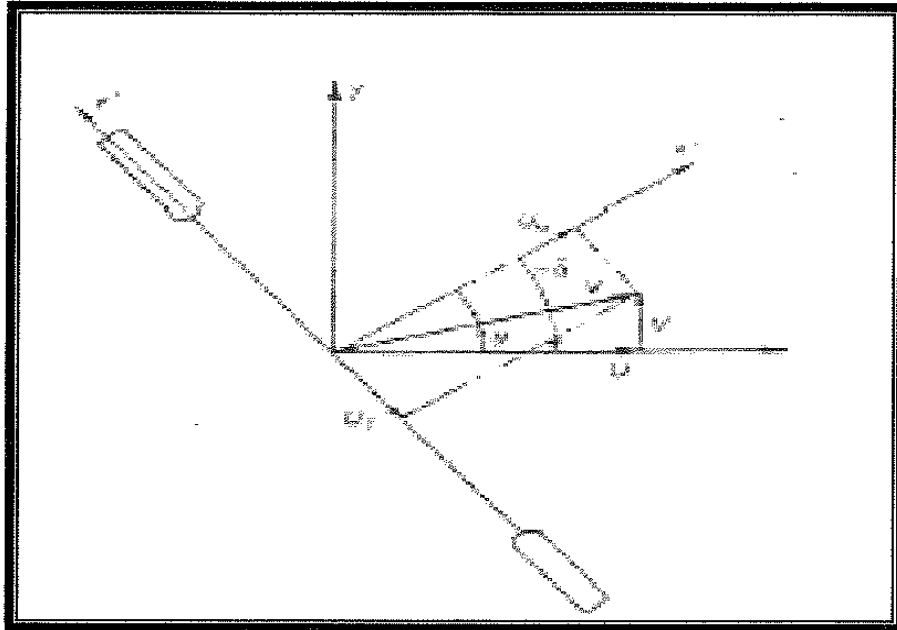
τότε από τις σχέσεις (1.84) και (1.86) προκύπτει:

$$(\bar{U}_{ef} + u_{ef})^2 = F^2 [\bar{U}^2 + u^2 + G^2 v^2 + 2\bar{U}u - 2\bar{U}Gv - 2uvG] \quad (1.87)$$

Παίρνοντας τη μέση τιμή και των δύο μελών της (1.87) θα ισχύει:

$$\bar{U} = \frac{\bar{U}_{ef}}{F}$$

$$\bar{u}_{ef}^2 = F^2 [\bar{u}^2 + G^2 \bar{v}^2 - 2G\bar{u}\bar{v}] \quad (1.88)$$



Σχήμα 1.41 : Νήμα υπό γωνία $-\alpha$ ως προς ρεύμα ρευστού.

Εάν το νήμα τοποθετηθεί υπό γωνία $-\alpha$, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.41, τότε με την ίδια διαδικασία αποδεικνύεται ότι:

$$U_{ef} = F[\bar{U} + u + vG]$$

$$\bar{U} = \frac{U_{ef}}{F}$$

και

$$\overline{u_{ef}^2} = F^2[\overline{u^2} + G^2\overline{v^2} + 2G\overline{uv}] \quad (1.89)$$

Εάν το νήμα τοποθετηθεί κάθετα προς την κύρια κατεύθυνση της ροής, δηλαδή: $\alpha=0$ τότε από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει:

από την (1.82): $\Rightarrow F=1$

από την (1.88): $\Rightarrow \bar{U} = \bar{U}_{ef}$ (1.90)

από την (1.85): $\Rightarrow G = 0$

και

από την (1.88): $\Rightarrow \overline{u^2} = \overline{u_{ef}^2}$ (1.91)

Δηλαδή θα υπολογιστεί η μέση τιμή της ταχύτητας του ρευστού \bar{U} και η ορθή τάση Reynolds $-\rho \overline{u^2}$

Εάν το νήμα τοποθετηθεί υπό γωνία α τότε:

από τη σχέση (1.88) προκύπτει ότι:

$$\overline{u_{ef1}^2} = F^2 \left[\overline{u^2} + G^2 \overline{v^2} - 2G\overline{uv} \right] \quad (1.92)$$

Εάν το νήμα τοποθετηθεί υπό γωνία $-\alpha$ τότε:

από τη σχέση (1.89) προκύπτει ότι:

$$\overline{u_{ef1}^2} = F^2 \left[\overline{u^2} + G^2 \overline{v^2} + 2G\overline{uv} \right] \quad (1.93)$$

Από τις σχέσεις (1.92) και (1.93) προκύπτει:

$$\overline{uv} = \frac{\overline{u_{ef2}^2} - \overline{u_{ef1}^2}}{4GF^2} \quad (1.94)$$

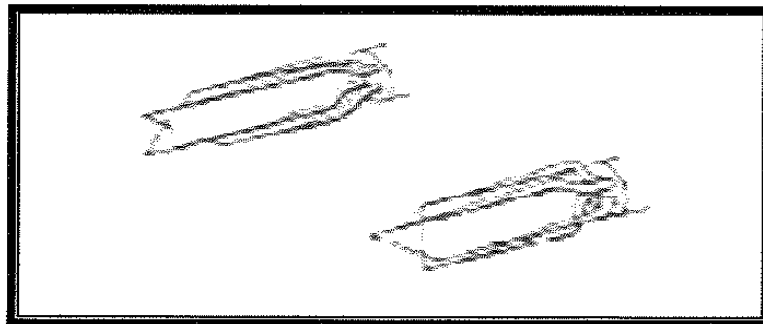
δηλαδή η τάση Reynolds $-\rho \overline{uv}$.

Τέλος από τις σχέσεις (1.94) και (1.93) ή (1.92) προκύπτει η $\overline{v^2}$ και επομένως η τάση Reynolds $-\rho \overline{v^2}$.

Συνεπώς χρησιμοποιώντας ένα θερμό νήμα μπορούν να μετρηθούν η μέση ταχύτητα ενός ρεύματος ρευστού και οι τάσεις Reynolds $-\rho \overline{u^2}$, $-\rho \overline{v^2}$, $-\rho \overline{uv}$ τοποθετώντας το νήμα κάθετα στη ροή, υπό γωνία α και $-\alpha$, αντιστοίχως.

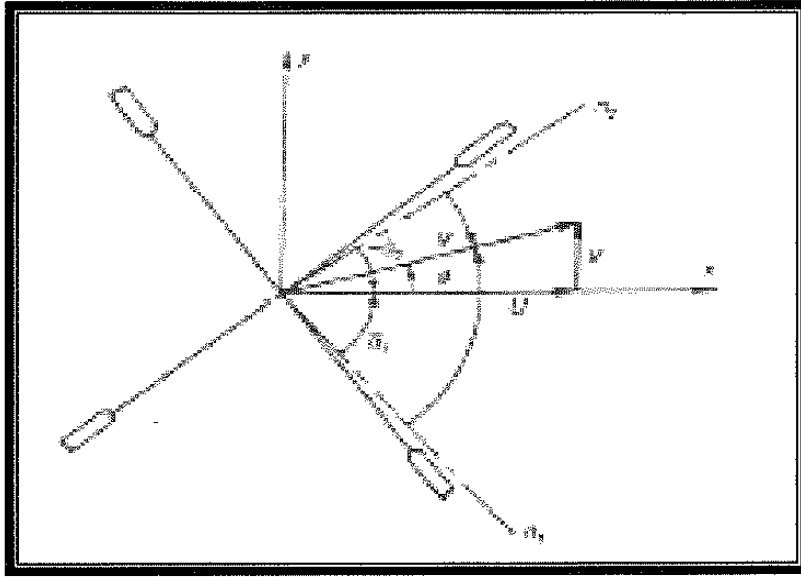
β) Μετρήσεις με διπλό θερμό νήμα σχήματος Χ

Η διάταξη αυτή περιλαμβάνει δύο θερμά νήματα τα οποία σχηματίζουν το γράμμα Χ, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 1.42.



Σχήμα 1.42 : Διπλό νήμα τύπου Χ.

Έστω (U, V) το διάνυσμα της ταχύτητας, α_1 η γωνία που σχηματίζει η συνιστώσα U με την κάθετο στο ένα νήμα και α_2 η γωνία που σχηματίζει η U με την κάθετο στο άλλο νήμα, σύμφωνα με το σχήμα 1.43.



Σχήμα 1.43 : Διπλό νήμα τύπου X και οι σχετικές γωνίες ως προς το ρεύμα ρευστού.

Εάν η συνιστώσα V είναι αρκετά μικρότερη από την U τότε μπορεί να εφαρμοστεί η σχέση (1.84) δηλαδή:

για το νήμα 1 ισχύει:
$$U_{ef1} = F_1[U - G_1V] \quad (1.95)$$

για το νήμα 2 ισχύει:
$$U_{ef2} = F_2[U - G_2V] \quad (1.96)$$

όπου:

$$F_1 = (\cos^2 a_1 + k_1^2 \sin^2 a_1)^{1/2}$$

$$F_2 = (\cos^2 a_2 + k_1^2 \sin^2 a_2)^{1/2}$$

$$G_1 = \frac{(1 - k_1^2) \sin 2a_1}{2F_1}$$

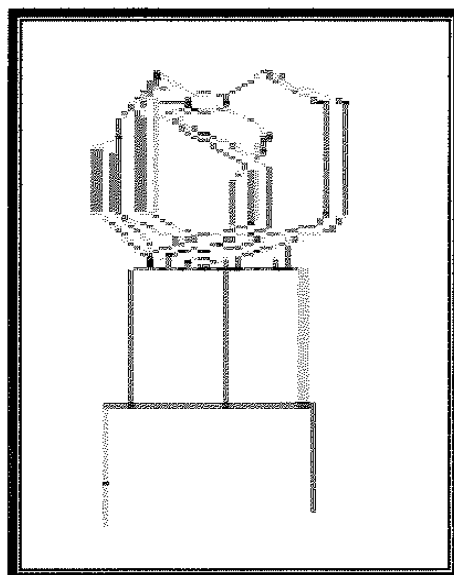
$$G_2 = \frac{(1 - k_1^2) \sin 2a_2}{2F_2}$$

Επιλύοντας το σύστημα των εξισώσεων (1.95), (1.96) προκύπτουν οι δύο συνιστώσες της ταχύτητας:

$$U = \frac{U_{ef1} \frac{G_2}{F_1} + U_{ef2} \frac{G_1}{F_2}}{G_1 + G_2} \quad \text{και} \quad V = \frac{U_{ef2} \frac{F_2}{G_1 + G_2} - U_{ef1} \frac{F_1}{G_1 + G_2}}{F_2 - F_1} \quad (1.97)$$

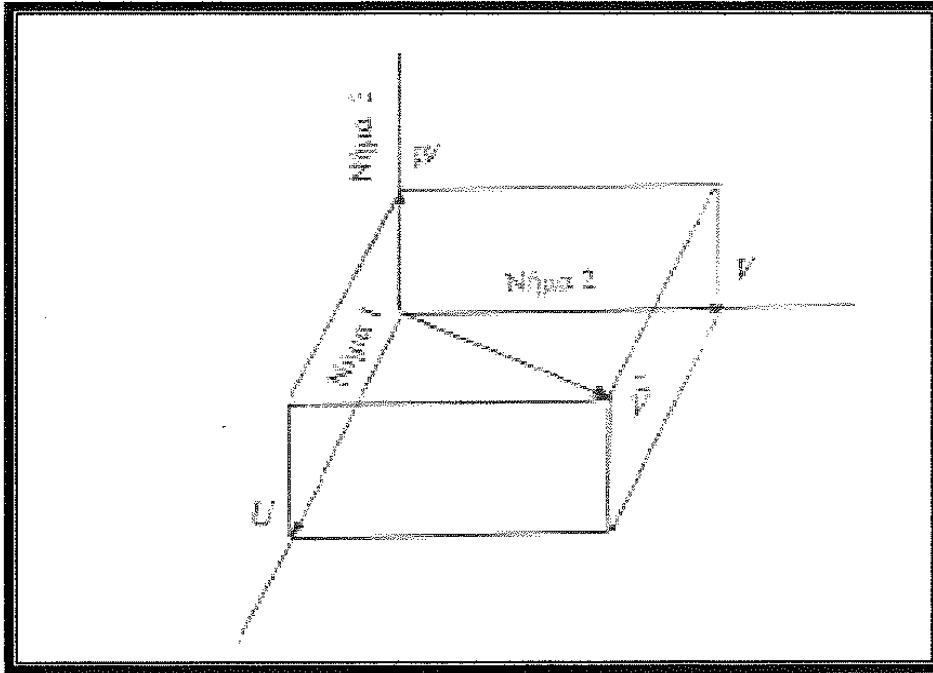
γ) Μετρήσεις με τριπλό νήμα

Στο σχήμα 1.44 παρουσιάζεται ένα τριπλό νήμα αποτελούμενο από τρία κάθετα μεταξύ τους νήματα.



Σχήμα 1.44 : Τριπλό νήμα.

Εάν \vec{V} είναι το διάνυσμα της ταχύτητας και U, V, W οι τρεις συνιστώσες της, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 1.45,



Σχήμα 1.45 : Τρεις συνιστώσες της ταχύτητας.

τότε εφαρμόζοντας το νόμο του King για κάθε νήμα προκύπτει:

$$\left(\frac{E_1^2 - A_1}{B_1} \right)^{2/n_1} = V^2 + k_1^2 W^2 + k_2^2 \quad (\text{Νήμα 1}) \quad (1.98)$$

$$\left(\frac{E_2^2 - A_2}{B_2} \right)^{2/n_2} = V^2 + k_1^2 W^2 + k_2^2 \quad (\text{Νήμα 2}) \quad (1.99)$$

$$\left(\frac{E_3^2 - A_3}{B_3} \right)^{2/n_3} = V^2 + k_1^2 W^2 + k_2^2 \quad (\text{Νήμα 3}) \quad (1.100)$$

Επίλυση του συστήματος των τριών παραπάνω εξισώσεων δίνει τις τρεις ζητούμενες συνιστώσες U , V , W . Προϋπόθεση για την ύπαρξη μοναδικής λύσης του συστήματος είναι οι U , V , W να παίρνουν θετικές τιμές.

1.7 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΙΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Οι μετρήσεις με το ανεμόμετρο θερμού νήματος επηρεάζονται από διάφορες παραμέτρους. Στην πραγματικότητα οποιαδήποτε παράμετρος η οποία εμπλέκεται στον μηχανισμό μετάδοσης θερμότητας από το νήμα στο περιβάλλον του μπορεί να οδηγήσει σε διαταραχή και σε μείωση της ακρίβειας του αποτελέσματος μέτρησης. Οι παράμετροι αυτοί συνδέονται και με το ρευστό μέσο και με την κατάσταση του αισθητήρα.

Οι μεταβολές στην τιμή της θερμοκρασίας είναι μια από τις σημαντικότερες πηγές σφαλμάτων, δεδομένου ότι η μεταφορά θερμότητας είναι άμεσα ανάλογη με τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του αισθητήρα και του ρευστού. Για αισθητήρες νήματος που λειτουργούν κάτω από κανονικές συνθήκες το σφάλμα στη μέτρηση της ταχύτητας είναι περίπου 2% για μεταβολή 1°C. Για αισθητήρες νήματος με επικαλυμμένη επιφάνεια και για εφαρμογές σε υγρό ρευστό, το σφάλμα μπορεί να φτάσει μέχρι και 10% για μεταβολή 1°C. Και στις δύο περιπτώσεις η μετρήσιμη τιμή της ταχύτητας μειώνεται με αύξηση της θερμοκρασίας. Ανάλογα με τις συνθήκες λαμβάνονται διαφορετικά μέτρα ώστε να αποφευχθούν τα τυχόν σφάλματα.

Οι μεταβολές στην τιμή πίεσης επηρεάζουν άμεσα την εξίσωση μεταφοράς θερμότητας, δεδομένου ότι στην πραγματικότητα κανείς μετρά τη ροή μάζας $\rho \cdot U$. Κανονικά το όργανο βαθμονομείται μόνο ως προς την ταχύτητα. Δεδομένου ότι οι μεταβολές πίεσης από τη βαθμονόμηση στο πείραμα αλλά και κατά τη διάρκεια του πειράματος είναι μικρές, η επιρροή της πίεσης στις μετρήσεις δεν συνυπολογίζεται. Το χαμηλότερο όριο για τις πιέσεις, στις οποίες ένας αισθητήρας μπορεί να χρησιμοποιηθεί, καθορίζεται από τον αριθμό Knudsen Kn (εκφράζει την αναλογία μεταξύ της μέσης ελεύθερης μοριακής διαδρομής και της διαμέτρου του αι-

σθητήρα και η τιμή του πρέπει να είναι μικρότερη από 0.01). Για αισθητήρα νήματος μεγέθους 5 μm σε ατμοσφαιρικές συνθήκες προκύπτει $\kappa\eta=0.02$. Υπό τον όρο ότι οι μεταβολές της πυκνότητας είναι μικρές, η ροή θεωρείται συνεχής, και οι μεταβολές πίεσης αγνοούνται.

Στις περισσότερες περιπτώσεις η σύνθεση του ρευστού παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια της βαθμονόμησης και του πειράματος, και δεν έχει μεγάλη σπουδαιότητα. Στις περιπτώσεις αέριου ρευστού υπάρχει πιθανότητα να μεταβληθεί η περιεκτικότητά του σε υδρατμούς. Η επιρροή είναι πολύ μικρή, λιγότερο από 1%, και σχεδόν πάντα αμελείται.

Τυχόν επικαθίσεις σκόνης ή διάφορων σωματιδίων στον αισθητήρα αλλά και η γήρανση του υλικού μειώνουν τη μετάδοση θερμότητας και επηρεάζουν τη βαθμονόμηση. Η επιρροή αυξάνεται όταν η επιφάνεια του αισθητήρα μειώνεται. Αισθητήρες με μέγεθος 5 μm μπορούν να χρησιμοποιηθούν χωρίς προβλήματα σε εργαστηριακό περιβάλλον, εάν γίνεται βαθμονόμηση σε τακτά χρονικά διαστήματα. Οι αισθητήρες νήματος με επικαλυμμένη επιφάνεια είναι λιγότερο ευαίσθητοι και μπορούν να χρησιμοποιηθούν, π.χ. στις υπαίθριες εφαρμογές χωρίς προβλήματα. Εάν η βαθμονόμηση δεν δίνει σωστά αποτελέσματα, μπορεί να είναι απαραίτητο να καθαριστεί ο αισθητήρας. Η μόλυνση είναι ένα πολύ μεγαλύτερο πρόβλημα σε περιπτώσεις υγρού ρευστού. Αυτό σημαίνει ότι οι αισθητήρες ινώδους επιφάνειας μη κυλινδρικού σχήματος πρέπει να προτιμούνται, σε σχέση με άλλους, όποτε είναι δυνατόν, εκτός αν πραγματοποιείται ένα προσεκτικό φιλτράρισμα του υγρού ρευστού.

Συνήθως οι περισσότερες ζημίες στους αισθητήρες συμβαίνουν κατά τη διάρκεια του χειρισμού του οργάνου. Καλό είναι όμως να λαμβάνεται υπόψη η αντοχή του αισθητήρα προτού αυτός να επιλεγεί για μια ιδιαίτερη εφαρμογή. Γενικά η αντοχή αυξάνεται με το μέγεθος του αισθητήρα.

Η επιρροή του προσανατολισμού του αισθητήρα συνήθως αγνοείται εφ' όσον ο αισθητήρας τοποθετείται ταυτόσημα με τη ροή κατά τη διάρκεια της βαθμονόμησης και των μετρήσεων. Η λανθασμένη ευθυγράμμιση είναι κανονικά τόσο μικρή που μπορεί να αμεληθεί ως πηγή σφάλματος.

1.8 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΕΙΔΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες οι μετρήσεις πραγματοποιούνται κάτω από ειδικές συνθήκες όπως:

- Πολύ χαμηλές ταχύτητες.
- Πολύ υψηλές ταχύτητες, συμπιεστά ρευστά.
- Συνθήκες χαμηλής πίεσης.
- Όταν το νήμα τοποθετείται κοντά σε στερεό τοίχο (wall effects).
- Συνθήκες πολύ υψηλής τύρβης.
- Ροή διάτμησης κοντά σε στερεά όρια (wall shear stress).
- Διφασική ροή.
- Δυαδικά μείγματα.

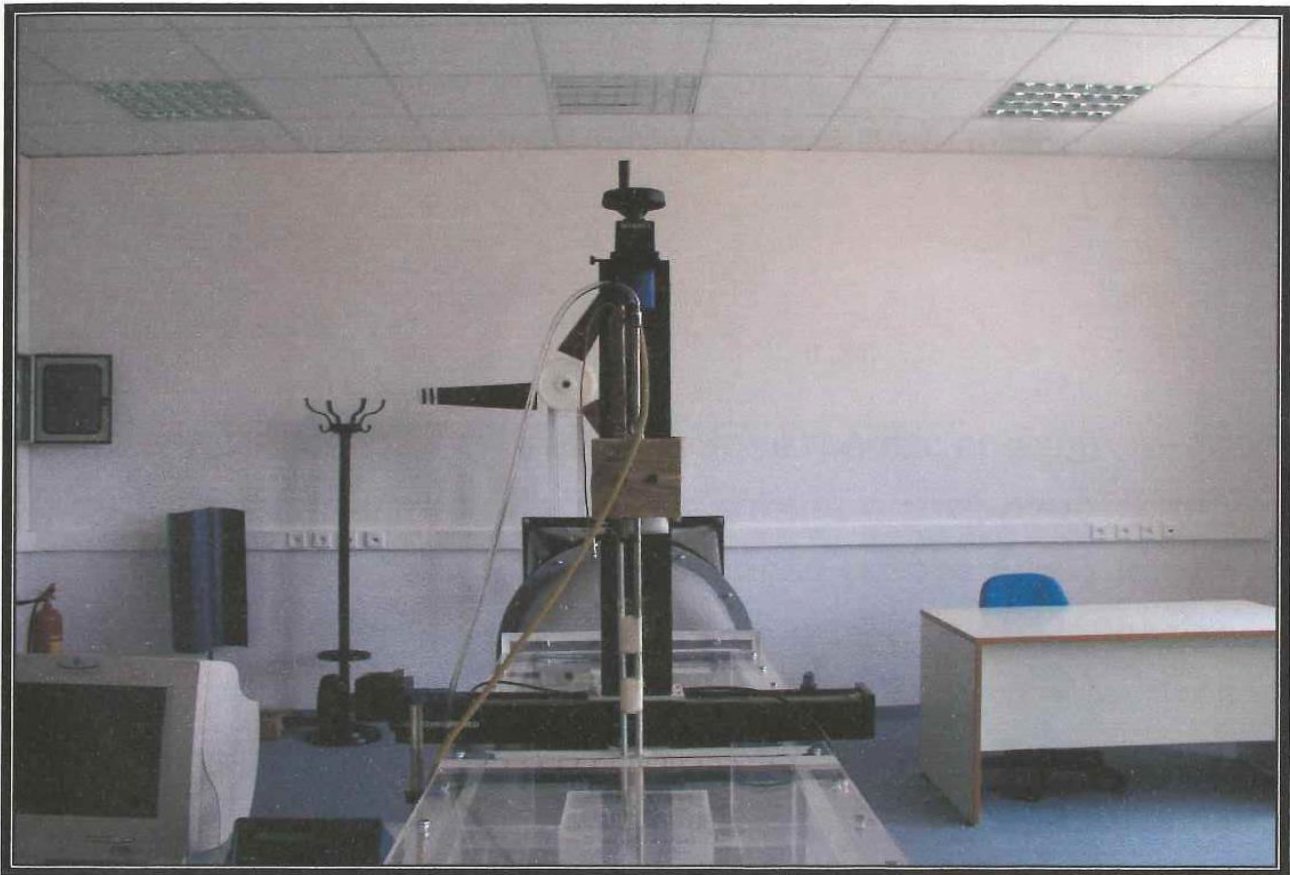
Όλες οι παραπάνω περιπτώσεις αντιμετωπίζονται η κάθε μία με ξεχωριστό τρόπο για παράδειγμα με χρήση συγκεκριμένου τύπου αισθητήρα, επιλέγοντας περισσότερους από έναν αισθητήρες, χρησιμοποιώντας ακροφύσια ή συνυπολογίζοντας τυχόν σφάλματα που μπορεί να προκύψουν.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

ΤΑ ΟΡΓΑΝΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΚΑΙ Η ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

2.1 ΤΟ ΜΕΤΡΗΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

Η εκτέλεση πειραμάτων είναι ένας βασικός τρόπος μελέτης φαινομένων ή επίλυσης προβλημάτων που παρουσιάζονται στην πράξη. Ο μόνος όμως τρόπος για να διεξαχθούν σωστά συμπεράσματα από μία πειραματική διάταξη, είναι να μετρηθούν σωστά και με ακρίβεια όλες οι παράμετροι που θεωρείται ότι μπορούν να επηρεάσουν το προς μελέτη φαινόμενο. Η χρήση ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συστημάτων στις μέρες μας, έδωσαν μία μεγάλη ώθηση στην τεχνική των μετρήσεων με αποτέλεσμα τη βελτίωση της ακρίβειας αυτών.



Εικόνα 2.1 : Το μετρητικό σύστημα.

Ένα μετρητικό σύστημα συνδέει κάποιο «μέσο» με ένα παρατηρητή και τον πληροφορεί για το τι συμβαίνει στις διάφορες παραμέτρους που περιγράφουν την «κατάσταση» του μέσου. Στην εικόνα 2.1 φαίνεται μια

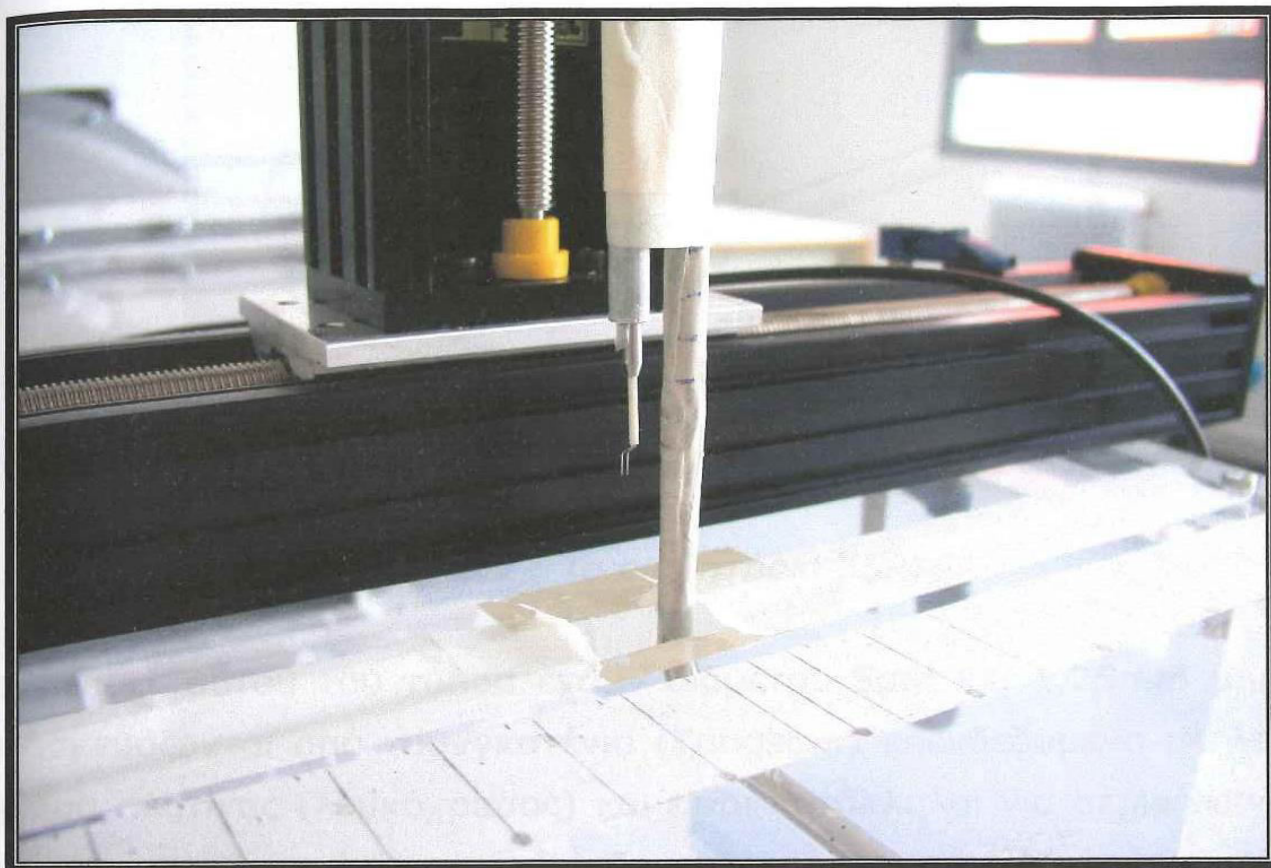
άποψη του εργαστηρίου και του μετρητικού συστήματος. Κάθε μετρητικό σύστημα λοιπόν μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από μία αλυσίδα στοιχείων. Το πρώτο στοιχείο είναι σε επαφή με το μέσο και είναι το αισθητήριο της μετρητικής συσκευής. Αυτό το αισθητήριο επηρεάζεται από τις συνθήκες που επικρατούν στο μέσο με αποτέλεσμα ένα ή περισσότερα φυσικά χαρακτηριστικά του να μεταβάλλονται σαν συνάρτηση των συνθηκών που επιζητείται να μετρηθούν. Στο άλλο άκρο της αλυσίδας υπάρχει το στοιχείο εξόδου που είναι σε επαφή με τον παρατηρητή, στον οποίο παρουσιάζει το αποτέλεσμα των μετρήσεων, με μορφή που μπορεί να γίνει αντιληπτή από τον ίδιο (μία οθόνη τερματικού ή μία βελόνη με μία διαβάθμιση). Ανάμεσα στα δύο αυτά απαραίτητα στοιχεία της αλυσίδας μπορούν να υπάρχουν άλλα τρία στοιχεία: το στοιχείο μεταβολής, το στοιχείο χειρισμού και το στοιχείο μεταφοράς. Ο ρόλος αυτών των στοιχείων είναι η βελτίωση και η διευκόλυνση της διαδικασίας του πειράματος.

2.1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Για να πραγματοποιηθούν οι πειραματικές μετρήσεις απαιτούνται τέσσερα επιμέρους συστήματα: το αισθητήριο σύστημα, ο επεξεργαστής σήματος, η κάρτα αναλογικού – ψηφιακού μετατροπέα (κάρτα ΑΨΜ) και το λογισμικό καταγραφής. Είναι η πρώτη φορά που συναρμολογήθηκε το πλήρες σύστημα στο Τμήμα Μηχανικών Διαχείρισης Ενεργειακών Πόρων και πραγματοποιήθηκαν πειραματικές μετρήσεις με το συγκεκριμένο όργανο. Τα στοιχεία που αποτελούν την πειραματική διάταξη όπου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις είναι: η αεροσήραγγα, τα μετρητικά όργανα και τα όργανα αποθήκευσης και επεξεργασίας δεδομένων.

2.1.2 ΤΟ ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

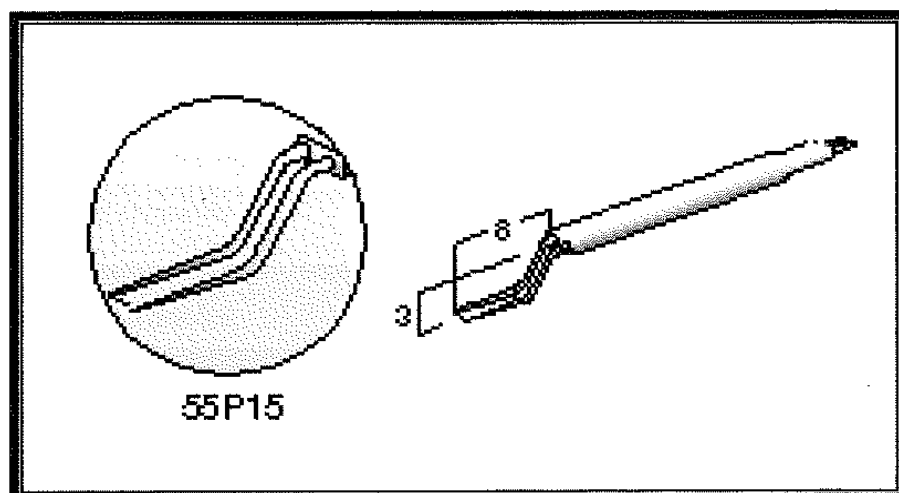
Ο ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ



Εικόνα 2.2 : Ο αισθητήρας.

Οι πειραματικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με αισθητήρα μονού νήματος πολύ μικρού μεγέθους. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε ο τύπος P15 της εταιρείας DANTEC-DYNAMICS, αισθητήρας με ακίδες και με το νήμα κάθετο στον άξονα του συστήματος, ο οποίος φαίνεται στην εικόνα 2.2. Η σχηματική παράσταση του αισθητήρα φαίνεται στο σχήμα 2.1. Ο αισθητήρας αυτού του τύπου είναι κατάλληλος για χρήση στα οριακά στρώματα. Η μορφή των ακίδων επιτρέπει τις μετρήσεις κοντά σε τοίχο χωρίς να παρεμβάλλεται το σύστημα στήριξης του αισθητήρα, το οποίο είναι εκτός του οριακού στρώματος. Η παράλληλη τοποθέτησή του εκμεταλλεύεται καλύτερα τη διαμόρφωση για χρήση σε οριακά στρώματα.

Επίσης για την προστασία του νήματος υπάρχει κατάλληλο φίλτρο το οποίο εισάγει πτώση πίεσης στη ροή με αποτέλεσμα αντίστοιχη πτώση του μεγέθους της ταχύτητας.



Σχήμα 2.1 : Το αισθητήριο 55P15.

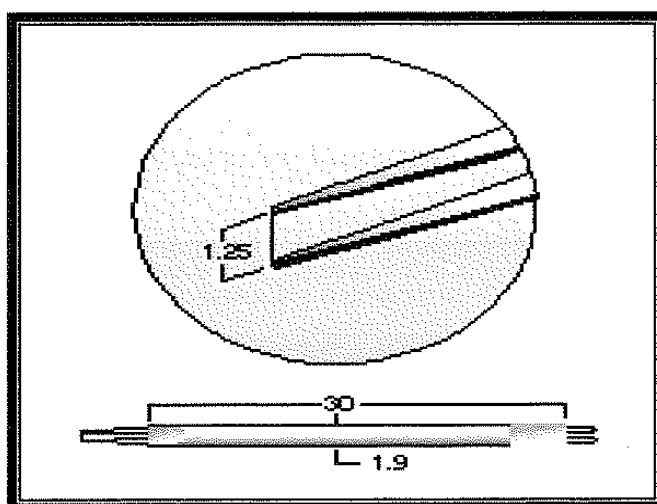
Αισθητήρες αυτού του τύπου έχουν διάμετρο 5μm και 1,25mm μήκος. Κατασκευάζονται από τουνγκστένιο (Tungsten) επενδεδυμένο με λεπτό στρώμα πλατίνας (λευκόχρυσος) και είναι κατάλληλοι για αέρια ρευστά. Το νήμα στηρίζεται άμεσα στις ακίδες και ολόκληρο το μήκος του νήματος λειτουργεί ως αισθητήρας. Το σύστημα στήριξης του αισθητήρα είναι ένας κεραμικός σωλήνας με διάμετρο 1,9 mm και είναι εξοπλισμένος με επιχρυσωμένα στοιχεία σύνδεσης. Ο αισθητήρας είναι κατάλληλος για διάφορες πειραματικές εφαρμογές, όμως τέτοιου τύπου διατάξεις μονού νήματος, συστήνονται για μετρήσεις σε μονοδιάστατη ροή και με χαμηλή ένταση τύρβης, αλλά είναι κατάλληλοι και για μετρήσεις σε υψηλές τιμές ταχύτητας χωρίς να υπάρχει κίνδυνος λόγω ταλάντωσης. Το κόστος είναι αρκετά προσιτό και είναι δυνατή η επισκευή του. Στον πίνακα 2.1 που ακολουθεί, παρουσιάζονται συνοπτικά τα τεχνικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα που χρησιμοποιήθηκε.

ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ P15

Τύπος αισθητήρα	P15
Ρευστό μέσο	Αέρας
Υλικό Κατασκευής	Τουνγκοτένιο (Tungsten) επενδεδυμένο με λεπτό στρώμα πλατίνας (λευκόχρυσος)
Διαστάσεις αισθητήρα	Διάμετρος: 5 μm και μήκος: 1.25 mm
Αντίσταση αισθητήρα στους 20°C	$R_{20} = 3.3\Omega$
Αντίσταση αγωγών	$R_L = 0.5\Omega$
Συντελεστής διόρθωσης της αντίστασης λόγω θερμοκρασίας	$\alpha_{20} = 0.36 \text{ \% / } ^\circ\text{C}$
Μέγιστη θερμοκρασία αισθητήρα	300 $^\circ\text{C}$
Μέγιστη θερμοκρασία περιβάλλοντος	150 $^\circ\text{C}$
Ελάχιστη ταχύτητα	0.05 m/s
Μέγιστη ταχύτητα	500 m/s
Όριο συχνότητας f_{cpo}	90 Hz
Όριο συχνότητας f_{max}	400 kHz

Πίνακας 2.1 : Τεχνικά χαρακτηριστικά αισθητήρα.

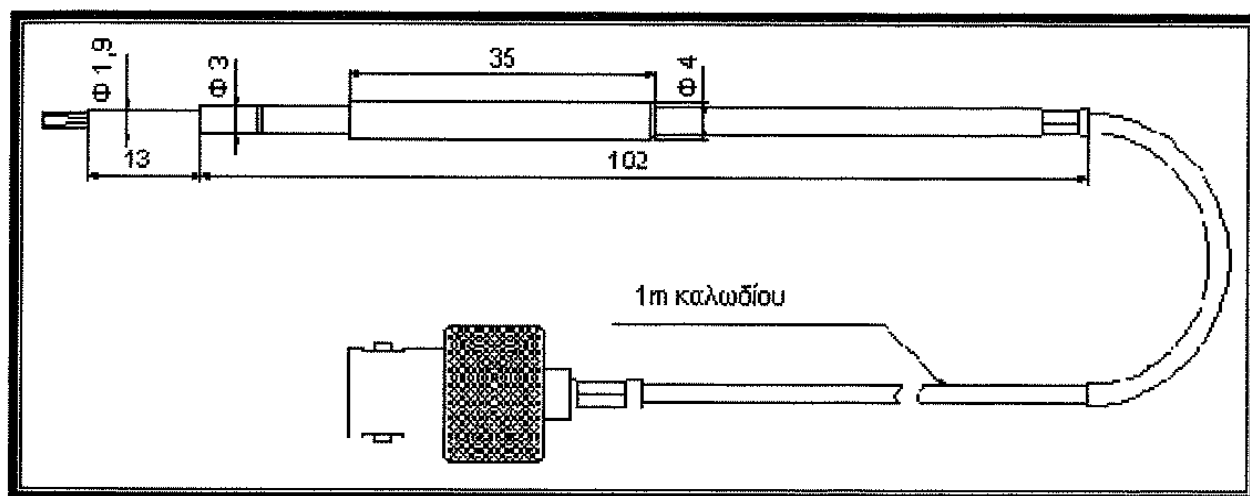
Στο σχήμα 2.2 παρουσιάζονται ορισμένες τυπικές διαστάσεις για όλους τους αισθητήρες μονού νήματος.



Σχήμα 2.2 : Τυπικές διαστάσεις για όλους τους αισθητήρες μονού νήματος.

ΤΟ ΚΑΛΩΔΙΟ ΤΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

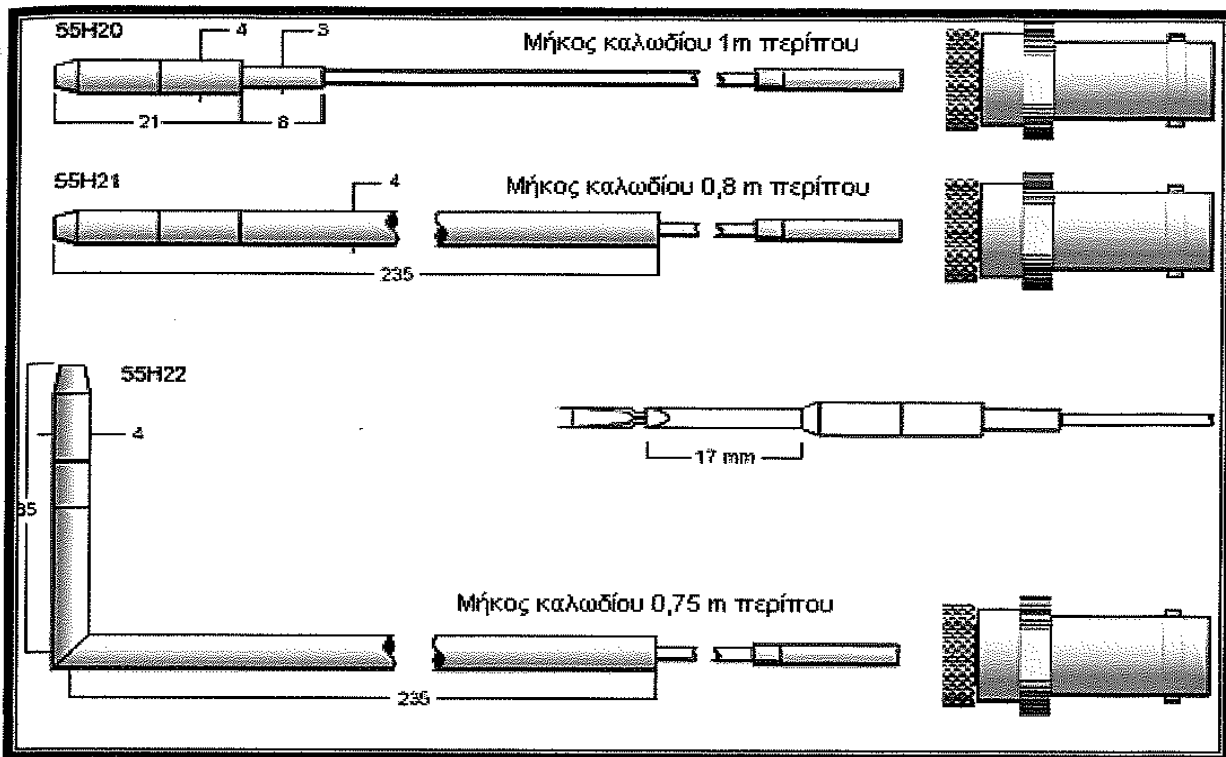
Για κάθε αισθητήρα που κατασκευάζεται, κατασκευάζεται και το καλώδιο του αισθητήριου συστήματος. Το καλώδιο διαθέτει κατάλληλη επένδυση ώστε να προστατεύεται όταν δεν βρίσκεται σε χρήση. Οι συνδέσεις γίνονται με συνδέσεις BNC και η κατασκευή του καλωδίου είναι τέτοια ώστε να προστατεύει και από παρασιτικά σήματα. Στο σχήμα 2.3 φαίνεται σχηματικά το καλώδιο του αισθητήριου συστήματος. Οι διαστάσεις που αναγράφονται πάνω στο σχήμα είναι σε mm. Ο σχεδιασμός του είναι κατάλληλος για μετρήσεις της ταχύτητας και της τύρβης, σε αέριο ρευστό, για μέτρια και χαμηλή τύρβη.



Σχήμα 2.3 : Το καλώδιο του αισθητήριου συστήματος.

ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΤΗΡΙΞΗΣ ΤΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ

Τέλος σε ότι αφορά το σύστημα στήριξης του αισθητήρα μονού νήματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν τρεις διαφορετικοί τύποι, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.4, ανάλογα με την εφαρμογή.



Σχήμα 2.4 : Το σύστημα στήριξης του αισθητήρα μονού νήματος.

Η ΓΕΦΥΡΑ

Χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο DISA TYPE 55M01 MAIN UNIT το οποίο φαίνεται στην εικόνα 2.3. Η γέφυρα αποτελεί ουσιαστικά το σύστημα τροφοδοσίας του οργάνου, το οποίο διαφέρει στις απαιτήσεις ανάμεσα στη λειτουργία σταθερής θερμοκρασίας ή σταθερού ρεύματος. Στη λειτουργία του οργάνου με σταθερή θερμοκρασία το θερμό νήμα αποτελεί έναν από τους τέσσερις κλάδους μιας γέφυρας Wheatstone, στην οποία ενισχυτής τάσης αναλαμβάνει την ισορροπία της γέφυρας, όταν η ωμική αντίσταση του νήματος μεταβάλλεται στιγμιαία λόγω της μεταβαλλόμενης ταχύτητας του ρευστού. Περισσότερες λεπτομέρειες για τη λειτουργία της γέφυρας μπορεί κανείς να δει στις παραγράφους 1.3.2 και 1.4.2 του πρώτου κεφαλαίου.



Εικόνα 2.3 : Η γέφυρα. Το μαύρο καλώδιο που διακρίνεται στα αριστερά της εικόνας, στην πρώτη υποδοχή, συνδέει τη γέφυρα με τον επεξεργαστή σήματος. Το δεύτερο μαύρο καλώδιο, στο μέσο περίπου της εικόνας συνδέει τη γέφυρα με τον αισθητήρα.

ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗΣ

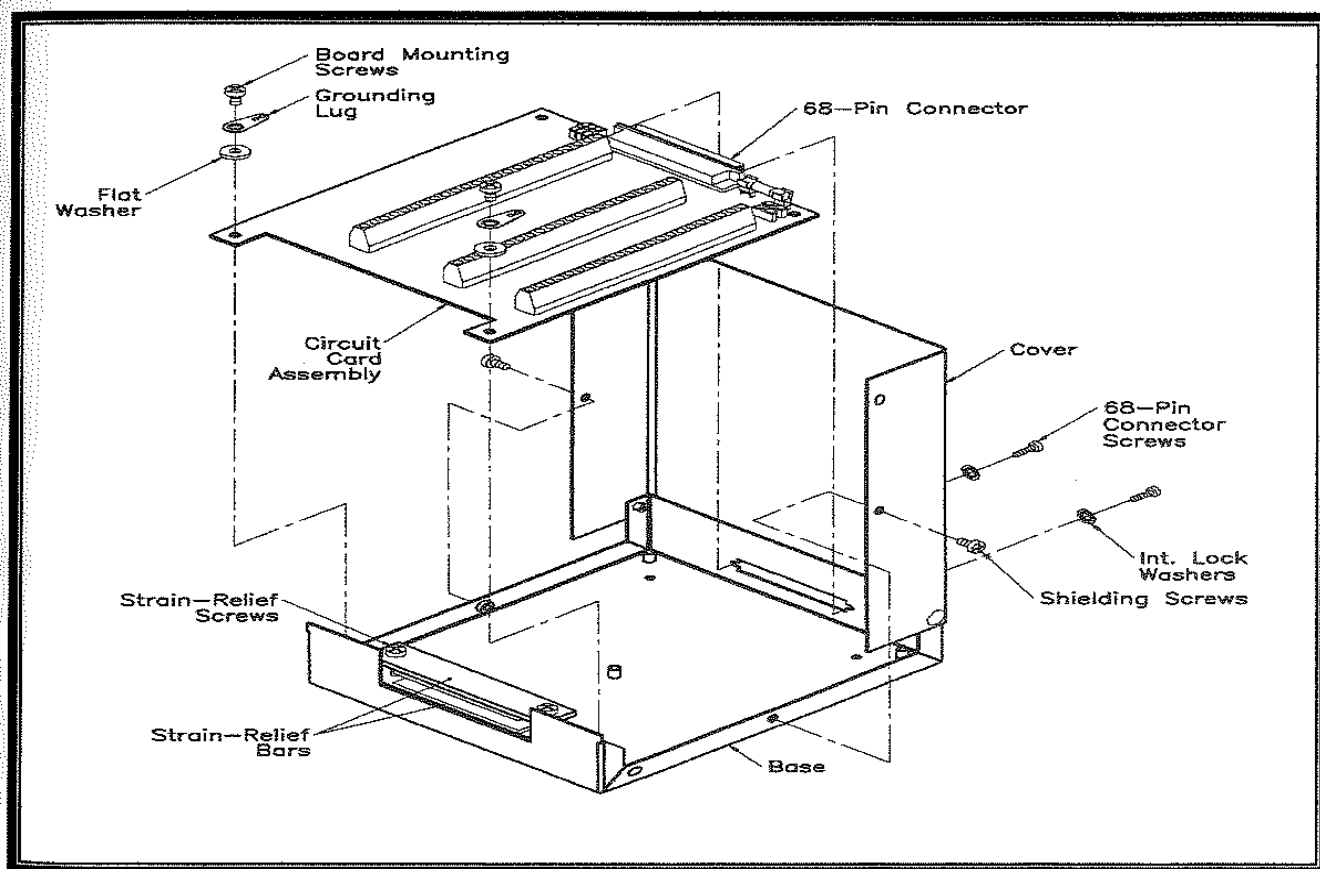
Για τη μετακίνηση του θερμού νήματος στην κατακόρυφη διεύθυνση χρησιμοποιήθηκε μηχανισμός που αποτελείται από έναν κοχλία με ακρίβεια εκατοστού του χιλιοστού και παρέχει τη δυνατότητα μετακίνησης στο σύνολο των περιοχών της ροής. Για τη μετακίνηση του θερμού νήματος στην οριζόντια διεύθυνση, χρησιμοποιήθηκε μηχανισμός που ολισθαίνει πάνω σε σωλήνες. Ο προσδιορισμός της θέσης μέτρησης γίνεται από το μήκος ολίσθησης πάνω στους σωλήνες με τη βοήθεια οριζόντιου κοχλία ακρίβειας εκατοστού του χιλιοστού επίσης.

Κατά το πλάτος της αεροσήραγγας δεν πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις. Σε αυτή τη διάσταση, το ανεμόμετρο θερμού νήματος παρέμεινε τοποθετημένο σε σταθερή θέση για όλες τις περιπτώσεις μετρήσεων. Η ακρίβεια της κίνησης του ανεμομέτρου θερμού νήματος κατά το πλάτος της αεροσήραγγας εξασφαλίστηκε από την ύπαρξη οδηγητικού αύλακα στο επάνω οριζόντιο τμήμα της αεροσήραγγας.

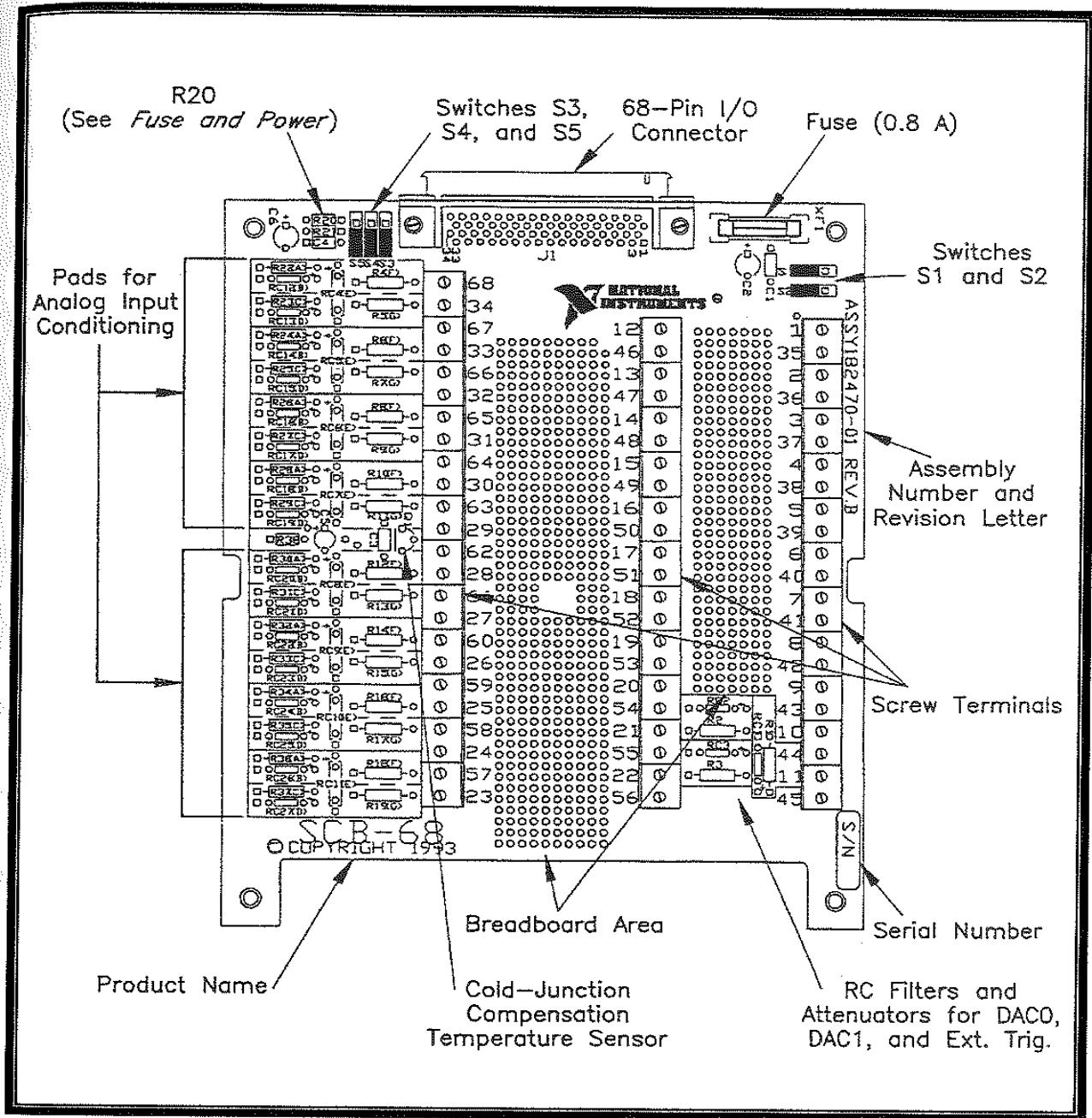
Η όλη λειτουργία του μηχανισμού μετακίνησης του θερμού νήματος είναι αποκλειστικά χειροκίνητη. Αυτό έχει σαν συνέπεια την επίτευξη σχετικά καλών ταχυτήτων μετακίνησης. Από την άλλη πλευρά είναι μια ιδιαίτερα μονότονη και επίπονη διαδικασία κατά την οποία είναι πιθανό να πραγματοποιηθούν σφάλματα σχετικά με τη θέση. Αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι η ακρίβεια των θέσεων ήταν σχετικά καλή αλλά όχι απόλυτη.

2.2 ΚΑΡΤΑ ΑΝΑΛΟΓΙΚΟΥ — ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ

Η κάρτα αναλογικού - ψηφιακού μετατροπέα μετατρέπει τα αναλογικά σήματα που δέχεται από τον επεξεργαστή σήματος σε ψηφιακά. Με τον τρόπο αυτό γίνεται ευκολότερη η αποθήκευση και η διαχείριση των δεδομένων που λαμβάνονται, ώστε να μπορεί κανείς να εξάγει χρήσιμα συμπεράσματα. Κατά τη διάρκεια των πειραματικών μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο SCB-68 68-Pin Shielded Connector Block της National Instruments. Στο σχήμα 2.5 μπορεί κανείς να δει πως τοποθετείται η κάρτα μέσα στον ηλεκτρονικό υπολογιστή και στο σχήμα 2.6 μια σχηματική παράσταση της κάρτας.



Σχήμα 2.5. : Η κάρτα αναλογικού - ψηφιακού μετατροπέα και ο τρόπος τοποθέτησής της.

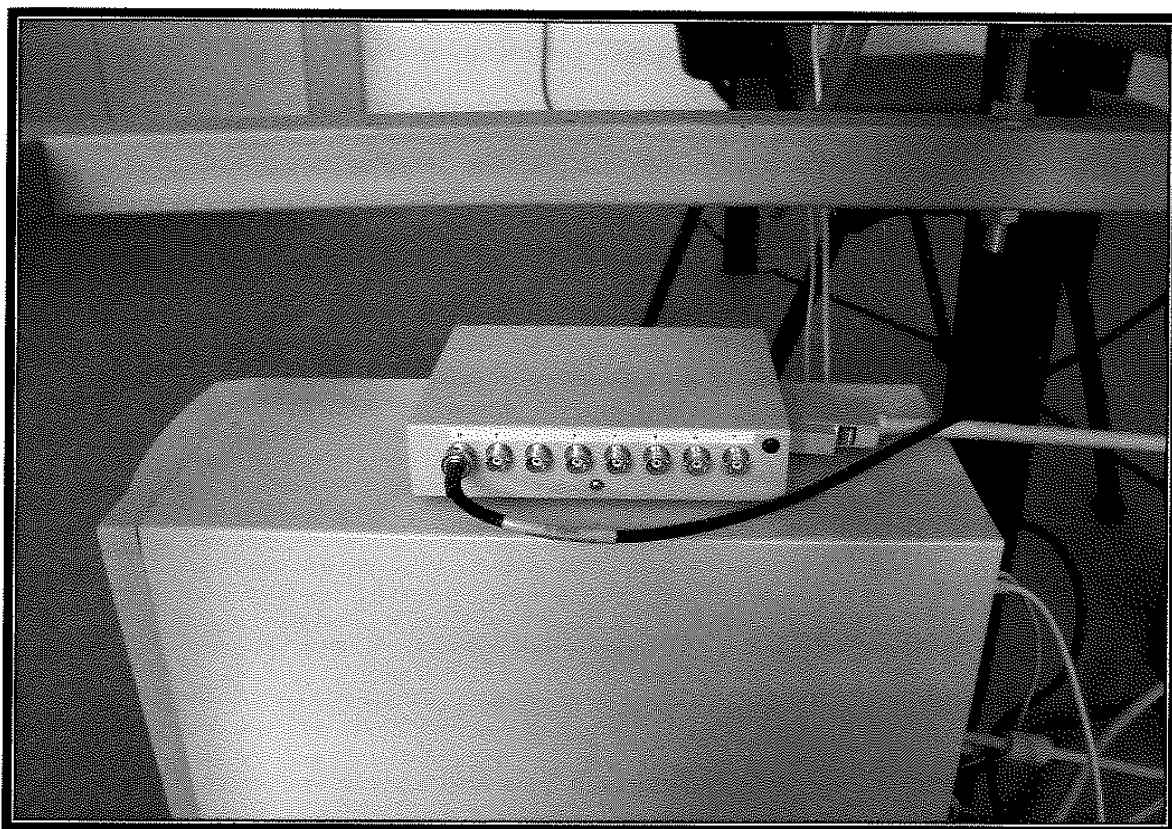


Σχήμα 2.6 : Σχηματική παράσταση της κάρτας αναλογικού-ψηφιακού μετατροπέα.

Οι συνθήκες περιβάλλοντος κατά τη λειτουργία της κάρτας μπορούν να είναι, σε ότι αφορά τη θερμοκρασία από 0°C έως 70°C και σε ότι αφορά την υγρασία από 5% έως 90%. Επίσης μπορεί να αποθηκευτεί σε χώρους με θερμοκρασία από -5°C έως 125°C και υγρασία από 5% έως 90%. Η ανάλυση της είναι 16 bits, έχει εύρος λειτουργίας από 0 έως 10 Volt για συχνότητες από 5 έως 128 kHz.

2.3 Ο ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΤΗΣ ΣΗΜΑΤΟΣ

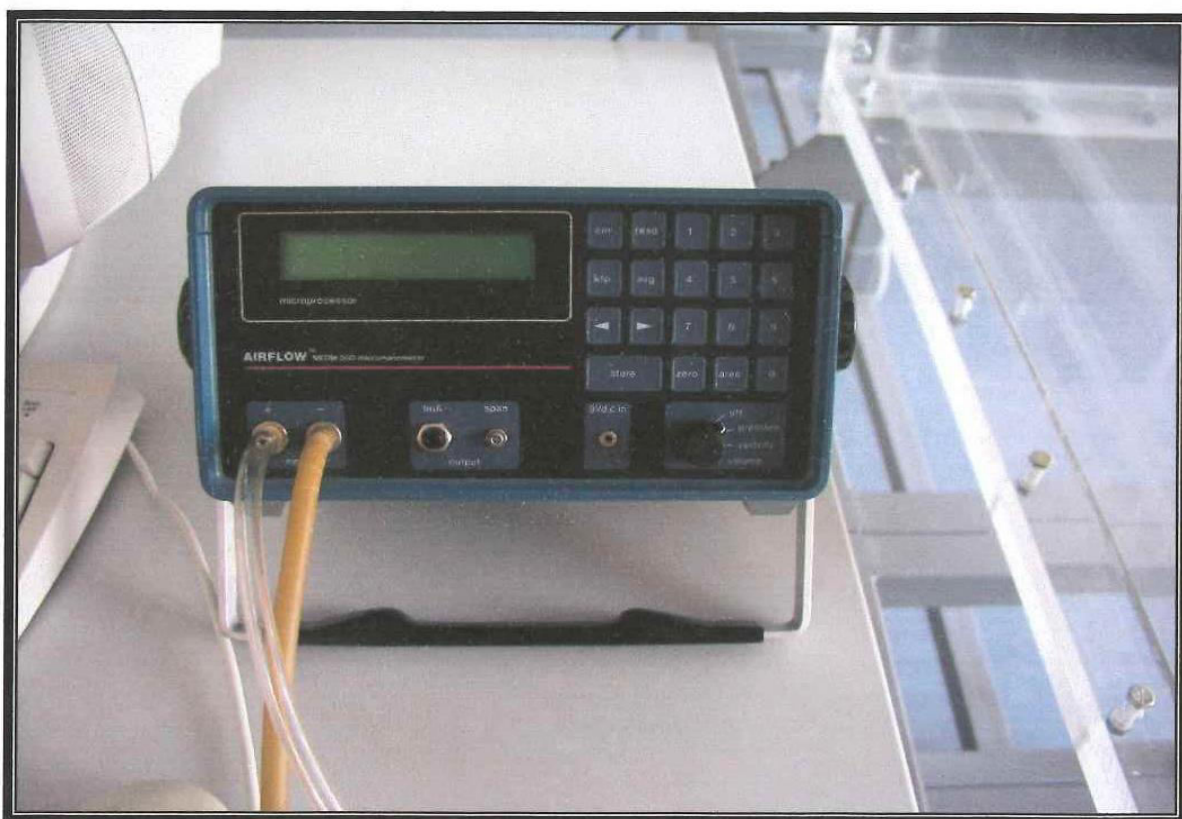
Ο επεξεργαστής σήματος λαμβάνει τα σήματα που δέχεται από το ανεμόμετρο θερμού νήματος και τα αποστέλλει για επεξεργασία στον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Είναι επίσης ένα μοντέλο της National Instruments το SCB-68 μια φωτογραφία του οποίου παρουσιάζεται στην εικόνα 2.4. Η ενδεδειγμένη θερμοκρασία λειτουργίας είναι από 0°C έως 55°C ενώ η θερμοκρασία αποθήκευσης από -55°C έως 150°C. Οι συνθήκες υγρασίας πρέπει να είναι από 5% έως 90%.



Εικόνα 2.4 : Ο επεξεργαστής σήματος. Το καλώδιο μαύρου χρώματος που φαίνεται μπροστά από τον επεξεργαστή συνδέει τον επεξεργαστή και τη γέφυρα, ενώ το καλώδιο γκριζου χρώματος που φαίνεται στο πλάι του επεξεργαστή συνδέει τον επεξεργαστή με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή.

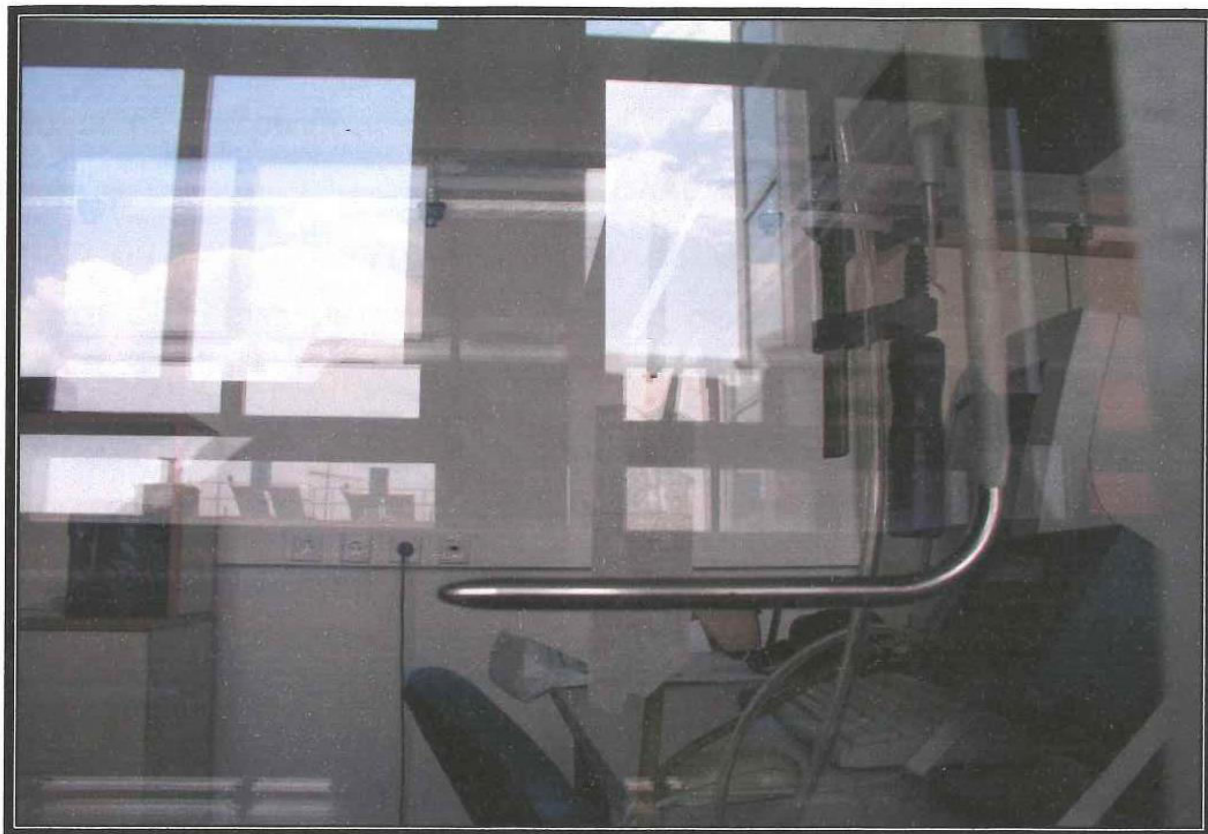
2.4 Ο ΣΩΛΗΝΑΣ ΡΙΤΟΤ

χρησιμοποιήθηκε ο μορφοτροπέας πίεσης MEDM 5k της Airflow και μια φωτογραφία του μοντέλου μπορεί κανείς να δει στην εικόνα 2.5. Το όργανο μετατρέπει το σήμα πίεσης σε τάση και λειτουργεί με μπαταρίες οι οποίες έχουν διάρκεια ζωής περισσότερες από 60 ώρες. Η προτεινόμενη θερμοκρασία λειτουργίας είναι από 0°C μέχρι 40°C και η θερμοκρασία αποθήκευσης είναι από τους -10°C μέχρι τους 60 °C. Τα όρια λειτουργίας της πίεσης είναι +/- 5000 Pa και της ταχύτητας μέχρι 91 m/s. Επίσης έχει τη δυνατότητα αποθήκευσης 80 τιμών ενώ έχει και τη δυνατότητα να δίνει ως ένδειξη τη διαφορά πίεσης, ή την ταχύτητα εφ' όσον καταγραφεί η πυκνότητα. Ο σωλήνας pitot φαίνεται στην εικόνα 2.6.



Εικόνα 2.5 : Το μοντέλο MEDM 5k της Airflow. Τα δύο πλαστικά σωληνάκια που διακρίνονται στα αριστερά του μορφοτροπέα πίεσης, τον συνδέουν με το σωλήνα pitot (input). Το διαφανές σωληνάκι στα αριστερά συνδέεται από το πάνω μέρος με τον pitot και δίδει θετική ένδειξη

(+), ενώ το κίτρινο σωληνάκι στα δεξιά συνδέεται από το πίσω μέρος με τον pitot και δίδει αρνητική ένδειξη (-). Στην περίπτωση που η σύνδεση με τον pitot γίνει αντίστροφα, οι τιμές που θα πάρουμε από το όργανο θα έχουν αρνητικό πρόσημο.



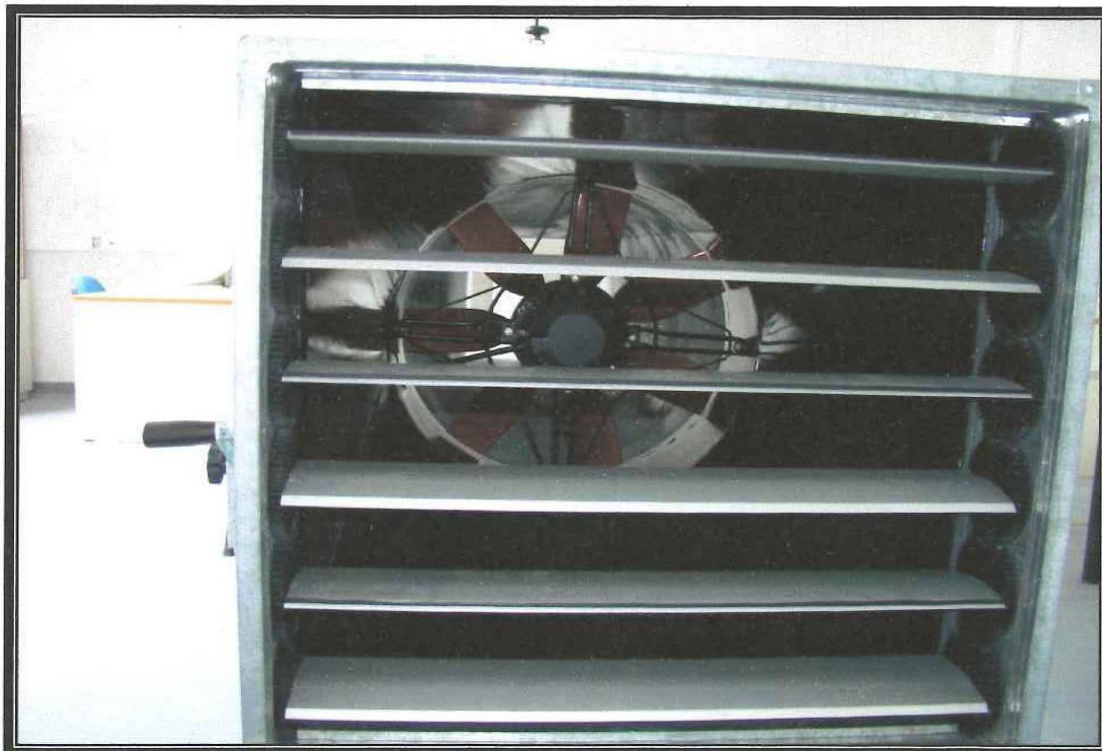
Εικόνα 2.6 : Ο σωλήνας pitot.

2.5 Η ΑΕΡΟΣΗΡΑΓΓΑ

Τα πειράματα διεξήχθησαν στην αεροσήραγγα του τμήματος Μηχανικών Διαχείρισης Ενεργειακών Πόρων. Η αεροσήραγγα που χρησιμοποιήθηκε είναι ανοικτού κυκλώματος, τύπου αναρροφήσεως και έχει διαστάσεις $0.35 \times 0.35 \text{ m}^2$. Είναι αεροσήραγγα αναρρόφησης αέρα και διαθέτει ανεμιστήρα επτά πτερυγίων κατασκευασμένο από πλαστικό υλικό. Δεν έχει ρυθμιστή στροφών του ανεμιστήρα αλλά η ρύθμιση γίνεται από την κατάντι πλευρά του ανεμιστήρα μέσω ρυθμιστών οι οποίοι εισάγουν πτώση πίεσης και ανάλογα με την κλίση τους ρυθμίζεται η ταχύτητα ροής του αέρα μέσα στην αεροσήραγγα. Για την ασφάλεια της αεροσήραγγας καλό είναι οι ρυθμιστές να μην παραμένουν εντελώς κλειστοί για μεγάλο χρονικό διάστημα. Θέτοντας σε λειτουργία τον ανεμιστήρα γίνεται εισαγωγή του αέρα από το ένα άκρο της διάταξης και διαφεύγει στο χώρο περνώντας από τον ανεμιστήρα και τους ρυθμιστές (dampers). Τα τμήματα της αεροσήραγγας προσαρμόστηκαν κατάλληλα ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή γεωμετρία και η απαραίτητη περιοχή μετρήσεων. Δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στις κλίσεις των επιμέρους τμημάτων ώστε αυτά να εφάπτονται ακριβώς για να μη δημιουργούνται ανωμαλίες στο χώρο ροής από απώλειες πίεσης. Επιπλέον καλύφθηκαν όλα τα ανοίγματα που υπήρχαν στις επιφάνειες της αεροσήραγγας για να ελαχιστοποιηθούν τα φαινόμενα πτώσης πίεσης. Στην εικόνα 2.7 παρουσιάζεται η αεροσήραγγα, στην εικόνα 2.8 οι ρυθμιστές και στην εικόνα 2.9 ο μοχλός με τον οποίο μπορεί κανείς να ανοίξει ή να κλείσει τους ρυθμιστές ανάλογα με την ταχύτητα ροής αέρα που θέλει να έχει μέσα στην αεροσήραγγα.



Εικόνα 2.7 : Η αεροσήραγγα.



Εικόνα 2.8 : Οι ρυθμιστές.



Εικόνα 2.9 : Ο μοχλός με τον οποίο ανοίγουν και κλείνουν οι ρυθμιστές.

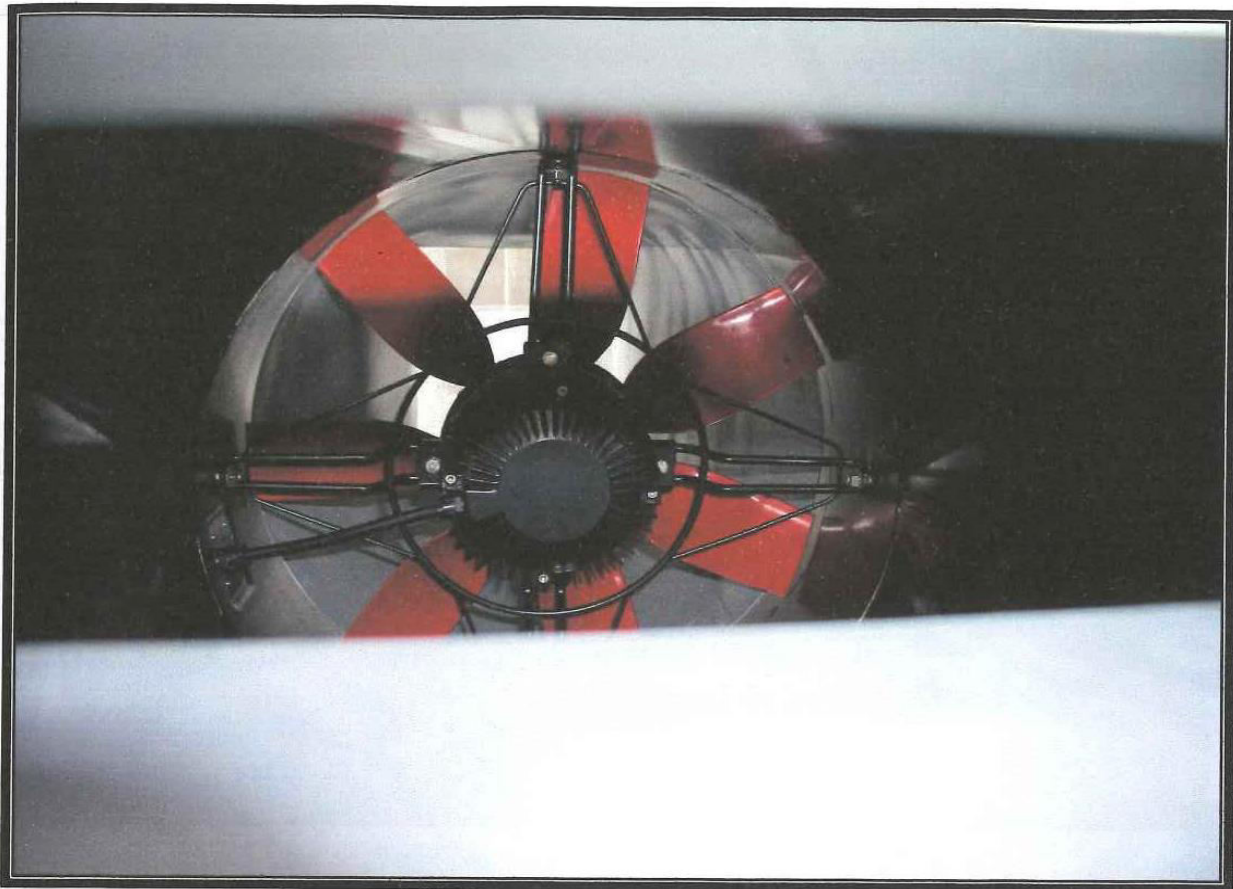
Επίσης απαραίτητος ήταν ο καθαρισμός των τμημάτων της αεροσήραγ-
γας, ώστε να αποφευχθεί η καταστροφή του ανεμόμετρου θερμού νήμα-
τος από τυχόν σωματίδια που θα κινούνταν με την έναρξη λειτουργίας
του ανεμιστήρα.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του ανεμιστήρα φαίνονται στον πίνακα 2.2:

θερμοκρασία λειτουργίας	από -40°C έως 70°C
ταχύτητα περιστροφής	1250 rpm
συχνότητα	50 Hz
τάση	230 V
ισχύς	0.98 KW

Πίνακας 2.2 : Τεχνικά χαρακτηριστικά του ανεμιστήρα.

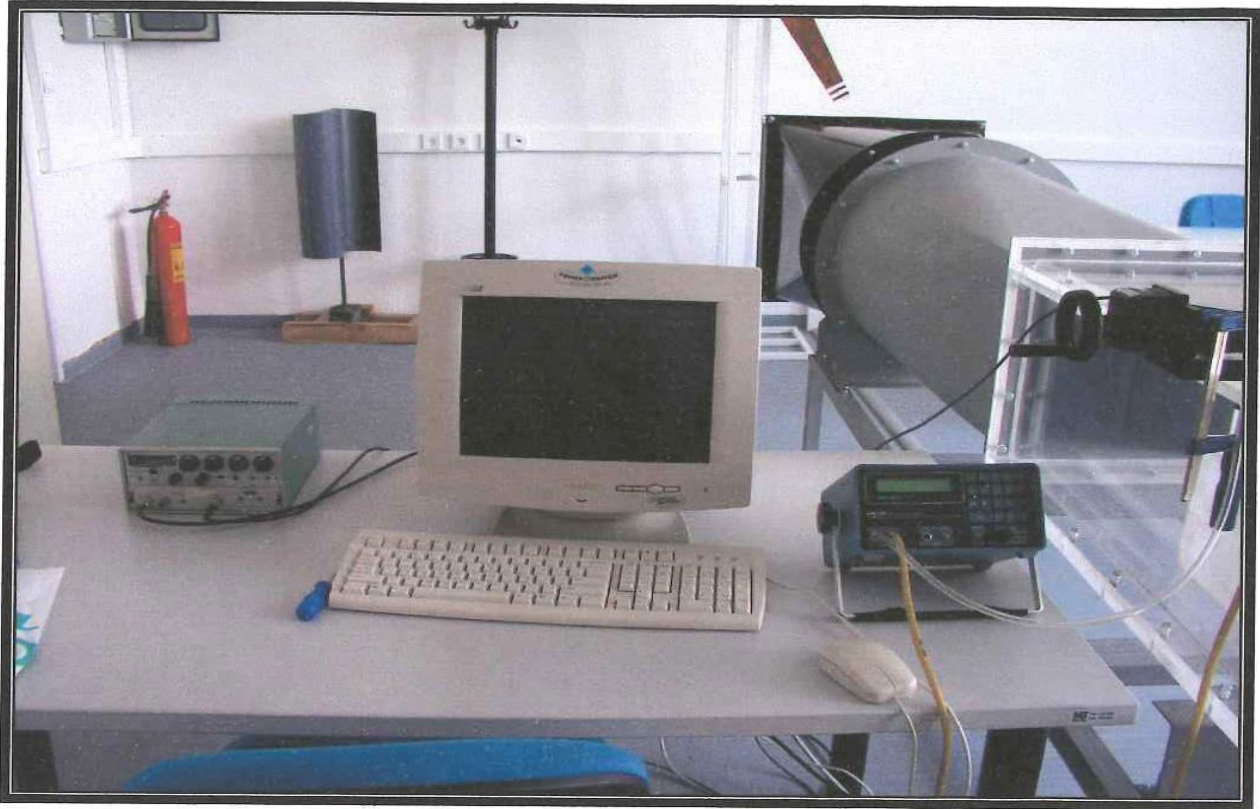
Στην εικόνα 2.10 που ακολουθεί παρουσιάζεται ο ανεμιστήρας της αεροσήραγγας.



Εικόνα 2.10 : Ο ανεμιστήρας.

Τέλος το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν το πρόγραμμα LabView για την καταγραφή και αποθήκευση του σήματος σε ψηφιακή μορφή. Αυτό κάνει ευκολότερη την αποθήκευση, την επεξεργασία και τη μεταφορά των δεδομένων. Σύμφωνα με το πρόγραμμα για κάθε θέση μέτρησης γινόταν καταγραφή τιμών ταχύτητας για χρονικό διάστημα 10 sec. Στη συνέχεια το πρόγραμμα υπολόγιζε τη μέση τιμή της ταχύτητας καθώς και την τυπική απόκλιση αυτής. Τα στοιχεία της κάθε μέτρησης αποθηκεύτηκαν στο σκληρό δίσκο του υπολογιστή για περαιτέρω επεξεργασία από την οποία προέκυψαν τα τελικά διαγράμματα.

Στην εικόνα 2.11 φαίνεται μια γενική άποψη του εργαστηρίου με την αεροσήραγγα και τα μετρητικά όργανα.



Εικόνα 2.11 : Η αεροσήραγγα και τα μετρητικά όργανα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

**ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΣΤΗΝ
ΑΕΡΟΣΗΡΑΓΓΑ ΜΕ ΑΝΕΜΟΜΕΤΡΟ
ΘΕΡΜΟΥ ΝΗΜΑΤΟΣ**

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι πειραματικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν ώστε να καταγραφεί η αεροδυναμική συμπεριφορά και η λειτουργία της αεροσήραγγας. Στόχος είναι η καταγραφή των μέγιστων ταχυτήτων, της τύρβης που δημιουργείται και της δυνατότητας ρύθμισης καθώς και διανομής ταχύτητας μέσα στο τετραγωνικό κανάλι.

3.2 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Πριν από κάθε πειραματική διαδικασία είναι απαραίτητη η βαθμονόμηση του ανεμόμετρου θερμού νήματος. Επίσης αναγκαία είναι η καταγραφή της πίεσης, της θερμοκρασίας αλλά και της αντίστασης του νήματος. Κατά την κατασκευή του αισθητήρα έχει δοθεί η τιμή της αντίστασής του και είναι 3.3Ω στους 20°C . Όμως η μεταβολή των συνθηκών του περιβάλλοντος του εργαστηρίου και της θερμοκρασίας, μεταβάλλει την τιμή της αντίστασης του νήματος και επιβάλλεται η μέτρηση της τιμής της πριν αρχίσει κανείς τη βαθμονόμηση του οργάνου.

Κατά τη διάρκεια των πειραματικών μετρήσεων και μετά την πρώτη βαθμονόμηση, αντικαταστάθηκε ο ανεμιστήρας λόγω ατυχήματος σε άλλη εργαστηριακή άσκηση και η επανάληψη της διαδικασίας έδειξε προβληματική συμπεριφορά.

3.2.1 ΠΡΩΤΗ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ

Η πρώτη βαθμονόμηση πραγματοποιήθηκε στις 4—3—2004. Η θερμοκρασία ήταν $\theta=22^\circ\text{C}$, η πίεση $P=1017 \text{ mbar}$ και η αντίσταση του νήματος μετρήθηκε στα $R=3.5 \Omega$. Επίσης μέσα στην αεροσήραγγα υπήρχε το μοντέλο ενός κτιρίου, ένας κύβος σταθερά στερεωμένος, η παρουσία του οποίου μείωνε την ταχύτητα του αέρα όπως φαίνεται και στην εικόνα

3.1. Πρέπει ακόμα να αναφερθεί ότι έγινε η υπόθεση μη επίδρασης του κύβου, παρά μόνο ως πτώση πίεσης, λόγω της κατάντι θέσης του σε σχέση με τον αισθητήρα.



Εικόνα 3.1 : Μια άποψη της αεροσήραγγας από το εσωτερικό της. Διακρίνεται το μοντέλο του κτιρίου, το ανεμόμετρο θερμού νήματος, ο σωλήνας pitot και ο ανεμιστήρας της αεροσήραγγας.

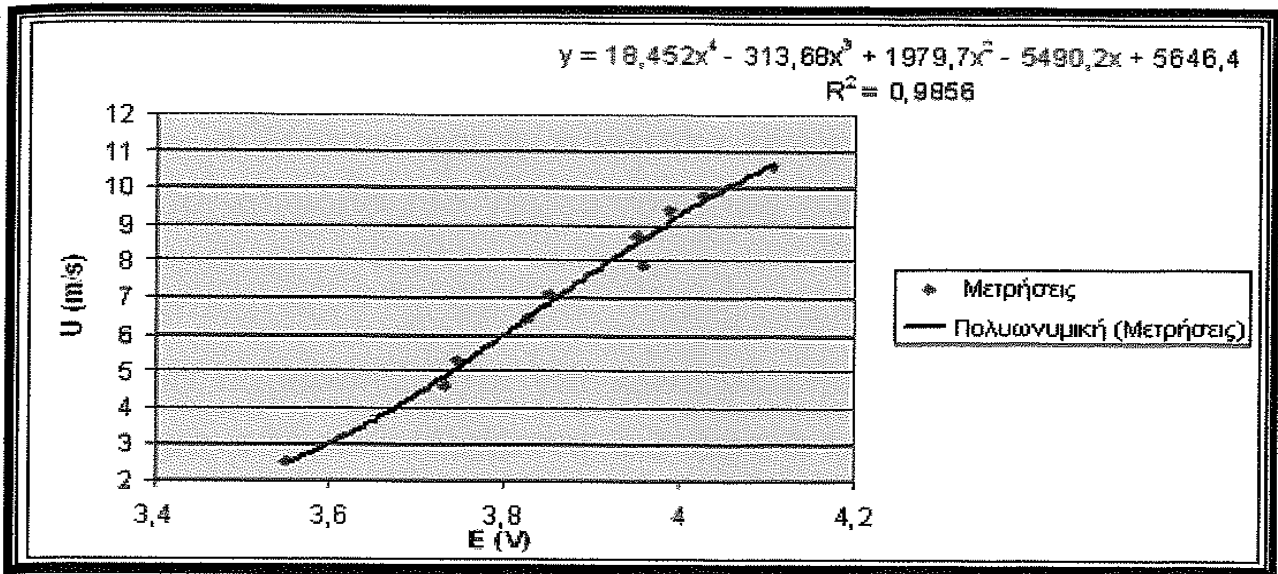
Πάρθηκαν 10 μετρήσεις, σε 10 διαφορετικές θέσεις μέσα στην αεροσήραγγα και για 10 διαφορετικές τιμές ταχύτητας του αέρα που τη διαρρέει. Η συχνότητα της δειγματοληψίας ήταν πάντα 1000 Hz και η διάρκειά της 10 sec. Οι τιμές της ταχύτητας μετρήθηκαν με το σωλήνα pitot και οι αντίστοιχες τιμές της τάσης μετρήθηκαν με το ανεμόμετρο θερμού νήματος. Στον πίνακα 3.1 παρουσιάζονται οι τιμές της τάσης που δόθηκαν από το ανεμόμετρο θερμού νήματος, της ταχύτητας που δόθηκαν από τον σωλήνα pitot αλλά και της τάσης υψωμένης στο τετράγωνο και της ταχύτητας υψωμένης στο 0.45, ώστε να προκύψουν δύο διαγράμματα

βαθμονόμησης. Ένα μεταξύ της τάσης και της ταχύτητας από το οποίο προκύπτει μια πολυωνυμική συνάρτηση τέταρτης τάξης και ένα μεταξύ της τάσης υψωμένης στο τετράγωνο και της ταχύτητας υψωμένης στο 0.45 από το οποίο προκύπτει μια γραμμική συνάρτηση. (βλ. νόμος King, σχέση 1.17, παράγραφος 1.2 πρώτου κεφαλαίου). Οι μέγιστες και ελάχιστες ταχύτητες λαμβάνονται με μεταβολή της θέσης των ρυθμιστών (βλ. παράγραφος 2.5 δεύτερου κεφαλαίου).

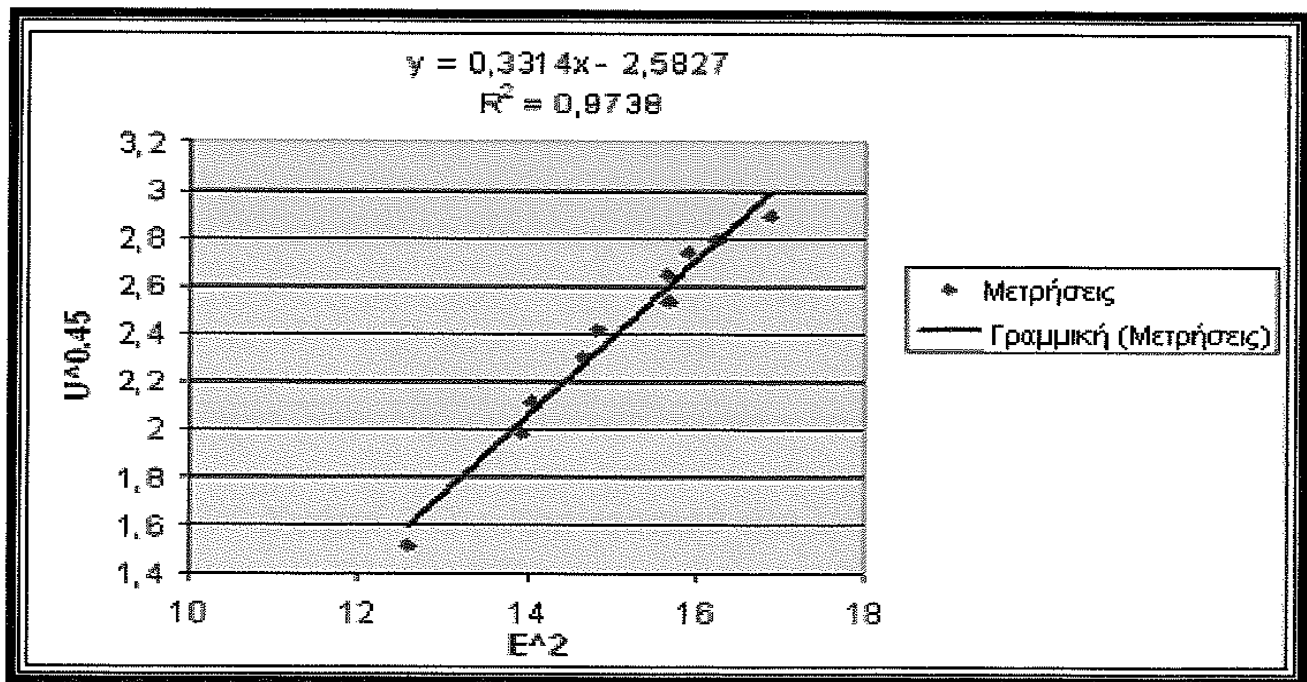
	ΤΑΣΗ	ΤΑΧΥΤΗΤΑ	E²	U^{0.45}	RMS VALUE
ΜΕΤΡΗΣΗ 1	4.1042	10.6	16.84445764	2.893261176	0.0134
ΜΕΤΡΗΣΗ 2	4.0253	9.8	16.20304009	2.792876515	0.0129
ΜΕΤΡΗΣΗ 3	3.9864	9.4	15.89138496	2.740990524	0.0128
ΜΕΤΡΗΣΗ 4	3.9509	8.7	15.60961081	2.647181162	0.0126
ΜΕΤΡΗΣΗ 5	3.9564	7,9	15.65310096	2.534732837	0.0124
ΜΕΤΡΗΣΗ 6	3.8499	7.1	14.82173001	2.415829371	0.0121
ΜΕΤΡΗΣΗ 7	3.8246	6.4	14.62756516	2.305584205	0.0121
ΜΕΤΡΗΣΗ 8	3.7436	5.3	14.01454096	2.117991151	0.0115
ΜΕΤΡΗΣΗ 9	3.7304	4.6	13.91588416	1.987197464	0.0114
ΜΕΤΡΗΣΗ10	3.5481	2.5	12.58901361	1.510334016	0.0111

Πίνακας 3.1 : Μετρήσεις για την πρώτη βαθμονόμηση.

Στη συνέχεια στο σχήμα 3.1 και στο σχήμα 3.2 παρουσιάζονται τα δύο διαγράμματα.



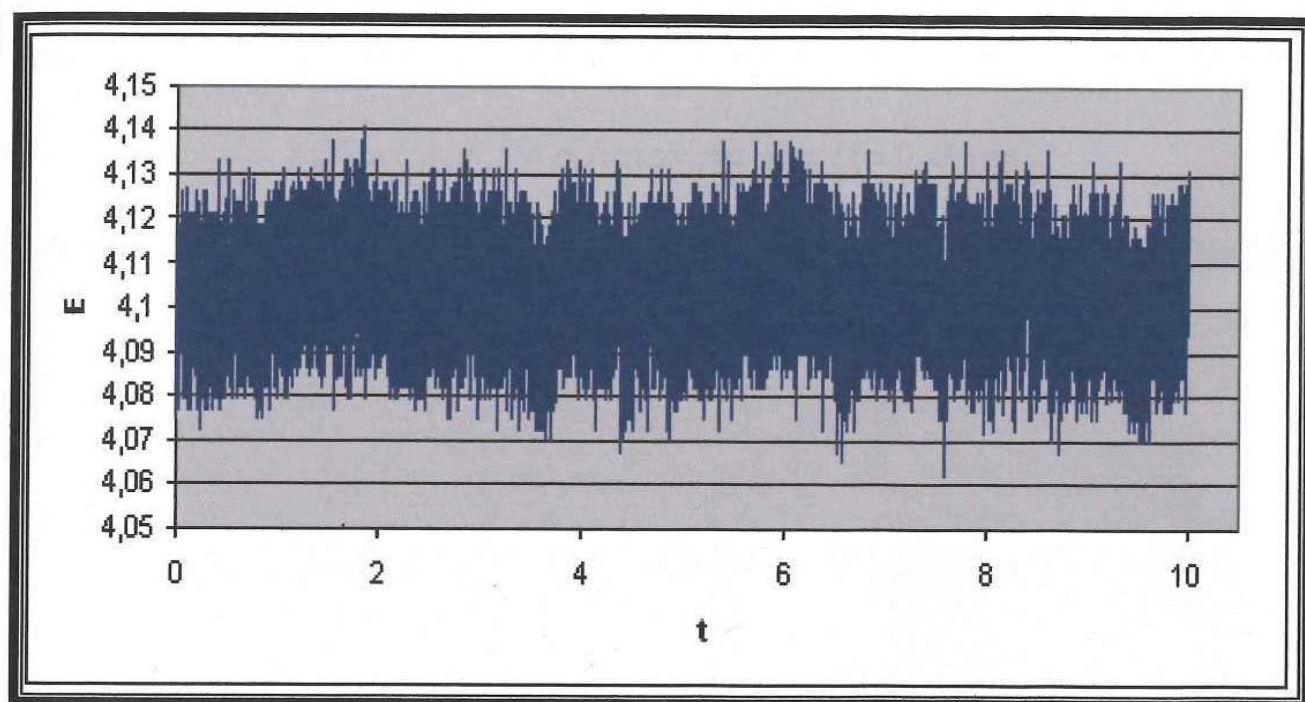
Σχήμα 3.1 : Διάγραμμα μεταξύ της τάσης και της ταχύτητας από το οποίο προκύπτει μια πολυωνυμική συνάρτηση τέταρτης τάξης (πρώτη βαθμονόμηση).



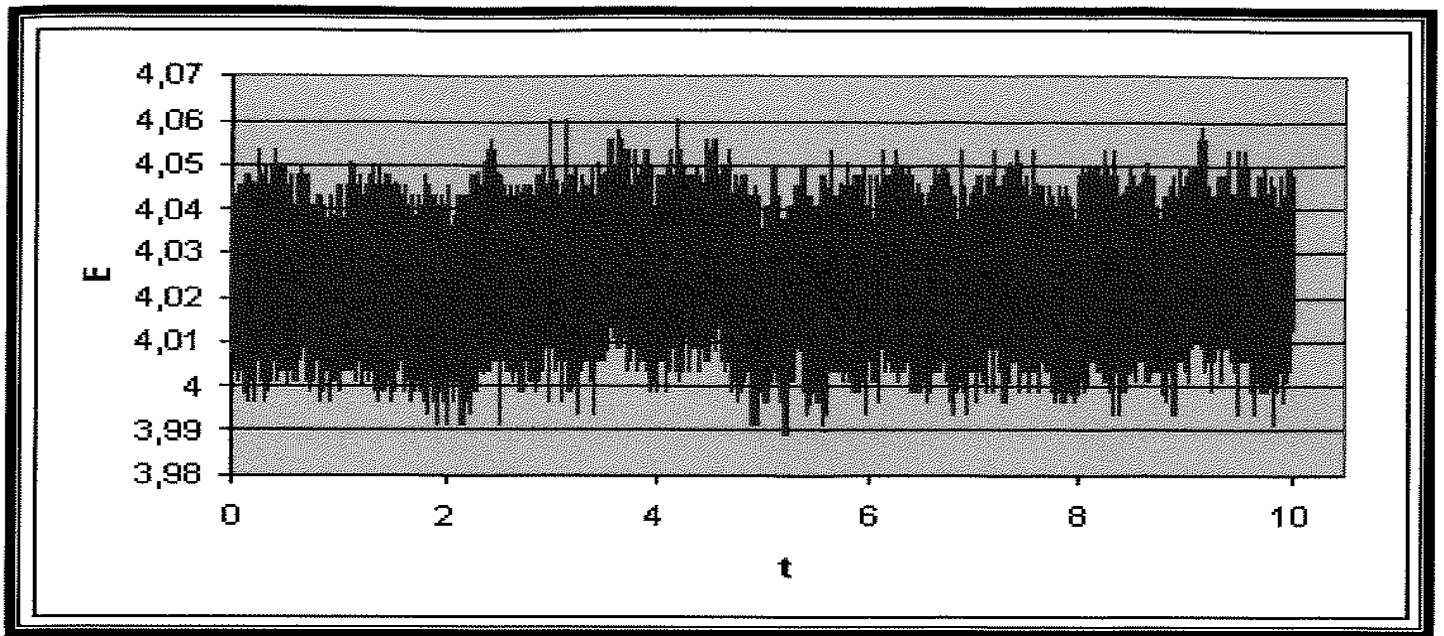
Σχήμα 3.2 : Διάγραμμα μεταξύ της τάσης υψωμένης στο τετράγωνο και της ταχύτητας υψωμένης στο 0.45 από το οποίο προκύπτει μια γραμμική συνάρτηση (πρώτη βαθμονόμηση).

Όπως μπορεί να παρατηρήσει κανείς από τα διαγράμματα το ανεμόμετρο θερμού νήματος δίνει λογικά αποτελέσματα καθώς η τάση που δίνει αυξάνεται όταν αυξάνεται και η ταχύτητα στην αεροσήραγγα. Δηλαδή η γραμμική συμπεριφορά του νόμου του King επαληθεύεται από τις μετρήσεις.

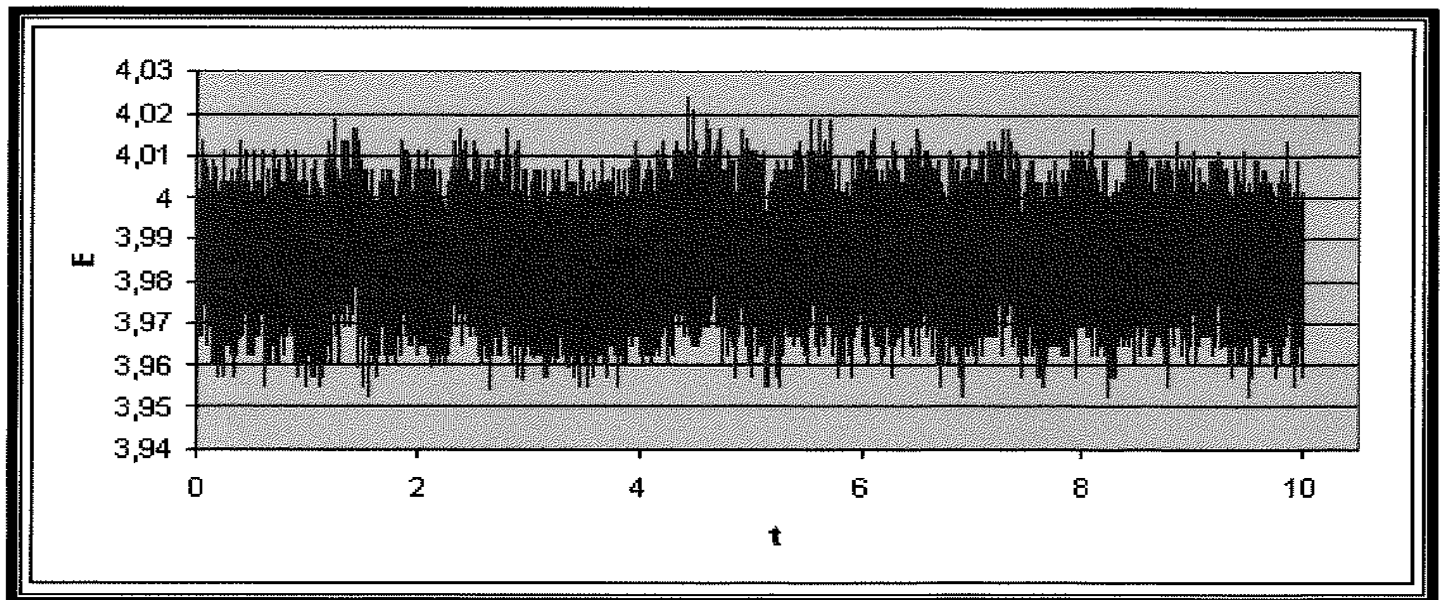
Στη συνέχεια παρουσιάζονται για κάθε μέτρηση ξεχωριστά τα διαγράμματα των χρονοσειρών (Σχήματα 3.3 έως 3.12). Για κάθε διάγραμμα ο χρόνος t μετράται σε δευτερόλεπτα (s) και η τάση E σε Volt (V).



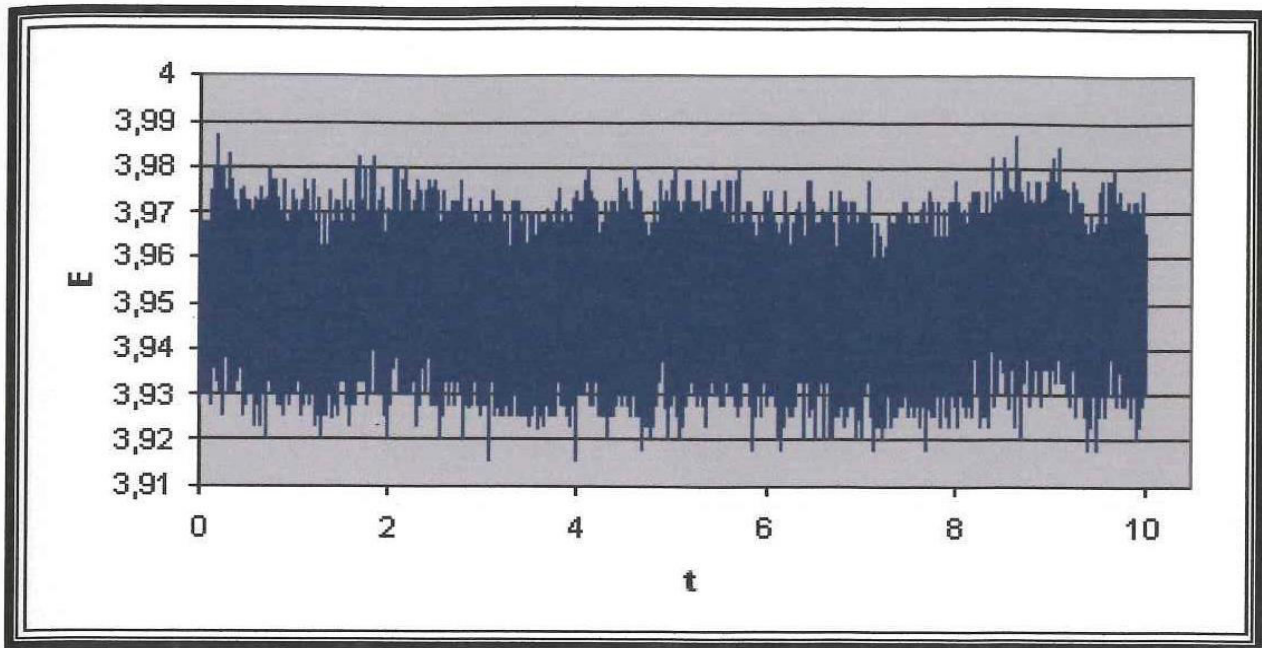
Σχήμα 3.3 : Χρονοσειρά για $U=10.6$ m/s.



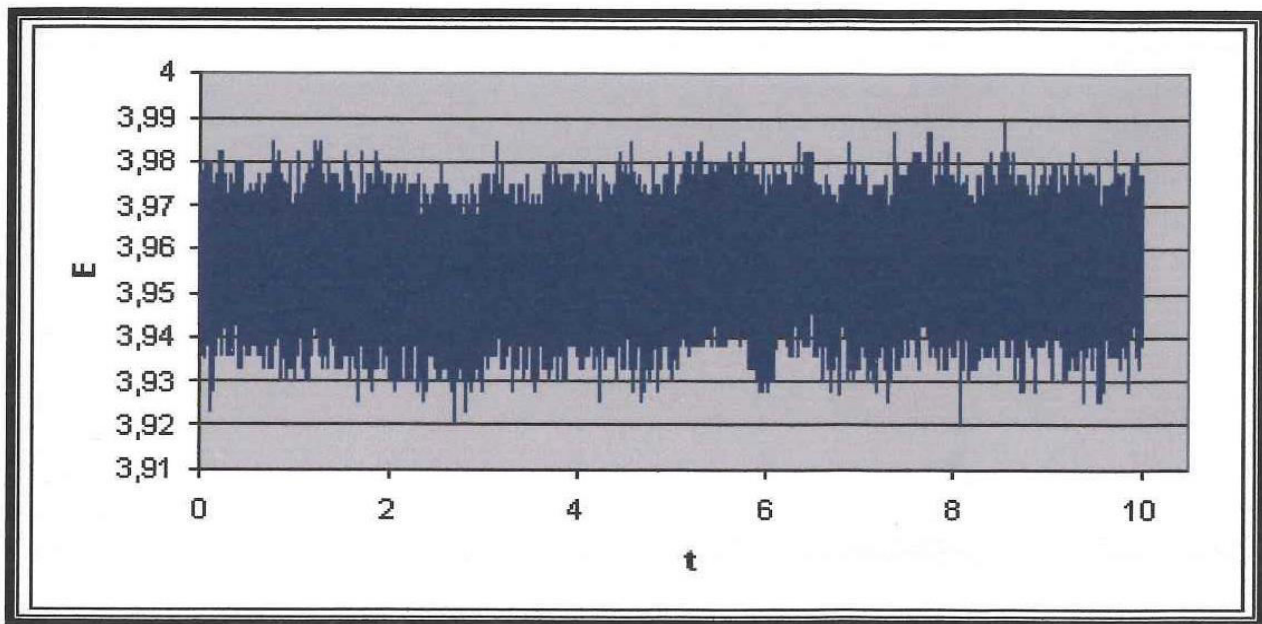
Σχήμα 3.4 : Χρονοσειρά για $U=9.8 \text{ m/s}$.



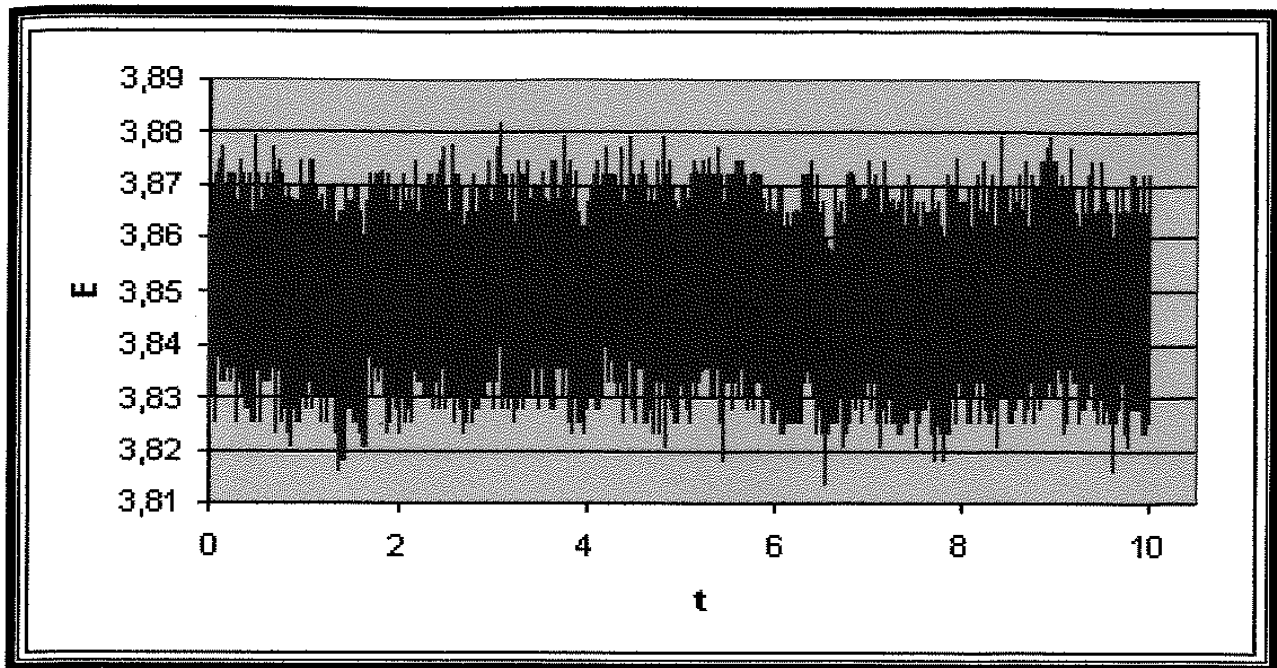
Σχήμα 3.5 : Χρονοσειρά για $U=9.4 \text{ m/s}$.



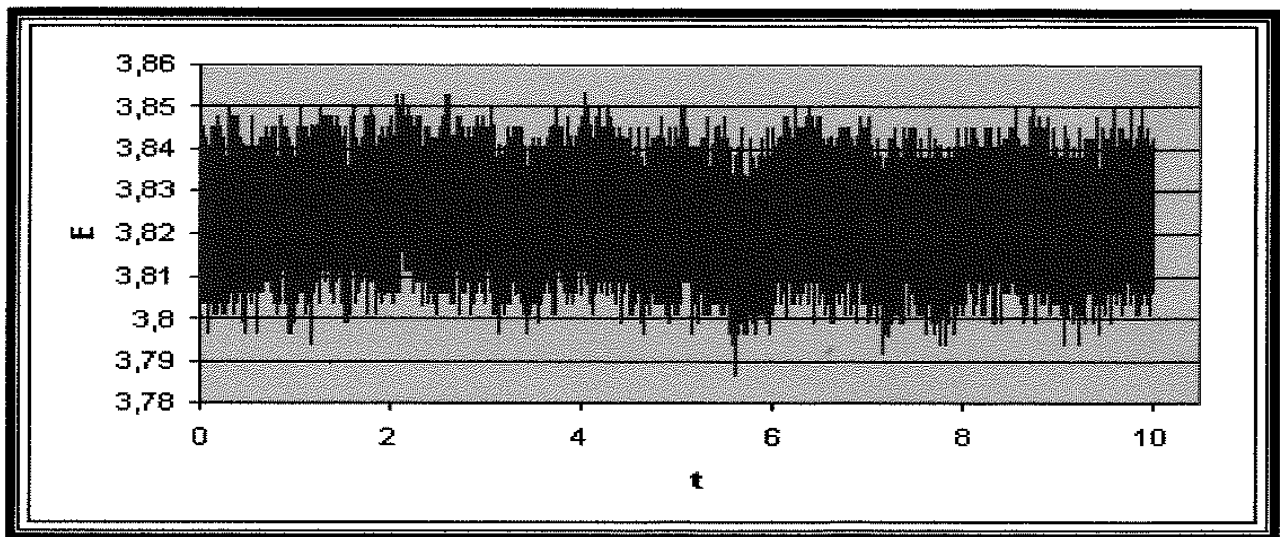
Σχήμα 3.6 : Χρονοσειρά για $U=8.7$ m/s.



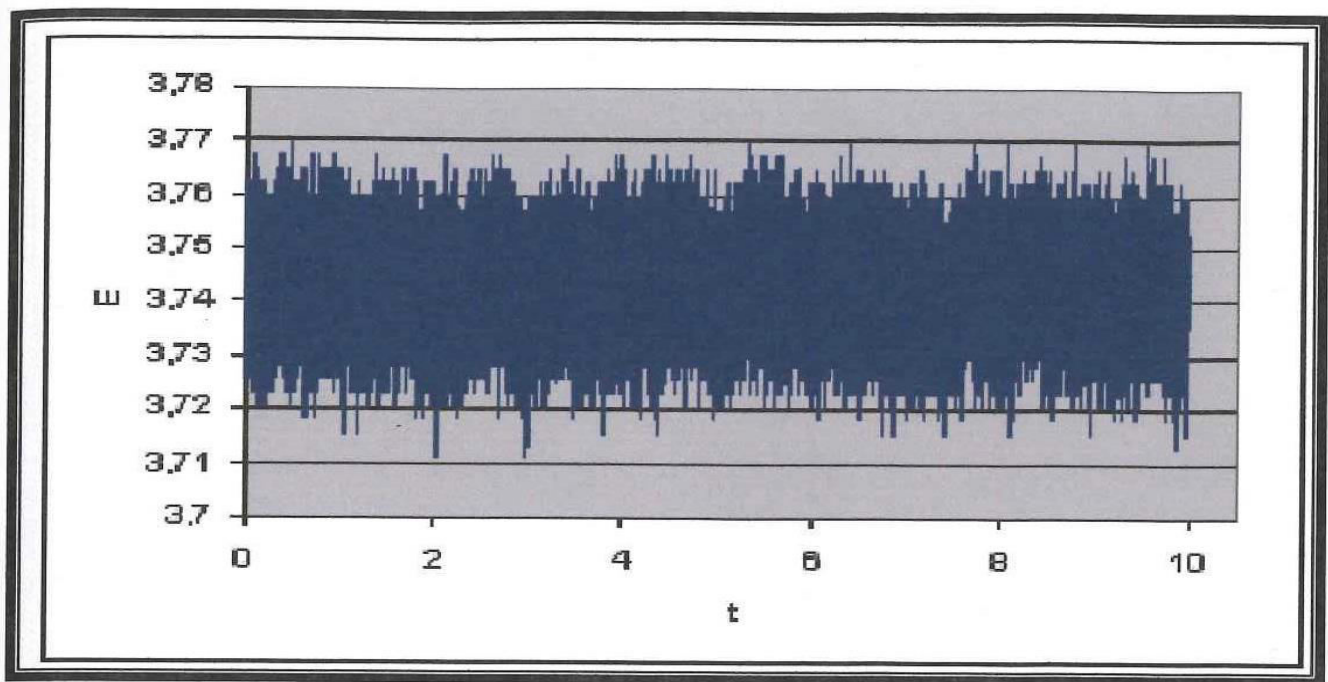
Σχήμα 3.7 : Χρονοσειρά για $U=7.9$ m/s.



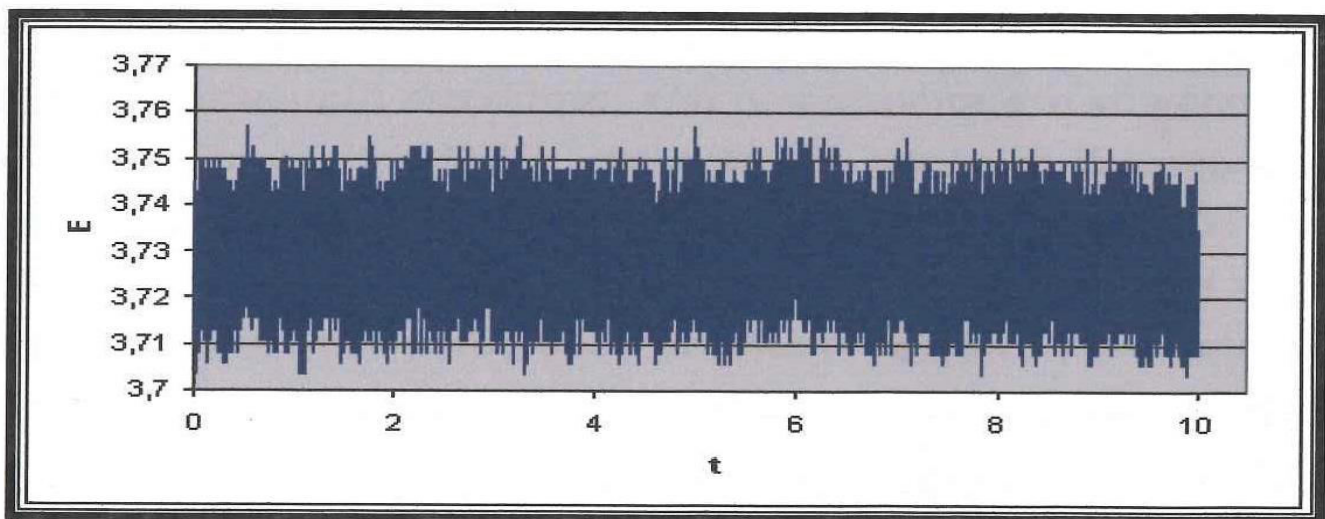
Σχήμα 3.8 : Χρονοσειρά για $U=7.1$ m/s.



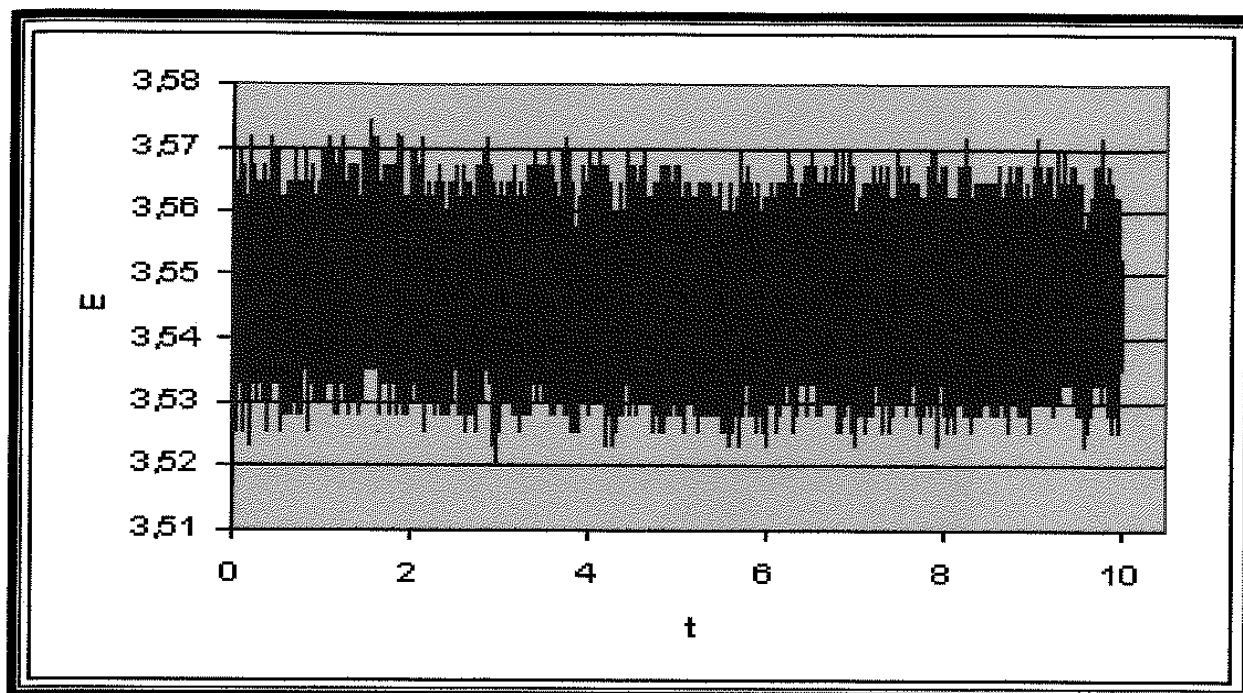
Σχήμα 3.9 : Χρονοσειρά για $U=6.4$ m/s.



Σχήμα 3.10 : Χρονοσειρά για $U=5.3$ m/s.

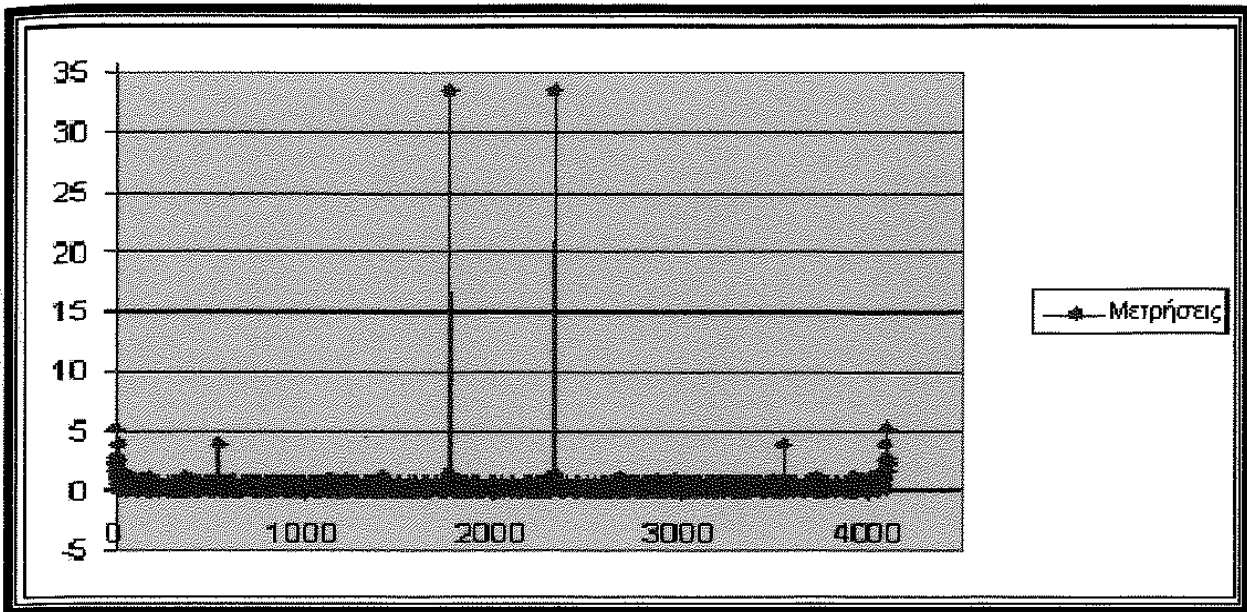


Σχήμα 3.11 : Χρονοσειρά για $U=4.6$ m/s.

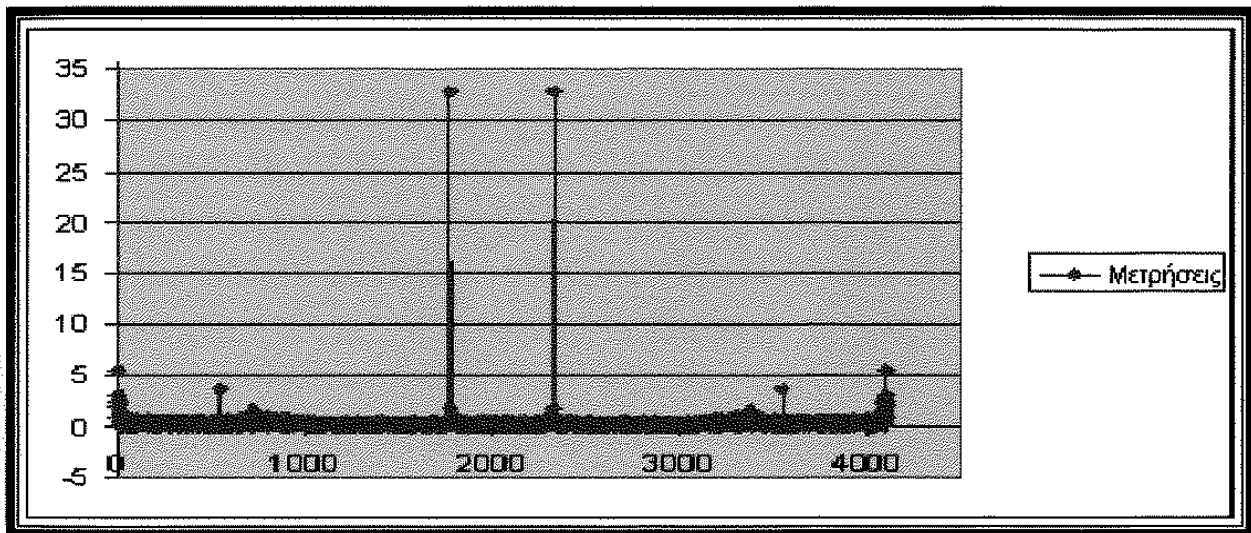


Σχήμα 3.12 : Χρονοσειρά για $U=2.5$ m/s.

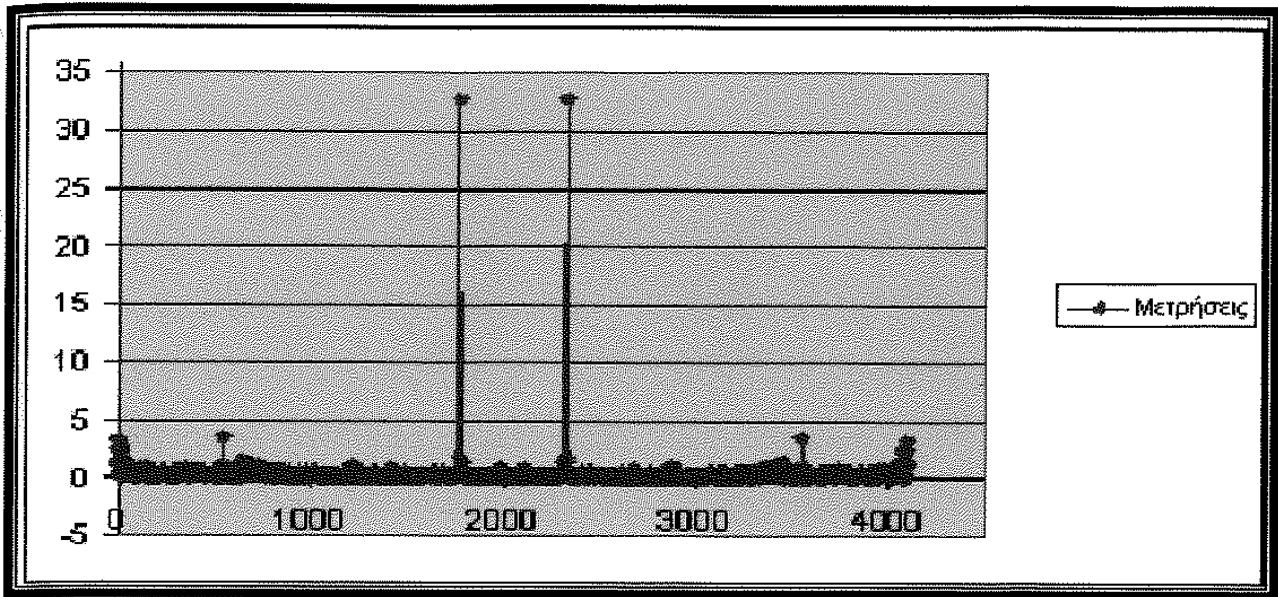
Από τα διαγράμματα των χρονοσειρών παρατηρείται μια περιοδική συμπεριφορά με χαμηλή συχνότητα, κάτι που οδήγησε στο να χρησιμοποιηθεί η ανάλυση fourier. Στη συνέχεια λοιπόν και για τα ίδια σημεία, παρουσιάζονται τα διαγράμματα της ανάλυσης fourier που πραγματοποιήθηκε (Σχήματα 3.13 έως 3.22). Για κάθε διάγραμμα στον άξονα x υπάρχει η συχνότητα f που μετράται σε Hz, ενώ στον άξονα y υπάρχει το μέτρο του μιγαδικού αριθμού $|E|$ που προέκυψε από την ανάλυση fourier, ενώ παρατίθεται και η συχνότητα f_i . Τα διαγράμματα fourier είναι συμμετρικά γύρω από το σημείο 2048 και με χρονικό βήμα dt το βήμα στο χώρο των συχνοτήτων είναι $df=1/(Ndt)$ Hz, οπότε η μικρότερη συχνότητα που μετράται είναι df Hz και η μεγαλύτερη $(Ndf)/2$ Hz.



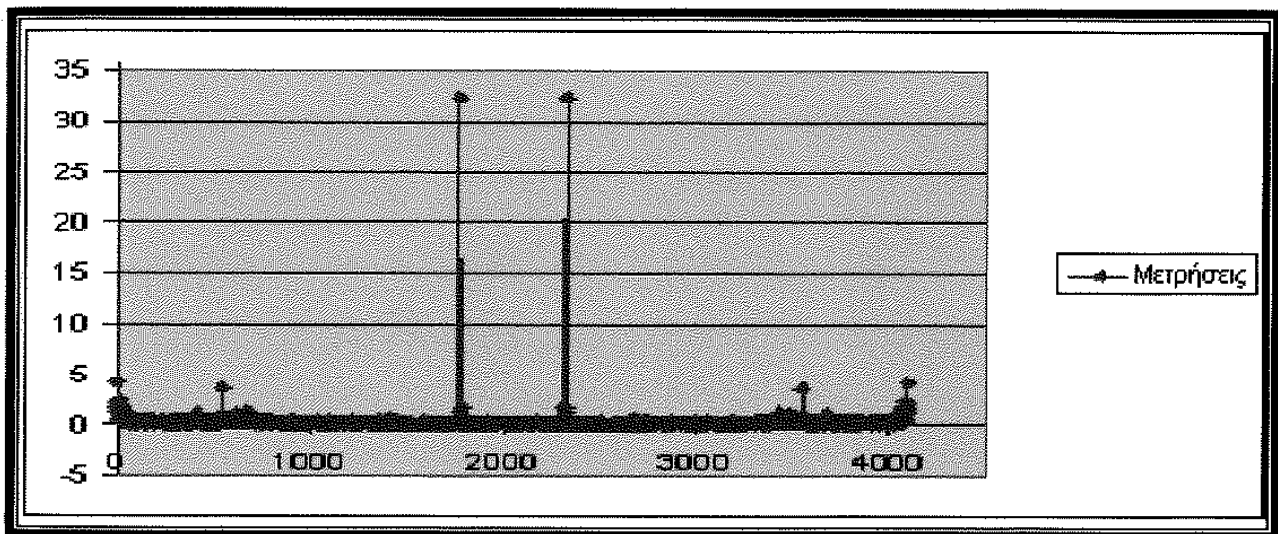
Σχήμα 3.13 : Διάγραμμα fourier για $U=10.6$ m/s με $f_i=67.38$ Hz.



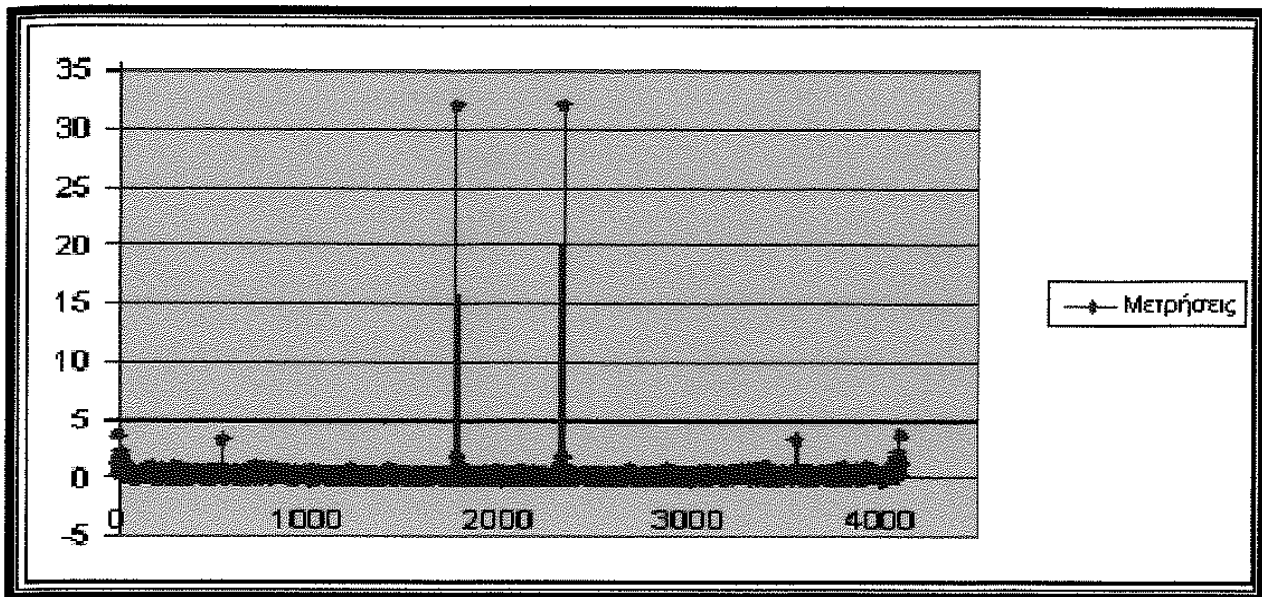
Σχήμα 3.14 : Διάγραμμα fourier για $U=9.8$ m/s με $f_i=67.38$ Hz.



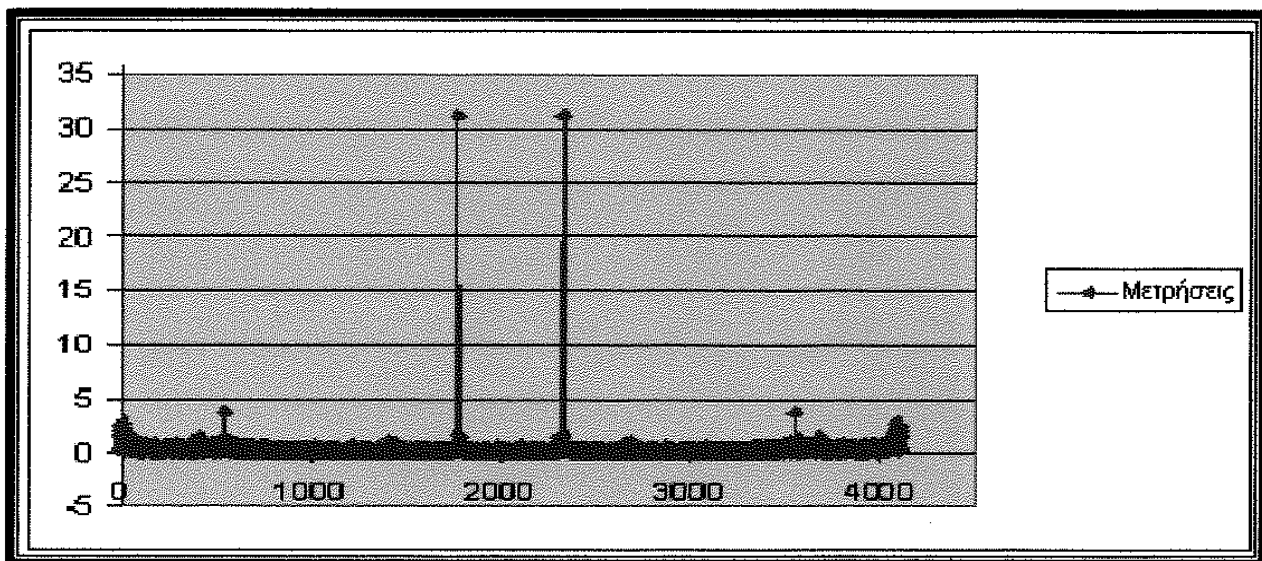
Σχήμα 3.15 : Διάγραμμα fourier για $U=9.4 \text{ m/s}$ με $f_i=67.38 \text{ Hz}$.



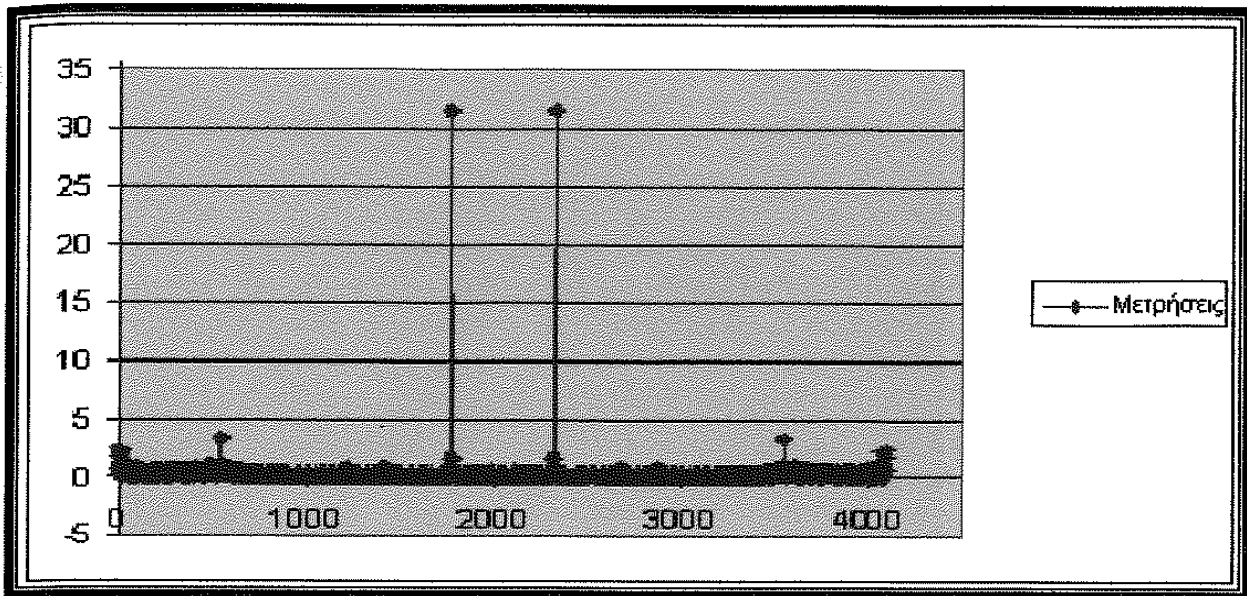
Σχήμα 3.16 : Διάγραμμα fourier για $U=8.7 \text{ m/s}$ με $f_i=67.38 \text{ Hz}$.



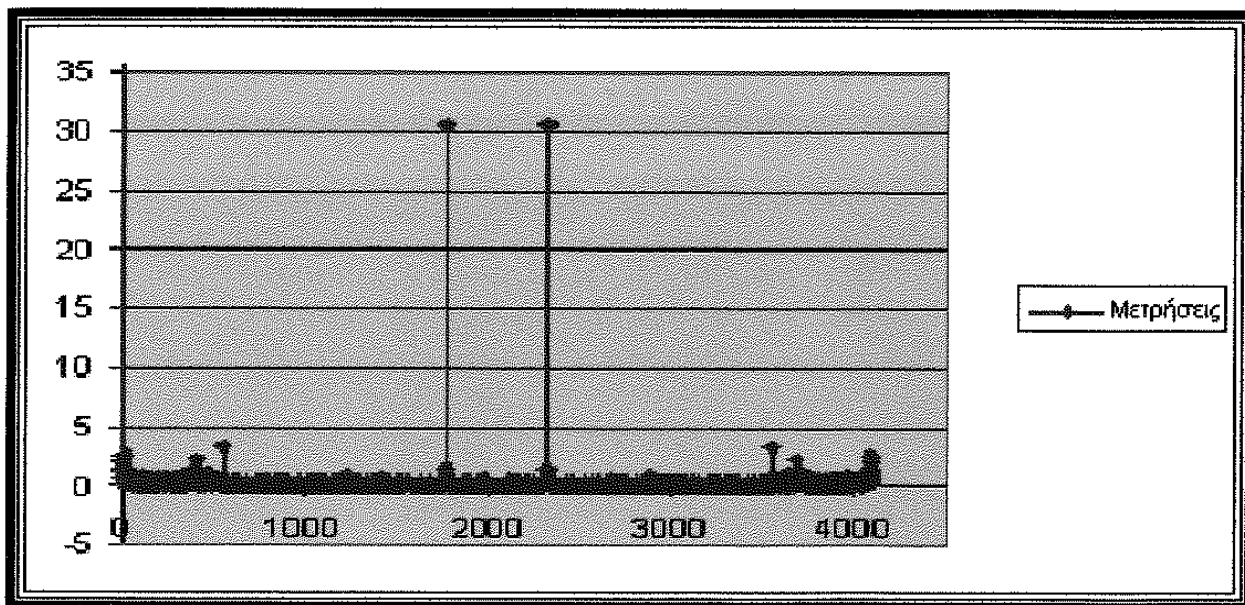
Σχήμα 3.17 : Διάγραμμα fourier για $U=7.9 \text{ m/s}$ με $f_i=67.38 \text{ Hz}$.



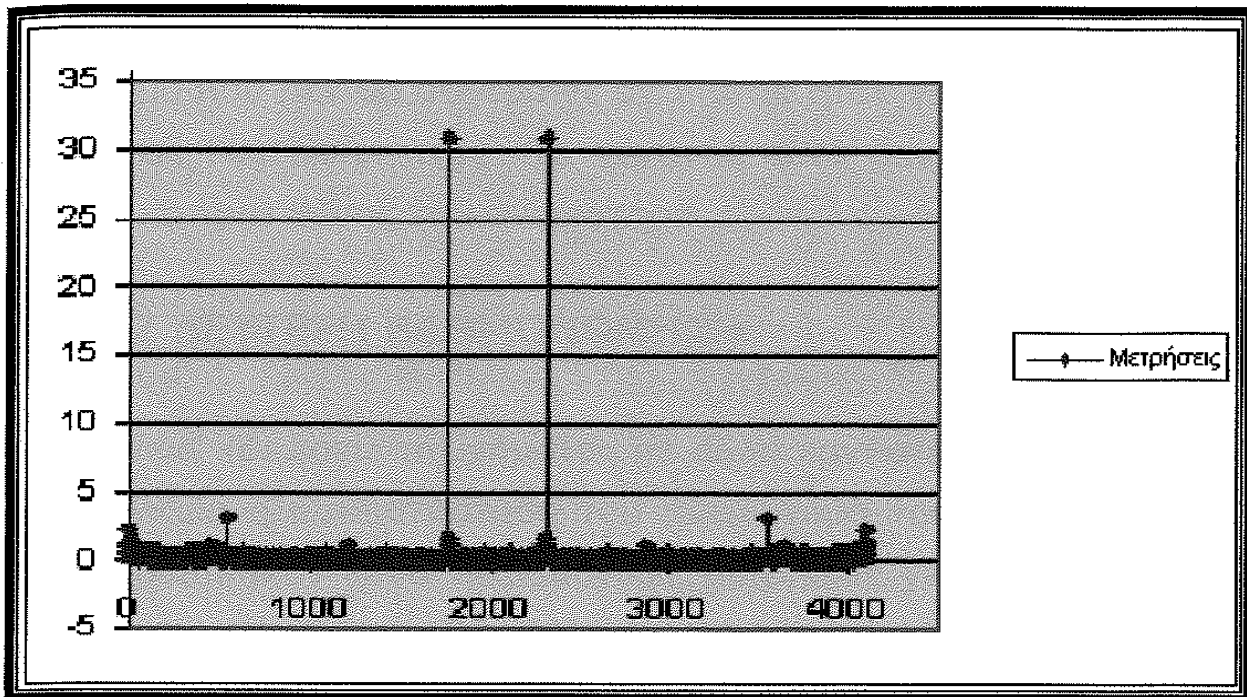
Σχήμα 3.18 : Διάγραμμα fourier για $U=7.1 \text{ m/s}$ με $f_i=67.38 \text{ Hz}$.



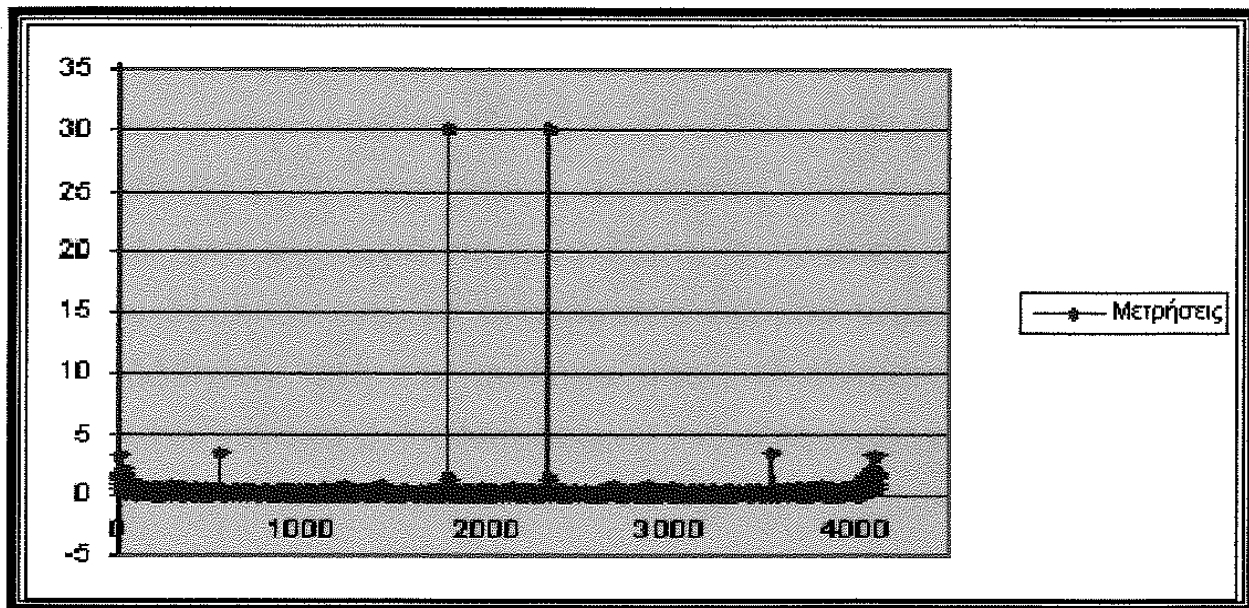
Σχήμα 3.19 : Διάγραμμα fourier για $U=6.4 \text{ m/s}$ με $f_1=67.38 \text{ Hz}$.



Σχήμα 3.20 : Διάγραμμα fourier για $U=5.3 \text{ m/s}$ με $f_1=67.38 \text{ Hz}$.



Σχήμα 3.21 : Διάγραμμα fourier για $U=4.6 \text{ m/s}$ με $f_i=67.38 \text{ Hz}$.



Σχήμα 3.22 : Διάγραμμα fourier για $U=2.5 \text{ m/s}$ με $f_i=67.38 \text{ Hz}$.

Παρατηρείται ότι στο σύνολο των μετρήσεων τα διαγράμματα που προκύπτουν από την ανάλυση fourier παρουσιάζουν σημαντικές ομοιότητες μεταξύ τους, καθώς και ότι η συχνότητα f_i έχει την ίδια τιμή σε κάθε διάγραμμα. Η διακριτή συχνότητα των 67.38 Hz ενδεχομένως να οφείλε-

ται στον ανεμιστήρα, αφού παραμένει σταθερή για όλες τις τιμές ταχύτητας, πράγμα που δεν θα συνέβαινε αν η αιτία ήταν για παράδειγμα τυχόν ταλαντώσεις του μετρητικού. Το γεγονός αυτό δεν το περίμενε κανείς λόγω της κατάντι θέσης του ανεμιστήρα.

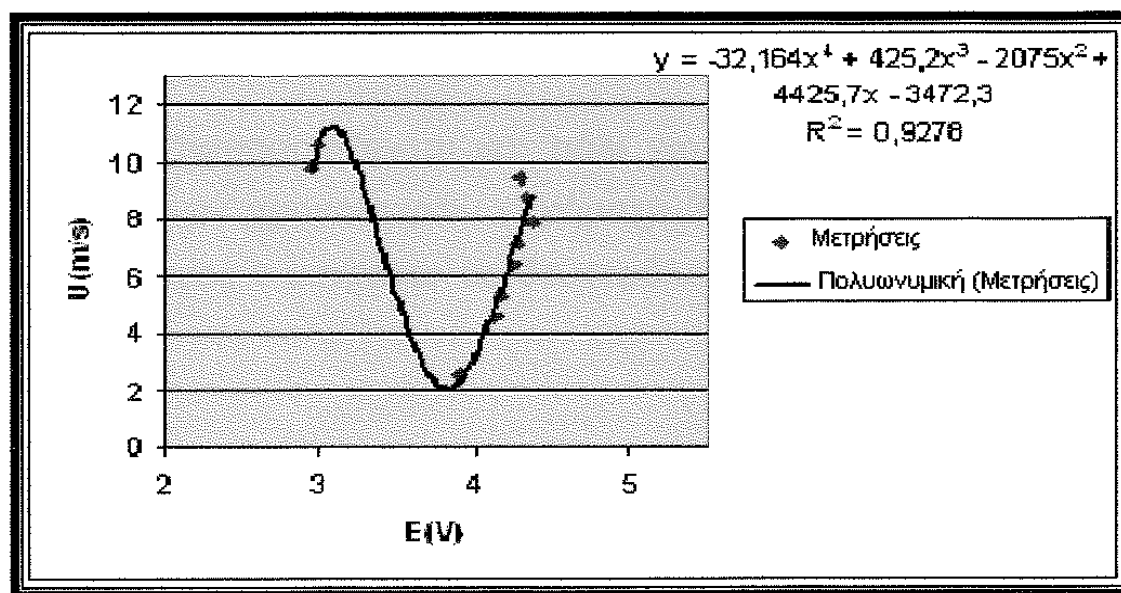
3.2.2 ΔΕΥΤΕΡΗ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ

Στη συνέχεια και λόγω ατυχήματος σε άλλη εργαστηριακή άσκηση, κρίθηκε αναγκαία η αντικατάσταση του ανεμιστήρα της αεροσήραγγας και πραγματοποιήθηκαν ξανά πειραματικές μετρήσεις για την βαθμονόμηση του οργάνου. Πάρθηκαν και πάλι 10 μετρήσεις, σε 10 διαφορετικές θέσεις μέσα στην αεροσήραγγα και για τις ίδιες 10 τιμές ταχύτητας του αέρα που διαρρέει την αεροσήραγγα όπως και κατά την πρώτη βαθμονόμηση. Μέσα στην αεροσήραγγα παρέμεινε το μοντέλο του κτιρίου. Οι τιμές της ταχύτητας μετρήθηκαν με το σωλήνα pitot και οι αντίστοιχες τιμές της τάσης μετρήθηκαν με το ανεμόμετρο θερμού νήματος. Η βαθμονόμηση πραγματοποιήθηκε στις 15—6—2004. Η θερμοκρασία ήταν $\theta=27$ °C, η πίεση $P=1020$ mbar και η αντίσταση του νήματος μετρήθηκε στα $R=3.62$ Ω. Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο πίνακας 3.2 με τις τιμές της τάσης που δόθηκαν από το ανεμόμετρο θερμού νήματος και της ταχύτητας που δόθηκαν από τον σωλήνα pitot. Ο πίνακας 3.2 είναι πρακτικά όμοιος με τον πίνακα 3.1 αλλά δείχνει τις νέες τιμές της βαθμονόμησης.

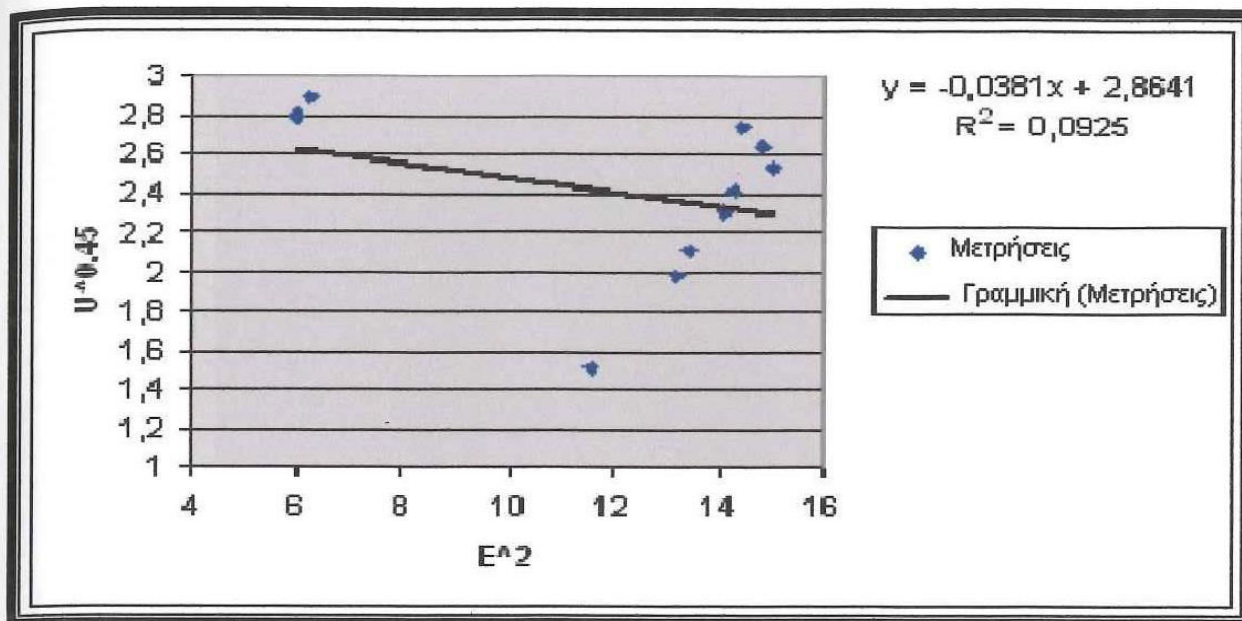
	ΤΑΣΗ	ΤΑΧΥΤΗΤΑ	E^2	$U^{0.45}$	RMS VALUE
ΜΕΤΡΗΣΗ 1	2.4977	10.6	6.23850529	2.893261176	3.1215
ΜΕΤΡΗΣΗ 2	2.4462	9.8	5.98389444	2.792876515	3.053
ΜΕΤΡΗΣΗ 3	3.7994	9.4	14.43544036	2.740990524	0.9805
ΜΕΤΡΗΣΗ 4	3.8478	8.7	14.80556484	2.647181162	0.565
ΜΕΤΡΗΣΗ 5	3.8714	7.9	14.98773796	2.534732837	0.371
ΜΕΤΡΗΣΗ 6	3.7777	7.1	14.27101729	2.415829371	0.0078
ΜΕΤΡΗΣΗ 7	3.7532	6.4	14.08651024	2.305584205	0.0077
ΜΕΤΡΗΣΗ 8	3.6677	5.3	13.45202329	2.117991151	0.0063
ΜΕΤΡΗΣΗ 9	3.6366	4.6	13.22485956	1.987197464	0.0059
ΜΕΤΡΗΣΗ10	3.4061	2.5	11.60151721	1.510334016	0.0051

Πίνακας 3.2 : Μετρήσεις για τη δεύτερη βαθμονόμηση.

Στη συνέχεια στο σχήμα 3.23 και στο σχήμα 3.24 παρουσιάζονται τα δύο διαγράμματα.



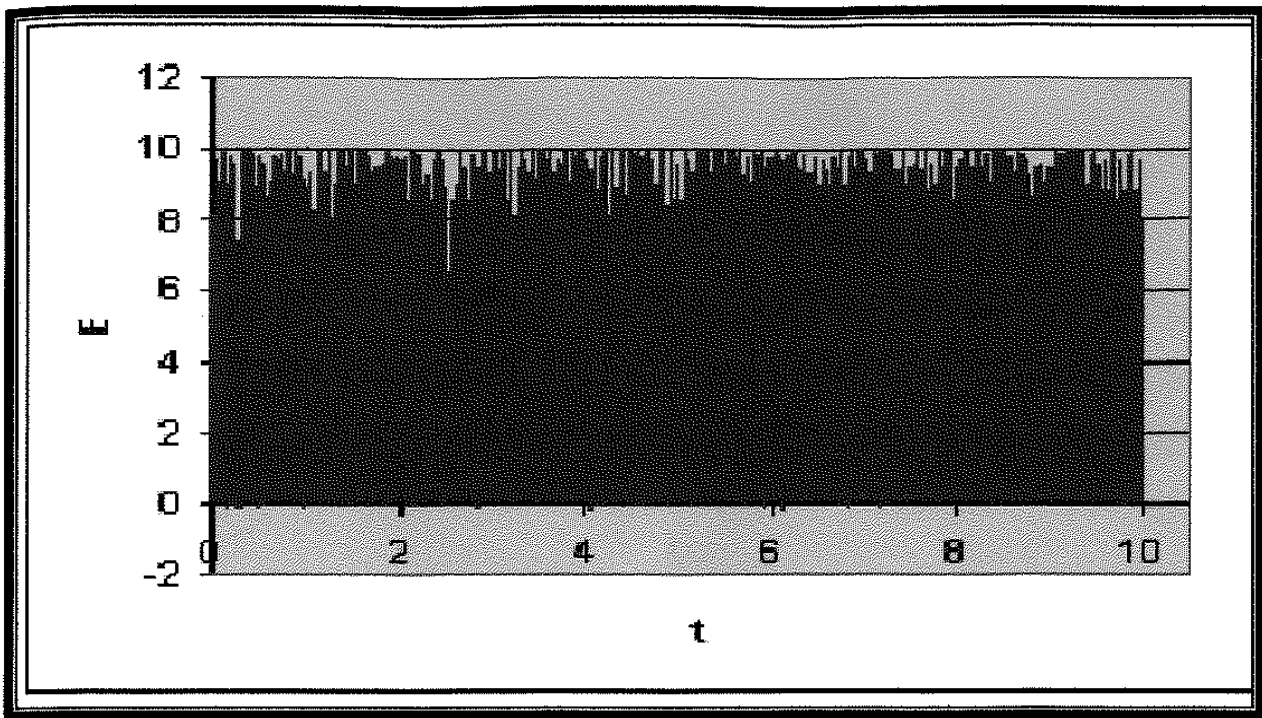
Σχήμα 3.23 : Διάγραμμα μεταξύ της τάσης και της ταχύτητας από το οποίο προκύπτει μια πολυωνυμική συνάρτηση τέταρτης τάξης (δεύτερη βαθμονόμηση).



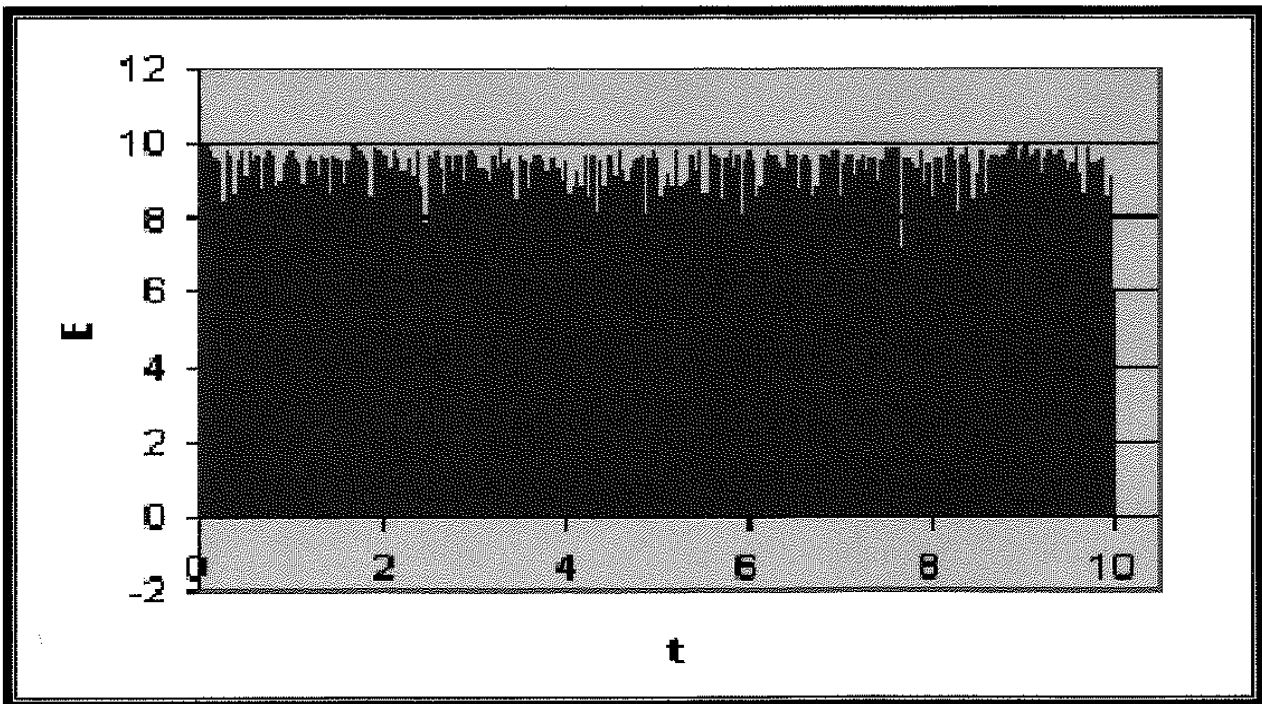
Σχήμα 3.24 : Διάγραμμα μεταξύ της τάσης υψωμένης στο τετράγωνο και της ταχύτητας υψωμένης στο 0.45 από το οποίο προκύπτει μια γραμμική συνάρτηση (δεύτερη βαθμονόμηση).

Όπως μπορεί να παρατηρήσει κανείς από τα διαγράμματα, το ανεμόμετρο θερμού νήματος δεν δίνει πλέον λογικά αποτελέσματα καθώς για ταχύτητες από 7.9 m/s και πάνω η τάση μειώνεται!

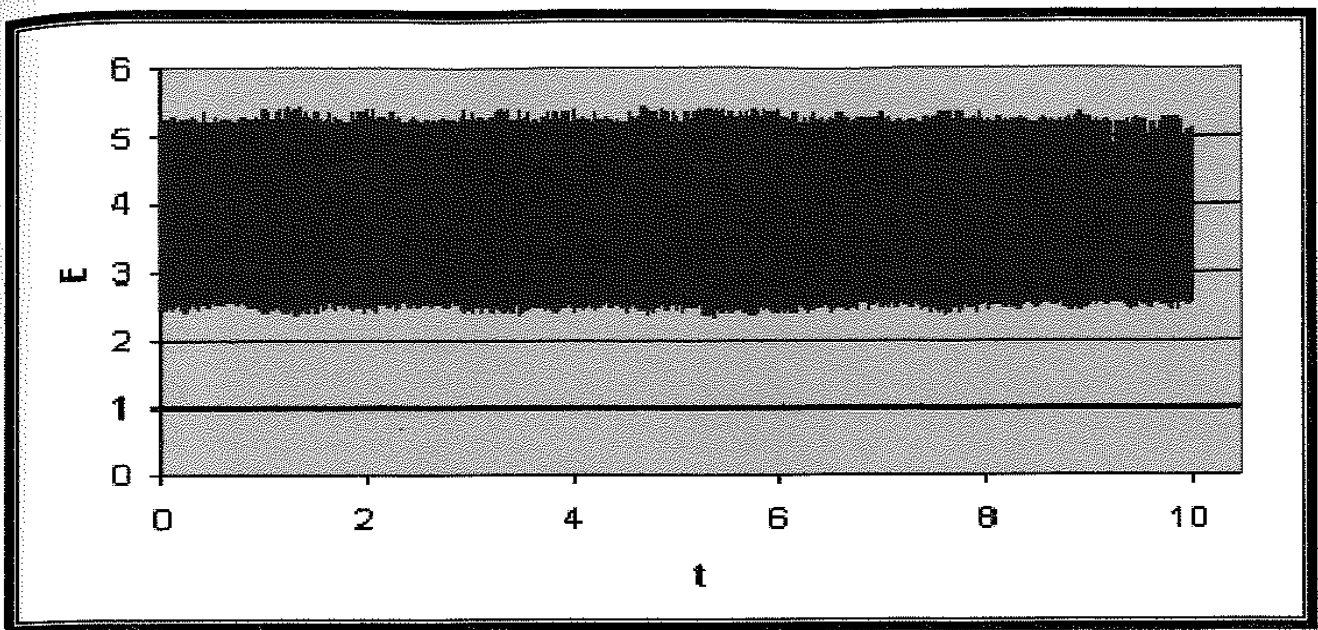
Στη συνέχεια παρουσιάζονται και πάλι για κάθε μέτρηση ξεχωριστά τα διαγράμματα των χρονοσειρών (Σχήματα 3.25 έως 3.34). Για κάθε διάγραμμα ο χρόνος t μετράται σε δευτερόλεπτα (s) και η τάση E σε Volt (V).



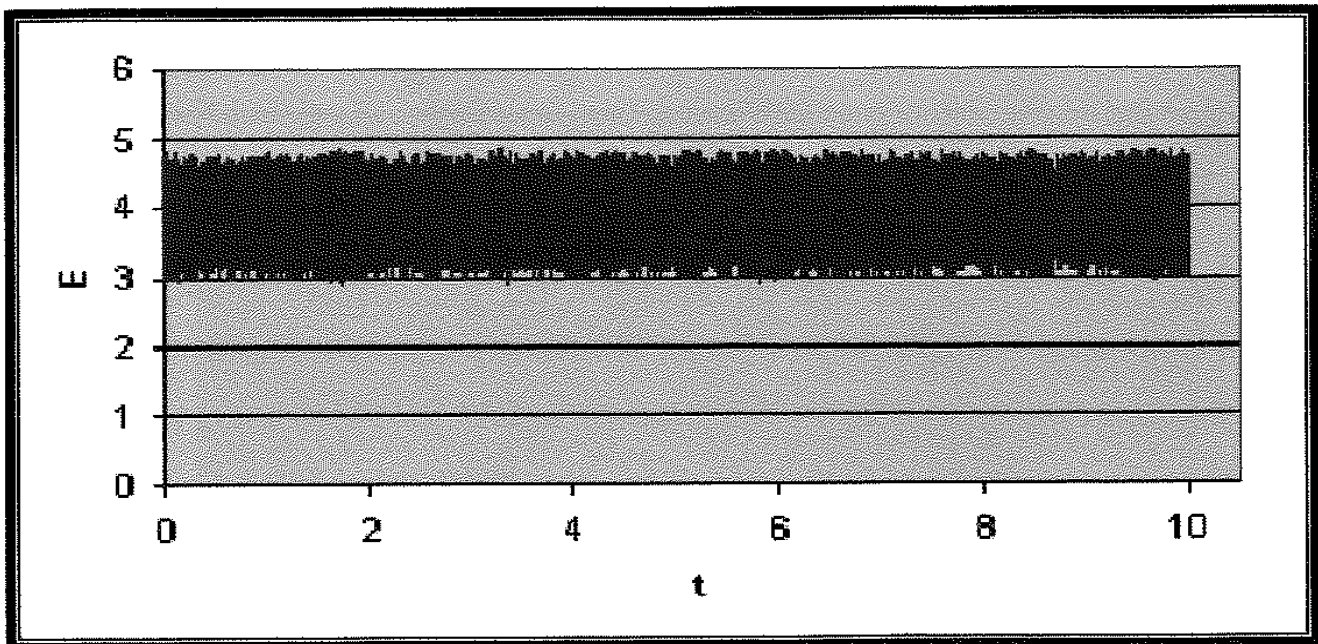
Σχήμα 3.25 : Χρονοσειρά για $U=10.6$ m/s.



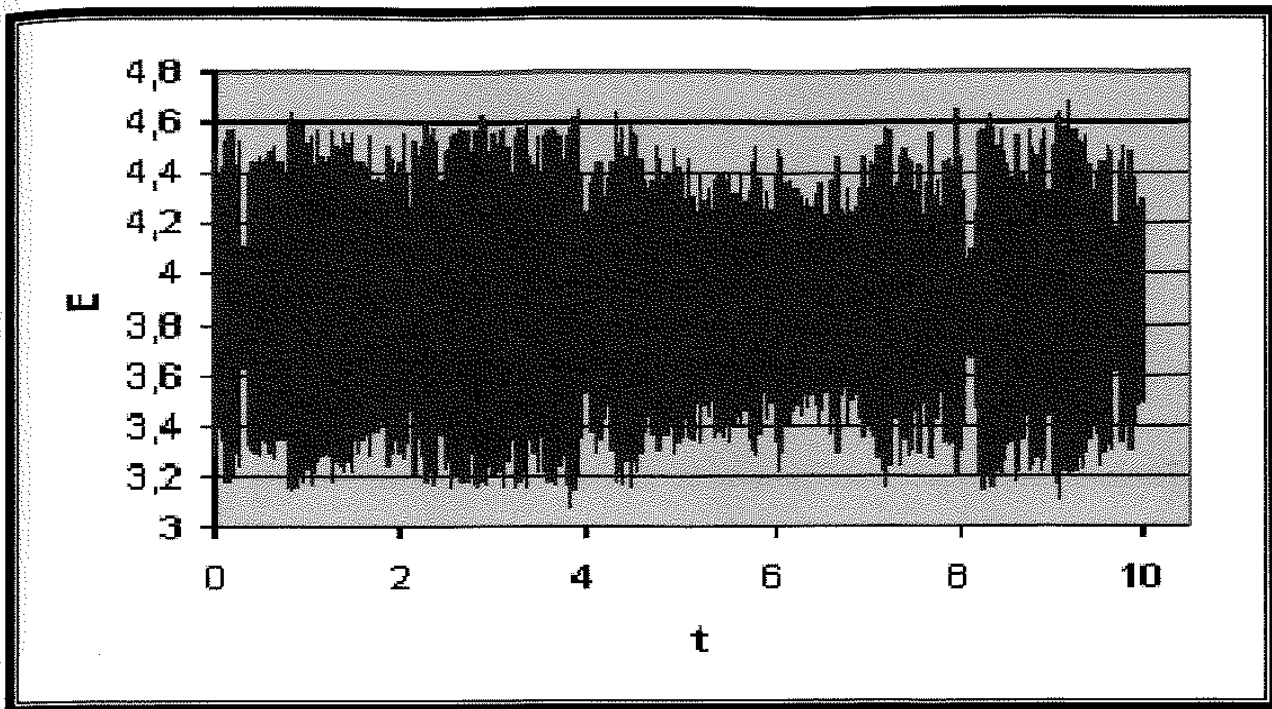
Σχήμα 3.26 : Χρονοσειρά για $U=9.8$ m/s.



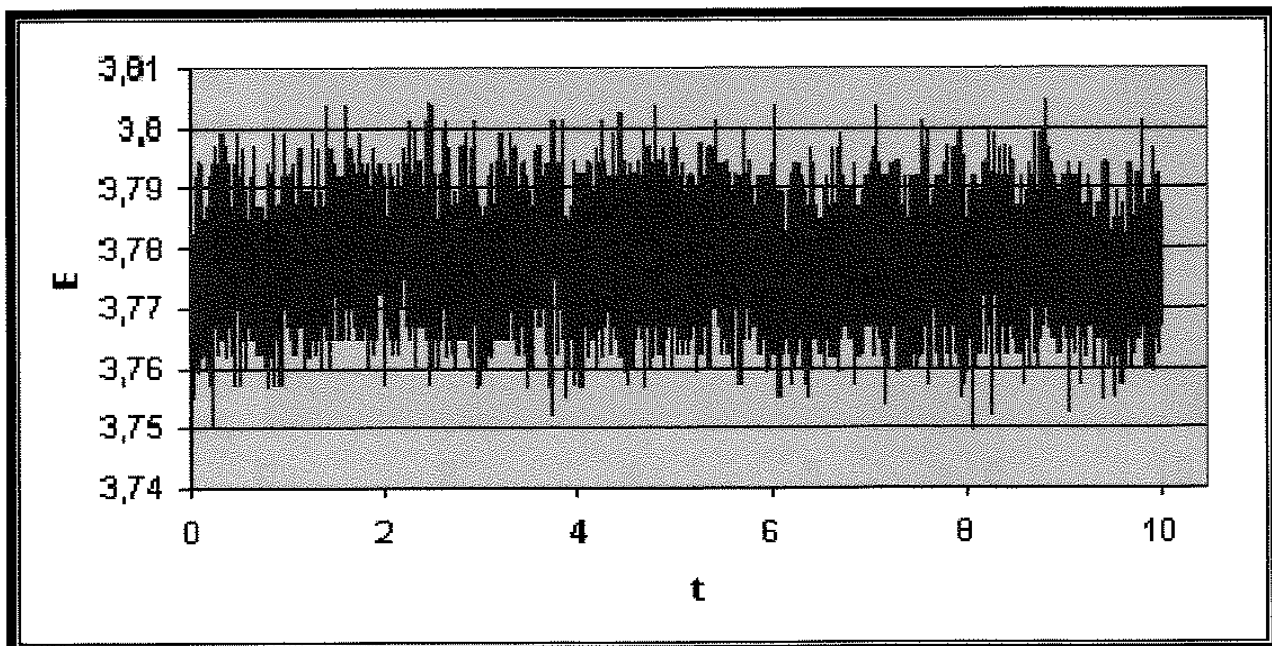
Σχήμα 3.27 : Χρονοσειρά για $U=9.4$ m/s.



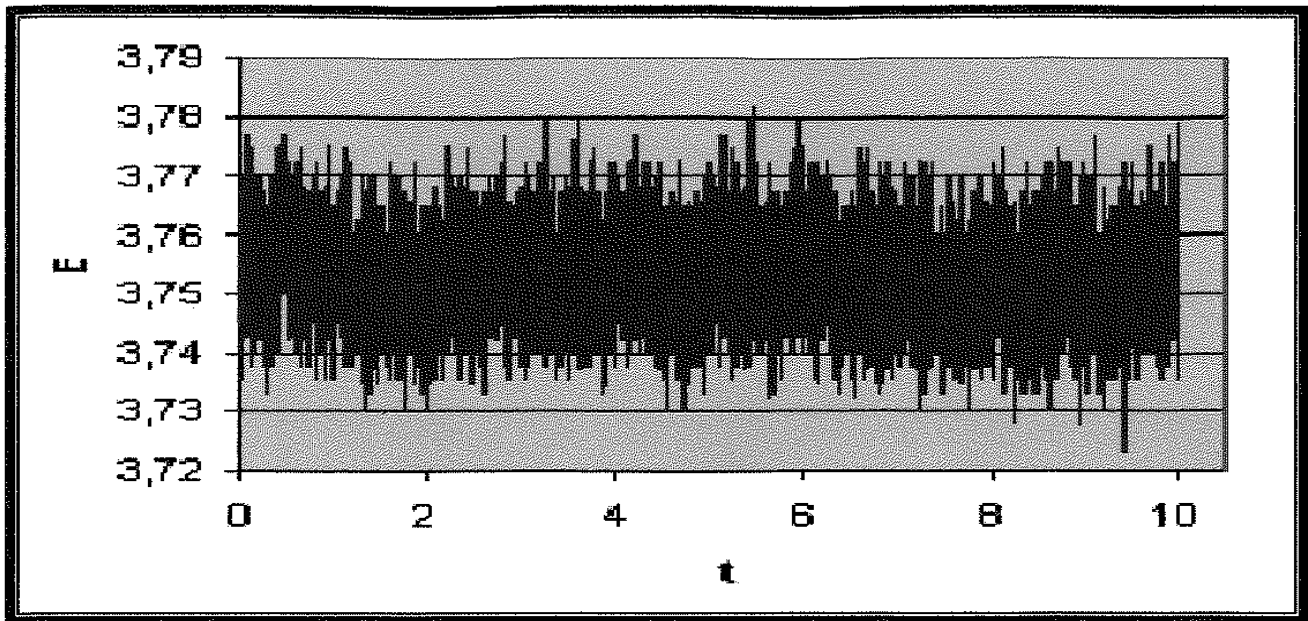
Σχήμα 3.28 : Χρονοσειρά για $U=8.7$ m/s.



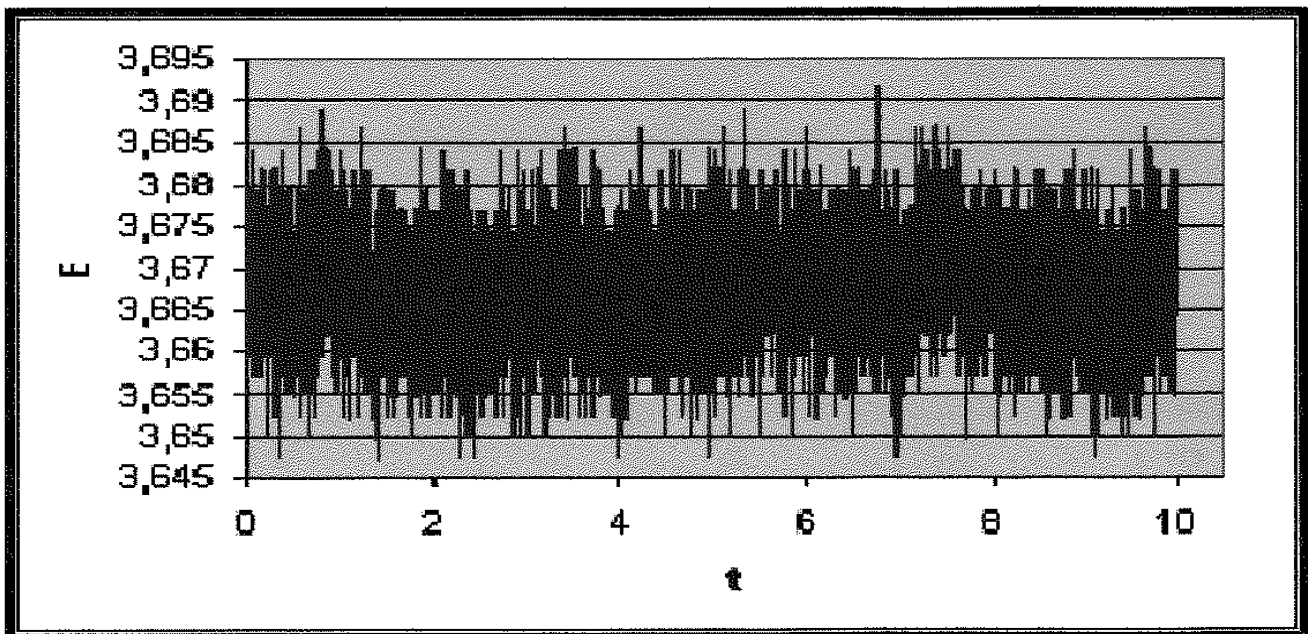
Σχήμα 3.29 : Χρονοσειρά για $U=7.9$ m/s.



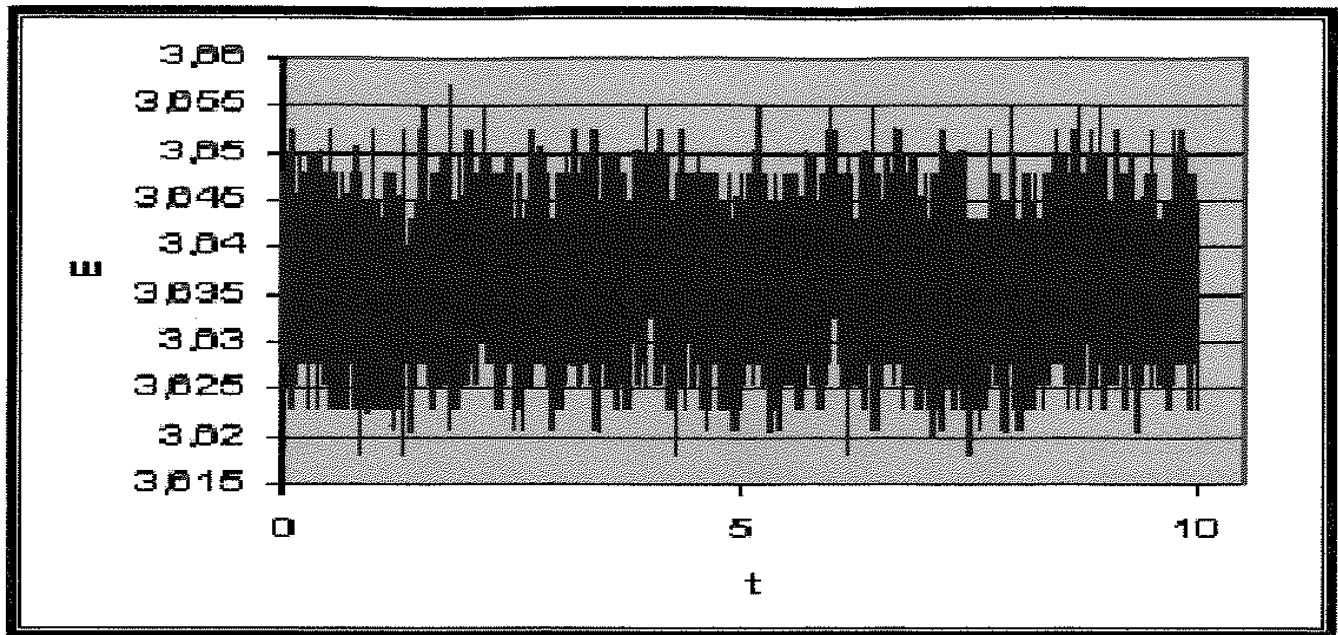
Σχήμα 3.30 : Χρονοσειρά για $U=7.1$ m/s.



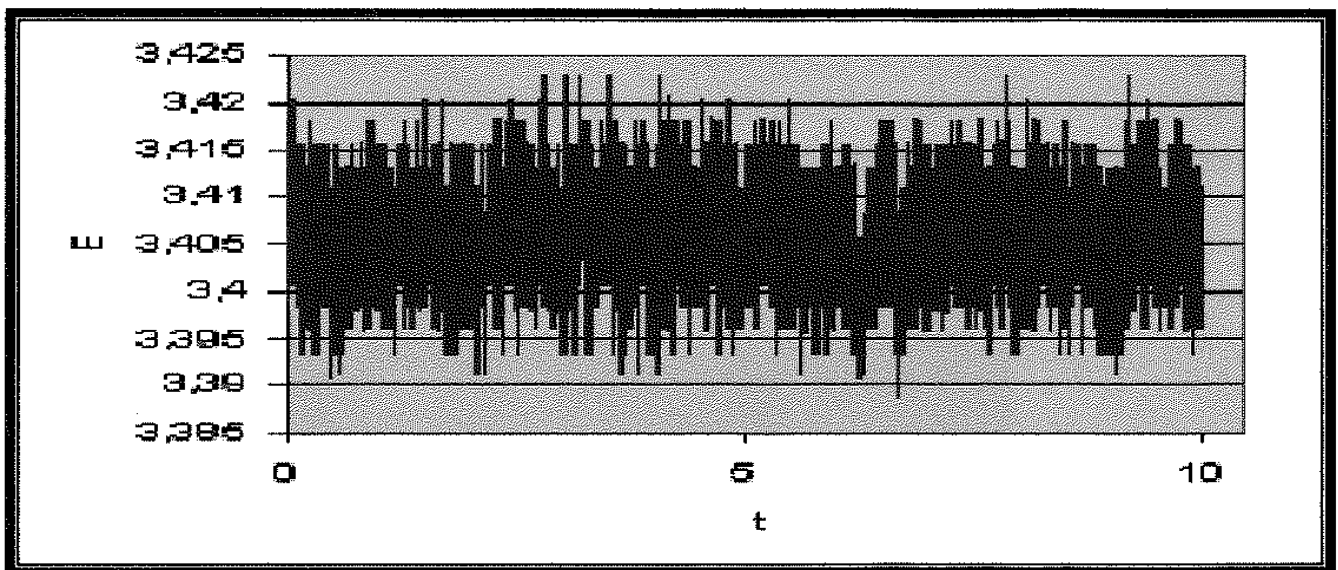
Σχήμα 3.31 : Χρονοσειρά για $U=6.4$ m/s.



Σχήμα 3.32 : Χρονοσειρά για $U=5.4$ m/s.



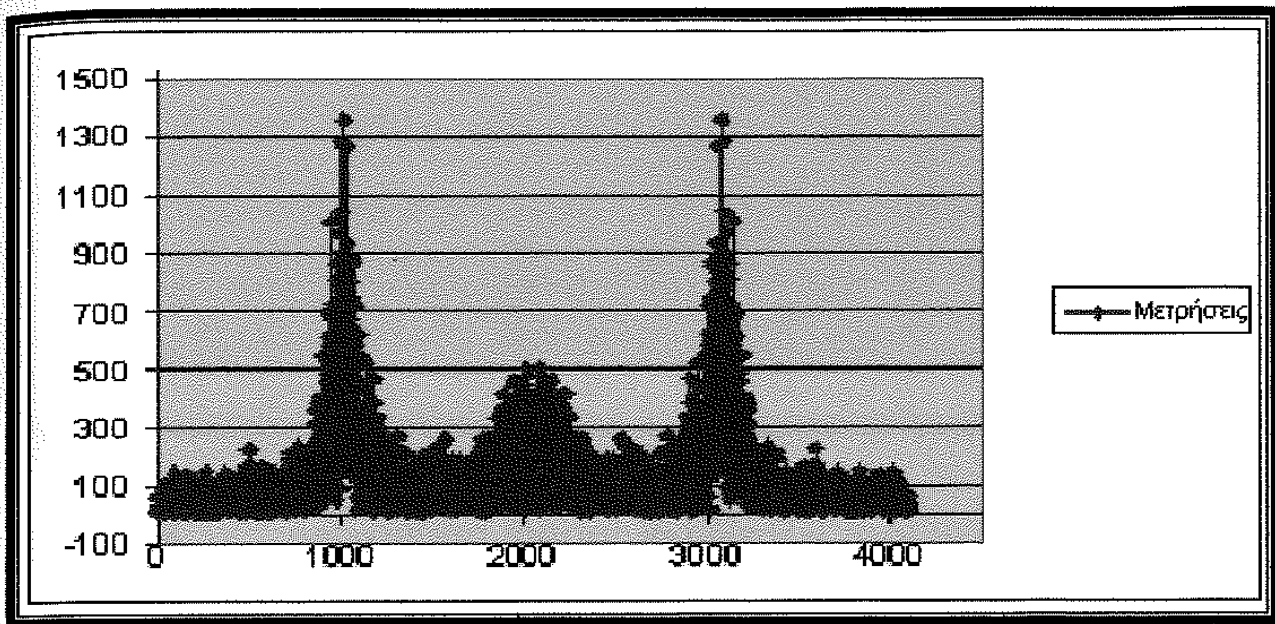
Σχήμα 3.33 : Χρονοσειρά για $U=4.6$ m/s.



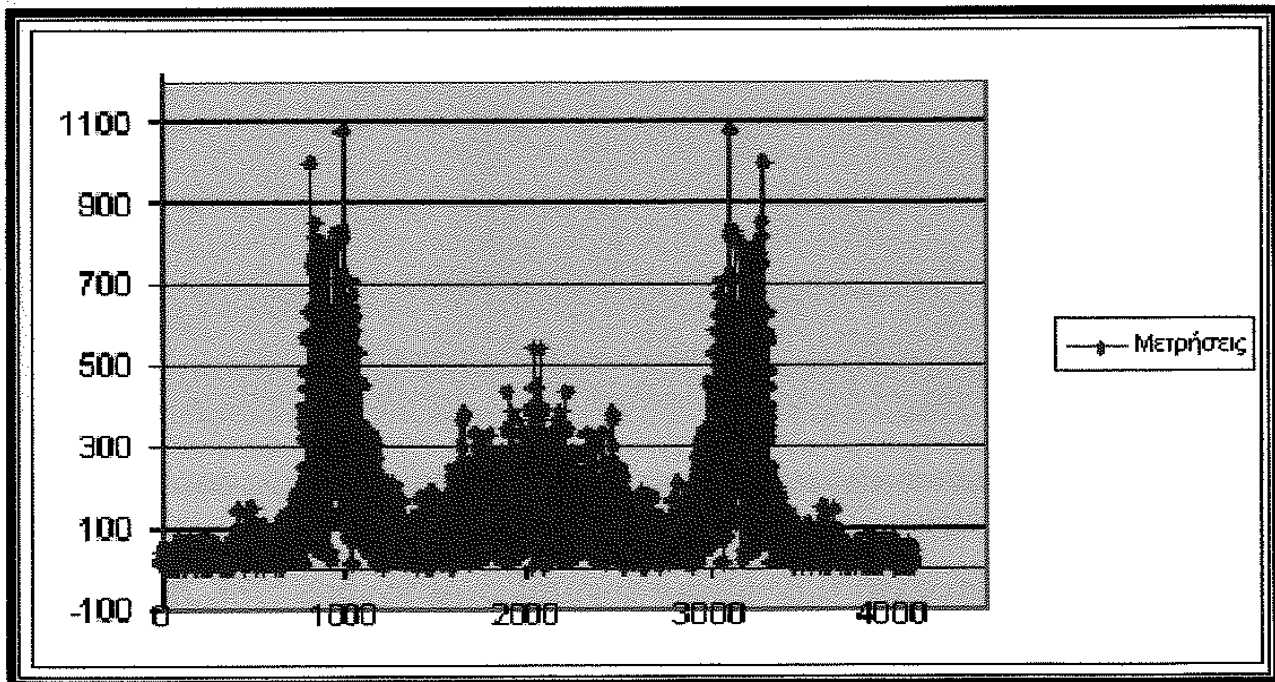
Σχήμα 3.34 : Χρονοσειρά για $U=2.5$ m/s.

Στη συνέχεια και για τα ίδια σημεία παρουσιάζονται τα διαγράμματα της ανάλυσης fourier (Σχήματα 3.35 έως 3.44). Για κάθε διάγραμμα στον άξονα x υπάρχει η συχνότητα f που μετράται σε Hz, ενώ στον άξονα y υπάρχει το μέτρο του μιγαδικού αριθμού $|E|$ που προέκυψε από την ανάλυση fourier. Τα διαγράμματα αυτά μπορούν να βοηθήσουν ώστε να

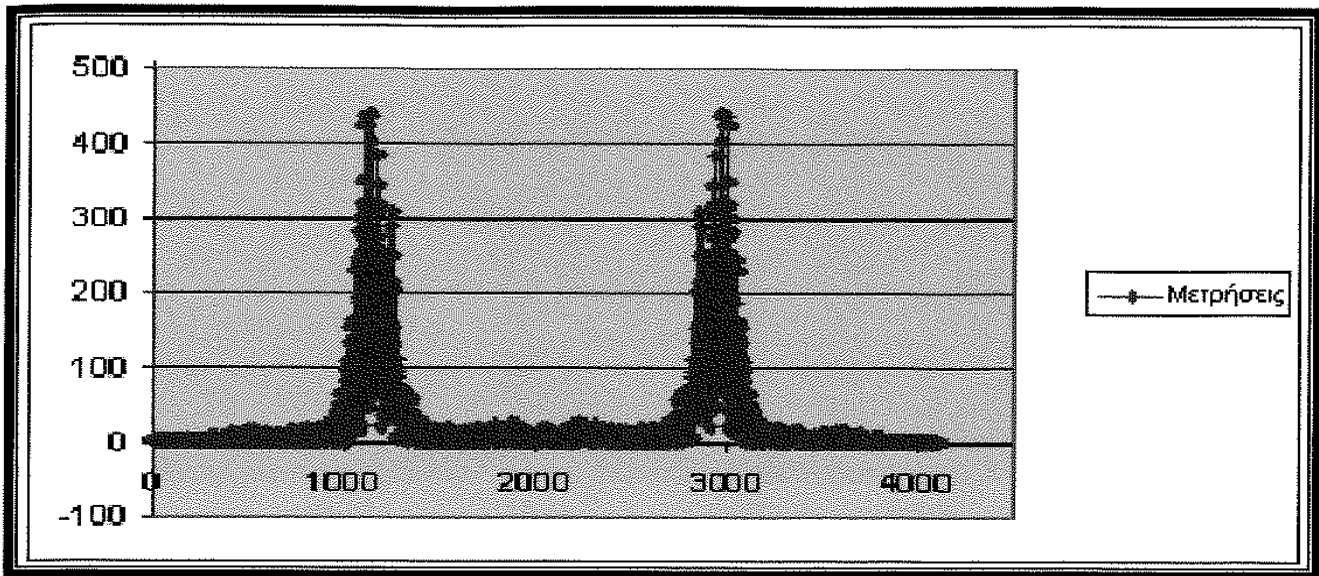
γίνουν κατανοητοί οι λόγοι για τους οποίους το ανεμόμετρο θερμού νήματος δίνει τις τιμές αυτές.



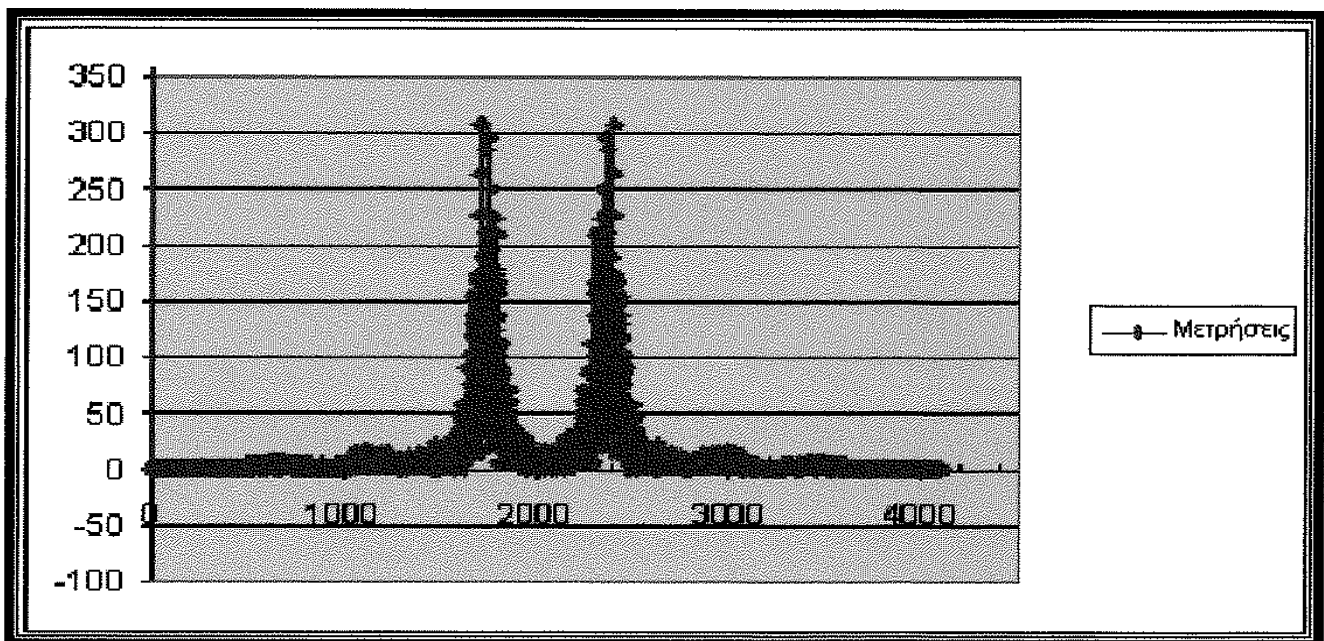
Σχήμα 3.35 : Διάγραμμα fourier για $U=10.6$ m/s με $f_i=250.244$ Hz.



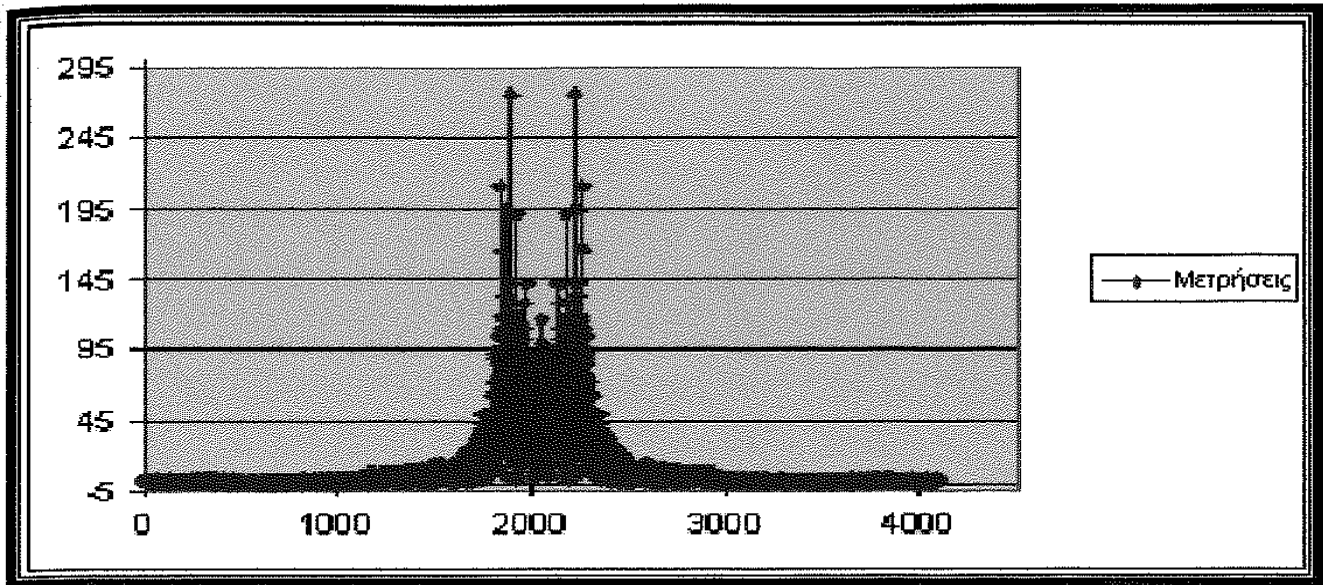
Σχήμα 3.36 : Διάγραμμα fourier για $U=9.8$ m/s με $f_i=257.324$ Hz.



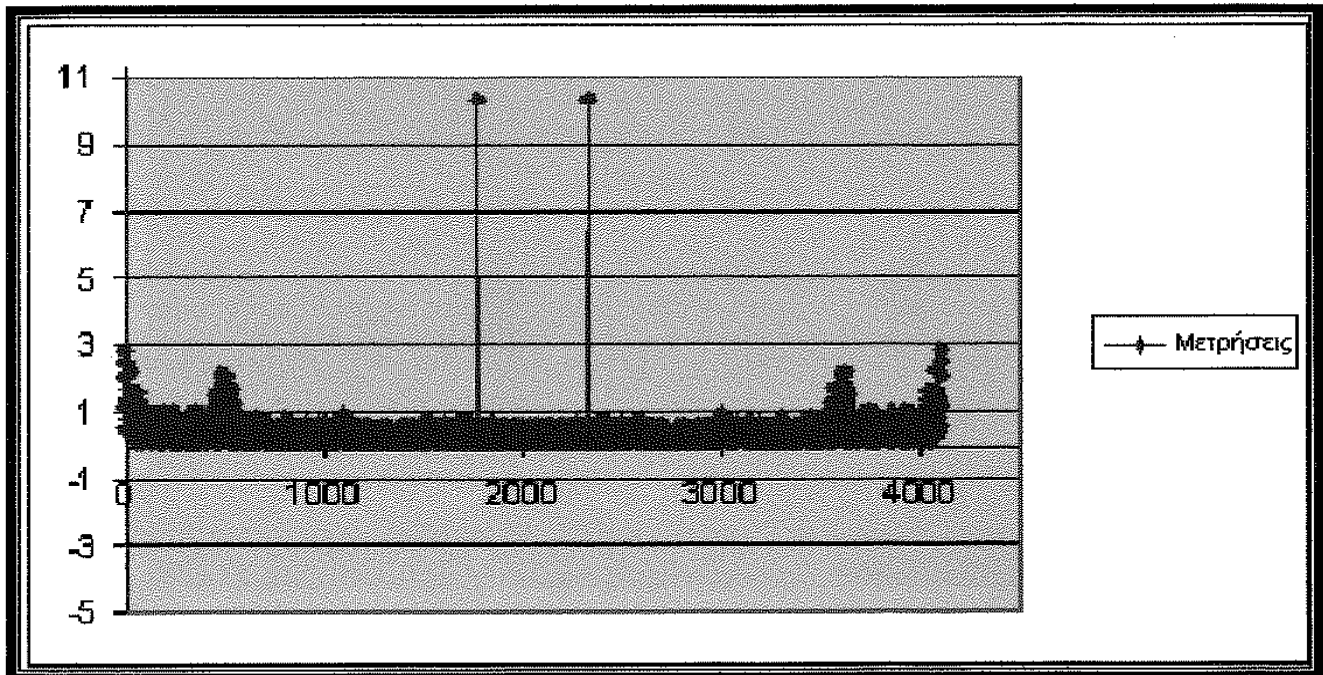
Σχήμα 3.37 : Διάγραμμα fourier για $U=9.4$ m/s με $f_1=228.515$ Hz.



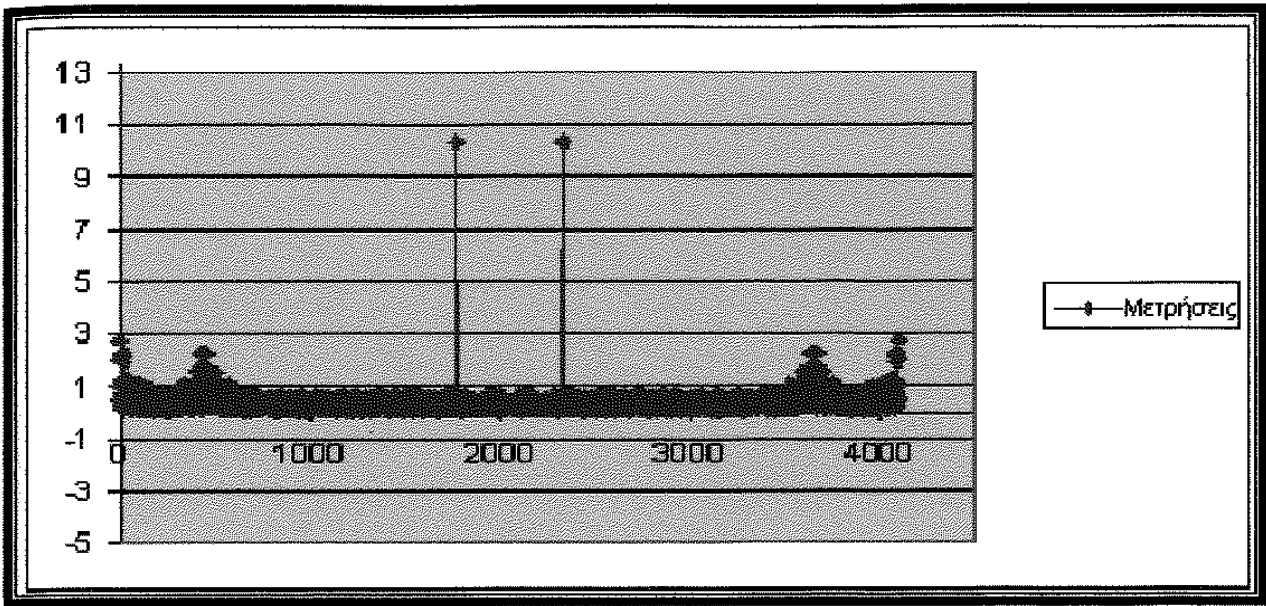
Σχήμα 3.38 : Διάγραμμα fourier για $U=8.7$ m/s με $f_1=83.497$ Hz.



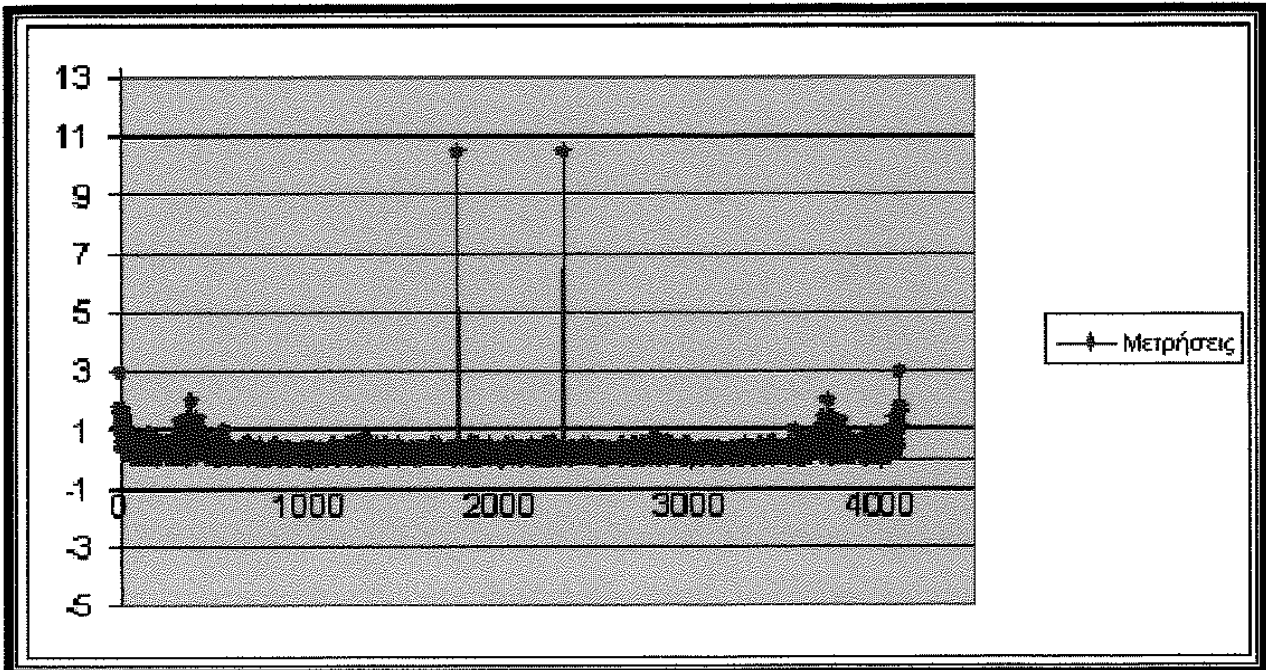
Σχήμα 3.39 : Διάγραμμα fourier για $U=7.9$ m/s με $f_i=39.795$ Hz.



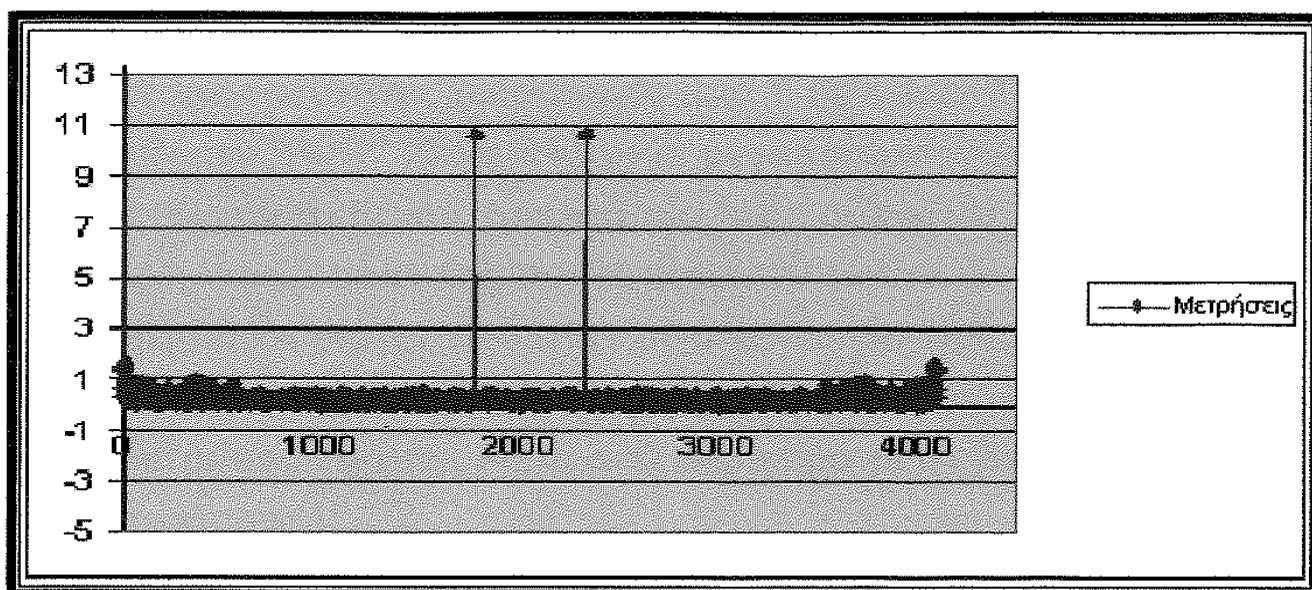
Σχήμα 3.40 : Διάγραμμα fourier για $U=7.1$ m/s με $f_i=67.38$ Hz.



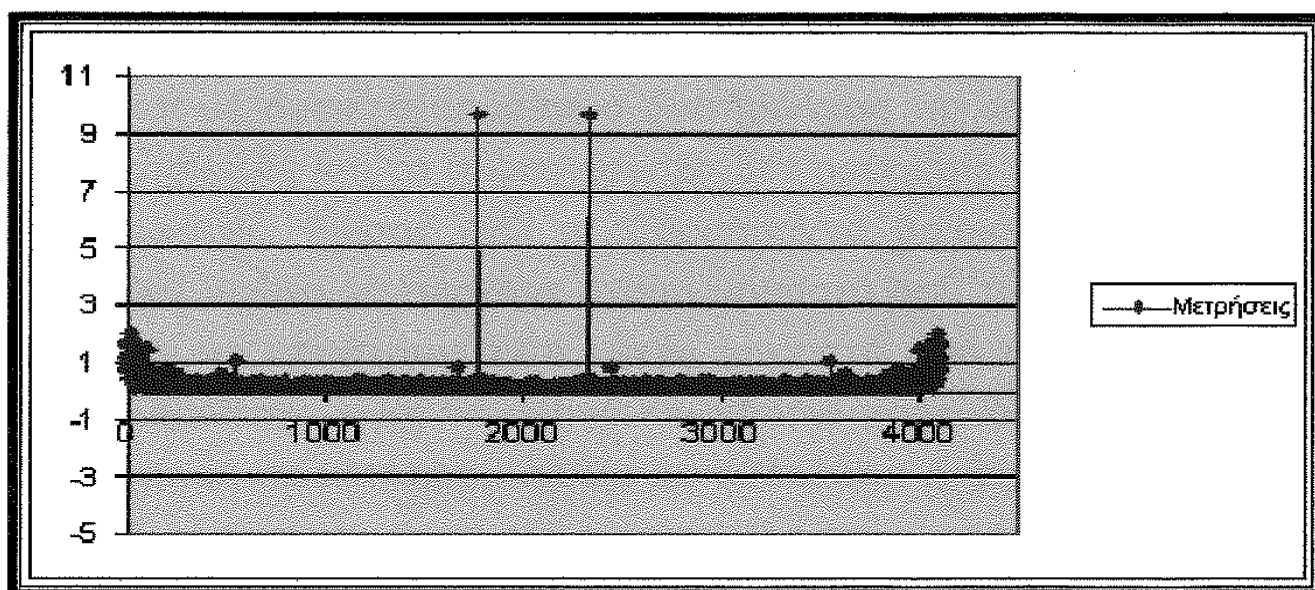
Σχήμα 3.41 : Διάγραμμα fourier για $U=6.4$ m/s με $f_i=67.38$ Hz.



Σχήμα 3.42 : Διάγραμμα fourier για $U=5.4$ m/s με $f_i=67.38$ Hz.



Σχήμα 3.43 : Διάγραμμα fourier για $U=4.6 \text{ m/s}$ με $f_i=67.38 \text{ Hz}$.



Σχήμα 3.44 : Διάγραμμα fourier για $U=2.5 \text{ m/s}$ με $f_i=67.38 \text{ Hz}$.

Από τα διαγράμματα fourier φαίνεται ότι για μεγάλες ταχύτητες το ανεμόμετρο θερμού νήματος μετρά συχνότητες που εισάγονται από κάποια άλλη αιτία και όχι μόνο από την τύρβη. Το γεγονός αυτό είναι που δίνει τα αποτελέσματα αυτά στις μεγάλες ταχύτητες. Τα αίτια αυτού του φαινομένου μπορεί να οφείλονται σε πολλούς λόγους. Για παράδειγμα, η παρουσία του σωλήνα pitot, ενδεχομένως να εισάγει διαταραχές τις

οποίες να μετρά το ανεμόμετρο θερμού νήματος. Από τα δεδομένα παρατηρείται ότι σε ταχύτητες μικρότερες από 7 m/s επανέρχεται η προηγούμενη συχνότητα $f_1=67.38$ Hz αλλά για μεγαλύτερες ταχύτητες εισάγονται υψηλής συχνότητας διαταραχές και στο φάσμα των συχνοτήτων υπάρχει πολλή ενέργεια και στις υπόλοιπες συχνότητες. Άλλωστε οι μετρήσεις με ανεμόμετρο θερμού νήματος δεν είναι αξιόπιστες για τιμές τύρβης πάνω από 25% περίπου, πράγμα το οποίο συμβαίνει στις υψηλές ταχύτητες όπως αποδεικνύεται από τα rms. Μετά από μια σειρά μετρήσεων προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

- Απαραίτητη είναι η διεξαγωγή των πειραματικών μετρήσεων διατηρώντας ανοικτά τα παράθυρα του εργαστηρίου, ώστε να γίνεται ανανέωση του αέρα και να μην αυξάνεται η θερμοκρασία στο χώρο. Βέβαια πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις και με κλειστά και με ανοικτά παράθυρα διατηρώντας τις υπόλοιπες συνθήκες σταθερές και τα αποτελέσματα δεν παρουσίασαν ουσιαστικές διαφορές. Επίσης ενώ η αεροσήραγγα βρίσκεται σε λειτουργία δεν πρέπει να περνάνε άτομα μπροστά από τους ρυθμιστές ούτε και να υπάρχουν αντικείμενα μπροστά από τους ρυθμιστές. Απαραίτητο είναι να περνά και κάποιο χρονικό διάστημα από μέτρηση σε μέτρηση, καθώς μεταβάλλεται η ταχύτητα ανοίγοντας ή κλείνοντας τους ρυθμιστές. Όλα τα παραπάνω εξασφαλίζουν κατά τη διάρκεια των μετρήσεων αδιατάρακτο περιβάλλον και αποκατεστημένη ροή μετά από μεταβολές ταχύτητας.
- Ο σωλήνας pitot ναι μεν εισάγει κάποιες διαταραχές λόγω του μεγέθους του, όπως παρουσιάζεται και στους παρακάτω πίνακες, όμως δεν είναι ιδιαίτερα σημαντικές. Άλλωστε η ύπαρξή του είναι απαραίτητη μόνο κατά τη διάρκεια της βαθμονόμησης. Κατά τη διάρκεια των πειραματικών μετρήσεων για παράδειγμα, για να βρει κανείς το προφίλ της ταχύτητας μέσα στην αερο-

σήραγγα ή για να μελετήσει τη ροή γύρω από κάποιο μοντέλο, δεν είναι απαραίτητη η παρουσία του pitot, εφόσον βέβαια έχει προηγηθεί η βαθμονόμηση του οργάνου. Στον πίνακα 3.3 και στον πίνακα 3.4 παρουσιάζονται οι μετρήσεις της τάσης και του rms value που έλαβαν χώρα, με και χωρίς την παρουσία του σωλήνα pitot. Η ταχύτητα ροής του αέρα μέσα στην αεροσήραγγα διατηρήθηκε η ίδια και το μετρητικό σύστημα παρέμεινε στην ίδια θέση και χωρίς την παρουσία του pitot. Συγκρίνοντας τις τιμές κανείς παρατηρεί μια μικρή πτώση τους όταν κατά τη διάρκεια της μέτρησης δεν υπάρχει ο σωλήνας pitot.

	ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ Ε ΜΕ ΡΙΤΟΤ	ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ Ε ΧΩΡΙΣ ΡΙΤΟΤ
ΜΕΤΡΗΣΗ 1 (U=16.3 m/s)	4,0169	4,0133
ΜΕΤΡΗΣΗ 2 (U=9.5 m/s)	3,985	3,9515
ΜΕΤΡΗΣΗ 3 (U=3.1 m/s)	3,4629	3,4462

Πίνακας 3.3 : Συγκριτικός πίνακας μετρήσεων της τάσης με και χωρίς την παρουσία pitot. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε θερμοκρασία $\theta=20.5^{\circ}\text{C}$, πίεση $p=1024\text{ mbar}$ και η αντίσταση του σύρματος $R=3.5\Omega$.

	ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ RMS VALUE ΜΕ ΡΙΤΟΤ	ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ RMS VALUE ΧΩΡΙΣ ΡΙΤΟΤ
ΜΕΤΡΗΣΗ 1 (U=16.3 m/s)	1,499	1,3556
ΜΕΤΡΗΣΗ 2 (U=9.5 m/s)	0,0141	0,0138
ΜΕΤΡΗΣΗ 3 (U=3.1 m/s)	0,0123	0,0122

Πίνακας 3.4 : Συγκριτικός πίνακας μετρήσεων του rms value με και χωρίς την παρουσία pitot.

- Υπάρχει η πιθανότητα το ανεμόμετρο θερμού νήματος να ταλαντώνεται λόγω του αέρα και αυτή η ταλάντωση να προσμετράται ενώ το όργανο παίρνει τη μέτρηση. Όμως και αυτή η πιθανότητα είναι μικρή καθώς έγιναν και μετρήσεις με ελάχιστο μήκος στηρίγματος μέσα στην αεροσήραγγα σφίγγοντας τα στηρίγματα και τραβώντας τα προς τα επάνω ώστε να προεξέχουν μόλις 2 cm. Απαραίτητη βέβαια είναι πάντοτε η σωστή στήριξη του οργάνου ώστε και να προστατεύεται αλλά και να αποφεύγονται τέτοια φαινόμενα ταλαντώσεων.
- Μικρές μεταβολές στη θερμοκρασία δεν επηρεάζουν τις μετρήσεις, όμως για μεγάλες μεταβολές της θερμοκρασίας αλλά και της πίεσης επιβάλλεται να γίνει πάνω από μια φορά βαθμονόμηση.
- Η λειτουργία της αεροσήραγγας για αρκετές ώρες συνεχόμενα οδηγεί σε αύξηση της θερμοκρασίας κατά ένα με δύο βαθμούς °C στο εργαστήριο, όμως και αυτό το γεγονός δεν επηρεάζει καθοριστικά τις μετρήσεις. Κατά τη διάρκεια των πειραματικών

μετρήσεων έγιναν μετρήσεις και μετά από πολύωρη συνεχή λειτουργία της αεροσήραγγας.

- Η ύπαρξη του μοντέλου μέσα στην αεροσήραγγα επίσης δεν έχει κάποιο ουσιαστικό ρόλο καθώς κατά την πρώτη βαθμονόμηση τα φαινόμενα αυτά δεν παρουσιάστηκαν. Αντίθετα εμφανίστηκαν και κατά τη διάρκεια μετρήσεων με τον νέο ανεμιστήρα, ενώ το μοντέλο ήταν εκτός της αεροσήραγγας, όπως θα φανεί και στη συνέχεια.

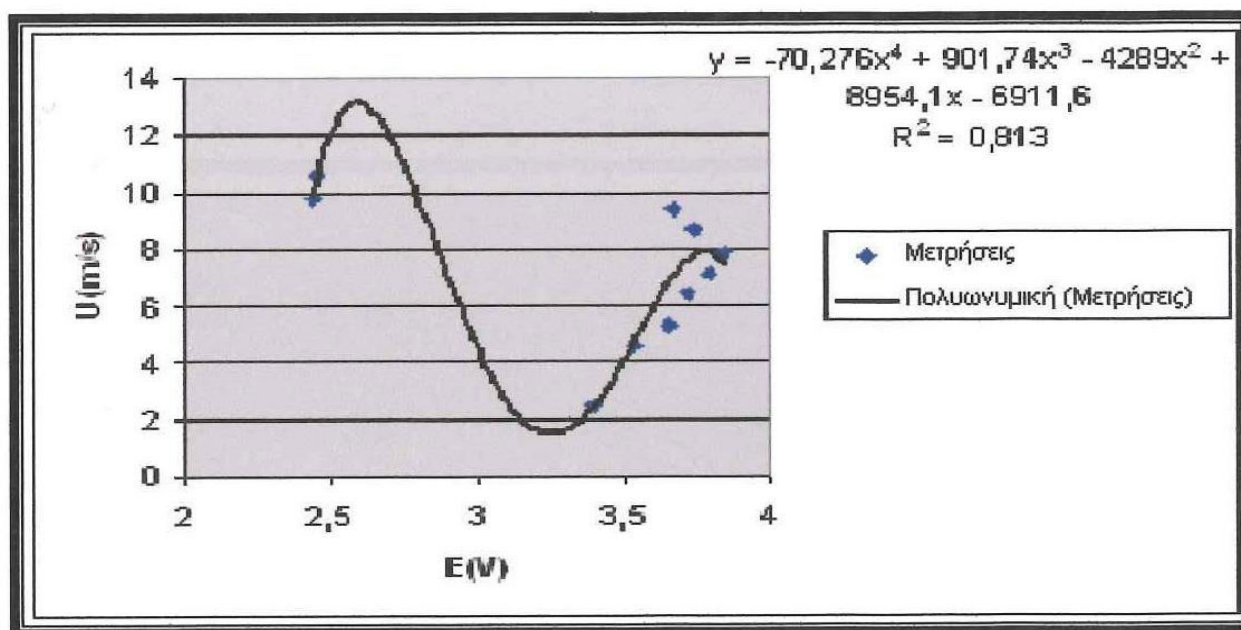
3.2.3 ΤΡΙΤΗ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ

Κατά την τρίτη βαθμονόμηση πάρθηκαν και πάλι 10 μετρήσεις, σε 10 διαφορετικές θέσεις μέσα στην αεροσήραγγα και για τις ίδιες 10 τιμές ταχύτητας του αέρα που διαρρέει την αεροσήραγγα, όπως και κατά τις δύο προηγούμενες βαθμονομήσεις. Όμως αυτή τη φορά το μοντέλο του κτιρίου δεν υπάρχει μέσα στην αεροσήραγγα, δηλαδή έγινε αφαίρεση του κατάντι εμποδίου που προκαλούσε πτώση πίεσης ώστε να διαπιστωθεί αν η παρουσία του δημιουργεί προβλήματα για τις μετρήσεις. Ακολουθούν και πάλι οι απαραίτητοι πίνακες και τα διαγράμματα. Ο πίνακας 3.5 περιέχει τις τιμές της τάσης που δόθηκαν από το ανεμόμετρο θερμού νήματος και της ταχύτητας που δόθηκαν από τον σωλήνα pitot.

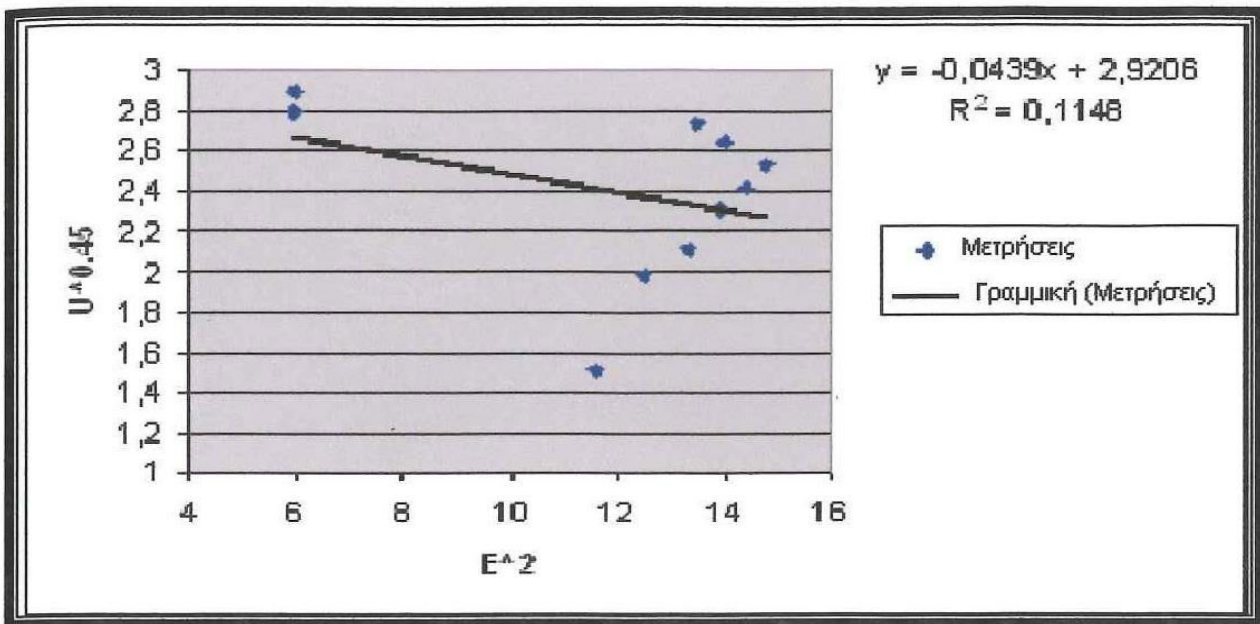
	ΤΑΣΗ	ΤΑΧΥΤΗΤΑ	E^2	$U^{0.45}$	RMS VALUE
ΜΕΤΡΗΣΗ 1	2.4523	10.6	6.01377529	2.893261176	3.2115
ΜΕΤΡΗΣΗ 2	2.4369	9.8	5.93848161	2.792876515	3.0715
ΜΕΤΡΗΣΗ 3	3.6717	9.4	13.48138089	2.740990524	0.9877
ΜΕΤΡΗΣΗ 4	3.7426	8.7	14.00705476	2.647181162	0.5783
ΜΕΤΡΗΣΗ 5	3.8447	7.9	14.78171809	2.534732837	0.4183
ΜΕΤΡΗΣΗ 6	3.7911	7.1	14.37243921	2.415829371	0.0096
ΜΕΤΡΗΣΗ 7	3.7285	6.4	13.90171225	2.305584205	0.0089
ΜΕΤΡΗΣΗ 8	3.6539	5.3	13.35098521	2.117991151	0.0067
ΜΕΤΡΗΣΗ 9	3.5324	4.6	12.47784976	1.987197464	0.0061
ΜΕΤΡΗΣΗ10	3.4021	2.5	11.57428441	1.510334016	0.0055

Πίνακας 3.5 : Μετρήσεις για την τρίτη βαθμονόμηση.

Στο σχήμα 3.45 και στο σχήμα 3.46 παρουσιάζονται τα δύο διαγράμματα.

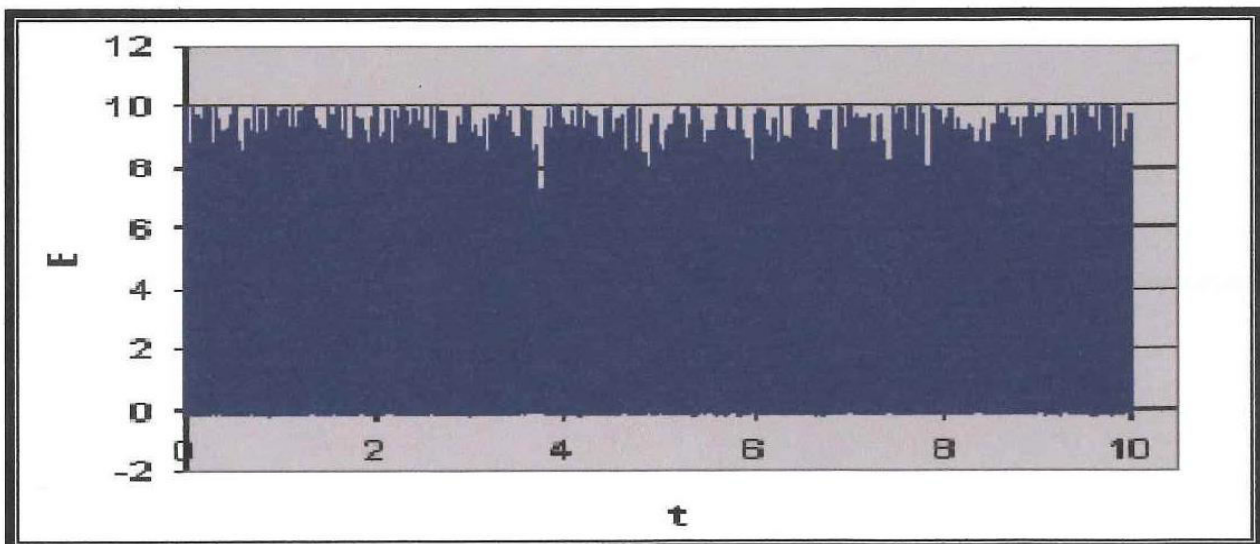


Σχήμα 3.45 : Διάγραμμα μεταξύ της τάσης και της ταχύτητας από το οποίο προκύπτει μια πολυωνυμική συνάρτηση τέταρτης τάξης (τρίτη βαθμονόμηση).

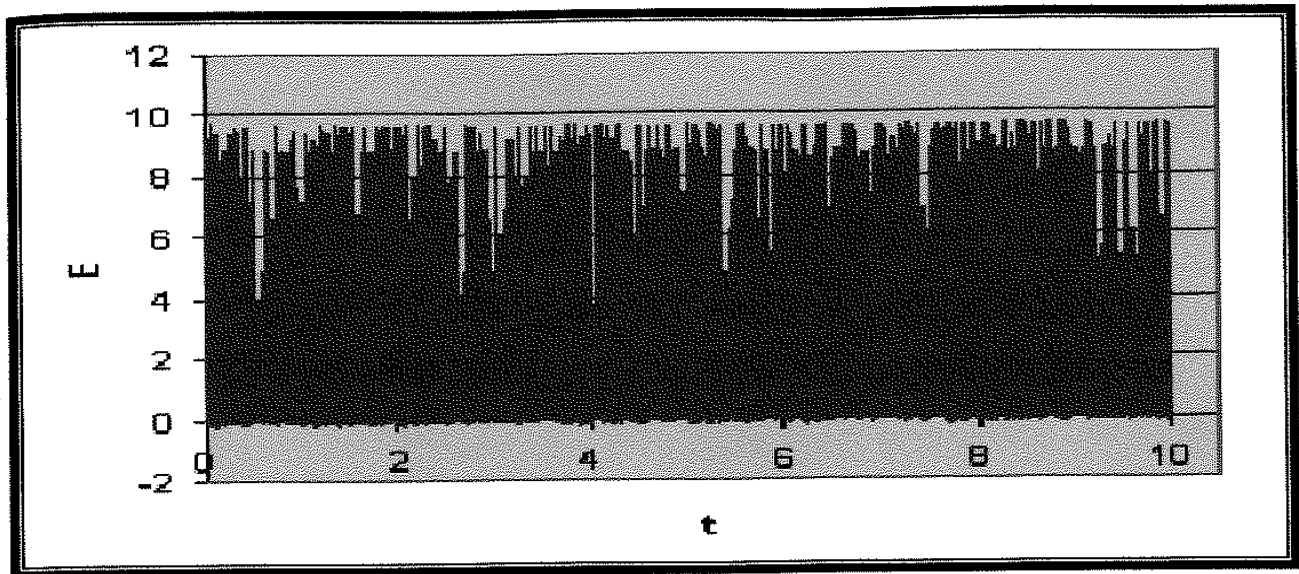


Σχήμα 3.46 : Διάγραμμα μεταξύ της τάσης υψωμένης στο τετράγωνο και της ταχύτητας υψωμένης στο 0.45 από το οποίο παίρνουμε μια γραμμική συνάρτηση (τρίτη βαθμονόμηση).

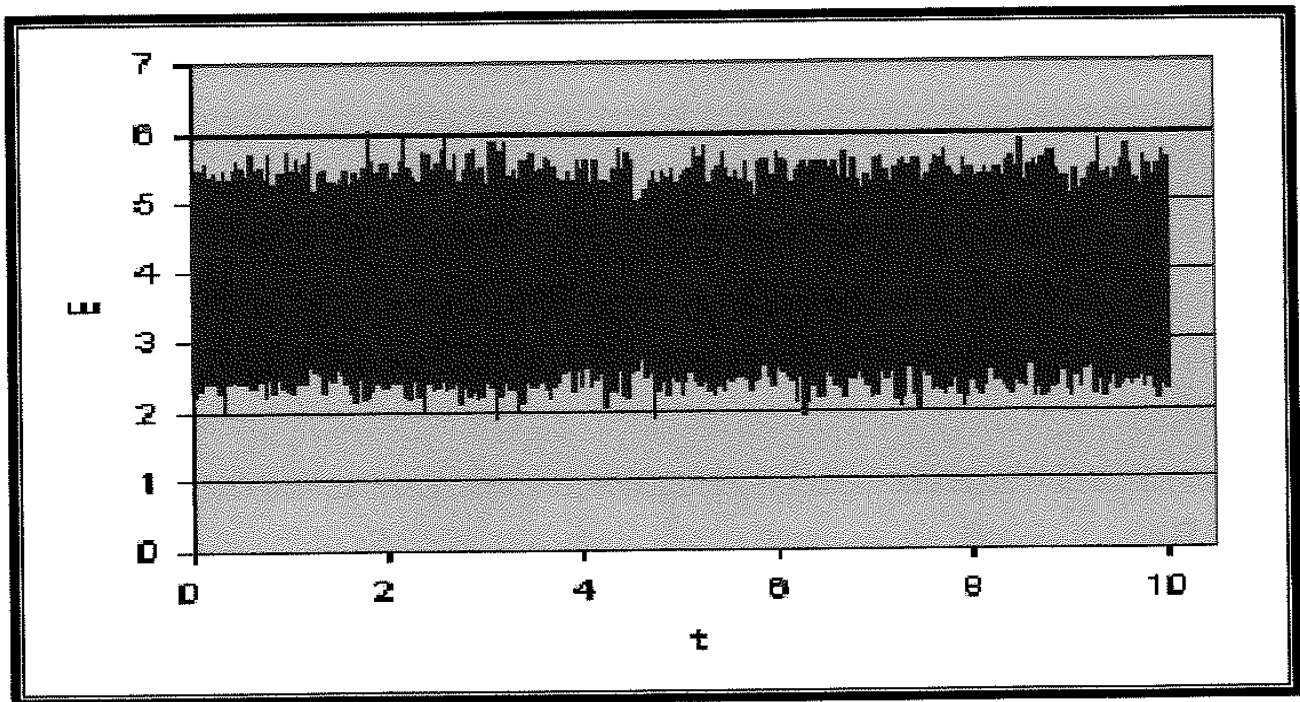
Στη συνέχεια παρουσιάζονται για κάθε μέτρηση ξεχωριστά τα διαγράμματα των χρονοσειρών (Σχήματα 3.47 έως 3.56). Για κάθε διάγραμμα ο χρόνος t μετράται σε δευτερόλεπτα (s) και η τάση E σε Volt (V).



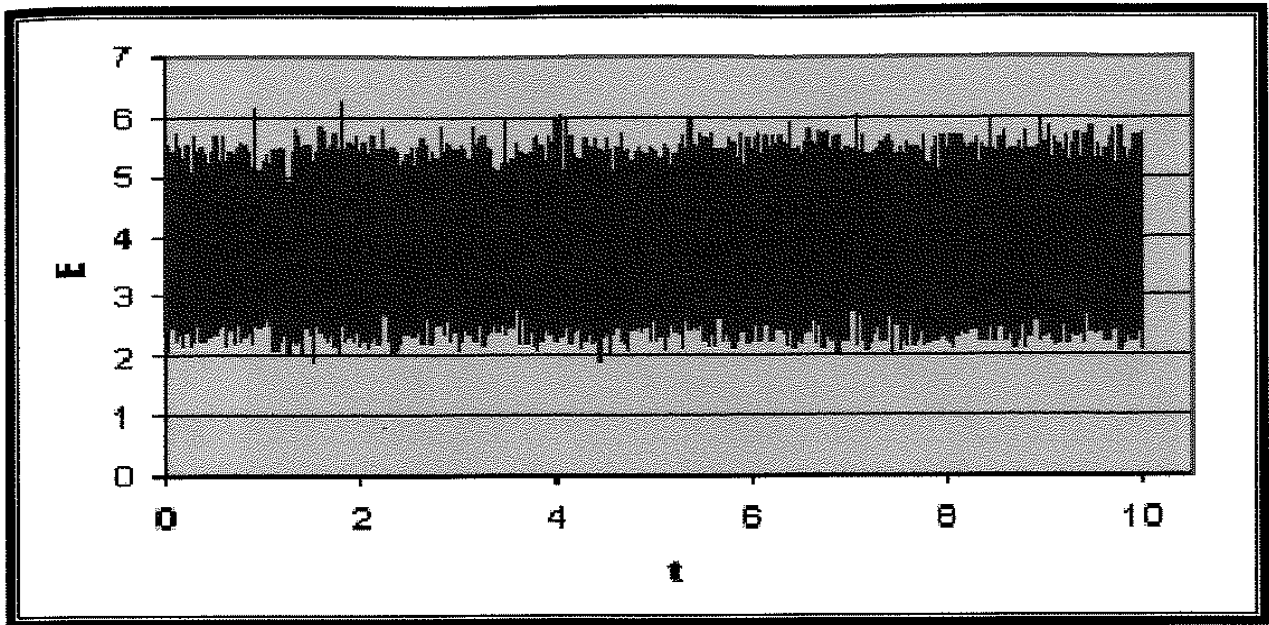
Σχήμα 3.47 : Χρονοσειρά για $U=10.6$ m/s.



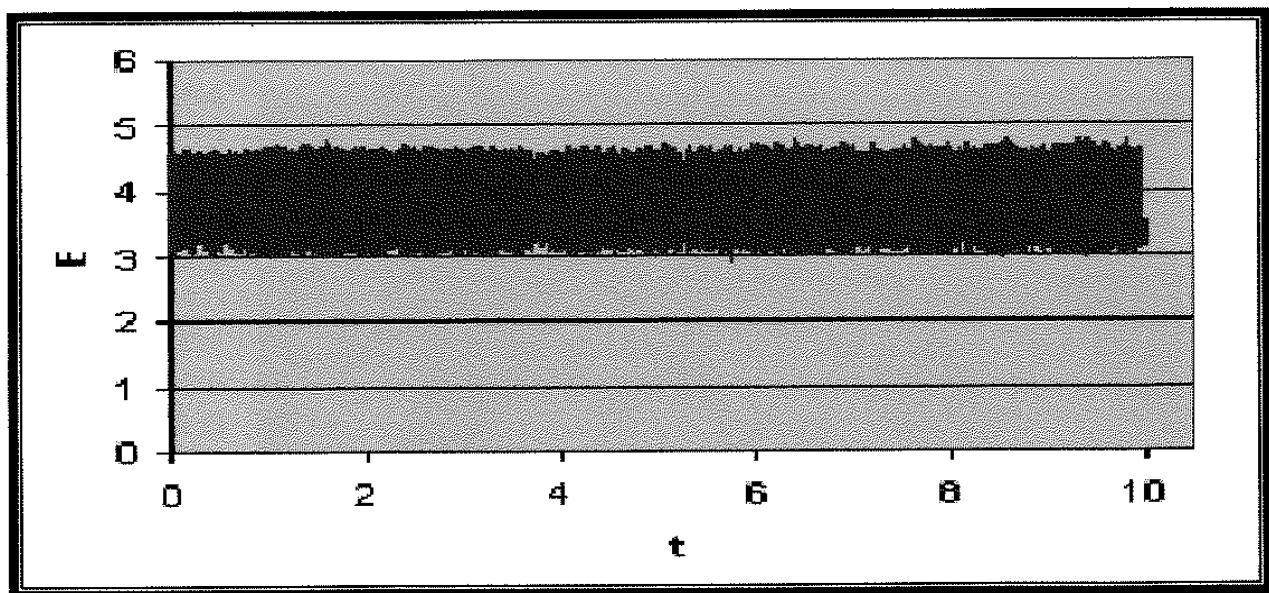
Σχήμα 3.48 : Χρονοσειρά για $U=9.8$ m/s.



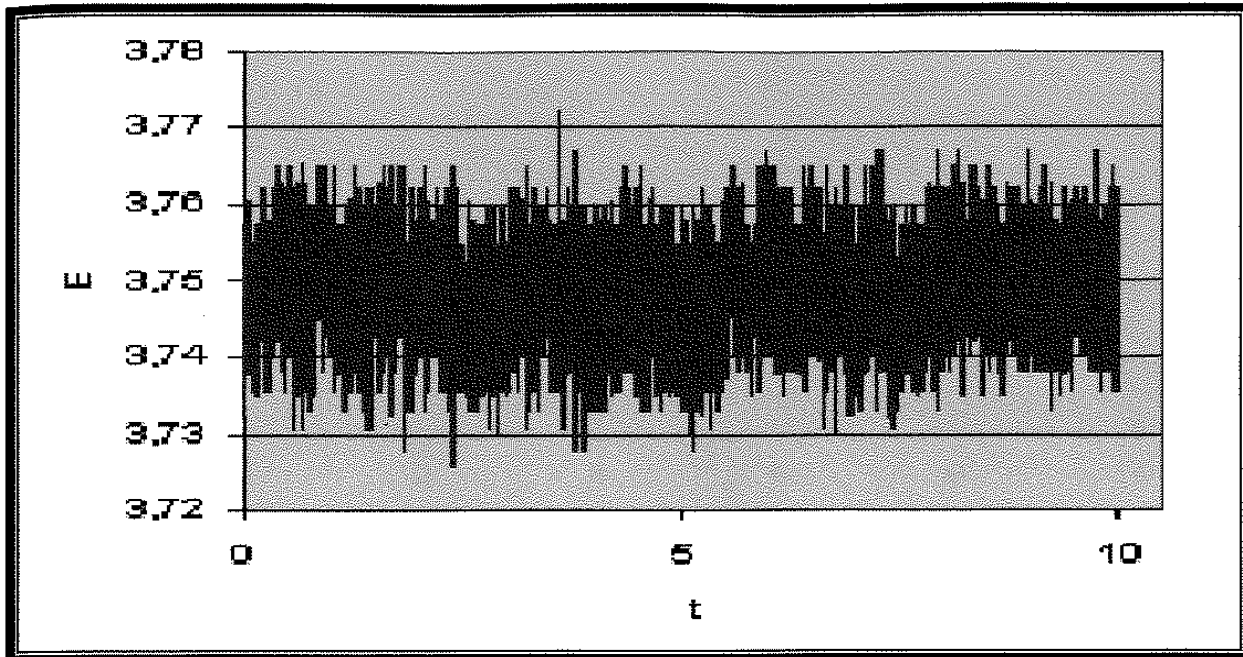
Σχήμα 3.49 : Χρονοσειρά για $U=9.4$ m/s.



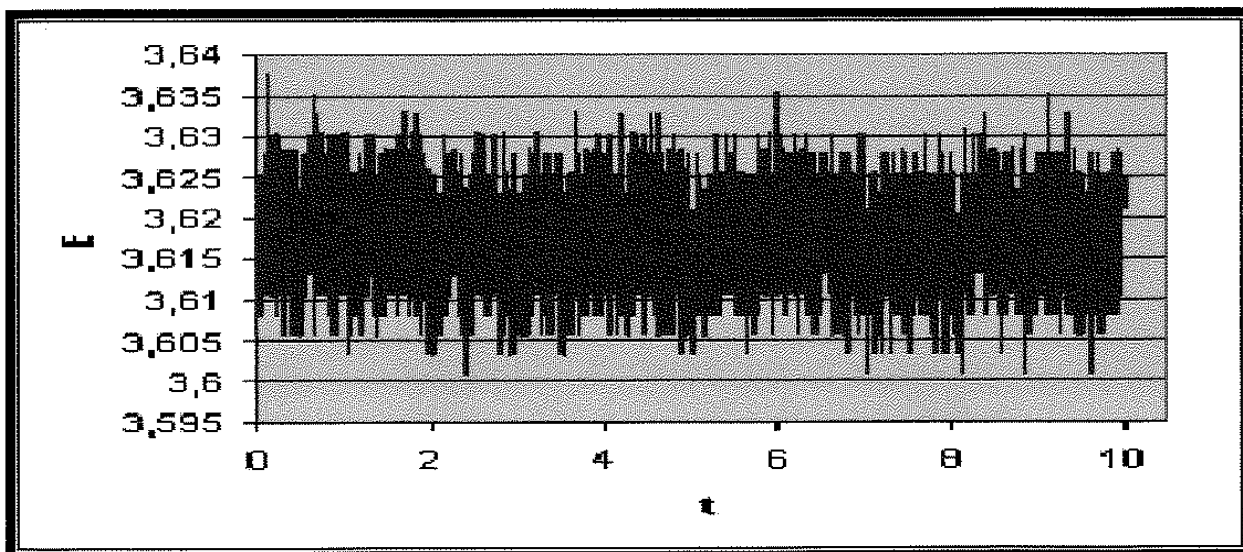
Σχήμα 3.50 : Χρονοσειρά για $U=8.7$ m/s.



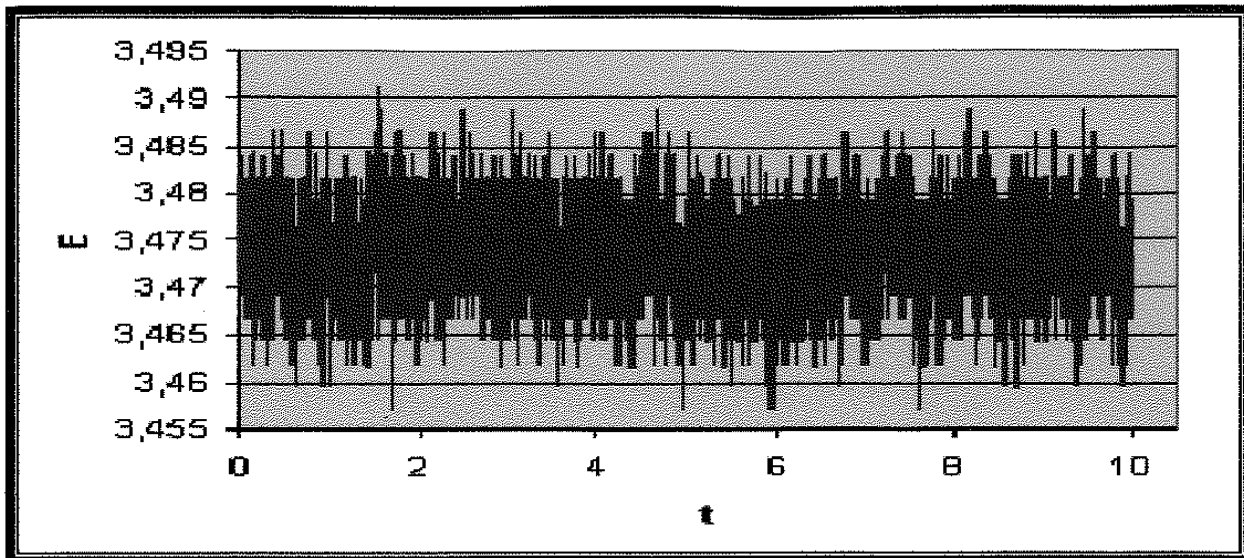
Σχήμα 3.51 : Χρονοσειρά για $U=7.9$ m/s.



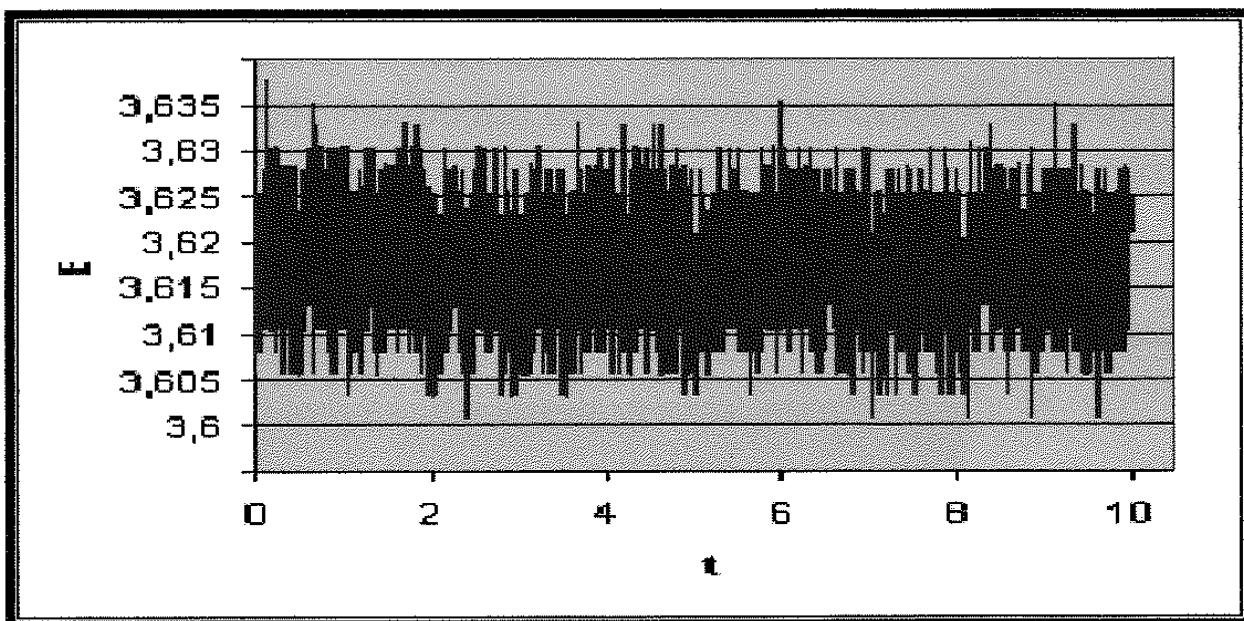
Σχήμα 3.52 : Χρονοσειρά για $U=7.1$ m/s.



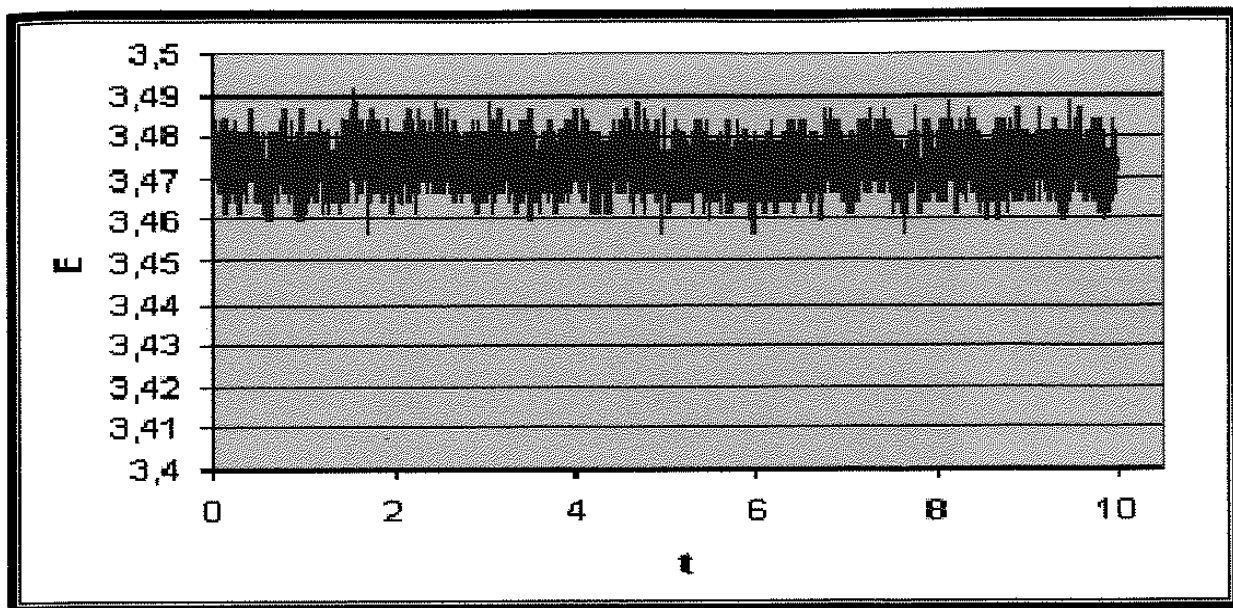
Σχήμα 3.53 : Χρονοσειρά για $U=6.4$ m/s.



Σχήμα 3.54 : Χρονοσειρά για $U=5.4$ m/s.

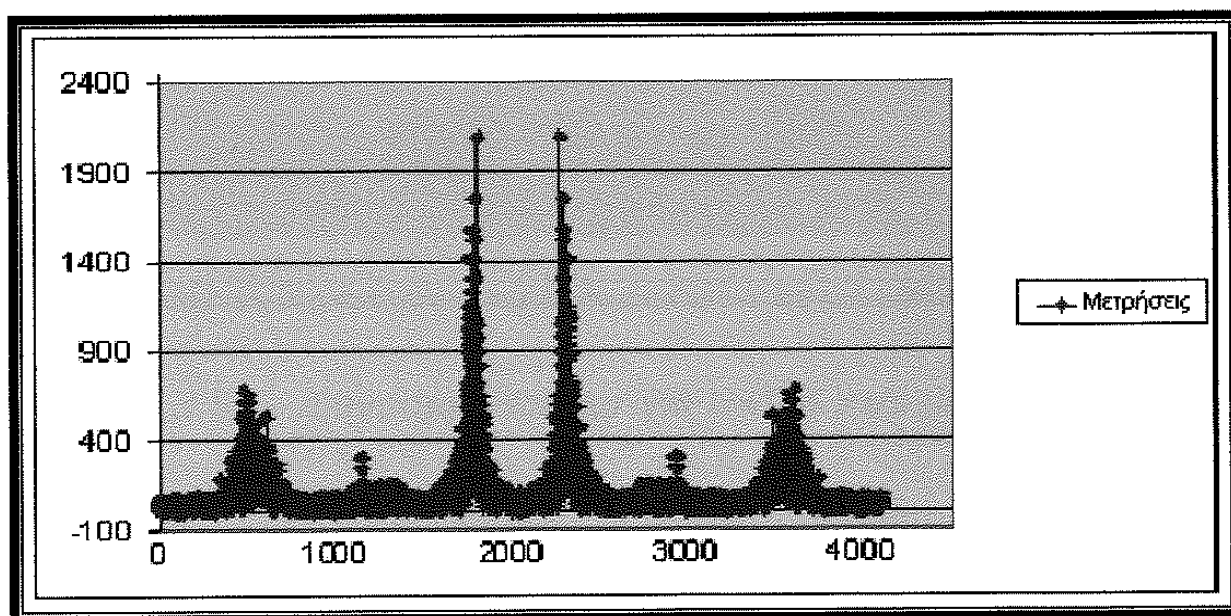


Σχήμα 3.55 : Χρονοσειρά για $U=4.6$ m/s.

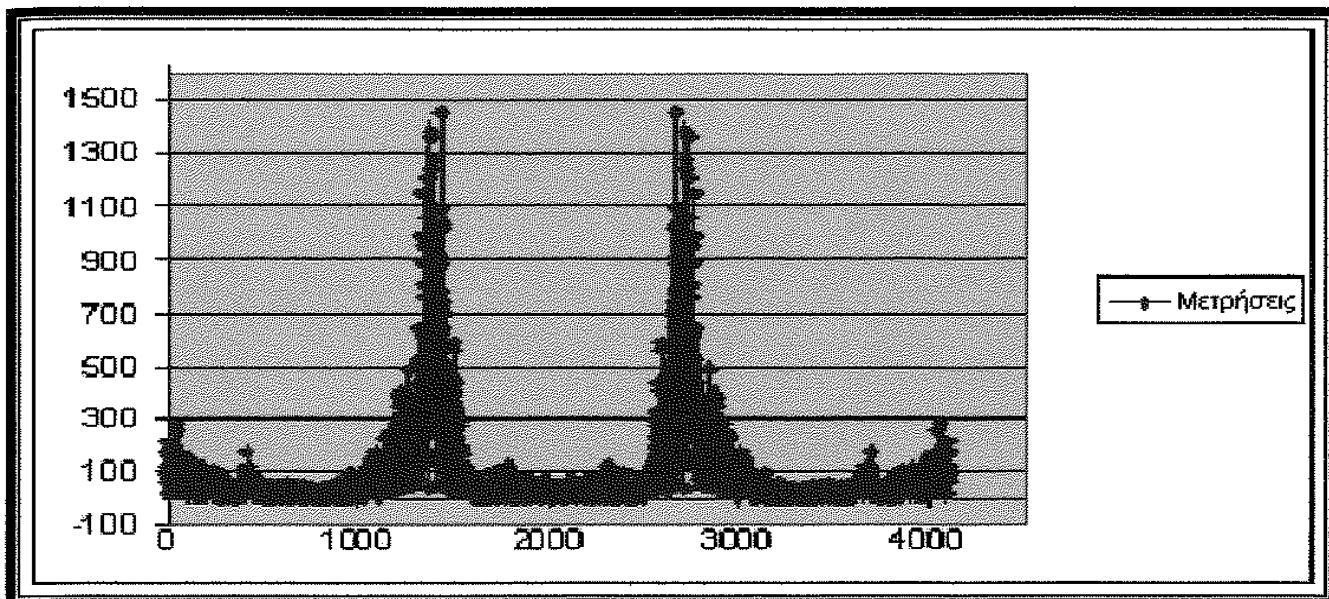


Σχήμα 3.56 : Χρονοσειρά για $U=2.5 \text{ m/s}$.

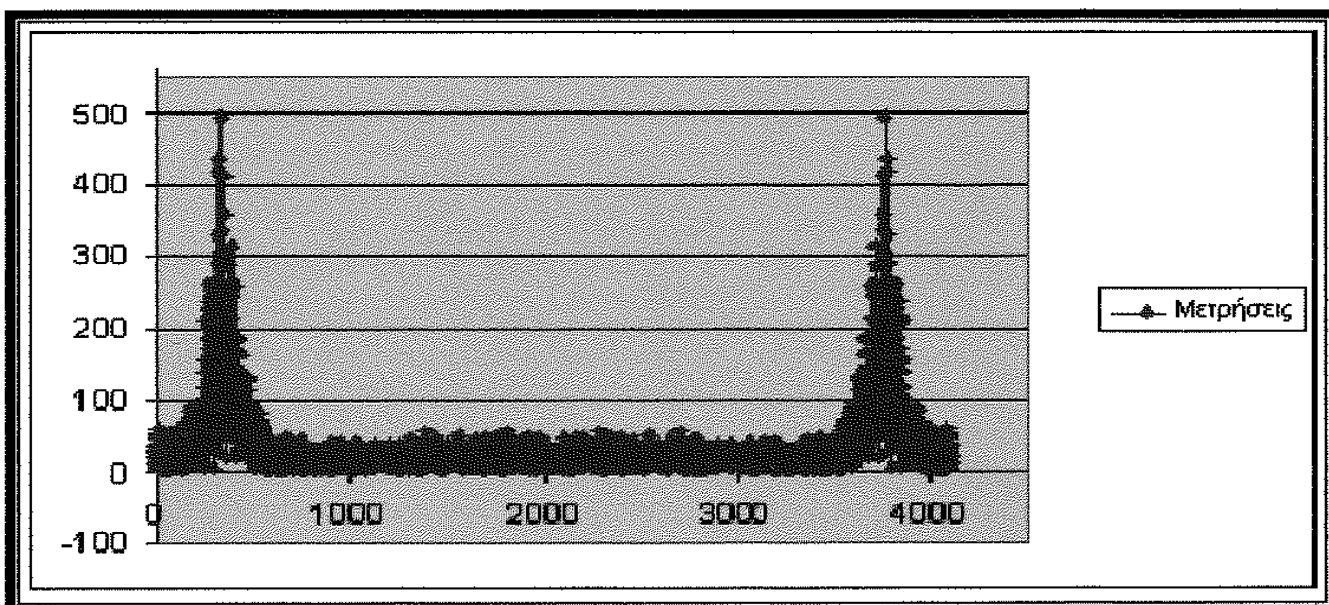
Ακολουθούν τα διαγράμματα της ανάλυσης fourier (Σχήματα 3.57 έως 3.66). Για κάθε διάγραμμα στον άξονα x υπάρχει η συχνότητα f που μετράται σε Hz, ενώ στον άξονα y υπάρχει το μέτρο του μιγαδικού αριθμού $|E|$ που προέκυψε από την ανάλυση fourier.



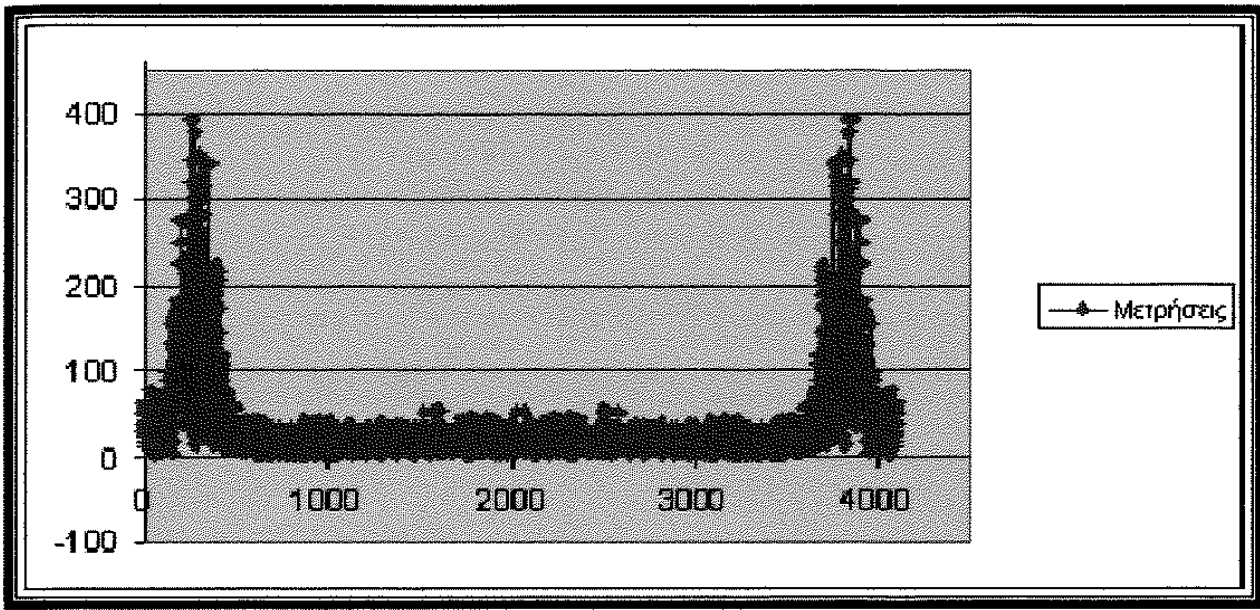
Σχήμα 3.57 : Διάγραμμα fourier για $U=10.6 \text{ m/s}$ με $f_i=245.384 \text{ Hz}$.



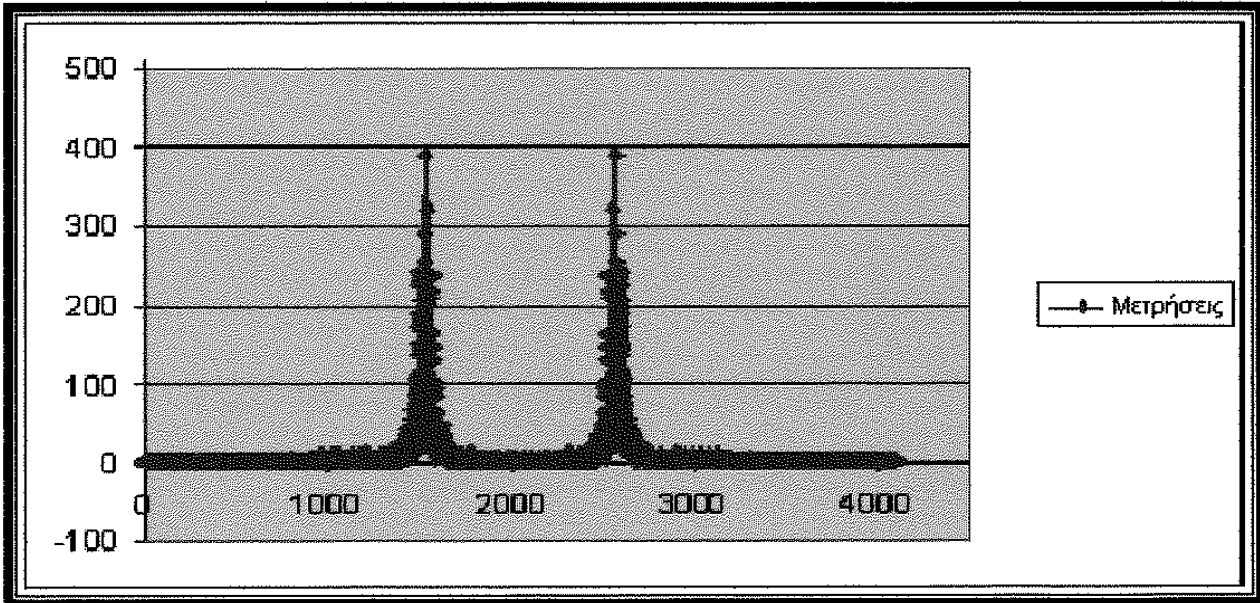
Σχήμα 3.58 : Διάγραμμα fourier για $U=9.8$ m/s με $f_i=150.39$ Hz.



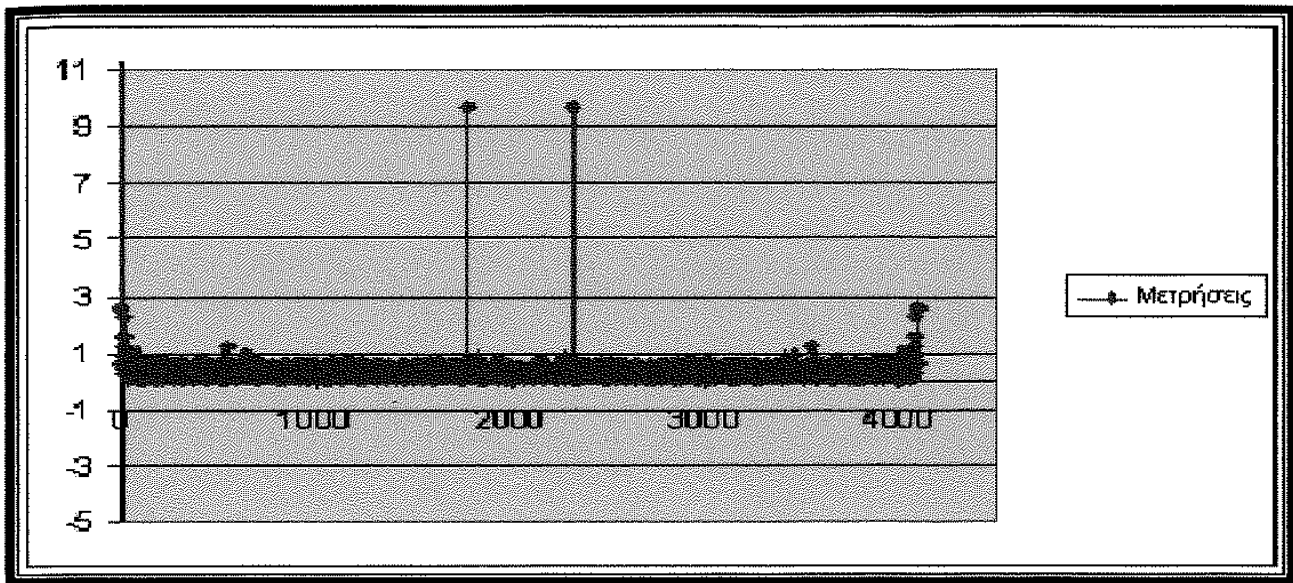
Σχήμα 3.59 : Διάγραμμα fourier για $U=9.4$ m/s με $f_i=418.7$ Hz.



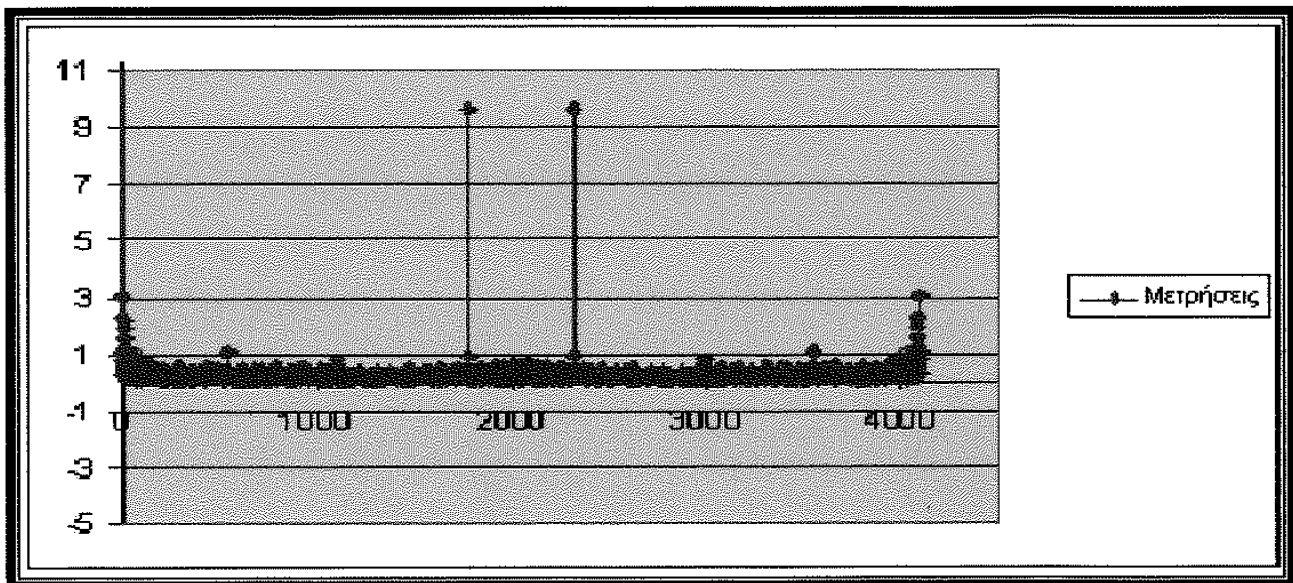
Σχήμα 3.60 : Διάγραμμα fourier για $U=8.7$ m/s με $f_i=440.918$ Hz.



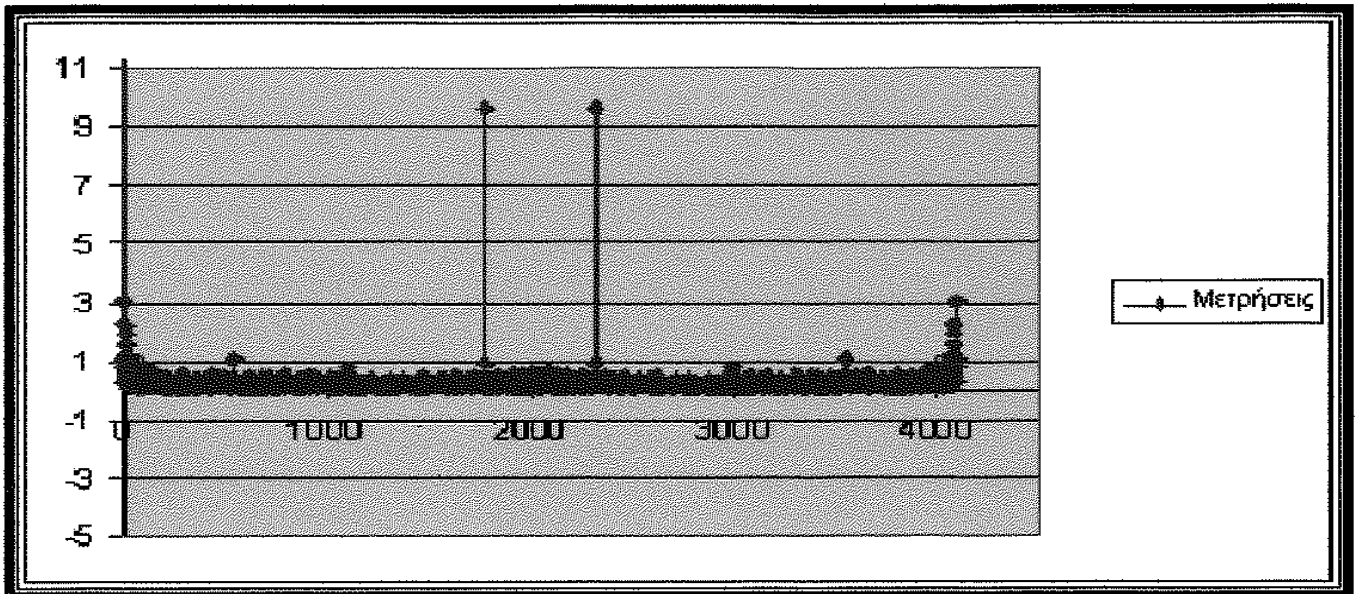
Σχήμα 3.61 : Διάγραμμα fourier για $U=7.9$ m/s με $f_i=127.929$ Hz.



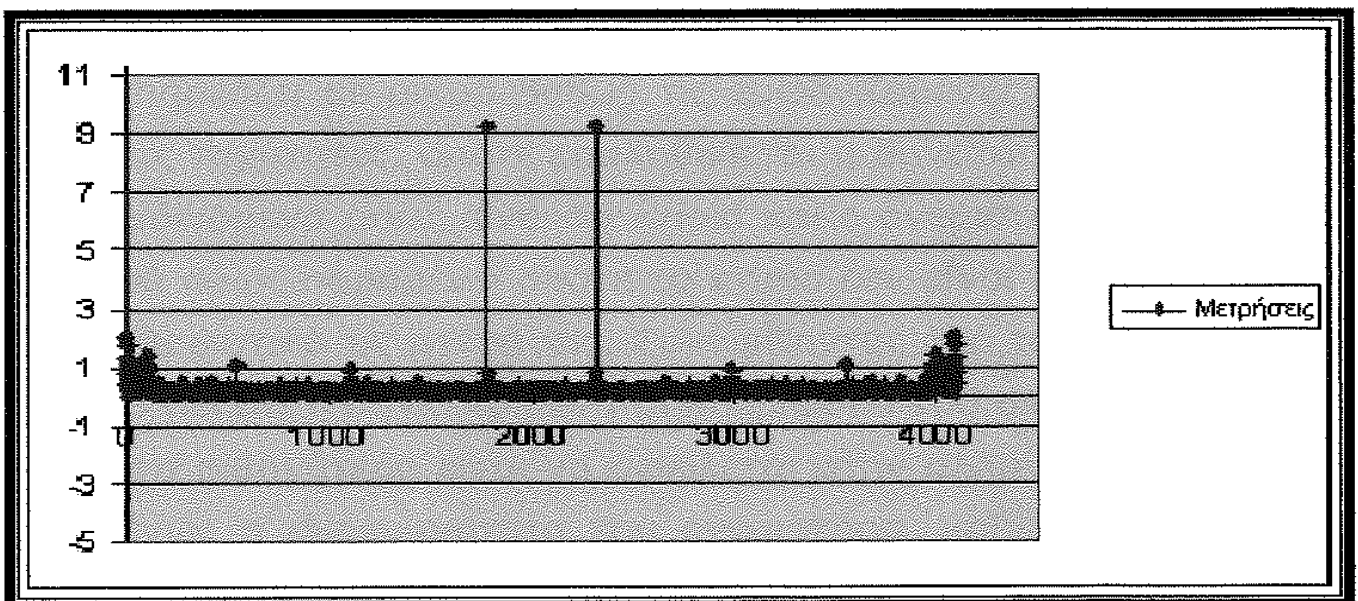
Σχήμα 3.62 : Διάγραμμα fourier για $U=7.1$ m/s με $f_i=67.38$ Hz.



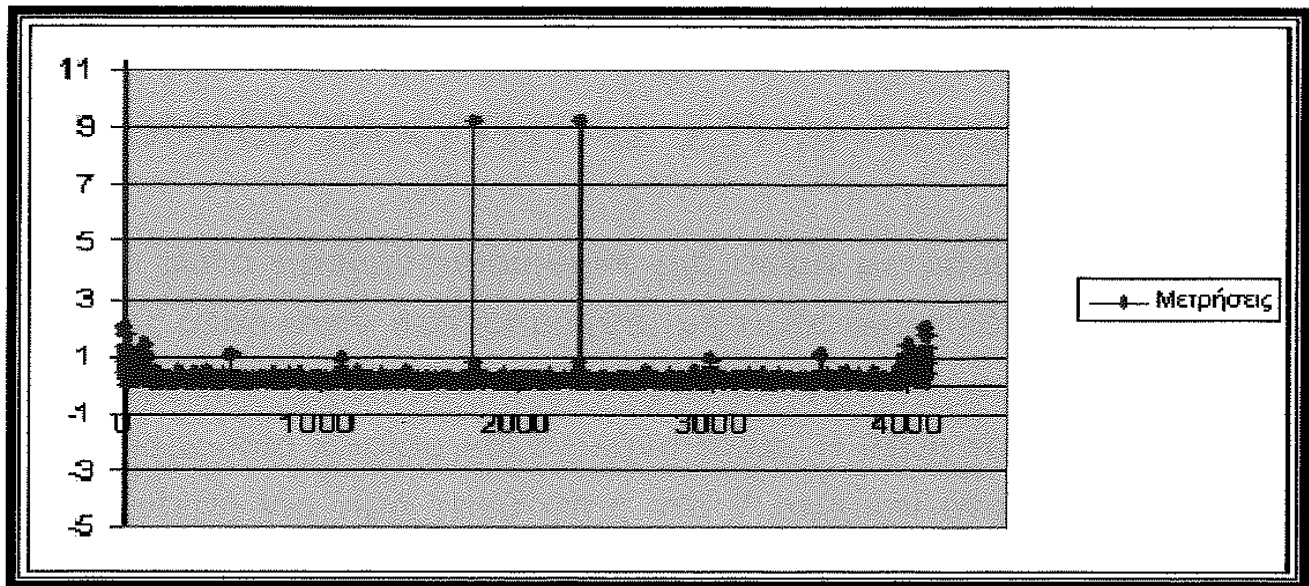
Σχήμα 3.63 : Διάγραμμα fourier για $U=6.4$ m/s με $f_i=67.38$ Hz.



Σχήμα 3.64 : Διάγραμμα fourier για $U=5.4 \text{ m/s}$ με $f_i=67.38 \text{ Hz}$.



Σχήμα 3.65 : Διάγραμμα fourier για $U=4.6 \text{ m/s}$ με $f_i=67.38 \text{ Hz}$.



Σχήμα 3.66 : Διάγραμμα fourier για $U=2.5 \text{ m/s}$ με $f_i=67.38 \text{ Hz}$.

Από τα αποτελέσματα μπορεί κανείς να παρατηρήσει ότι η παρουσία του κτιρίου επηρεάζει σε μικρό βαθμό τις εμφανιζόμενες συχνότητες, ειδικά σε μεγάλες ταχύτητες, οπότε επαληθεύεται η δυνατότητα επίδρασης από κατάντι φαινόμενα όπως είναι το κτίριο και ο ανεμιστήρας. Η γενική συμπεριφορά όμως παραμένει οπότε το κτίριο δεν είναι αυτό το οποίο επηρεάζει καθοριστικά τις μετρήσεις. Συνοψίζοντας όλα τα παραπάνω κανείς μπορεί να πει ότι η συγκεκριμένη συμπεριφορά του ανεμομέτρου θερμού νήματος το πιθανότερο είναι να οφείλεται στην αλλαγή του ανεμιστήρα. Ενδεχομένως η ιδιοσυχνότητα του ανεμιστήρα, καθώς αυτός περιστρέφεται, να προσμετράται από το ανεμόμετρο θερμού νήματος και αυτό να δίνει λανθασμένα αποτελέσματα όταν η ταχύτητα του αέρα μέσα στην αεροσήραγγα έχει αυξημένη τιμή. Πιθανότατα όμως θα μπορούσε να οφείλεται και σε κάποια ζημία του αισθητήρα η οποία δεν μπορεί να γίνει αντιληπτή ή ακόμα και σε ταλαντώσεις ολόκληρου του συστήματος της αεροσήραγγας. Σε κάθε περίπτωση όμως η μη φυσιολογική συμπεριφορά της τάσης σε σχέση με την ταχύτητα αποδίδεται όταν οι τιμές της τύρβης είναι μεγάλες.

3.3 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΣΤΗΝ ΑΕΡΟΣΗΡΑΓΓΑ

Παρ' όλα αυτά πραγματοποιήθηκε μια σειρά μετρήσεων για τη διανομή ταχύτητας μέσα στην αεροσήραγγα, με τιμές όμως κάτω από 7 m/s όπου η συμπεριφορά του οργάνου είναι φυσιολογική. Οι μετρήσεις έγιναν χωρίς την παρουσία κτιρίου και σωλήνα pitot. Η θέση των ρυθμιστών παρέμεινε σταθερή για τιμή ταχύτητας στα 7 m/s και στα 4 m/s στο κέντρο της αεροσήραγγας. Πριν από όλα όμως πραγματοποιήθηκε όπως πάντα η βαθμονόμηση του οργάνου για τις συνθήκες εκείνης της ημέρας που έγιναν οι μετρήσεις. Σε ένα πεδίο ροής αγωγού, όπου ρέει ρευστό μιας φάσης, αέρας στην περίπτωση των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν, οι δυνάμεις που επηρεάζουν τη ροή είναι οι δυνάμεις της πίεσης, του ιξώδους και οι δυνάμεις αδράνειας. Υπάρχουν τρεις δυνατοί συνδιασμοί των παραπάνω δυνάμεων, αλλά στην πράξη χρησιμοποιείται για αυτές τις περιπτώσεις ο λόγος των:

δυνάμεων αδράνειας / δυνάμεις ιξώδους

που είναι ανάλογος του λόγου:

$$\frac{\rho \cdot l^2 u^2}{\mu \cdot ul} = \frac{\rho \cdot ul}{\mu}$$

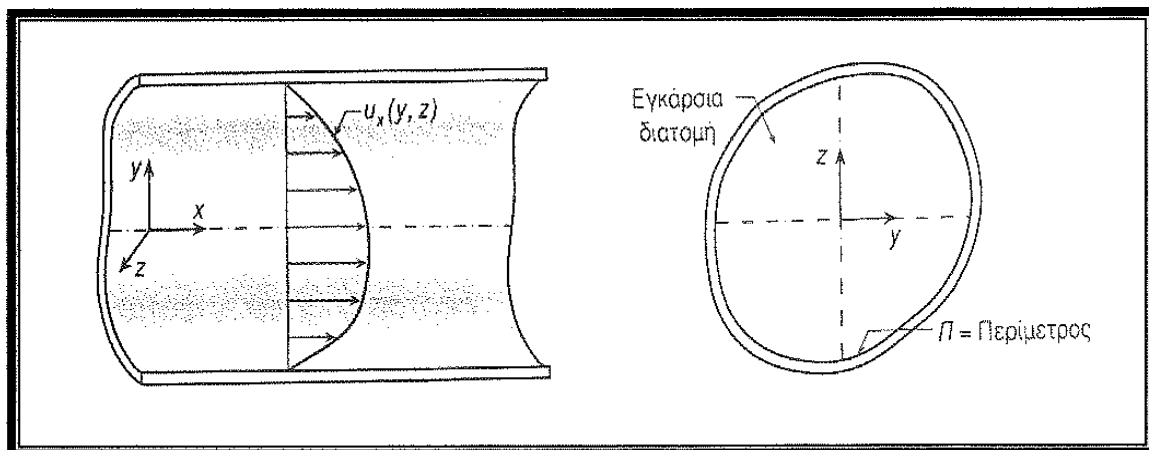
Ο λόγος $Re = \rho \cdot lu / \mu$ λέγεται αριθμός Reynolds.

3.3.1 ΡΟΗ ΣΕ ΑΓΩΓΟ ΜΗ ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ

Η ροή των ρευστών σε αγωγούς μη κυκλικής διατομής εξαρτάται στις λεπτομέρειές του από την ακριβή μορφή της εγκάρσιας διατομής του αγωγού. Η ανάλυση της πλήρως ανεπτυγμένης ροής σε έναν αγωγό

μη κυκλικής διατομής είναι παρόμοια με τη ροή σε κυκλικό αγωγό, αλλά ο μαθηματικός χειρισμός των σχέσεων που διέπουν την πρώτη ροή είναι πολύ πιο δύσκολος. Για στρωτή ροή σε αγωγούς μη κυκλικής διατομής, οι διαφορικές εξισώσεις συνεχείας και κίνησης μπορεί να λυθούν με ακρίβεια, κάτι που δεν μπορεί να γίνει στην περίπτωση της τυρβώδους ροής. Για την αντιμετώπιση προβλημάτων τυρβώδους ροής, μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ικανοποιητικά αποτελέσματα η λογαριθμική εξίσωση κατανομής της ταχύτητας ή η υδραυλική διάμετρος του αγωγού.

Για έναν αγωγό μη κυκλικής διατομής, η διατμητική τάση που αναπτύσσεται στο τοίχωμα του αγωγού δε θα έχει την ίδια τιμή κατά μήκος της περιμέτρου Π της εγκάρσιας διατομής A . Αυτό συμβαίνει, επειδή η κατανομή της ταχύτητας u_x του ρευστού στη διατομή A είναι συνάρτηση και των δύο μεταβλητών y και z όπως μπορεί κανείς να παρατηρήσει και στο σχήμα 3.67.



Σχήμα 3.67 : Πλήρως αναπτυγμένη ροή σε αγωγό μη κυκλικής διατομής.

Επίσης, η εγκάρσια διατομή, A , του αγωγού δεν είναι ίση με $\pi \cdot R^2$ ούτε η περίμετρος, Π , ίση με $2\pi \cdot R$ όπως συμβαίνει με έναν κυκλικό αγωγό ακτίνας R . Έτσι, η x -συνιστώσα της εξίσωσης της ορμής λαμβάνει τη μορφή:

$$(p_1 - p_2)A - gA(z_2 - z_1) - \bar{\tau}_w \Pi \ell = 0 \quad (3.1)$$

όπου :

p : η πίεση

A : η εγκάρσια διατομή του αγωγού

Π : η περίμετρος

z : η υψομετρική διαφορά

ℓ : το μήκος του αγωγού

$\bar{\tau}_w$: η μέση τιμή των διατμητικών τάσεων που ενεργούν κατά μήκος της περιμέτρου Π .

Επίσης ισχύει ότι:

$$h_f = \frac{\bar{\tau}_w \ell}{g \cdot (A/\Pi)} \quad (3.2)$$

Για τον υπολογισμό της πτώσης πίεσης σε αγωγούς μη κυκλικής διατομής μπορεί κανείς να χρησιμοποιήσει τις σχέσεις και τα διαγράμματα που αντιστοιχούν σε κυκλικούς αγωγούς. Ένας αγωγός μη κυκλικής διατομής λέγεται ότι έχει υδραυλική ακτίνα, R_h , η οποία ορίζεται από τη γενική σχέση:

$$R_h = \frac{A}{\Pi} \quad (3.3)$$

όπου A είναι το βρεχόμενο εμβαδόν και Π η βρεχόμενη περίμετρος της εγκάρσιας διατομής του αγωγού. Προφανώς, ο όρος «βρεχόμενο εμ-

βαδόν» σχετίζεται με ροή υγρών σε αγωγούς όπου εμφανίζεται ελεύθερη επιφάνεια (για παράδειγμα σε ανοικτά κανάλια). Το μη βρεχόμενο τμήμα της περιμέτρου δε συμμετέχει στην ανάπτυξη τριβής με τα τοιχώματα του αγωγού, συνεπώς, το τμήμα αυτό δεν μπορεί να περιληφθεί στον όρο που εκφράζει τις δυνάμεις τριβής. Για τα αέρια στην εξίσωση (3.3) εισέρχεται το εμβαδόν ολόκληρης της διατομής του αγωγού και, βέβαια, ολόκληρο το μήκος της περιμέτρου της. Αν στην εξίσωση (3.2) αντικατασταθεί ο λόγος A/Π με την ακτίνα R_h του αγωγού, προκύπτει η σχέση:

$$h_f = \frac{\bar{\tau}_w \cdot \ell}{g \cdot R_h} \quad (3.4)$$

Επίσης μπορεί να οριστεί ο συντελεστής τριβής f αγωγού μη κυκλικής διατομής ως συνάρτηση της μέσης διατμητικής τάσης $\bar{\tau}_w$, της πυκνότητας ρ και της μέσης ταχύτητας u του ρευστού στον αγωγό:

$$f = \frac{8 \cdot \bar{\tau}_w}{\rho \cdot u^2} \quad (3.5)$$

Απαλείφοντας την τάση $\bar{\tau}_w$ από τις δύο τελευταίες εξισώσεις (3.4) και (3.5), προκύπτει:

$$h_f = f \frac{\ell}{4R_h} \frac{u^2}{2g} \quad (3.6)$$

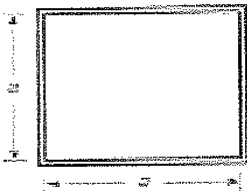
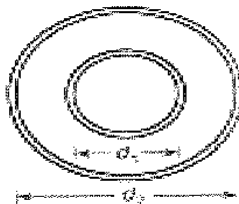
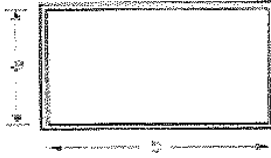
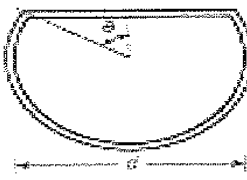
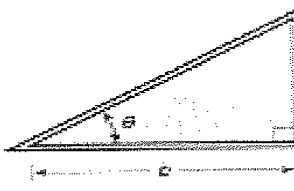
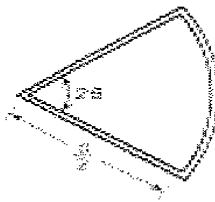
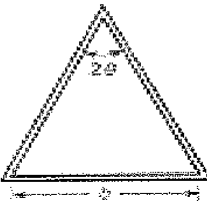
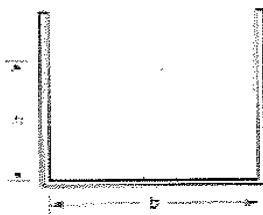
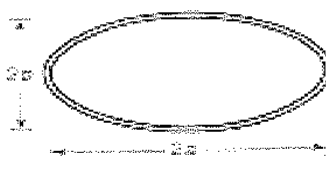
όπου το τετραπλάσιο της υδραυλικής ακτίνας ονομάζεται υδραυλική διάμετρος, δηλαδή ισχύει:

$$d_h = 4R_h \quad (3.7)$$

Για αγωγό κυκλικής διατομής d , η εξίσωση (3.7) γράφεται:

$$d_h = 4(A/\Pi) = 4[(\pi \cdot d^2 / 4) / (\pi \cdot d)] = d \quad (3.8)$$

δηλαδή, όπως αναμενόταν, η υδραυλική διάμετρος κυκλικού αγωγού είναι ίση με την εσωτερική του διάμετρο. Στον πίνακα 3.6 δίνεται η υδραυλική διάμετρος διαφόρων αγωγών μη κυκλικής διατομής.

Τετράγωνο	Ομόκεντρος Λακτώλης	Ορθογώνιο
		
$d_h = a$	$d_h = d_2 - d_1$	$d_h = \frac{2bh}{b+h}$
Κυκλικό Τμήμα	Ορθογώνιο Τρίγωνο	Κυκλικός Τομέας
		
$d_h = d \left[1 - \frac{\sin(2\theta)}{2(\pi - \theta)} \right]$	$d_h = \frac{2b \sin \theta}{(1 + \sin \theta + \cos \theta)}$	$d_h = \frac{\theta}{1 + \theta} \cdot d$
Ισοσκελές Τρίγωνο	Ορθογώνιακό Κιανάλι	Ελλειψη
		
$d_h = \frac{b \cos \theta}{1 + \sin \theta}$	$d_h = \frac{4bh}{b + 2h}$	$d_h = \frac{4ab}{\sqrt{2(a^2 + b^2)}}$

Πίνακας 3.6 : Υδραυλική διάμετρος αγωγών μη κυκλικής διατομής.

Για τετραγωνικό αγωγό, όπως φαίνεται και στον πίνακα 3.6, ισχύει ότι $d_h = a$. Πραγματικά αντικαθιστώντας στην εξίσωση (3.3) προκύπτει:

$$d_h = 4(A/\Pi) = 4[(a^2)/(4 \cdot a)] = a$$

Η εξίσωση (3.6), σε συνδυασμό και με την εξίσωση (3.7), γράφεται:

$$h_f = f \frac{\ell}{d_h} \frac{u^2}{2g} \quad (3.9)$$

σχέση που ισχύει τόσο για στρωτή όσο και για τυρβώδη ροή, ανεξάρτητα από τη γεωμετρία του αγωγού.

Για ροή σε αγωγούς μη κυκλικής διατομής, ο αριθμός Reynolds της ροής υπολογίζεται με βάση την υδραυλική διάμετρο του αγωγού και παριστάνεται με το σύμβολο Re_h , δηλαδή:

$$Re_h = \frac{ud_h}{\nu} \quad (3.10)$$

Για στρωτή ροή ($Re_h < 2000$), η εξίσωση υπολογισμού του συντελεστή τριβής των αγωγών μη κυκλικής διατομής μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$f = \frac{C}{Re_h} \quad (3.11)$$

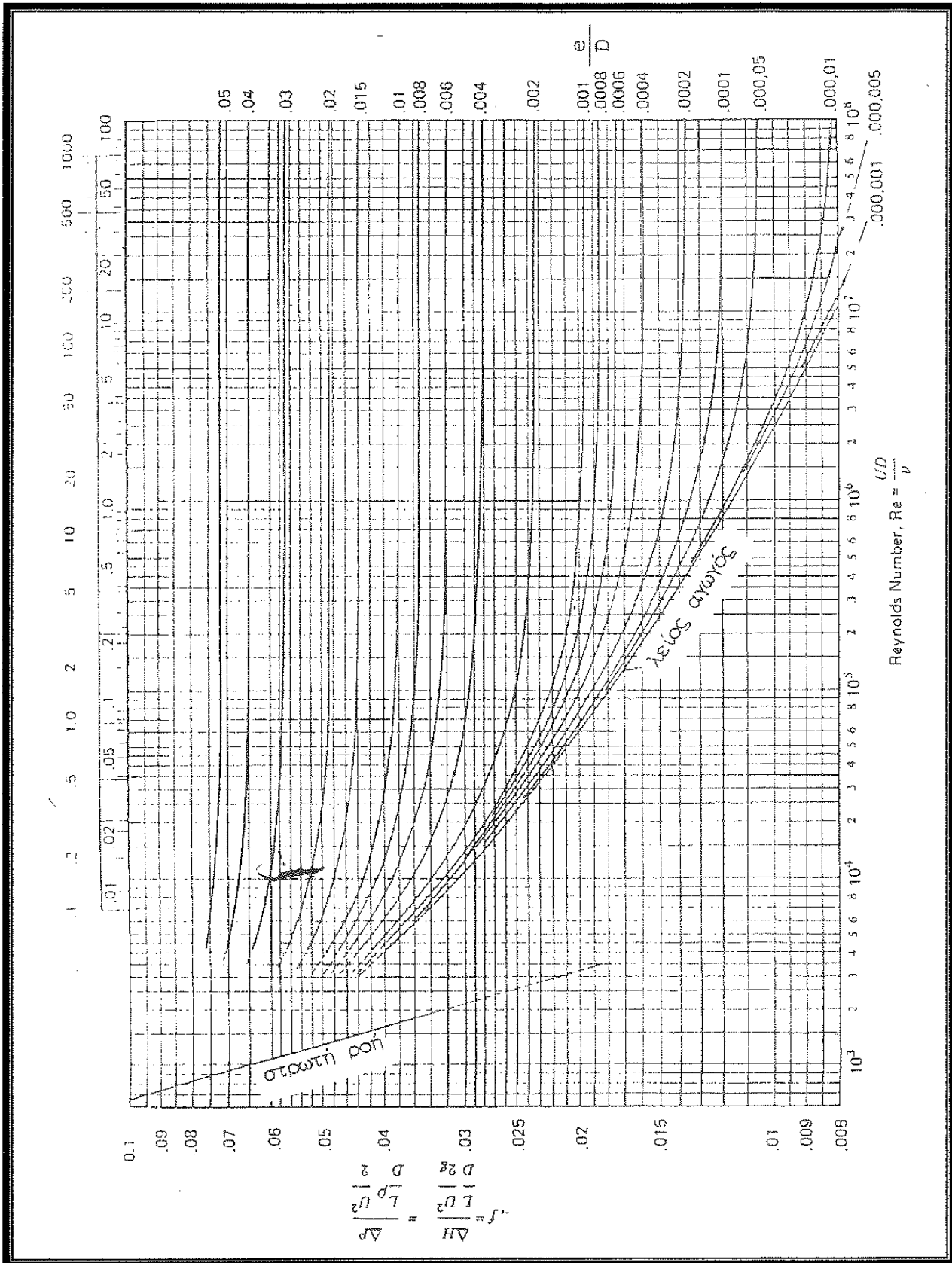
όπου C είναι σταθερά, η τιμή της οποίας εξαρτάται από το σχήμα της διατομής του αγωγού. Για διατομές απλής γεωμετρίας, οι τιμές της C υπολογίζονται θεωρητικά, ενώ για σύνθετες γεωμετρίες, πειραματικά. Στον πίνακα 3.7 δίνονται τυπικές τιμές της σταθεράς C για στρωτή ροή σε διάφορους αγωγούς μη κυκλικής διατομής.

Ορθογώνιο		Ισοσκελές Τρίγωνο		Ομόκεντρος Δισκύλιος	
a/b	C	θ	C	d_1/d_2	C
0.0	96.0	0°	48.0	0.0	64.0
0.05	89.9	10°	51.6	0.001	74.7
0.10	84.7	20°	52.9	0.01	80.1
0.125	82.3	30°	53.3	0.05	86.3
0.167	78.8	40°	52.9	0.1	89.4
0.25	72.9	50°	52.0	0.2	92.4
0.40	65.5	60°	51.1	0.4	94.7
0.50	62.2	70°	49.5	0.6	95.6
0.75	57.9	80°	48.3	0.8	95.9
1.00	56.9	90°	48.0	1.0	96.0

Ορθογώνιο Τρίγωνο		Κυκλικό Τμήμα		Κυκλικός Τομέας	
θ	C	θ	C	θ	C
0°	48.0	0°	64.0	0°	48.0
10°	49.9	60°	63.3	30°	56.7
20°	51.2	90°	63.1	60°	60.8
30°	52.0	120°	62.8	90°	63.1
40°	52.4	180°	62.2		
45°	52.5				

Πίνακας 3.7 : Τυπικές τιμές της σταθεράς $C = f Re_h$ για στρωτή ροή σε αγωγούς μη κυκλικής διατομής.

Για τυρβώδη ροή, ο συντελεστής f των αγωγών μη κυκλικής διατομής μπορεί να ληφθεί από το διάγραμμα Moody εφόσον η τραχύτητα e , οι γεωμετρικές διαστάσεις και η παροχή είναι γνωστά και αν, αντί των παραμέτρων Re και e/d , χρησιμοποιηθούν ο αριθμός Reynolds Re_h και η σχετική τραχύτητα e/d_h , αντίστοιχα. Στο σχήμα 3.68 παρουσιάζεται το διάγραμμα Moody.



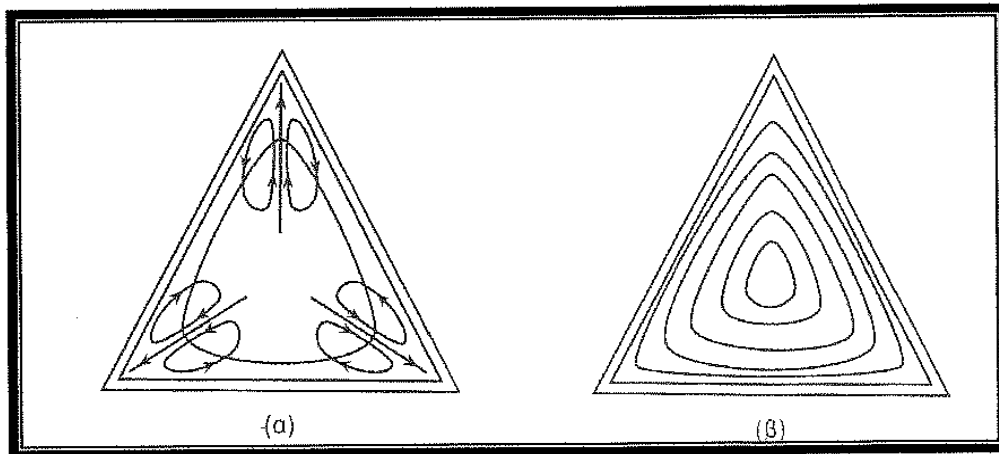
Σχήμα 3.68 : Το διάγραμμα Moody.

Οι τιμές του f που προκύπτουν από το διάγραμμα Moody με τον τρόπο αυτό, κρίνονται ικανοποιητικές αν ληφθεί υπόψη ότι το σφάλμα τους δεν υπερβαίνει το $\pm 15\%$ της πραγματικής τιμής τους. Το σφάλμα αυτό μπορεί να μειωθεί αρκετά (κάτω από το $\pm 10\%$), αν, αντί της υδραυλικής διαμέτρου, d_h , χρησιμοποιηθεί η ενεργός διάμετρος, d_{ev} , του αγωγού η οποία δίνεται από την εξίσωση:

$$d_{ev} = \frac{64d_h}{f Re_h} = \frac{64d_h}{C} \quad (3.12)$$

Είναι φανερό ότι η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο όταν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα στρωτής ροής για τη θεωρούμενη διατομή.

Κατά την τυρβώδη ροή σε έναν ευθύ αγωγό μη κυκλικής διατομής εμφανίζεται το φαινόμενο της δευτερογενούς ροής. Αντιπροσωπευτικό παράδειγμα δευτερογενούς ροής αποτελεί η ροή σε αγωγούς τριγωνικής και τετραγωνικής διατομής. Κατά τη ροή αυτή, το ρευστό κινείται από το κέντρο της διατομής προς τις γωνίες της κατά τη διεύθυνση των διχοτόμων τους και κατόπιν επιστρέφει από δύο διαφορετικές κατευθύνσεις όπως παρουσιάζεται και στο σχήμα 3.69 που ακολουθεί.

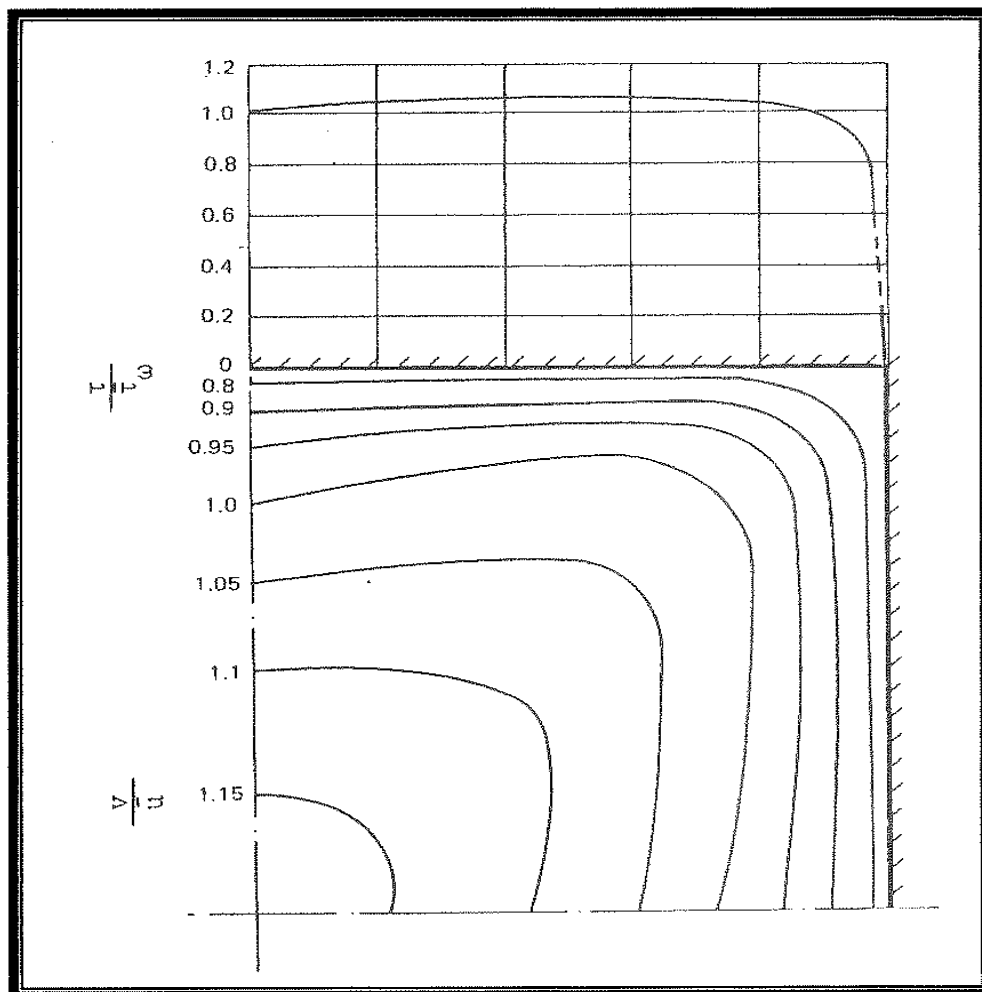


Σχήμα 3.69 : Τυρβώδης ροή σε αγωγό τριγωνικής διατομής : (α) μηχανισμός δευτερογενούς ροής και (β) ισοταχείς καμπύλες.

Έτσι, λόγω της δευτερογενούς ροής, μεταφέρεται συνεχώς ορμή από τον πυρήνα της ροής προς τις γωνίες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της αξονικής ταχύτητας στα στρώματα του ρευστού που βρίσκονται κοντά στις γωνίες. Η διατμητική τάση είναι σχεδόν σταθερή κατά μήκος των πλευρών του αγωγού, μηδενιζόμενη απότομα στις γωνίες του. Αυτός είναι και ο λόγος που η έννοια της υδραυλικής ακτίνας εφαρμόζεται ικανοποιητικά στην περίπτωση της τυρβώδους ροής. Για στρωτή ροή, η διατμητική τάση μεταβάλλεται σημαντικά κατά μήκος των πλευρών του αγωγού από την τιμή μηδέν (στις γωνίες) μέχρι μια μέγιστη τιμή (στο μέσο των πλευρών).

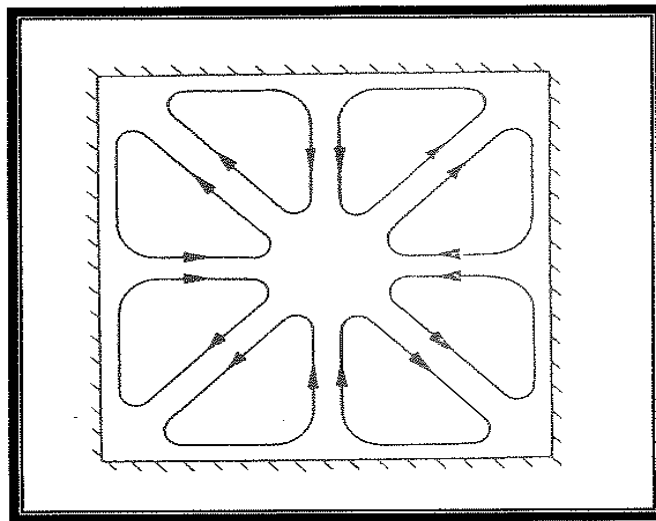
Το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται και σε αγωγούς τετραγωνικής διατομής. Για σταθερό x η διανομή των διατμητικών τάσεων στα τοιχώματα είναι μη συμμετρική. Δεδομένου ότι η στατική πίεση είναι σταθερή και συνάρτηση μόνο της απόστασης x αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την ανάπτυξη ενός μηχανισμού δευτερογενούς ροής, πάνω σε επίπεδα κάθετα στη διεύθυνση x . Η δευτερογενής ροή μεταφέρει ρευστό από περιοχές χαμηλών διατμητικών τάσεων σε περιοχές υψηλών διατμητικών τάσεων, με σκοπό την εξομοίωση των διατμητικών τάσεων σε κάθε διατομή. Στο σχήμα 3.70 δείχνεται η κατανομή των αξονικών ταχυτήτων σε ένα αγωγό

τετραγωνικής διατομής. Λόγω συμμετρίας, παρουσιάζεται μόνο το ένα τέταρτο.



Σχήμα 3.70 : Η κατανομή των αξονικών ταχυτήτων σε αγωγό τετραγωνικής διατομής.

Στη γωνία η διατμητική τάση έχει ελάχιστη τιμή, ενώ μακριά από αυτή η διατμητική τάση είναι μεγάλη. Στο σχήμα 3.71 φαίνεται η δημιουργία δινών.



Σχήμα 3.71 : Η δημιουργία δινών σε τετραγωνικό αγωγό.

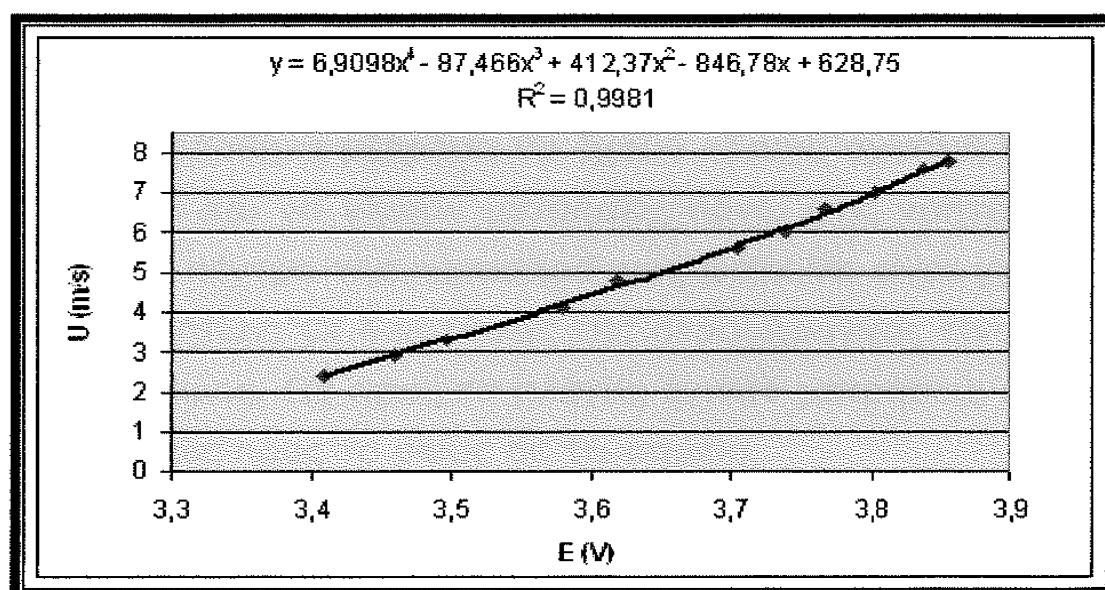
3.3.2 ΔΙΑΝΟΜΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΣΤΑ 7 m/s

Η βαθμονόμηση πραγματοποιήθηκε στις 15—9—2004. Η θερμοκρασία ήταν $\theta=26\text{ }^{\circ}\text{C}$, η πίεση $P=1020\text{ mbar}$ και η αντίσταση του νήματος μετρήθηκε στα $R=3.62\ \Omega$. Η αεροσήραγγα περιείχε μόνο τα όργανα μέτρησης δηλαδή τον σωλήνα pitot και το ανεμόμετρο θερμού νήματος. Πάρθηκαν 11 μετρήσεις, σε 11 διαφορετικές θέσεις μέσα στην αεροσήραγγα και για 11 διαφορετικές τιμές ταχύτητας του αέρα που τη διαρρέει με μέγιστη ταχύτητα τα 7.8 m/s και ελάχιστη ταχύτητα τα 2.4 m/s . Το εύρος των ταχυτήτων είναι συγκεκριμένο γιατί για μεγαλύτερες ταχύτητες παρουσιάζονται τα προβλήματα που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Στον πίνακα 3.8 παρουσιάζονται οι τιμές της τάσης που δόθηκαν από το ανεμόμετρο θερμού νήματος, της ταχύτητας που δόθηκαν από τον σωλήνα pitot αλλά και της τάσης υψωμένης στο τετράγωνο και της ταχύτητας υψωμένης στο 0.45, ώστε να προκύψουν τα δύο διαγράμματα βαθμονόμησης.

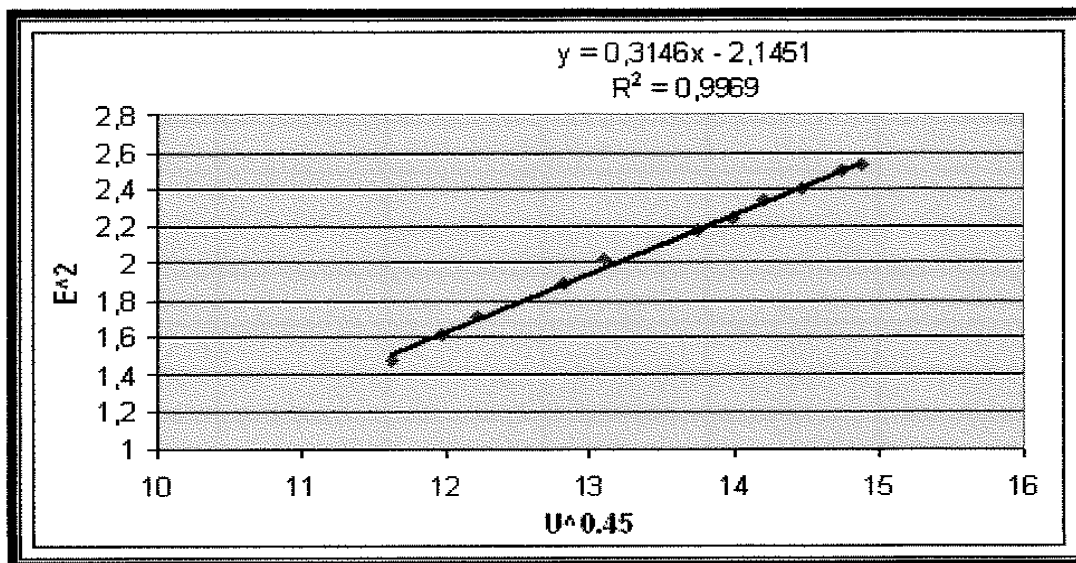
	ΤΑΣΗ	ΤΑΧΥΤΗΤΑ	E ²	U ^{0.45}	RMS VALUE
ΜΕΤΡΗΣΗ 1	3.8573	7.8	14.87876329	2.520243894	0.0087
ΜΕΤΡΗΣΗ 2	3.8386	7.6	14.73484996	2.490956346	0.0095
ΜΕΤΡΗΣΗ 3	3.8038	7	14,46889444	2.400458035	0.0072
ΜΕΤΡΗΣΗ 4	3.7681	6.6	14.19857761	2.337732265	0.0077
ΜΕΤΡΗΣΗ 5	3.7398	6	13.98610404	2.239587643	0.0066
ΜΕΤΡΗΣΗ 6	3.7068	5.6	13.74036624	2.17112392	0.0065
ΜΕΤΡΗΣΗ 7	3.6199	4.8	13.10367601	2.025622707	0.0071
ΜΕΤΡΗΣΗ 8	3.5801	4.1	12.81711601	1.886916732	0.0058
ΜΕΤΡΗΣΗ 9	3.4963	3.3	12.22411369	1.711320185	0.0057
ΜΕΤΡΗΣΗ10	3.4584	2.9	11.96053056	1.61465261	0.0057
ΜΕΤΡΗΣΗ11	3.409	2.4	11.621281	1.482842616	0.0055

Πίνακας 3.8 : Μετρήσεις για την βαθμονόμηση.

Στη συνέχεια στο σχήμα 3.72 και στο σχήμα 3.73 παρουσιάζονται τα δύο διαγράμματα.

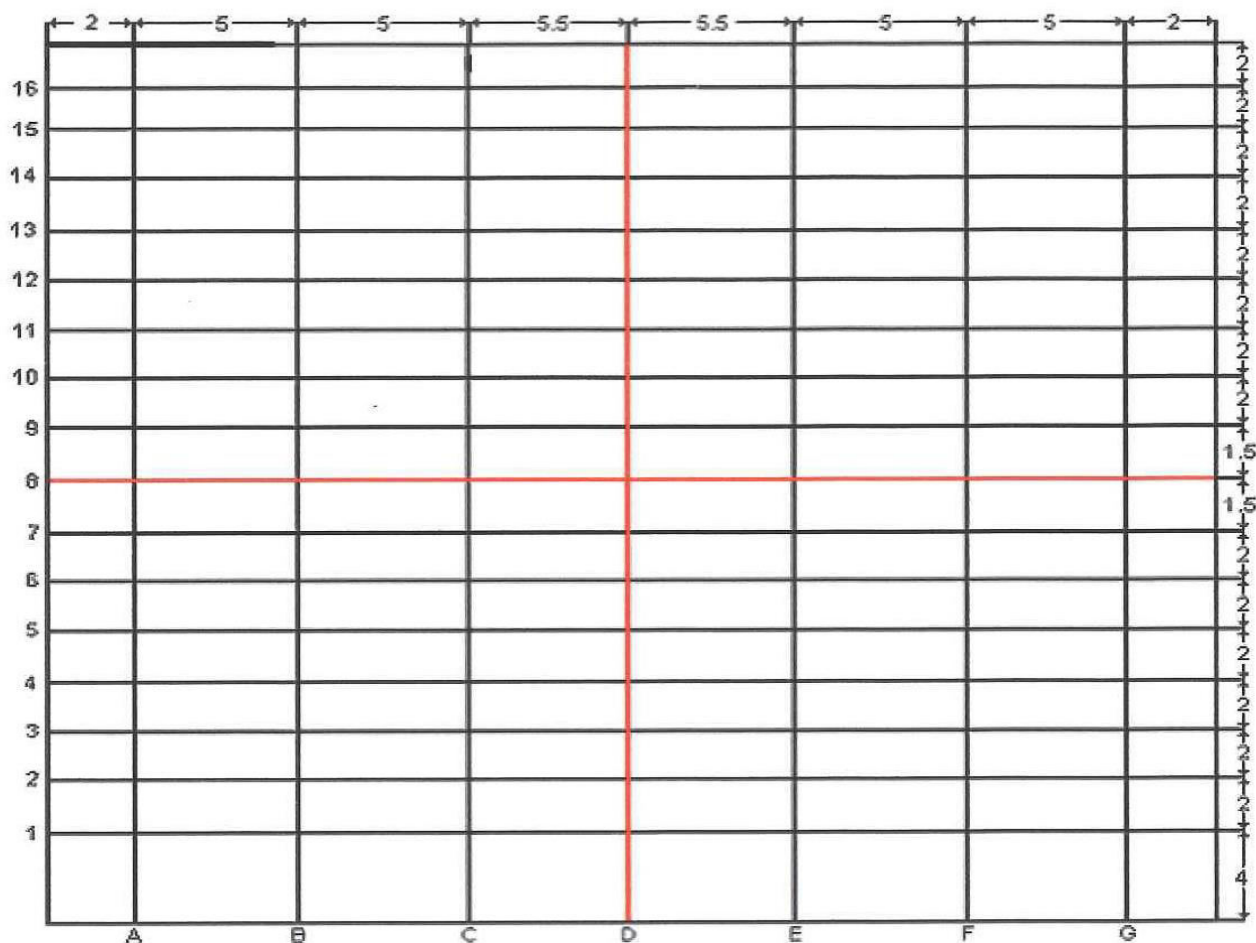


Σχήμα 3.72 : Διάγραμμα μεταξύ της τάσης και της ταχύτητας από το οποίο προκύπτει μια πολυωνυμική συνάρτηση τέταρτης τάξης.



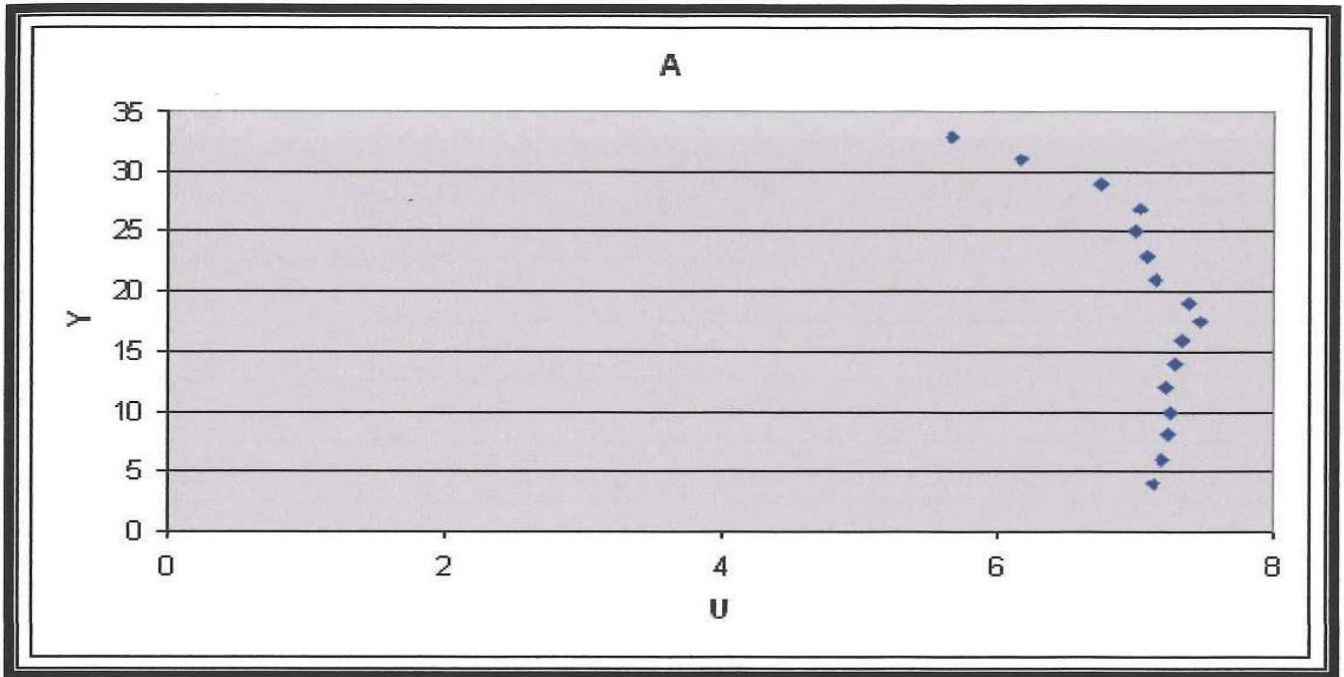
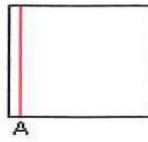
Σχήμα 3.73 : Διάγραμμα μεταξύ της τάσης υψωμένης στο τετράγωνο και της ταχύτητας υψωμένης στο 0.45 από το οποίο προκύπτει μια γραμμική συνάρτηση.

Έπειτα και χωρίς την παρουσία του pitot, αλλά μόνο με το ανεμόμετρο θερμού νήματος έγινε σειρά μετρήσεων σε διάφορα σημεία της τετραγωνικής διατομής της αεροσήραγγας. Συνολικά έγιναν μετρήσεις σε 112 διαφορετικά σημεία της αεροσήραγγας ώστε να μελετηθεί η διανομή ταχύτητας. Τα σημεία στα οποία έγιναν φαίνονται στο σχήμα 3.74 και η επιλογή τους αφορά καθαρά πρακτικούς λόγους. Επίσης καλό είναι τα σημεία στα οποία πάρθηκε μέτρηση να έχουν κάποια σχετική συμμετρία μεταξύ τους, αλλά και να γίνουν μετρήσεις πάνω στις νοητές ευθείες που περνάνε από το κέντρο της αεροσήραγγας ώστε να είναι γνωστές εκεί οι τιμές των ταχυτήτων. Οι διαστάσεις της αεροσήραγγας είναι 35 cm πλάτος και 35 cm ύψος. Ως προς το πλάτος έγιναν μετρήσεις σε 7 διαφορετικά σημεία και ως προς το ύψος σε 16 σημεία.

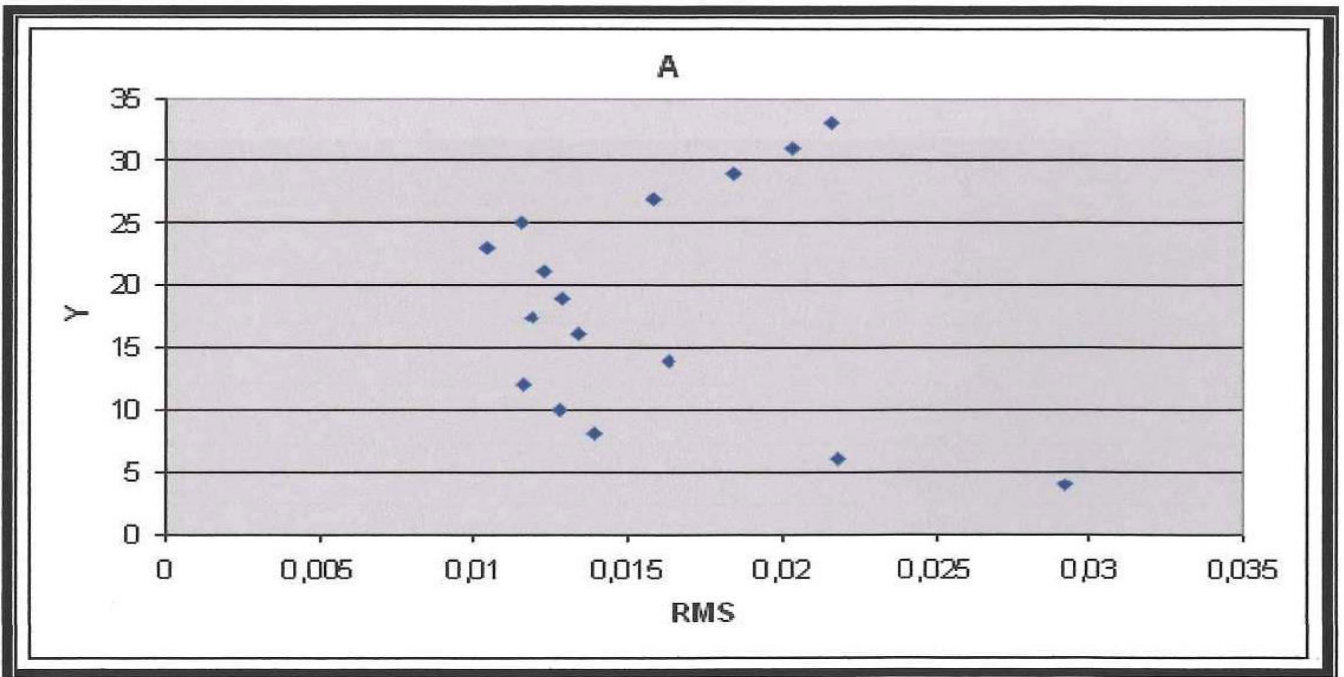


Σχήμα 3.74 : Γραφική απεικόνιση της τετραγωνικής διατομής της αεροσήραγγας. (Οι αποστάσεις μεταξύ των σημείων μετριοούνται σε cm).

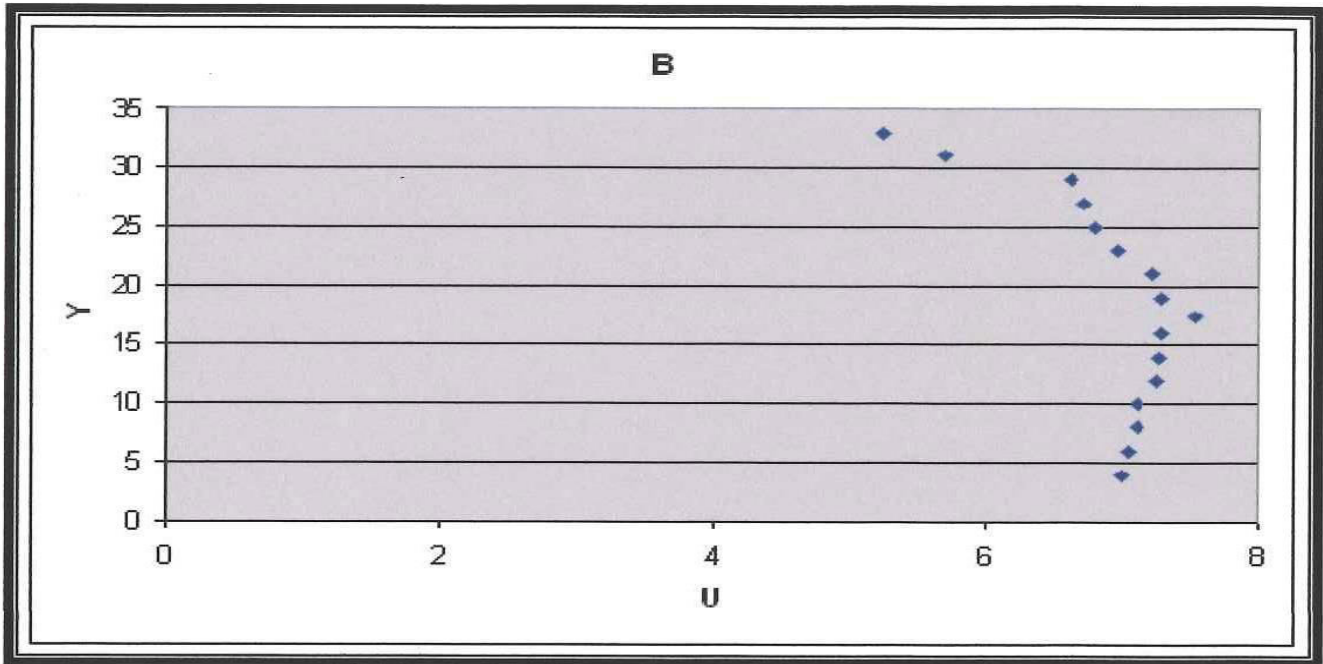
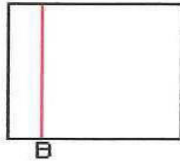
Στη συνέχεια παρουσιάζονται σε γραφικές παραστάσεις τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις μετρήσεις αυτές (Σχήματα 3.75 έως 3.88). Τα διαγράμματα δείχνουν τη διανομή ταχύτητας στις διάφορες τομές της διατομής της αεροσήραγγας για κάθε σημείο του πλάτους ξεχωριστά.



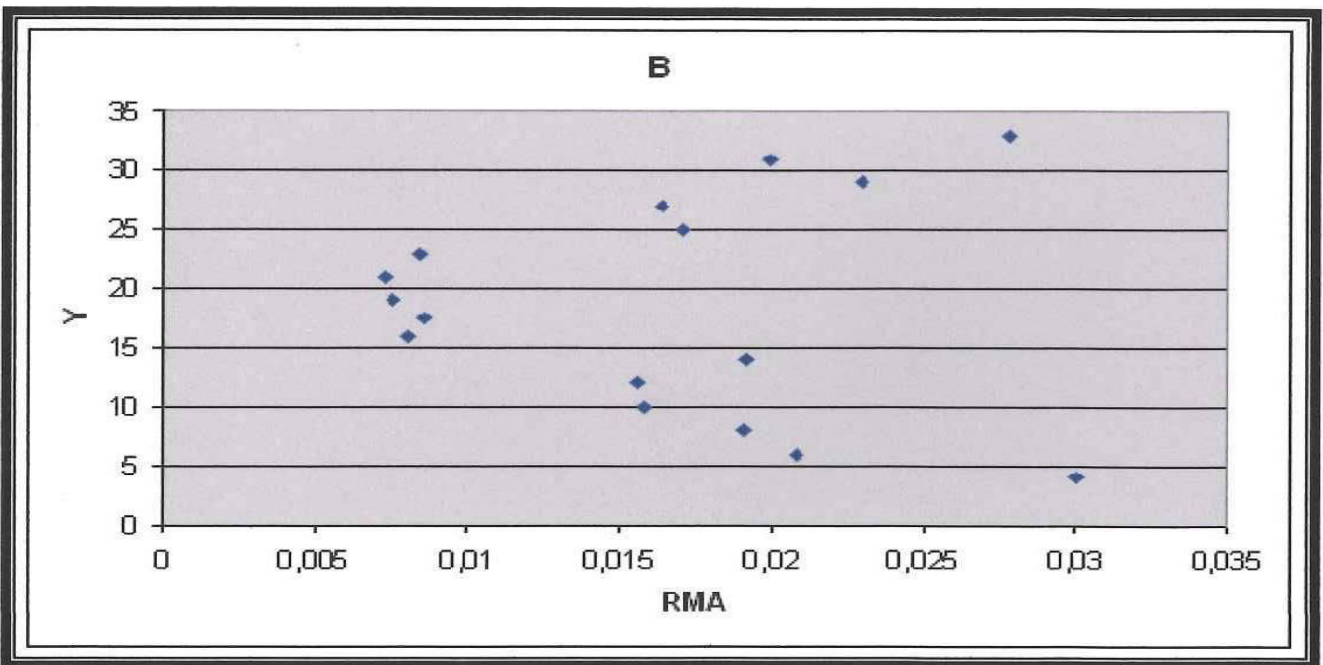
Σχήμα 3.75 : Γραφική παράσταση διανομής ταχύτητας.



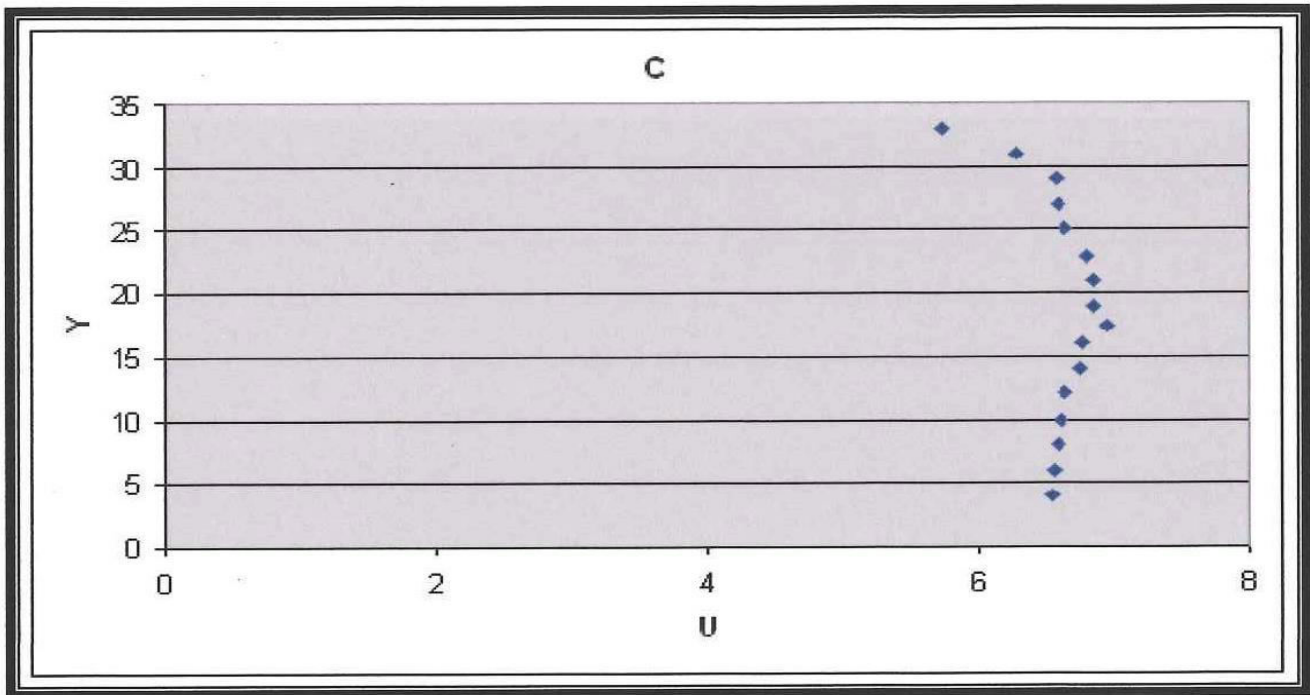
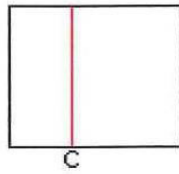
Σχήμα 3.76 : Γραφική παράσταση rms.



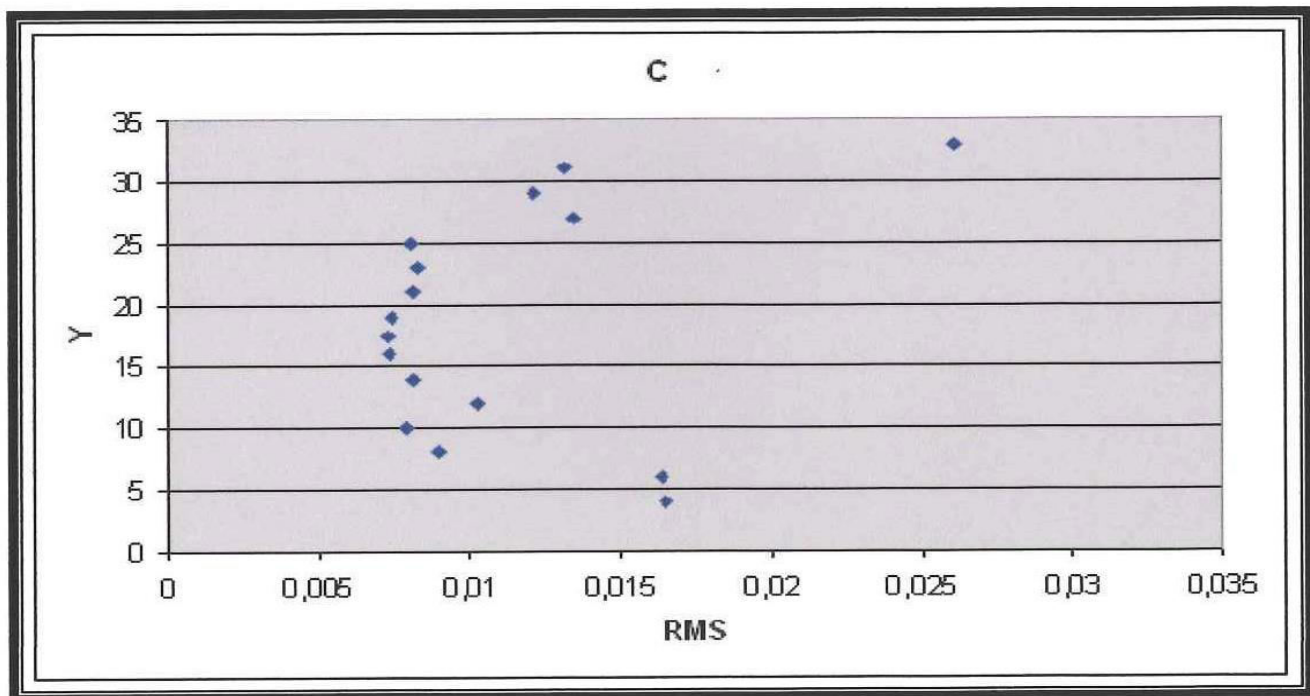
Σχήμα 3.77 : Γραφική παράσταση διανομής ταχύτητας.



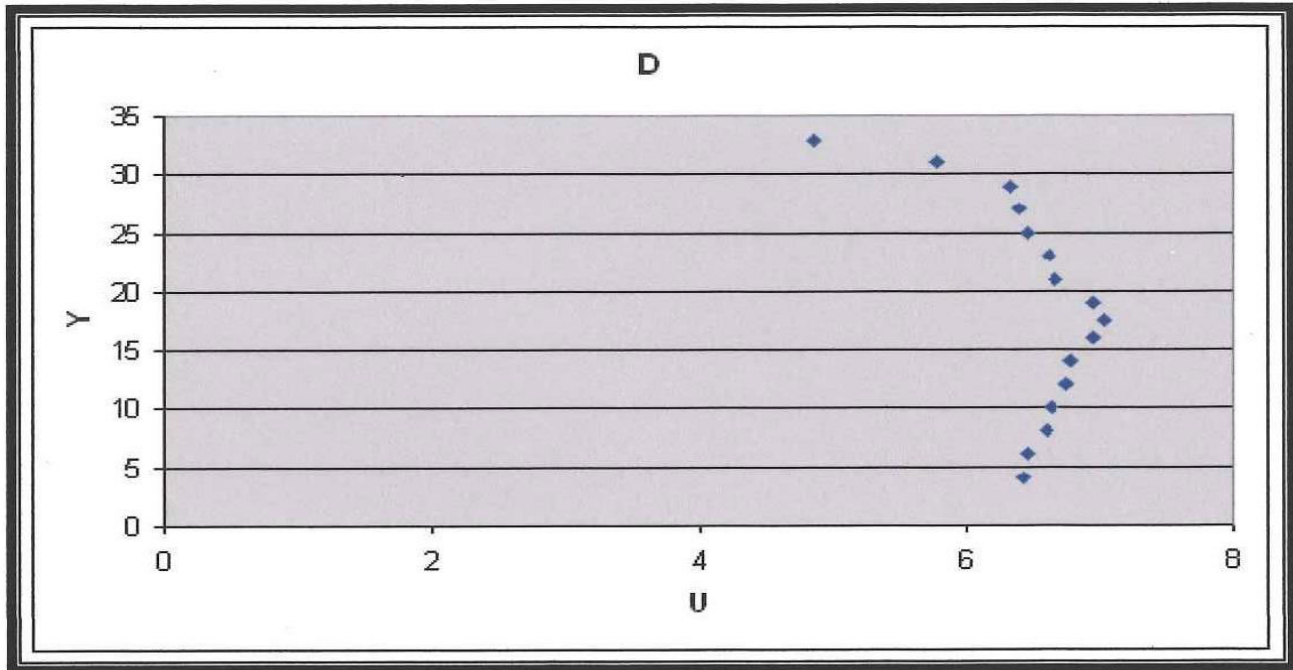
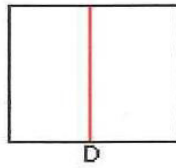
Σχήμα 3.78 : Γραφική παράσταση rms.



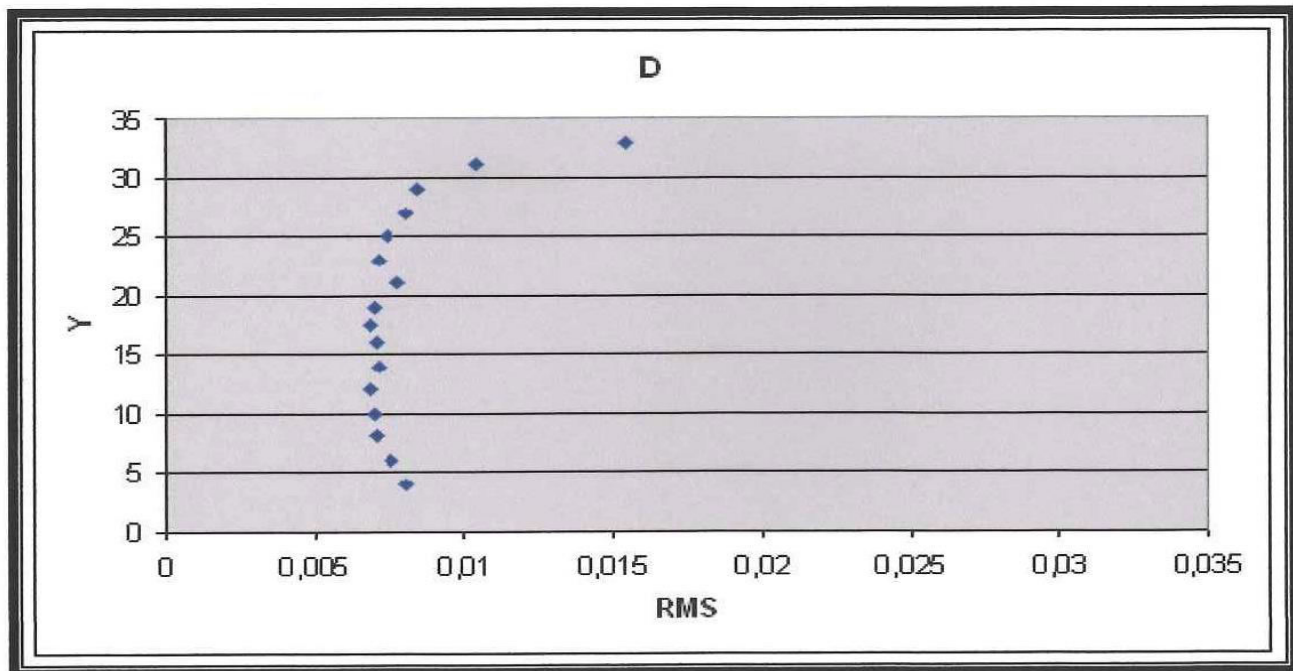
Σχήμα 3.79 : Γραφική παράσταση διανομής ταχύτητας.



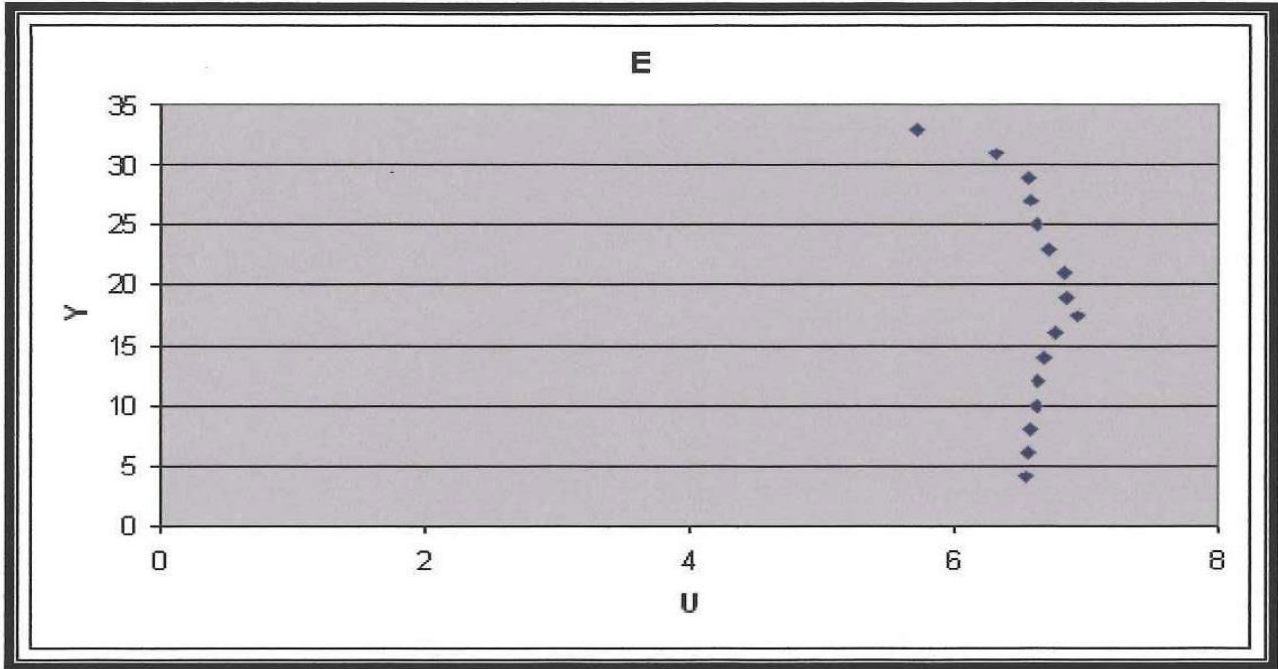
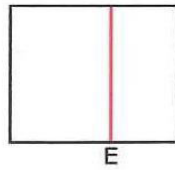
Σχήμα 3.80 : Γραφική παράσταση rms.



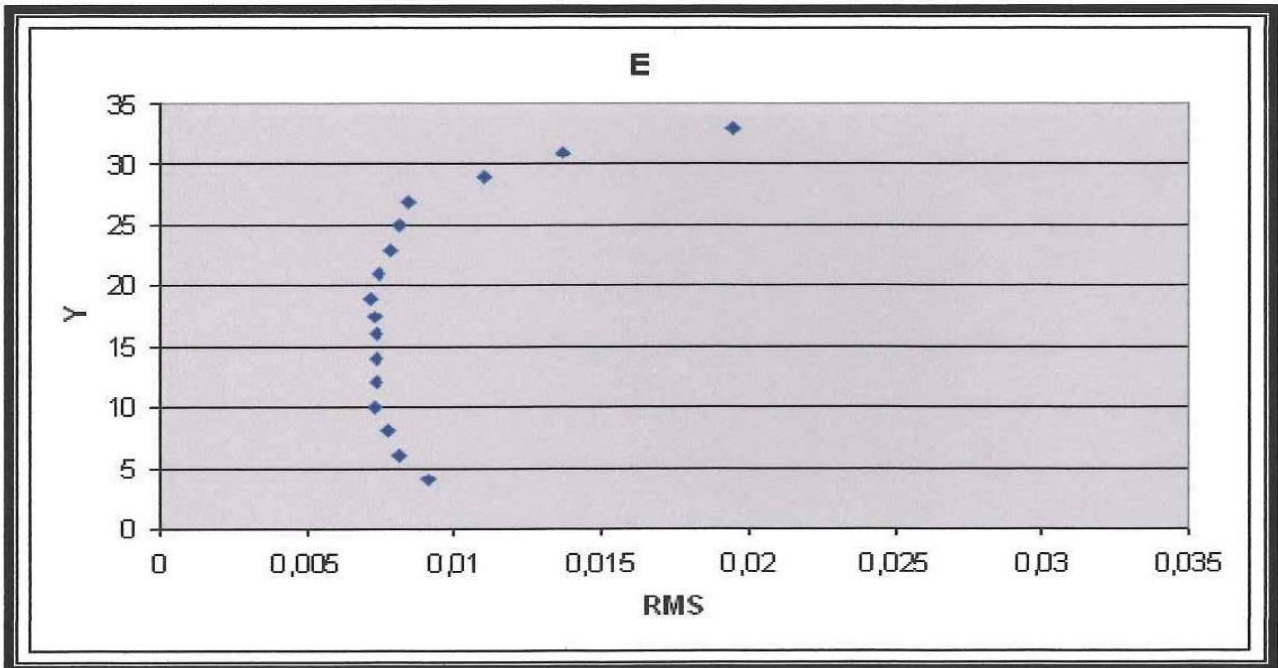
Σχήμα 3.81 : Γραφική παράσταση διανομής ταχύτητας.



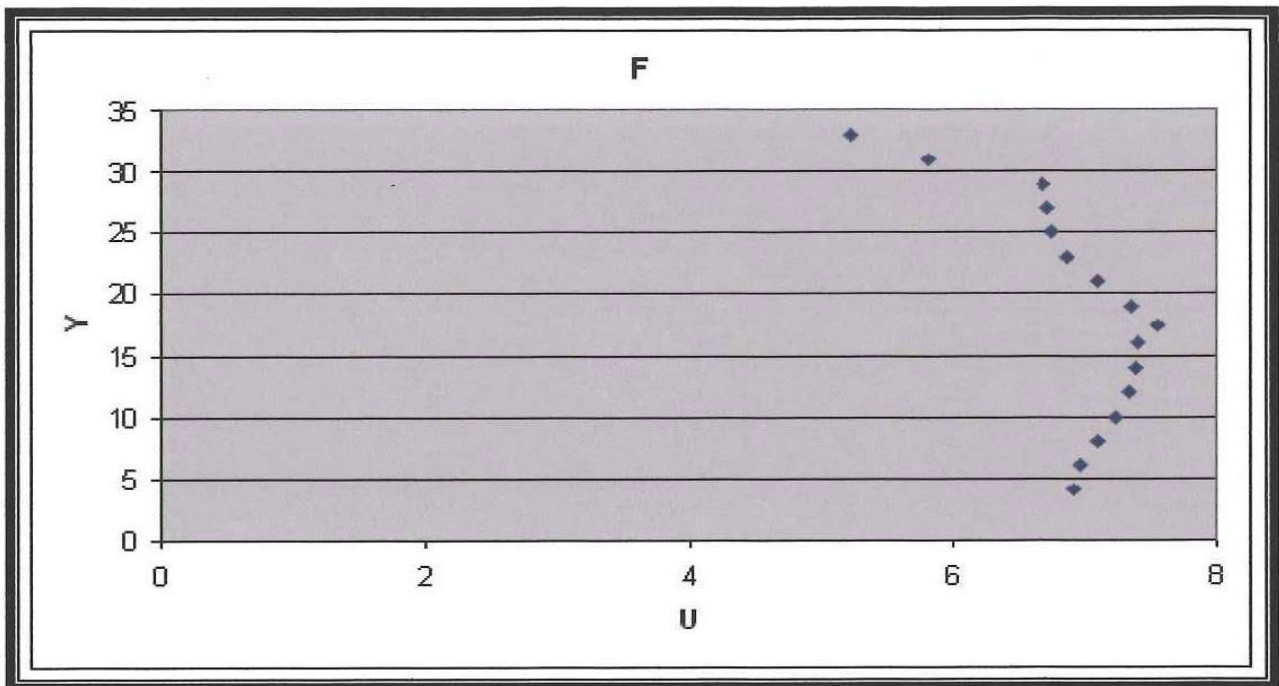
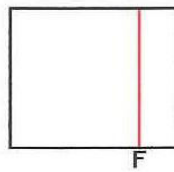
Σχήμα 3.82 : Γραφική παράσταση rms.



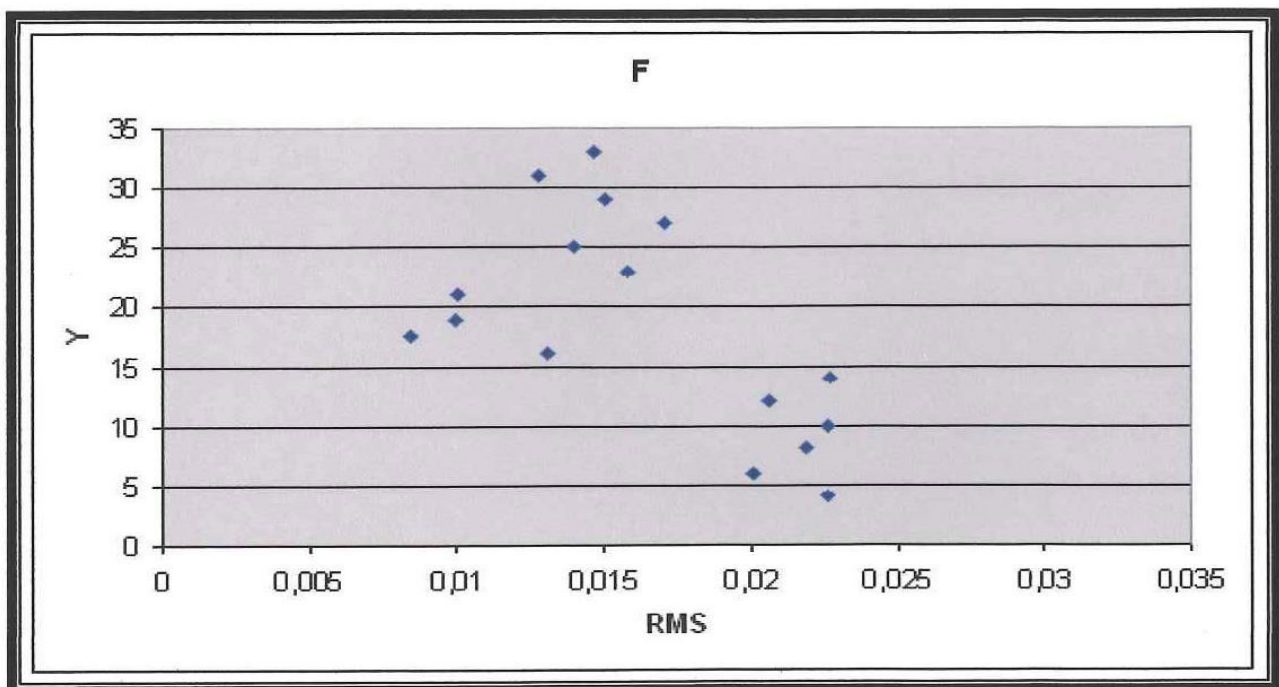
Σχήμα 3.83 : Γραφική παράσταση διανομής ταχύτητας.



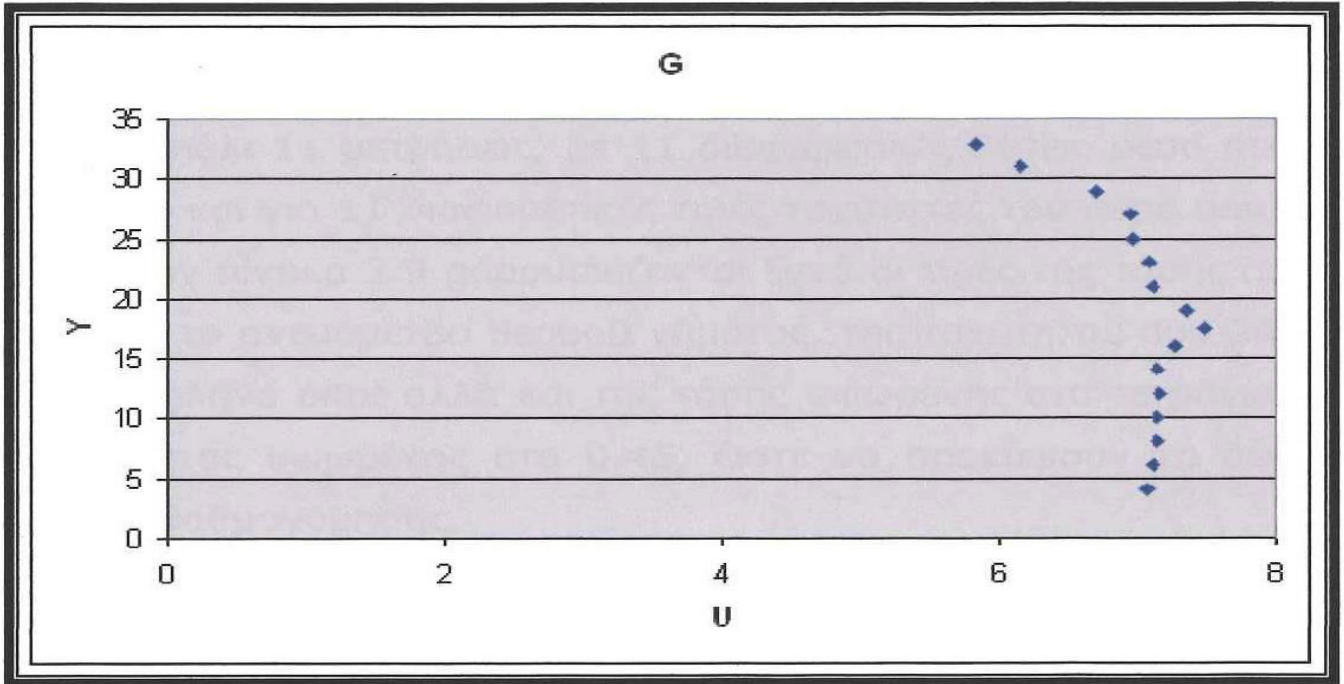
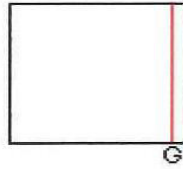
Σχήμα 3.84 : Γραφική παράσταση rms.



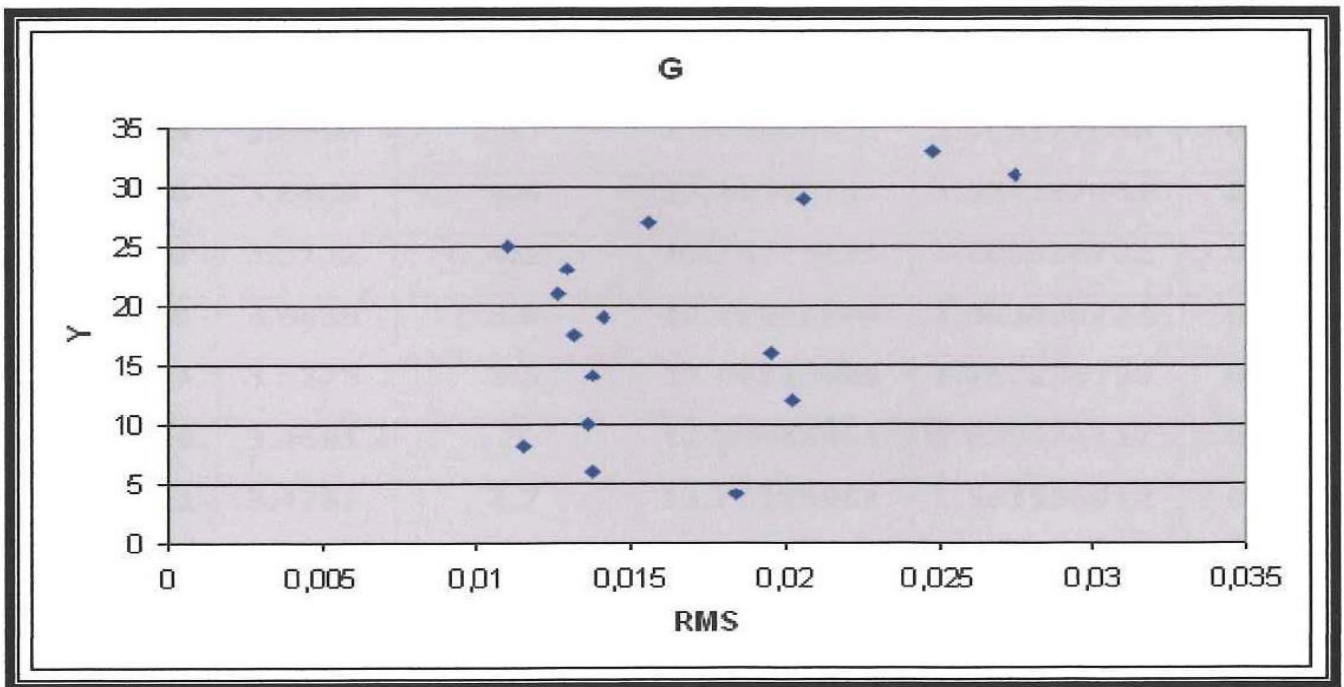
Σχήμα 3.85 : Γραφική παράσταση διανομής ταχύτητας.



Σχήμα 3.86 : Γραφική παράσταση rms.



Σχήμα 3.87 : Γραφική παράσταση διανομής ταχύτητας.



Σχήμα 3.88 : Γραφική παράσταση rms.

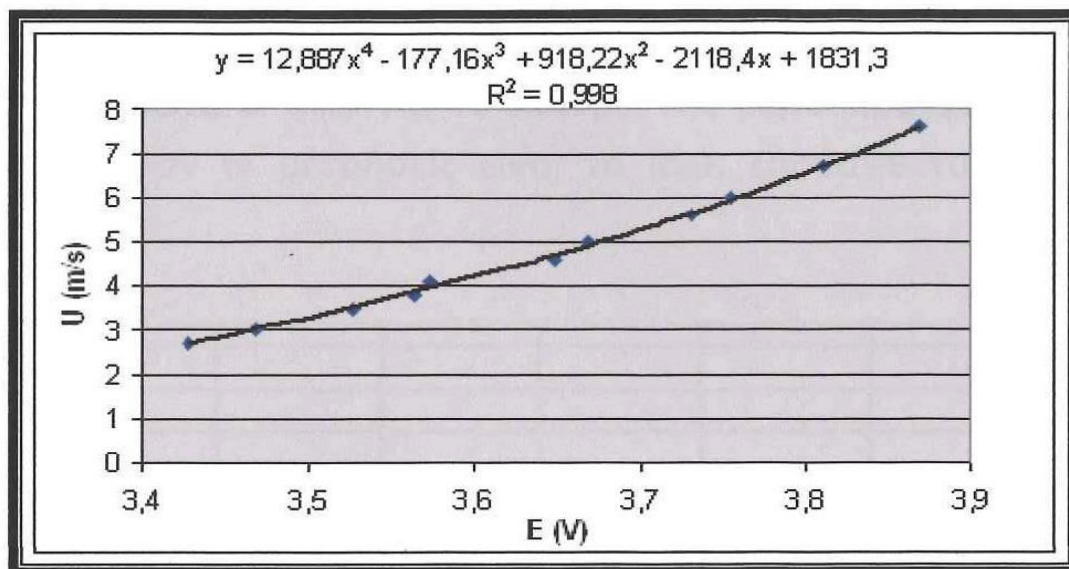
3.3.3 ΔΙΑΝΟΜΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΣΤΑ 4 m/s

Η βαθμονόμηση πραγματοποιήθηκε στις 16—9—2004. Η θερμοκρασία ήταν $\theta=26$ °C, η πίεση $P=1018$ mbar και η αντίσταση του νήματος μετρήθηκε στα $R=3.61$ Ω. Η αεροσήραγγα περιείχε μόνο τα όργανα μέτρησης δηλαδή τον σωλήνα pitot και το ανεμόμετρο θερμού νήματος. Πάρθηκαν και πάλι 11 μετρήσεις, σε 11 διαφορετικές θέσεις μέσα στην αεροσήραγγα και για 11 διαφορετικές τιμές ταχύτητας του αέρα που τη διαρρέει. Στον πίνακα 3.9 παρουσιάζονται ξανά οι τιμές της τάσης που δόθηκαν από το ανεμόμετρο θερμού νήματος, της ταχύτητας που δόθηκαν από τον σωλήνα pitot αλλά και της τάσης υψωμένης στο τετράγωνο και της ταχύτητας υψωμένης στο 0.45, ώστε να προκύψουν τα δύο διαγράμματα βαθμονόμησης.

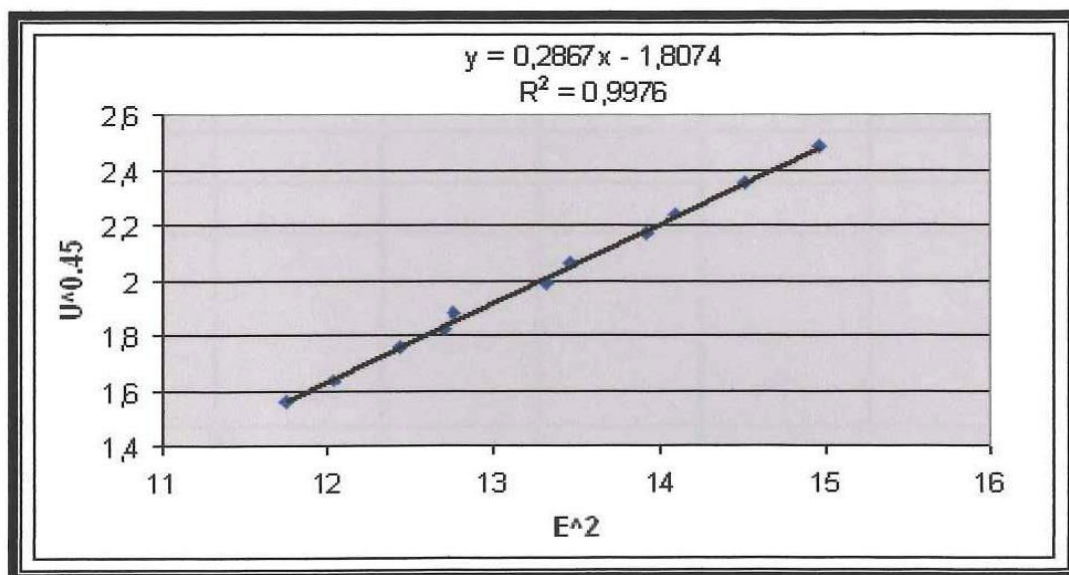
	ΤΑΣΗ	ΤΑΧΥΤΗΤΑ	E^2	$U^{0.45}$	RMS VALUE
ΜΕΤΡΗΣΗ 1	3.8687	7.6	14.96683969	2.490956346	0.0082
ΜΕΤΡΗΣΗ 2	3.8104	6.7	14.51914816	2.353605451	0.0071
ΜΕΤΡΗΣΗ 3	3.7546	6	14.09702116	2.239587643	0.0075
ΜΕΤΡΗΣΗ 4	3.7313	5.6	13.92259969	2.17112392	0.0063
ΜΕΤΡΗΣΗ 5	3.6696	5	13.46596416	2.063177068	0.0068
ΜΕΤΡΗΣΗ 6	3.6489	4.6	13.31447121	1.987197464	0.0058
ΜΕΤΡΗΣΗ 7	3.5732	4.1	12.76775824	1.886916732	0.0062
ΜΕΤΡΗΣΗ 8	3.5638	3.8	12.70067044	1.823486777	0.0057
ΜΕΤΡΗΣΗ 9	3.5275	3.5	12.44325625	1.757238136	0.0058
ΜΕΤΡΗΣΗ 10	3.4691	3	12.03465481	1.639474117	0.0057
ΜΕΤΡΗΣΗ 11	3.4281	2.7	11.75186961	1.563556912	0.0056

Πίνακας 3.9 : Μετρήσεις για την βαθμονόμηση.

Στη συνέχεια στο σχήμα 3.89 και στο σχήμα 3.90 παρουσιάζονται τα δύο διαγράμματα.



Σχήμα 3.89 : Διάγραμμα μεταξύ της τάσης και της ταχύτητας από το οποίο προκύπτει μια πολυωνυμική συνάρτηση τέταρτης τάξης.

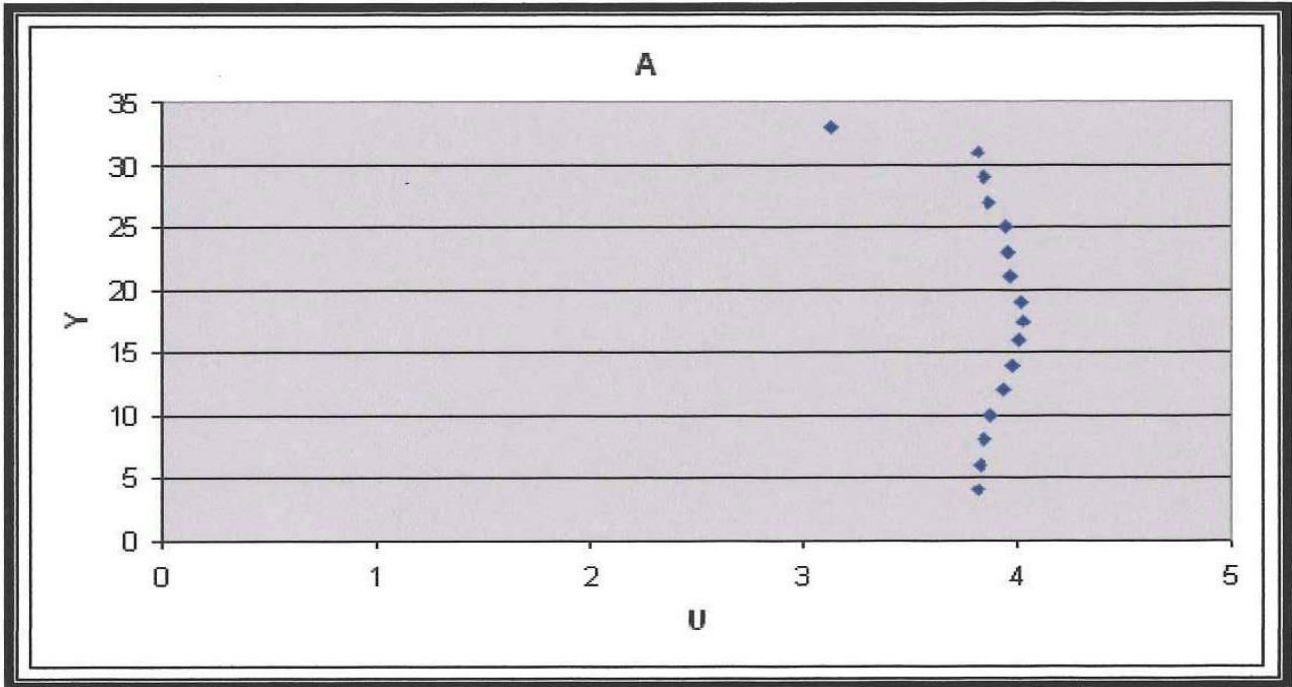
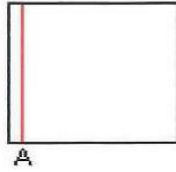


Σχήμα 3.90 : Διάγραμμα μεταξύ της τάσης υψωμένης στο τετράγωνο και της ταχύτητας υψωμένης στο 0.45 από το οποίο προκύπτει μια γραμμική συνάρτηση.

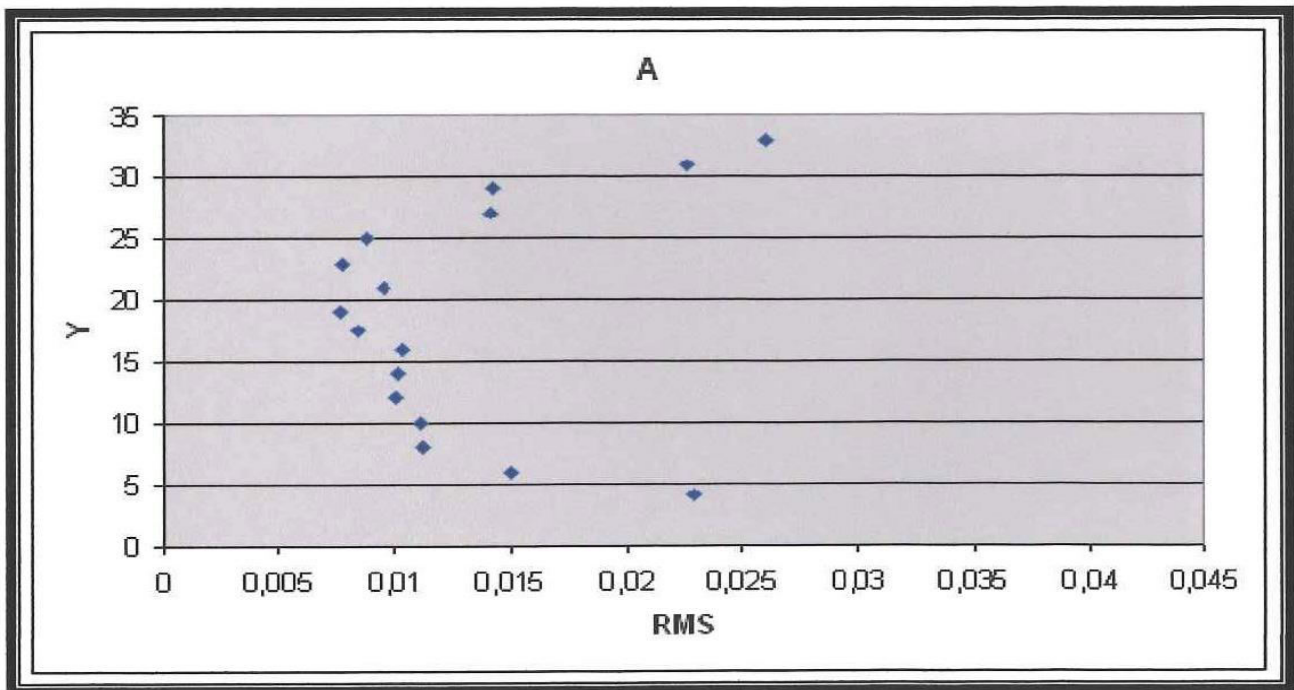
Έπειτα έγινε και πάλι σειρά μετρήσεων σε διάφορα σημεία της τετραγωνικής διατομής της αεροσήραγγας και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα διαγράμματα που ακολουθούν (Σχήματα 3.91 έως 3.104). Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι όμοια, αλλά η θέση των ρυθμιστών παρέμεινε σταθερή στα 4 m/s για το κέντρο της αεροσήραγγας. Τα σημεία στα οποία έγιναν οι μετρήσεις είναι τα ίδια. (παρατίθεται και πάλι το σχήμα 3.74)



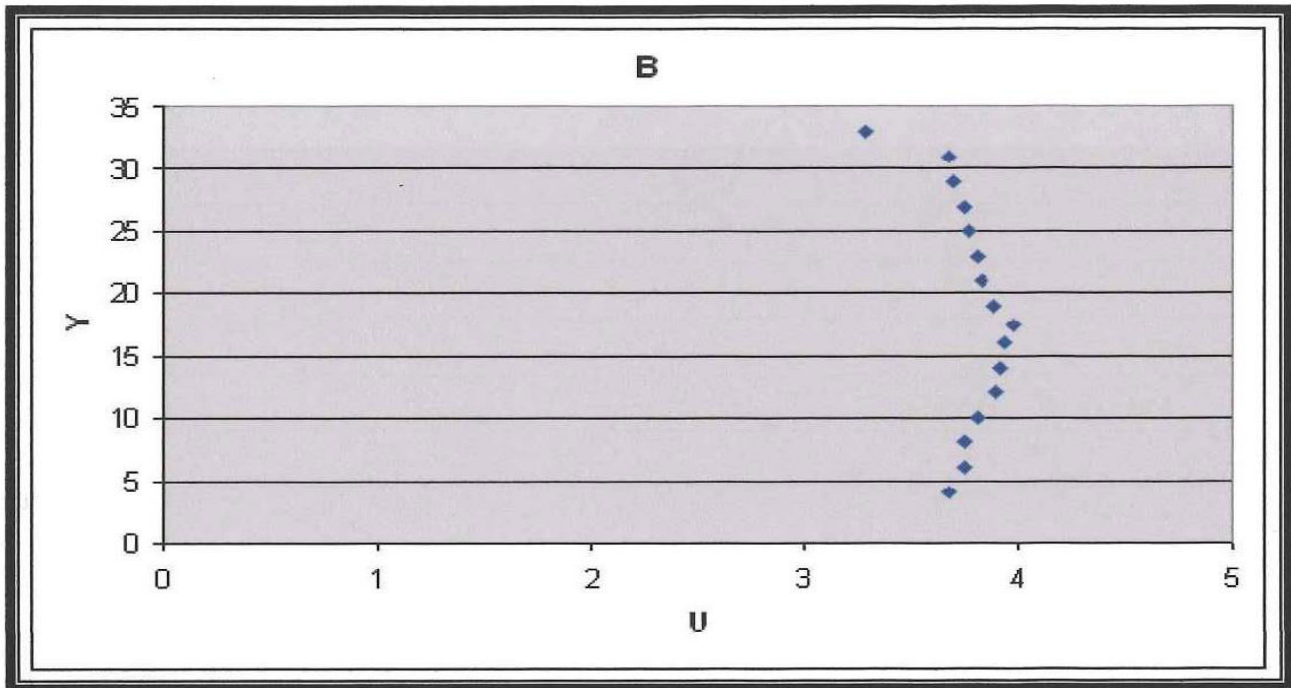
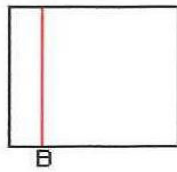
Σχήμα 3.74 : Γραφική απεικόνιση της τετραγωνικής διατομής της αεροσήραγγας. (Οι αποστάσεις μεταξύ των σημείων μετριοούνται σε cm).



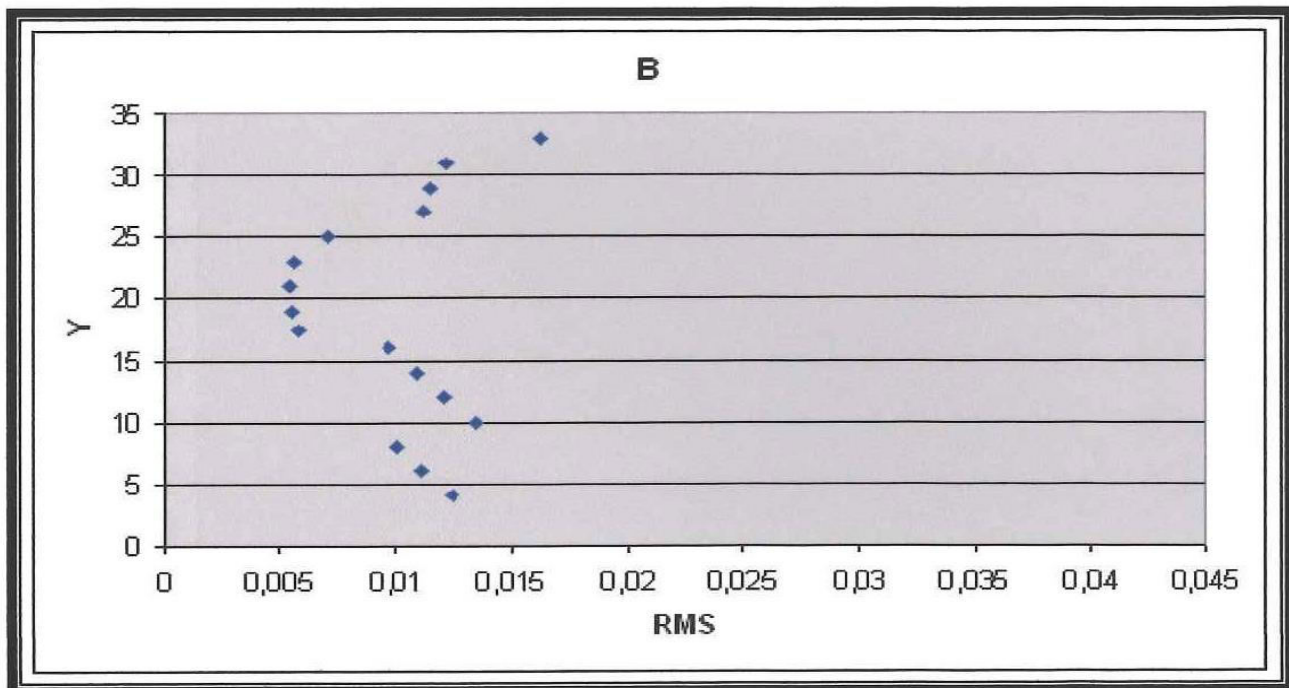
Σχήμα 3.91 : Γραφική παράσταση διανομής ταχύτητας.



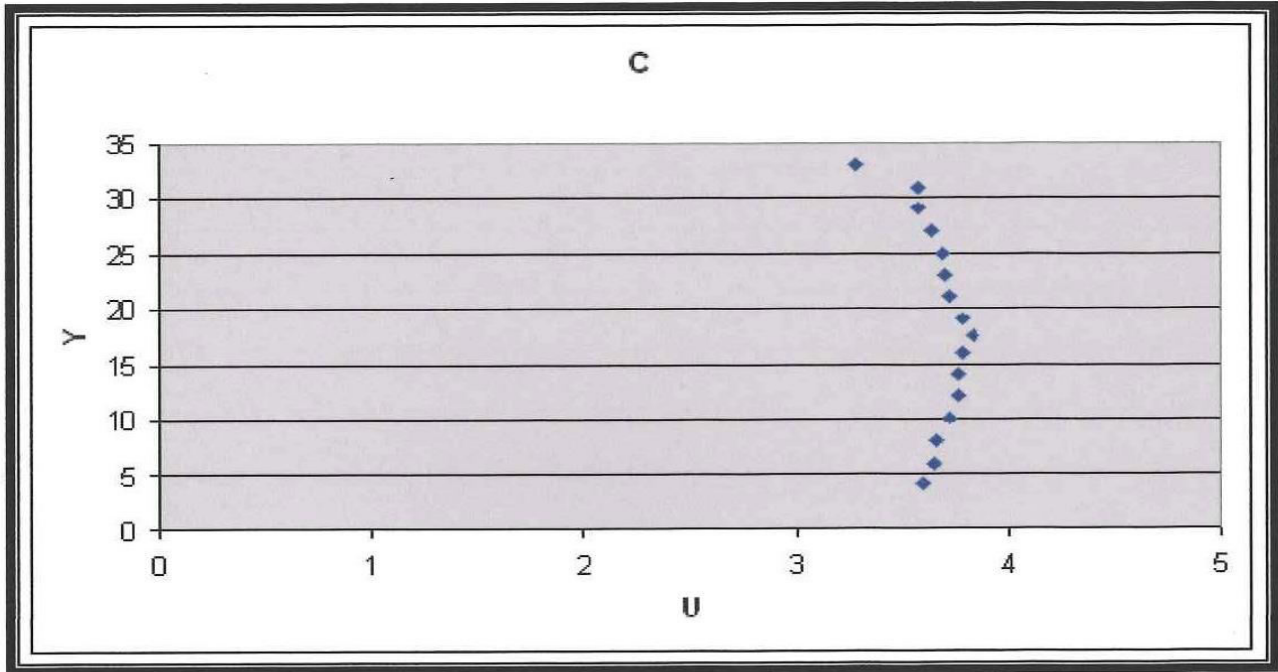
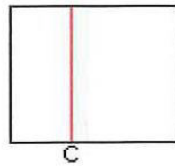
Σχήμα 3.92 : Γραφική παράσταση rms.



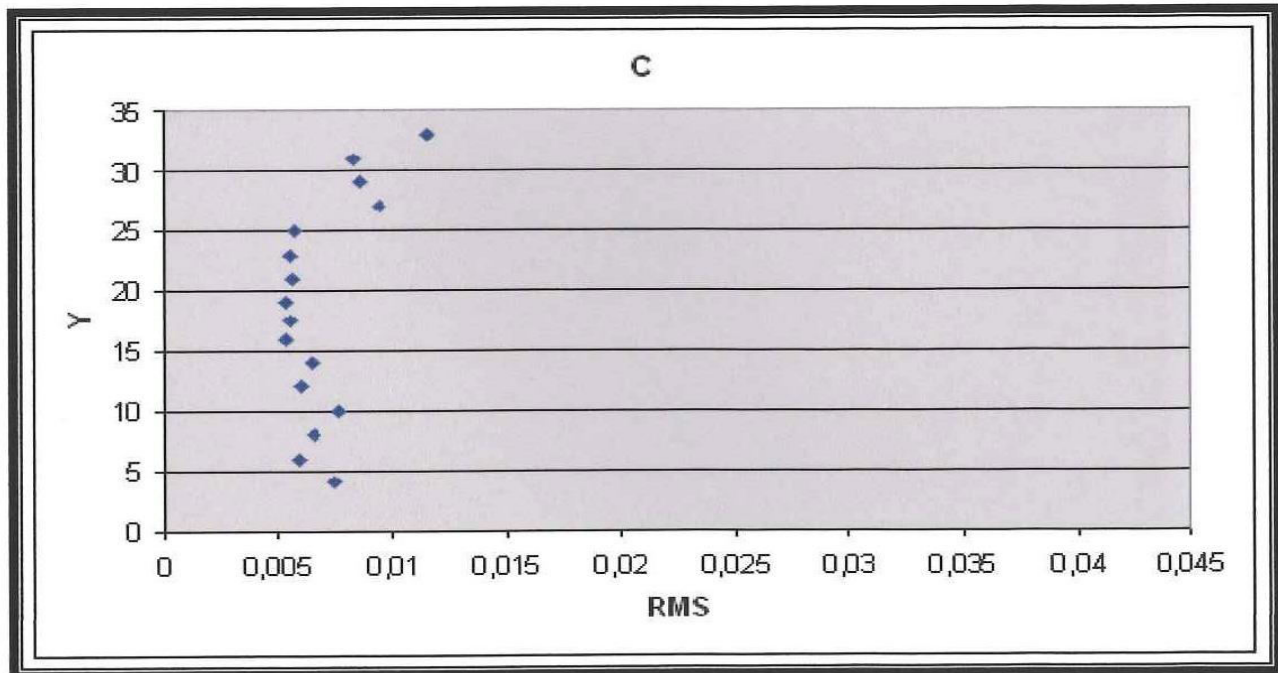
Σχήμα 3.93 : Γραφική παράσταση διανομής ταχύτητας.



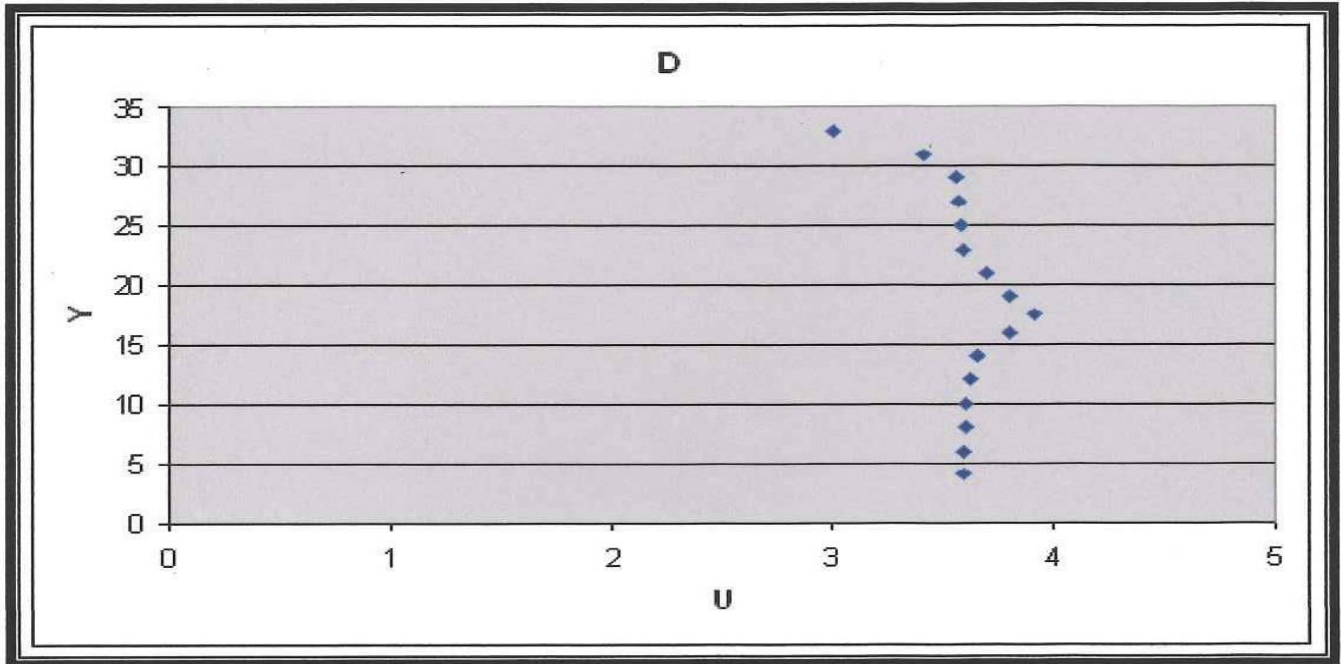
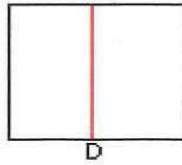
Σχήμα 3.94 : Γραφική παράσταση rms.



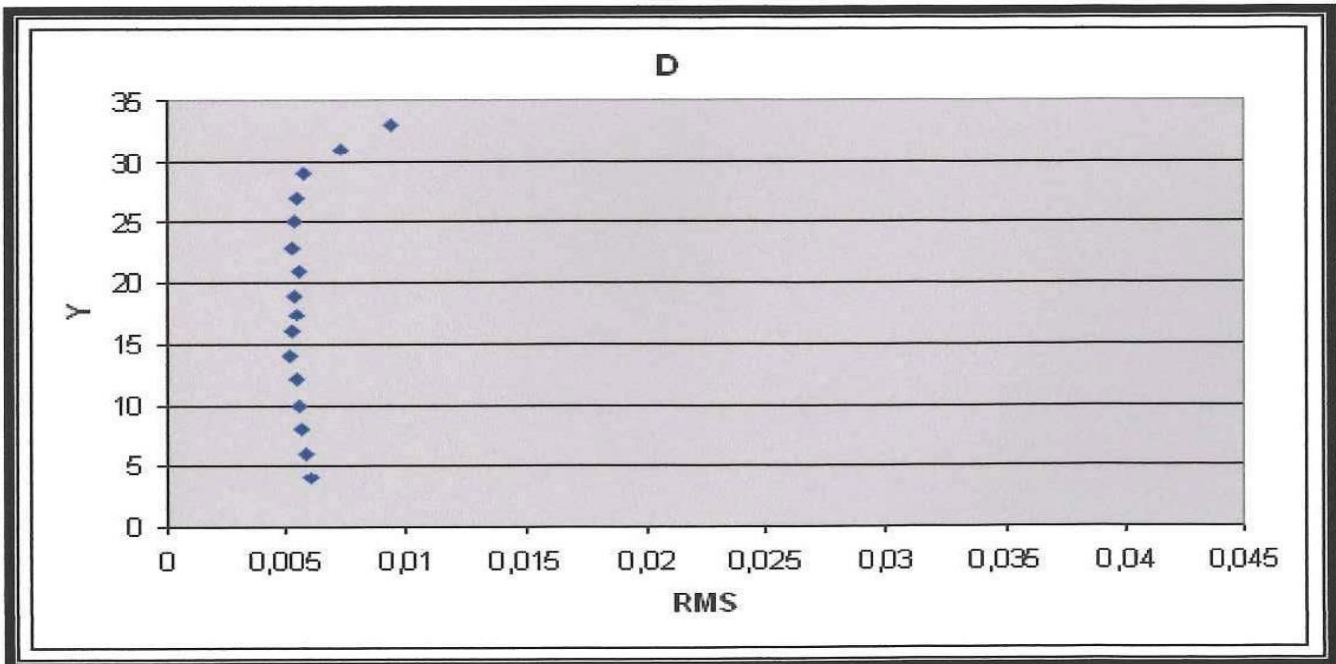
Σχήμα 3.95 : Γραφική παράσταση διανομής ταχύτητας.



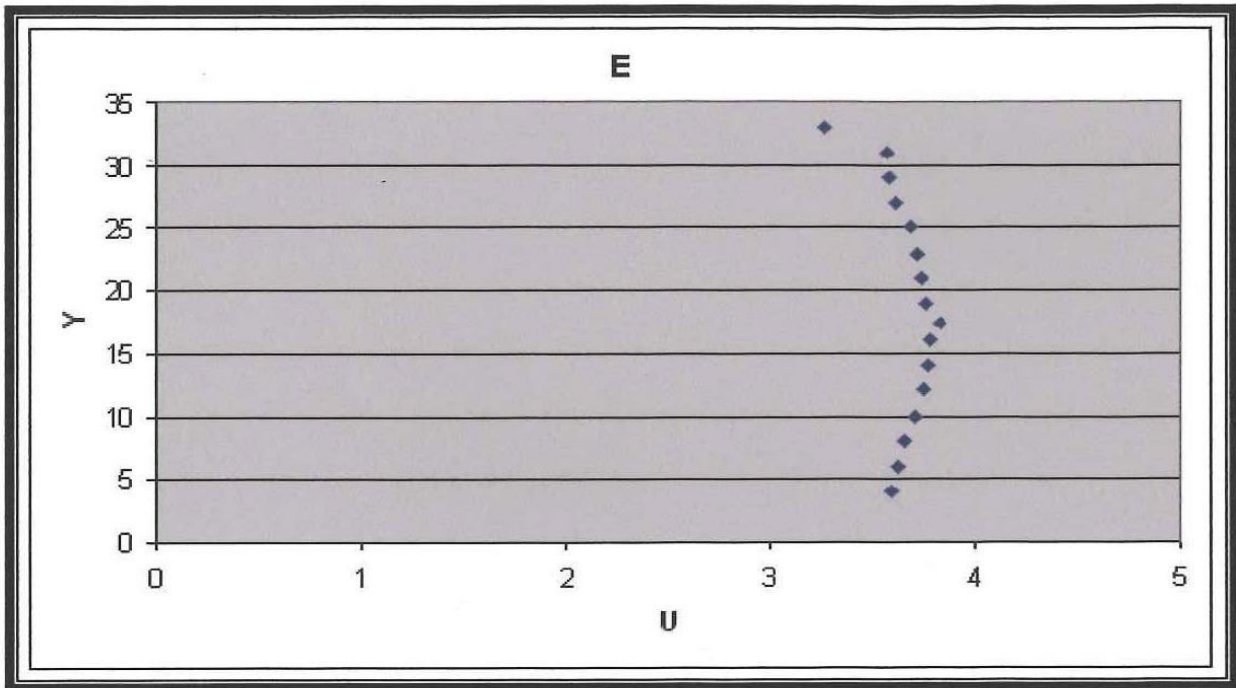
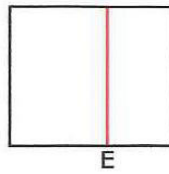
Σχήμα 3.96 : Γραφική παράσταση rms.



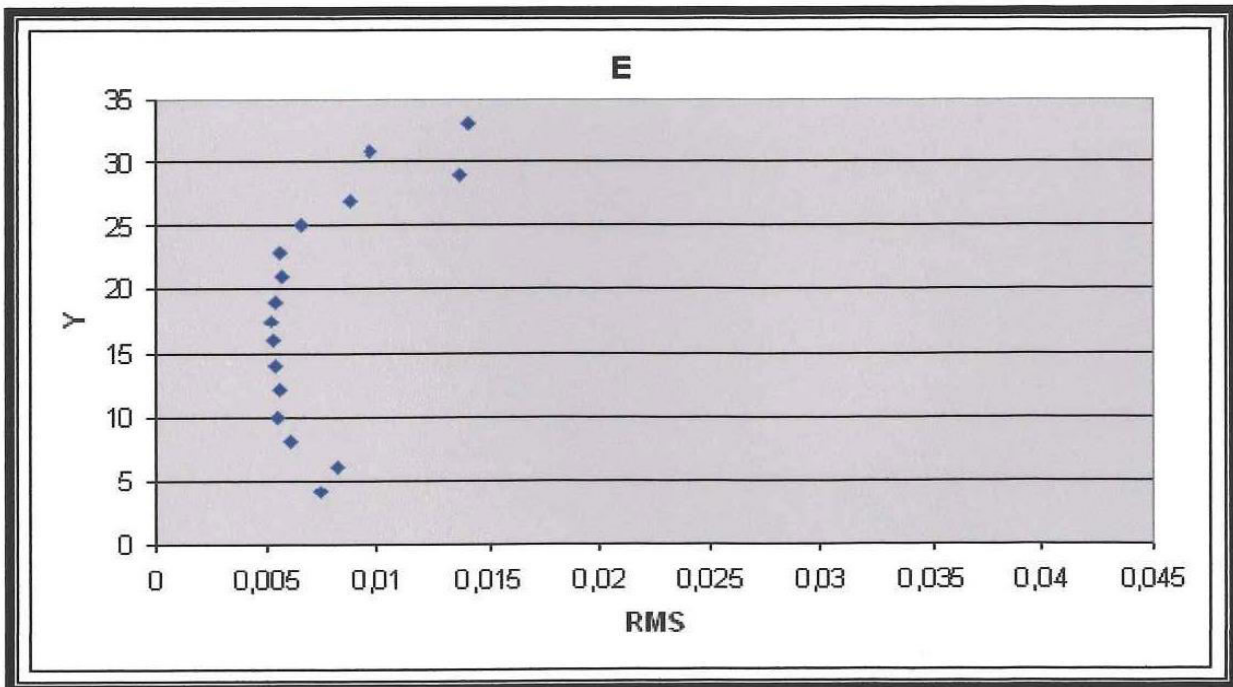
Σχήμα 3.97 : Γραφική παράσταση διανομής ταχύτητας.



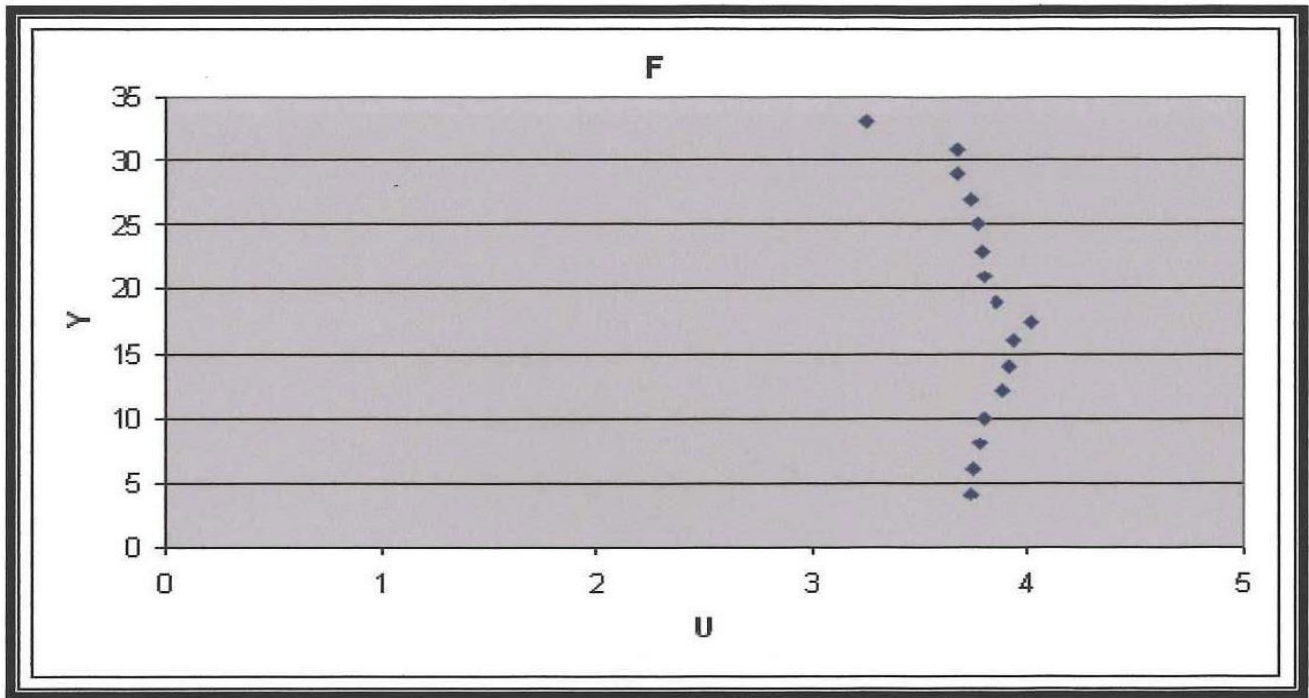
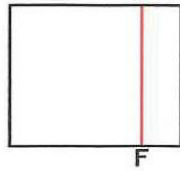
Σχήμα 3.98 : Γραφική παράσταση rms.



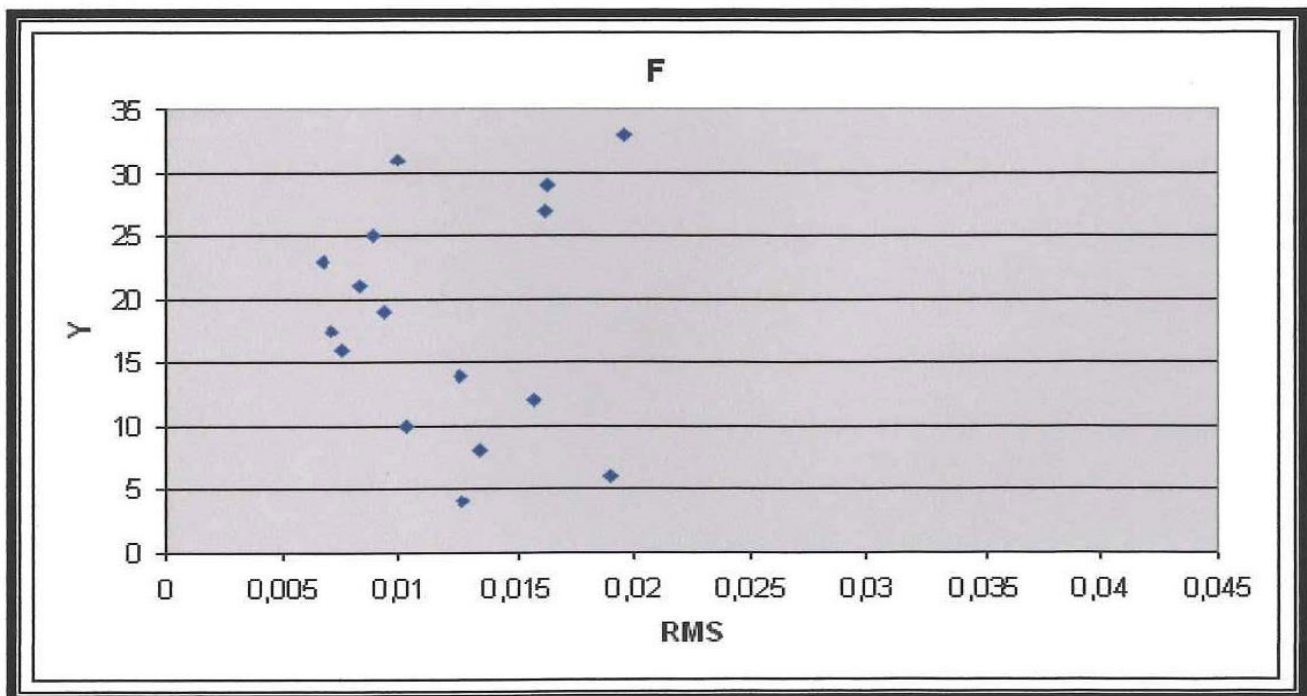
Σχήμα 3.99 : Γραφική παράσταση διανομής ταχύτητας.



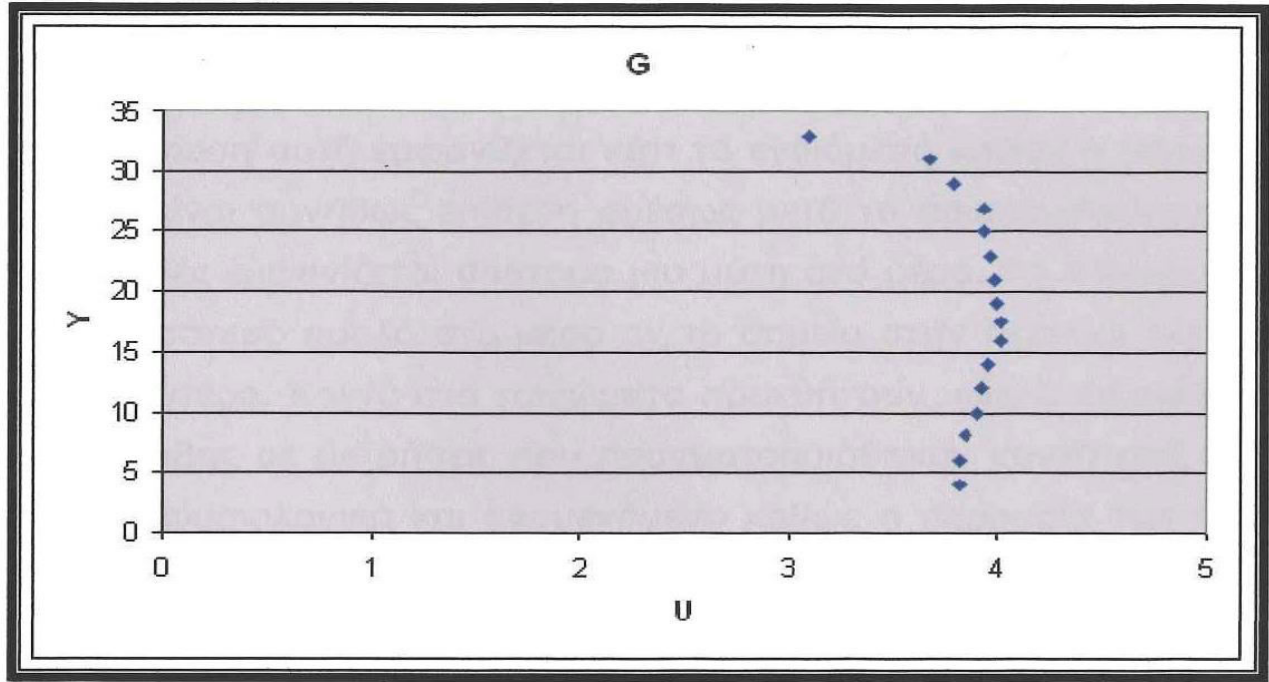
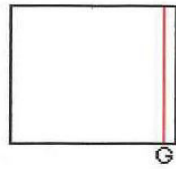
Σχήμα 3.100 : Γραφική παράσταση rms.



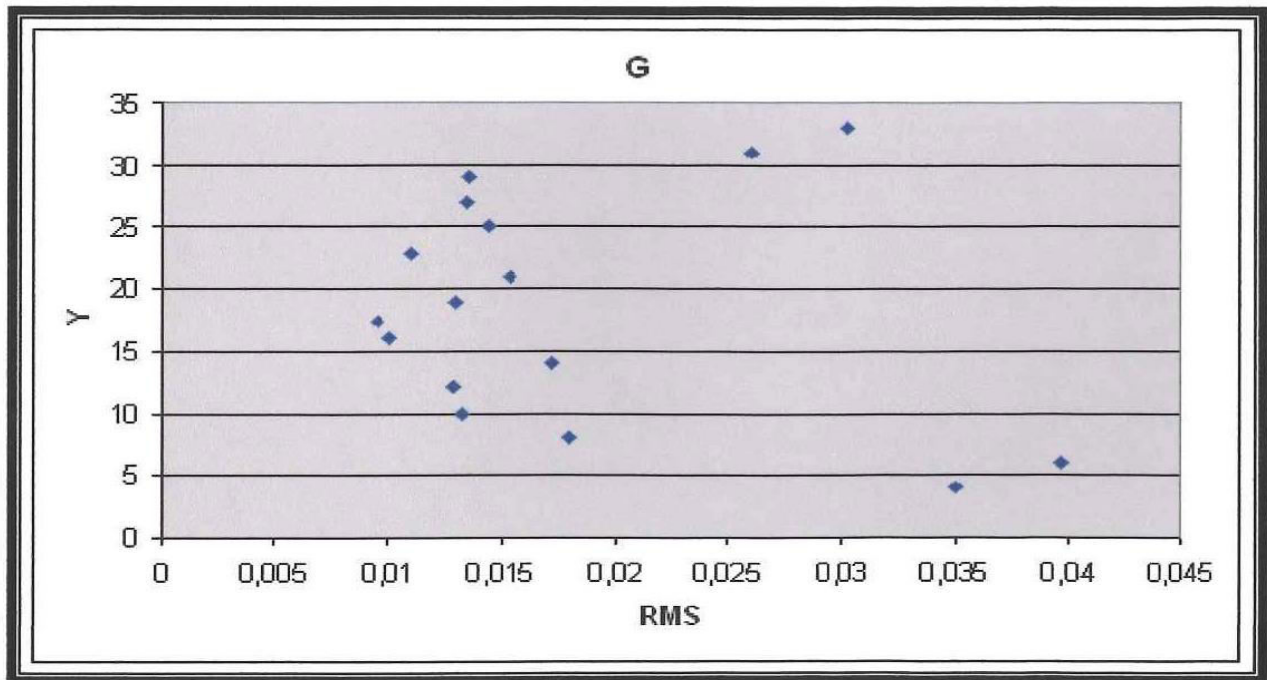
Σχήμα 3.101 : Γραφική παράσταση διανομής ταχύτητας.



Σχήμα 3.102 : Γραφική παράσταση rms.



Σχήμα 3.103 : Γραφική παράσταση διανομής ταχύτητας.



Σχήμα 3.104 : Γραφική παράσταση rms.

Από τις παραπάνω γραφικές παραστάσεις διανομής ταχύτητας και rms προκύπτουν τα ακόλουθα ουσιαστικά συμπεράσματα. Η ροή μέσα στον τετραγωνικό αγωγό είναι τυρβώδης γεγονός που φαίνεται και από τη μορφή των καμπυλών. Γενικά στην τυρβώδη ροή, η μορφή της καμπύλης πρέπει να είναι σχεδόν επίπεδη στο κεντρικό μέρος του αγωγού, ενώ στη στρωτή το οριακό στρώμα είναι παχύτερο με μια κορυφή στο μέσο. Στην περίπτωση αυτή εμφανίζεται κάτι το ενδιάμεσο καθώς η μορφή της καμπύλης είναι συνήθως επίπεδη αμέσως μετά τα οριακά στρώματα και πολλές φορές εμφανίζεται απότομα μια μύτη στο μέσο. Το διάγραμμα θα ήταν περισσότερο ομαλό στο μέσο αν τα σημεία στην περιοχή εκείνη ήταν περισσότερα. Κοντά στα τοιχώματα προκύπτουν υψηλά επίπεδα rms, δηλαδή τύρβης σε μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν κοντά στα τοιχώματα, κάτι φυσιολογικό και αναμενόμενο καθώς η παρουσία των τοιχωμάτων επηρεάζει τη ροή του αέρα κοντά σε αυτά. Επίσης καθώς τα σημεία των μετρήσεων είναι συμμετρικά μεταξύ τους υπάρχει μια σχετική συμμετρία και στις γραφικές παραστάσεις των σημείων αυτών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

ΚΡΙΤΙΚΗ, ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Είναι η πρώτη φορά που συναρμολογήθηκε το πλήρες σύστημα του ανεμόμετρου θερμού νήματος και έγιναν μετρήσεις στην αεροσήραγγα στο Τμήμα Μηχανικών Διαχείρισης Ενεργειακών Πόρων. Το γεγονός αυτό συνετέλεσε στο να προκύψουν ορισμένα προβλήματα κατά τη διάρκεια της εργασίας ορισμένα από τα οποία επιλύθηκαν, για κάποια άλλα όμως κάτι τέτοιο δεν ήταν εφικτό.

Απαραίτητο είναι να επιλυθεί το πρόβλημα που παρουσιάστηκε. Ενδεχομένως πρέπει να γίνουν επιπλέον μετρήσεις με νέο ανεμιστήρα ή και με νέο αισθητήρα ώστε να γίνει αντιληπτή η αιτία για την οποία το ανεμόμετρο θερμού νήματος δίνει λανθασμένα αποτελέσματα τάσης σε σχέση με την ταχύτητα και να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα. Επίσης καλό θα ήταν να τοποθετηθεί κατάλληλος ρυθμιστής στροφών του ανεμιστήρα καθώς η ρύθμιση της ροής του αέρα χειροκίνητα και με τη βοήθεια των ρυθμιστών είναι σχετικά επίπονη όταν κανείς επιθυμεί να διατηρεί μια συγκεκριμένη και σταθερή ταχύτητα μέσα στην αεροσήραγγα ή όταν χρειαστεί να επαναλάβει κάποια μέτρηση που έχει ήδη γίνει μετά από κάποιο χρονικό διάστημα. Ακόμα, καθώς κανείς πρέπει να γνωρίζει τις συνθήκες που επικρατούν στο χώρο του εργαστηρίου κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, καλό θα ήταν να υπάρχουν ένα θερμόμετρο και ένα μανόμετρο μεγαλύτερης ακριβείας, ώστε να παρακολουθούνται ευκολότερα τυχόν μεταβολές της πίεσης και της θερμοκρασίας στο χώρο κατά τη διάρκεια των μετρήσεων και στη συνέχεια να γίνονται οι κατάλληλες διορθώσεις όπου αυτές απαιτούνται.

Ένα ακόμα γεγονός που αξίζει να σημειωθεί είναι ότι για την πραγματοποίηση των πειραματικών μετρήσεων καλή θα ήταν η παρουσία δύο ατόμων καθώς κάτι τέτοιο μπορεί να επιταχύνει πολύ τη διαδικασία. Επίσης εξασφαλίζει μεγαλύτερη ασφάλεια δεδομένου ότι στο εργαστήριο υπάρχουν κινούμενα και περιστρεφόμενα μηχανικά μέρη και υπάρχει η πιθανότητα ενός ενδεχόμενου ατυχήματος.

Κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων είναι απαραίτητο να δίδεται ιδιαίτερη προσοχή στον τρόπο χειρισμού του ανεμόμετρου θερμού νήματος λόγω της μεγάλης του ευαισθησίας. Μεγάλη προσοχή είναι αναγκαίο να υπάρχει κατά την τοποθέτηση και την αφαίρεσή του. Επίσης και κατά τη διάρκεια των μετρήσεων καλό είναι να αποφεύγεται η τοποθέτησή του πολύ κοντά στα όρια των επιφανειών της αεροσήραγγας αλλά και τυχόν μοντέλων που πιθανότατα θα βρίσκονται μέσα σε αυτή. Ακόμα σε περίπτωση ταυτόχρονης ύπαρξης και ενός άλλου οργάνου μέσα στην αεροσήραγγα (για παράδειγμα ενός σωλήνα pitot) επιβάλλεται να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή ώστε να μην επηρεάζει το ένα όργανο τις μετρήσεις του άλλου.

Σημαντικότερο ρόλο στην εγκυρότητα και ακρίβεια των αποτελεσμάτων έχουν και οι τακτικές βαθμονομήσεις του ανεμόμετρου θερμού νήματος λόγω των διακυμάνσεων της θερμοκρασίας και της ατμοσφαιρικής πίεσης κατά τη διάρκεια της ημέρας. Αυτό εξασφαλίζει το να μην υπάρχει απόκλιση των μετρούμενων μεγεθών από τις πραγματικές τιμές τους. Τέλος καλό θα ήταν στο κέντρο της αεροσήραγγας οι μετρήσεις να γίνονται πιο πυκνές ώστε τα διαγράμματα διανομής ταχύτητας να είναι ομαλότερα χωρίς την παρουσία της απότομης μύτης στο κέντρο.

Τα προβλήματα που προέκυψαν λειτούργησαν ανασταλτικά ως προς την παραπέρα εξέλιξη της εργασίας. Με τη βοήθεια των οργάνων μπορεί κανείς να μελετήσει πληθώρα φαινομένων που σχετίζονται με τη μηχανική ρευστών και τη ροή γύρω από αντικείμενα. Εκτός από την καταγραφή της αεροδυναμικής συμπεριφοράς της αεροσήραγγας με τον τρόπο που έγινε, είναι δυνατό να γίνει πληρέστερα, σε ολόκληρη την έκτασή της και σε περισσότερα σημεία. Επίσης υπάρχει η δυνατότητα να τοποθετηθεί το μοντέλο ενός αντικειμένου και να μελετηθεί η ροή γύρω από αυτό. Κάτι τέτοιο μπορεί να γίνει με το μοντέλο ενός κτιρίου, ενός αυτοκινήτου ακόμα και μιας γέφυρας ώστε να αποφευχθούν τυχόν προβλήματα

λόγω ταλαντώσεων από ανέμους που τυχόν φυσούν στην περιοχή. Σε τυχόν τοποθέτηση του μοντέλου ενός εναλλάκτη μπορεί να μελετηθεί η ροή γύρω από αυτόν ώστε να επιλεγεί το ιδανικότερο σχήμα που θα έχει για καλύτερη απόδοση. Οι προοπτικές και οι κατευθύνσεις που μπορεί να πάρει κανείς είναι πάρα πολλές αλλά και εξαιρετικά ενδιαφέρουσες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΣΤΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΡΕΥΣΤΩΝ, ΑΠΟΣΤΟΛΟΣ Κ. ΓΟΥΛΑΣ, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΓΙΑΧΟΥΔΗ-ΓΙΑΠΟΥΛΗ, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ (1998).

ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΡΕΥΣΤΩΝ, ΑΠΟΣΤΟΛΟΣ Κ. ΓΟΥΛΑΣ, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΓΙΑΧΟΥΔΗ-ΓΙΑΠΟΥΛΗ, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ

“HOW TO MEASURE TURBULENCE WITH HOT-WIRE ANEMOMETERS—A PRACTICAL GUIDE”, FINN E. JOGENSEN, DANTEC DYNAMICS, (2002).

THE FAST FOURIER TRANSFORM, THEORY AND PRACTICE, S. RABINOVICH, 2nd ed., SPRINGER-VERLAG, (2000).

FLUID MECHANICS, VICTOR L. STEETER, E. BENJAMIN WYLIE.

ΑΝΩΤΕΡΑ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ, MURRAY R. SPIEGEL, ΜΕΤΑΦΡΑΣΗ: ΙΩΑΝΝΗΣ Χ. ΣΧΟΙΝΑΣ, Mc GRAW-HILL, NEW YORK, ΕΣΠΙ, ΑΘΗΝΑ.

Ε.Μ.Π. ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ - ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ,
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ, Δ. Σ. ΜΑΘΙΟΥΛΑΚΗΣ,
ΑΘΗΝΑ (1999).

ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ, Γ. ΜΠΕΡΓΕΛΕΣ,
Δ. ΠΑΠΑΝΤΩΝΗΣ, Σ. ΤΣΑΓΓΑΡΗΣ, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΣΥΜΕΩΝ.

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ, Σ. ΣΙΜΟΠΟΥΛΟΣ,
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΕΣ ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΜΑΘΗΜΑΤΟΣ Ε.Μ.Π., (1988).

ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ, ΑΓΓΕΛΟΥ Θ ΠΑΠΑΪΩΑΝΝΟΥ, ΕΚΔΟΣΕΙΣ Δ.
ΜΑΥΡΟΜΑΤΗ

ΔΙΕΥΘΥΝΣΕΙΣ ΣΤΟ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ

www.tsi.com, INNOVATION IN THERMAL ANEMOMETRY- A COMPLETE
FAMILY OF THERMAL ANEMOMETRY SYSTEMS, PROBES AND
ACCESSORIES.

www.dantec.com

