

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
UNIVERSITY OF WEST ATTICA



ΧΑΪΚΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ
ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΝΕΜΟΜΕΤΡΙΑΣ ΣΕ ΑΞΟΝΟ-ΣΥΜΜΕΤΡΙΚΟ
ΑΚΡΟΦΥΣΙΟ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΤΥΡΒΩΔΟΥΣ ΡΟΗΣ ΣΤΗΝ
ΠΕΡΙΟΧΗ ΟΜΟΙΟΤΗΤΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Ακαδημαϊκό Έτος: 2022 - 2023

Επιβλέπων: Δρ. ΣΑΡΡΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ
Επιβλέπων: Δρ. ΒΑΣΙΛΟΠΟΥΛΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΑΙΓΑΛΕΩ ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2023

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
UNIVERSITY OF WEST ATTICA

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Ακαδημαϊκό Έτος: 2022-2023

ΧΑΪΚΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ
ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΝΕΜΟΜΕΤΡΙΑΣ ΣΕ ΑΞΟΝΟ-ΣΥΜΜΕΤΡΙΚΟ
ΑΚΡΟΦΥΣΙΟ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΤΥΡΒΩΔΟΥΣ ΡΟΗΣ ΣΤΗΝ
ΠΕΡΙΟΧΗ ΟΜΟΙΟΤΗΤΑΣ

Επιβλέπων: ΣΑΡΡΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ
Επιβλέπων: ΒΑΣΙΛΟΠΟΥΛΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΑΙΓΑΛΕΩ ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2023

© UNIVERSITY OF WEST ATTICA

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced
without the written permission of the copyright owner

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
UNIVERSITY OF WEST ATTICA

SCHOOL OF ENGINEERING
Department of Mechanical Engineering

ACADEMIC YEAR: 2022-2023

CHAIKOS NIKOLAOS

AUTOMATIC CALIBRATION OF HOT WIRE PROBES AND
MEASUREMENTS IN THE SIMILARITY REGION OF A ROUND
TURBULENT JET

Supervisor: SARRIS IOANNIS

Supervisor: VASILOPOULOS KONSTANTINOS

EGALEO SEPTEMBER 2023.



ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ
ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΝΕΜΟΜΕΤΡΙΑΣ ΣΕ ΑΞΟΝΟ-ΣΥΜΜΕΤΡΙΚΟ
ΑΚΡΟΦΥΣΙΟ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΤΥΡΒΩΔΟΥΣ ΡΟΗΣ ΣΤΗΝ
ΠΕΡΙΟΧΗ ΟΜΟΙΟΤΗΤΑΣ

Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του
Εισηγητή

A/α	ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ	ΒΑΘΜΙΔΑ/ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ
1	ΣΑΡΡΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ	ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ	
2	ΒΑΣΙΛΟΠΟΥΛΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ- ΙΩΑΝΝΗΣ	ΕΚΤΑΚΤΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΠΡΟΣΩΠΙΚΟ	
3	ΚΑΡΒΕΛΑΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ	ΕΚΤΑΚΤΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΠΡΟΣΩΠΙΚΟ	

ABSTRACT

The study of the physics of a round jet flow is a fundamental part of fluid mechanics' research. The analysis of the flow structure after mixing provides scope for understanding phenomena about the physics of flows and vortices. Thermal anemometry as a sampling method gives a range of options for experimental data acquisition for flow calculation. The hot-wire continuous-temperature thermal anemometry method (HWA-CTA) gives results with little deviation that can be interpreted for investigating a flow. By interpreting the results, we can through the calculation of turbulent intensity and spectra-Strouhal number diagrams, see the presence of a potential core of the jet ($0.75 \cdot D$) and the increase of turbulence and dunes beyond it.

In this thesis, a new jet flow arrangement in the lab is studied using a hot wire thermal anemometer. The objective is to study the flow of the jet flow downstream of the nozzle.

Keywords:

Round jet, hot wire anemometry, vortices

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο/η κάτωθι υπογεγραμμένος/η Χάικος Νικόλαος του Ιωάννη, με αριθμό μητρώου 46145495 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών



Ευχαριστίες

Αρχικώς, θα ήθελα να ευχαριστήσω το διδακτικό προσωπικό για την καθοδήγηση και την εξαιρετική τους βοήθεια κατά όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας. Πιο συγκεκριμένα, τον κ. Ιωάννη Λεκάκη για την αρχική προτροπή να ασχοληθώ με το τομέα της θερμικής ανεμομετρίας και της ροής σε συγκλίνοντα ακροφύσια και την μετάδοση όλων των γνώσεων του. Τον κ. Ιωάννη Σαρρή για την εξασφάλιση όλων των πόρων για την πειραματική εκπόνηση της εργασίας και την επίβλεψη της διπλωματικής μου εργασίας. Τον κ. Κωνσταντίνο Βασιλόπουλο για την συνεχή στήριξη και καθοδήγηση σε όλη τη διάρκεια της εργασίας, στην σύνταξη, εκτέλεση και διεκπεραίωση της. Τον κ. Παπαδόπουλο Θεόδωρο για την βοήθεια του στο εργαστήριο και την τεχνική βοήθειά του στο πείραμα.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Ανάργυρο Παλαμπιγίκ για την πολύτιμη βοήθεια στα πρώτα στάδια της εργασίας τόσο στο θεωρητικό τόσο και στο πρακτικό μέρος της εργασίας και στην εκπαίδευση χρήσης της διάταξης θερμικού ανεμομέτρου. Τον Παναγιώτη Τζέκο, συμφοιτητή και κυρίως προσωπικό φίλο για την αδιάκοπη στήριξη, βοήθεια και πίστη σε όλη τη διάρκεια της διπλωματικής αλλά και της παράλληλης φοίτησης μας στο τμήμα όλα αυτά τα χρόνια. Τους φίλους και συμφοιτητές μου Μάριο Γκιόγκεζα και Φράνς Τσούλη για όλη τη στήριξη και βοήθεια ψυχολογική και υλική όλα τα χρόνια των σπουδών μας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την στήριξη της όλα αυτά τα χρόνια, τον πατέρα μου Ιωάννη Χάικο, ιδιαίτερα την μητέρα μου Κωνσταντίνα Βατσή που δεν σταμάτησε να πιστεύει σε μένα ακόμα και στις πιο δύσκολες στιγμές μου και τον αδερφό μου Γεώργιο Χάικο που αποτελεί πρότυπο ζωής για μένα

Τέλος θέλω να ευχαριστήσω όλους τους φίλους μου που δεν σταμάτησαν να πιστεύουν σε μένα ακόμα και όταν δεν πίστευα εγώ στον εαυτό μου. Δεν θα τα είχα καταφέρει χωρίς αυτούς .

Στην ανιψιά μου Γεωργία-Ιωάννα Χάικου

Περιεχόμενα

ABSTRACT	i
ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	ii
Ευχαριστίες	iii
Κατάλογος Σχημάτων	vii
Κατάλογος Πινάκων	x
Κατάλογος Εξισώσεων	xi
Λίστα Συντομογραφιών	xiv
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΡΟΗΣ ΣΕ ΣΥΓΚΛΙΝΟΝ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟ	3
2.1 Κυκλικοί ελεύθεροι πίδακες	3
2.2 Οι δίνες	8
2.3 Σύζευξη στροβίλων	10
2.4 Απόσταση στροβίλων	12
2.5 Μεταβατικοί πίδακες	14
3 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΑΝΕΜΟΜΕΤΡΙΑΣ ΘΕΡΜΟΥ ΝΗΜΑΤΟΣ	15
3.1 Εισαγωγή στην ανεμομετρία	15
3.1.1 Πλεονεκτήματα ανεμομετρίας θερμού νήματος/φιλμ	15
3.1.2 Προβλήματα HWA και προτιμώμενες λύσεις	17
3.1.3 HWA περιορισμοί/LDA εφαρμογές	19
3.1.4 Η ανάγκη για μετρήσεις ροής	20
3.1.5 Κύριες εξισώσεις χρόνου	22
3.1.6 Μετρήσεις μέσης ταχύτητας	24
3.2 Μετάδοση θερμότητας	26
3.2.1 Αισθητήρες «απείρου» μήκους νήματος	26
3.2.2 Αισθητήρες θερμού νήματος πεπερασμένου μήκους	27
3.3 Θερμικό ανεμόμετρο	40
3.3.1 Επεξεργασία Σήματος	44
4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ	47
4.1 Διαστασιολόγηση εύρους ταχυτήτων εύρους ταχυτήτων της διάταξης ροής συγκλίνοντος ακροφυσίου	47
4.2 Οδηγίες χρήσης διάταξης θερμικού ανεμομέτρου	52
Οδηγίες χρήσης διάταξης θερμικού ανεμομέτρου για την αποφυγή καταστροφής του αισθητήρα	52
4.3 Βαθμονόμηση καναλιού για λειτουργία CTA (continuous temperature anemometry)	53
5 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	56
5.1 Βαθμονόμηση της ταχύτητας της ροής συγκλίνοντος ακροφυσίου ως προς τον αριθμό Reynolds και υπολογισμός turbulent intensity (T.I.)	56
5.2 Μετρήσεις ταχύτητας με single και double-wire στην έξοδο του συγκλίνοντος ακροφυσίου	58

6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	67
6.1 Διαγράμματα average window FFT-αριθμό Strouhal για ροή του συγκλίνοντος ακροφυσίου σε 4 αριθμούς Reynolds	67
6.2 Διαγράμματα average FFT-Strouhal number για αριθμούς Re=20000 Re=50000 και Re=50000 με τη χρήση συχνότητας αποκοπής (f=380Hz)	69
7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	76
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	78
ΠΡΟΣΑΡΤΗΜΑΤΑ.....	80

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2-1 Πρότυπο ενός τυρβώδους τζετ.....	4
Σχήμα 2-2 Προφίλ ταχύτητας σε ένα συγκλίνον ακροφύσιο(εικόνα από Violato and Scarano (2011)).....	6
Σχήμα 2-3 Μέση αξονική ταχύτητα κατά μήκος της ακτινικής απόστασης (εικόνα από Pope (2000)).....	7
Σχήμα 2-4 Ανάπτυξη στρογγυλού τζετ: Μια δισδιάστατη αποτύπωση του στρογγυλού ακροφυσίου σε $Re=9000$ (εικόνα από Yule (1978)).....	8
Σχήμα 2-5 Απεικόνιση χρονικής σειράς κυκλικού συγκλίνοντα ακροφυσίου (εικόνα από Violato and Scarano (2011)).....	12
Σχήμα 2-6 Δομή ενός μεταβατικού πίδακα (εικόνα από Yule (1978)).....	13
Σχήμα 3-1 Μετάδοση θερμότητας από έναν θερμαινόμενο κύλινδρο σε μια διασταυρούμενη ροή (εικόνα από Bruun (1996)).....	21
Σχήμα 3-2 Αισθητήρας πίεσης 5-οπών για μέτρηση 3 συνιστωσών ταχύτητας σε ροή χαμηλής ταχύτητας (εικόνα από (Bruun 1996)).....	25
Σχήμα 3-3 Η γεωμετρία ενός θερμού νήματος (Bruun (1996)).....	29
Σχήμα 3-4 Η ισορροπία θερμοτήτων σε ένα θερμό νήμα (εικόνα από Bruun (1996)).....	29
Σχήμα 3-5 Η κατανομή της θερμοκρασίας κατά μήκος ενός θερμού νήματος για διάφορες τιμές του $l2lc$ (εικόνα από Bruun (1996)).....	33
Σχήμα 3-6 Μεταβολές στην απόκλιση θερμοκρασίας και ταχύτητας για θερμοκρασιακή διαφορά $T_w - T_a$: α) $10^{\circ}C$ b) $100^{\circ}C$ και c) $250^{\circ}C$ (εικόνα από Bruun (1996)).....	39
Σχήμα 3-7 Διάταξη κυκλώματος γέφυρας ανεμομέτρου (Εχχειρίδιο χρήσης) ..	42
Σχήμα 3-8. Σήμα πριν και μετά την επεξεργασία σήματος (Εχχειρίδιο χρήσης) ..	44
Σχήμα 4-1. Χαρακτηριστικά μεγέθη διάταξης ακροφυσίου	47
Σχήμα 4-2. Διάταξη ροής συγκλίνοντος ακροφυσίου	48
Σχήμα 4-3. Α) πίνακας λειτουργίας κινητήρα διάταξης β) σωλήνας pitot.....	49
Σχήμα 4-4. Μανόμετρο Furness Controls FCO560	49
Σχήμα 4-5 Διάγραμμα ταχυτήτων-συχνότητας περιστροφής κινητήρα διάταξης για μετρήσεις στην έξοδο του συγκλίνοντος ακροφυσίου με σωλήνα pitot και για μετρήσεις στη πίσω διάμετρο του ακροφυσίου	50
Σχήμα 4-6 Σχέδιο διάταξης ροής συγκλίνοντος ακροφυσίου	51

Σχήμα 4-7. Μονάδα διάταξης θερμικού ανεμομέτρου.....	55
Σχήμα 5-1 Διάγραμμα συχνότητας περιστροφής κινητήρα (Hz) – αριθμού Reynolds.....	57
Σχήμα 5-2 Μονός αισθητήρας θερμού νήματος.....	59
Σχήμα 5-3 Στήριξη μονού και διπλού αισθητήρα.....	59
Σχήμα 5-4 Αισθητήρας διπλού θερμού νήματος.....	60
Σχήμα 5-5 Μετρήσεις ταχύτητας single wire στην έξοδο του ακροφυσίου σε αριθμό $Re=50.000$	61
Σχήμα 5-6 Μετρήσεις τάσης single wire στην έξοδο του ακροφυσίου σε αριθμό $Re=50.000$	61
Σχήμα 5-7 Διάγραμμα FFT για μετρήσεις ταχύτητας στην έξοδο του ακροφυσίου για $Re=50000$	62
Σχήμα 5-8 Διάγραμμα ταχύτητας-τάσεων για single wire στην έξοδο του ακροφυσίου για $Re=50000$	63
Σχήμα 5-9 Μετρήσεις ταχύτητας single wire στην έξοδο του ακροφυσίου σε αριθμό $Re=20.000$	64
Σχήμα 5-10 Μετρήσεις τάσης single wire στην έξοδο του ακροφυσίου σε αριθμό $Re=20.000$	64
Σχήμα 5-11 Διάγραμμα ταχύτητας-τάσεων για single wire στην έξοδο του ακροφυσίου για $Re=20000$	65
Σχήμα 5-12 Διάγραμμα FFT για μετρήσεις ταχύτητας στην έξοδο του ακροφυσίου για $Re=20000$	65
Σχήμα 5-13 Παράδειγμα διαγράμματος μετρήσεων ταχύτητας two-wire CTA στην έξοδο του συγκλίνοντος ακροφυσίου σε $Re=50000$	66
Σχήμα 6-1 Απεικόνιση μετρήσεων ροής με το θερμικό ανεμόμετρο σε διάφορες αποστάσεις L/D στη ροή συγκλίνοντος ακροφυσίου.....	67
Σχήμα 6-3 Average window FFT-Αριθμός Strouhal.....	68
Σχήμα 6-3 Διάγραμμα Power/N-Strouhal number για λήψη μετρήσεων σε «ελεύθερο» χώρο και με τη χρήση του βραχίονα διαστάσεων.....	69
Σχήμα 6-4 Συγκριτικό διάγραμμα Power spectra-Strouhal Number σε $Re=50000$ για διαφορετικές τιμές L/D	71
Σχήμα 6-5 Συγκριτικό διάγραμμα Power spectra-Strouhal Number σε $Re=20000$ για διαφορετικές τιμές L/D	73
Σχήμα 6-6 Συγκριτικό διάγραμμα Power spectra-Strouhal Number σε $Re=50000$ με τη χρήση συχνότητας αποκοπής για διαφορετικές τιμές L/D	75

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3-1 Φυσικές ιδιότητες κοινών υλικών θερμού νήματος	35
Πίνακας 5-1 Χαρακτηριστικά μεγέθη των 4 καταστάσεων ροής που συγκρίνονται	57
Πίνακας 5-2 Χαρακτηριστικά μεγέθη των μετρήσεων με ανεμόμετρο	58
Πίνακας 6-1 Χαρακτηριστικά της ροής συγκλίνοντος ακροφυσίου για $Re=50000$ σε διάφορες θέσεις του αισθητήρα από την έξοδο του	70
Πίνακας 6-2 Χαρακτηριστικά της ροής συγκλίνοντος ακροφυσίου για $Re=20000$ σε διάφορες θέσεις του αισθητήρα από την έξοδο του	72
Πίνακας 6-3 Χαρακτηριστικά της ροής συγκλίνοντος ακροφυσίου για $Re=50000$ σε διάφορες θέσεις του αισθητήρα από την έξοδο του	74

Κατάλογος Εξισώσεων

(2-1).....	5
(2-2).....	11
(2-3).....	13
(2-4).....	13
(3-1).....	20
(3-2).....	23
(3-3).....	23
(3-4).....	23
(3-5).....	23
(3-6).....	23
(3-7).....	23
(3-8).....	23
(3-9).....	26
(3-10).....	26
(3-11).....	26
(3-12).....	27
(3-13).....	27
(3-14).....	28
(3-15).....	28
(3-16).....	28
(3-17).....	30
(3-18).....	30
(3-19).....	30
(3-20).....	30
(3-21).....	30
(3-22).....	31
(3-23).....	31
(3-24).....	31

(3-25).....	31
(3-26).....	31
(3-27).....	31
(3-28).....	32
(3-29).....	32
(3-30).....	32
(3-31).....	32
(3-32).....	32
(3-33).....	33
(3-34).....	33
(3-35).....	33
(3-36).....	34
(3-37).....	34
(3-38).....	35
(3-39).....	35
(3-40).....	35
(3-41).....	35
(3-42).....	35
(3-43).....	36
(3-44).....	36
(3-45).....	36
(3-46).....	36
(3-47).....	36
(3-48).....	36
(3-49).....	36
(3-50).....	37
(3-51).....	37
(3-52).....	37
(3-53).....	37

(3-54).....	37
(3-55).....	38
(3-56).....	38
(3-57).....	38
(3-58).....	38
(3-59).....	38
(3-60).....	38
(3-61).....	40
(3-62).....	40
(3-63).....	40
(3-64).....	40
(3-65).....	43
(3-66).....	44
(4-1).....	48
(4-2).....	48
(5-1).....	56
(5-2).....	56
(5-3).....	58
(5-4).....	58
(5-5).....	60
(5-6).....	63
(6-1).....	67

Λίστα Συντομογραφιών

HWA	Hot Wire Anemometry
CCA	Constant Current Anemometry
CTA	Constant Temperature Anemometry
LDA	Laser Doppler Anemometry
CFD	Computing Fluid Dynamics
OHR	Over Heating Ratio

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μελέτη της φυσικής ενός συγκλίνοντος ακροφυσίου αποτελεί ιδιαίτερο μέρος έρευνας της ρευστομηχανικής. Η ανάλυση της δομής της ροής μετά την μίξη προσδίδει χώρο για τη λήψη πολλών συμπερασμάτων για την φυσική των ροών, των δινών και της στροβιλότητας. Η θερμική ανεμομετρία ως μέθοδος δειγματοληψίας προσδίδει ένα φάσμα επιλογών για τη πειραματική λήψη δεδομένων για τον υπολογισμό της ροής. Η μέθοδος θερμικής ανεμομετρίας θερμού σύρματος με συνεχή θερμοκρασία (HWA-CTA) δίνει με μικρή απόκλιση αποτελέσματα τα οποία μπορούν να ερμηνευθούν για την ερεύνα μιας ροής. Με την ερμηνεία των αποτελεσμάτων παρέχεται η δυνατότητα μέσω του υπολογισμού της έντασης της τύρβης (turbulent intensity) και διαγράμματα power spectra density προς αριθμό Strouhal να παρατηρηθεί η παρουσία potential core του jet ($0,75 \cdot D$) και η αύξηση της τύρβης και των δινών πέρα από αυτό, καθώς και οι μεταβλητές στη ροή του ρευστού ερμηνεύοντας τις συχνότητες των μετρήσεων.

Στην παρούσα διπλωματική, γίνεται μελέτη νέας διάταξης συγκλίνοντος ακροφυσίου με τη χρήση θερμικού ανεμομέτρου θερμού νήματος. Στόχοι της είναι η :

- Η πρώτη θέση λειτουργίας νέας διάταξης ροής συγκλίνοντος ακροφυσίου και τα τεχνικά χαρακτηριστικά της
- Η διαστασιολόγηση και η ρύθμιση της λειτουργίας της διάταξης με τη βαθμονόμηση της ταχύτητας της ροής με βάση τις στροφές του κινητήρα της διάταξης του ακροφυσίου
- Η λήψη πρώτων μετρήσεων ταχύτητας στην έξοδο του ακροφυσίου και η επεξεργασία αυτών με σκοπό τον προσδιορισμό της τύρβης στην ανάμιξη των ροών

Αναλυτικότερα, στο κεφάλαιο 2 γίνεται εισαγωγή στις βασικές αρχές της ροής ενός συγκλίνοντος ακροφυσίου, την ανάπτυξη των δινών και των στροβίλων κατά την ανάμιξη των ροών κατόπιν του ακροφυσίου, με σκοπό την κατανόηση

των εννοιών και των φαινομένων που θα παρατηρηθούν στην πειραματική διάταξη μας

Στο κεφάλαιο 3, γίνεται μια ενδελεχής αναφορά στην θερμική ανεμομετρία θερμού νήματος. Δίνεται ιδιαίτερη σημασία στις εφαρμογές που χρησιμοποιείται η ανεμομετρία θερμού νήματος και οι εξισώσεις μετάδοσης θερμότητας που τη χαρακτηρίζουν. Επίσης, παρουσιάζονται οι βασικές αρχές που διέπουν την λειτουργία ενός θερμικού ανεμομέτρου σε λειτουργία σταθερής θερμοκρασίας και την επεξεργασία του σήματος των μετρήσεων.

Στόχος του κεφαλαίου 4 γίνεται μια πρώτη γνωριμία με τη πειραματική διάταξη του συγκλίνοντος ακροφυσίου και του θερμικού ανεμομέτρου. Λαμβάνει μέρος πρώτη διαστασιολόγηση της ταχύτητας της ροής σε σχέση με τις στροφές του κινητήρα της διάταξης.

Στο κεφάλαιο 5, παρουσιάζεται η λήψη των μετρήσεων ταχύτητας με βάση τον αριθμό Reynolds της ροής για την μελέτη της τύρβης στη ροή κατάντη του συγκλίνοντος ακροφυσίου

Καταλήγοντας στο κεφάλαιο 6, γίνεται επεξεργασία των δεδομένων ταχύτητας ώστε να προσδιορισθεί η εξέλιξη της τύρβης στη ροή μετά την πλήρη ανάμιξη των ροών.

2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΡΟΗΣ ΣΕ ΣΥΓΚΛΙΝΟΝ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟ

Η κατανόηση της ανατομίας των στρογγυλών συγκλινόντων ακροφυσίων είναι σημαντική σε διάφορες εφαρμογές. Η αστάθεια του ελεύθερου στρώματος διάτμησης κατάντη του στομίου του ακροφυσίου, η μεγάλης κλίμακας σπειροειδείς δομές, η ανάπτυξη τύρβης και η συμπεριφορά της ροής στο σημείο στασιμότητας είναι πολύ σημαντικές έννοιες σε αυτά τα φυσικά φαινόμενα. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι βασικές αρχές των συγκλινόντων ακροφυσίων, οι οποίες αποτελούν τη βάση για την ερμηνεία των πειραματικών αποτελεσμάτων που λαμβάνονται στα επόμενα κεφάλαια.

2.1 Κυκλικοί ελεύθεροι πίδακες

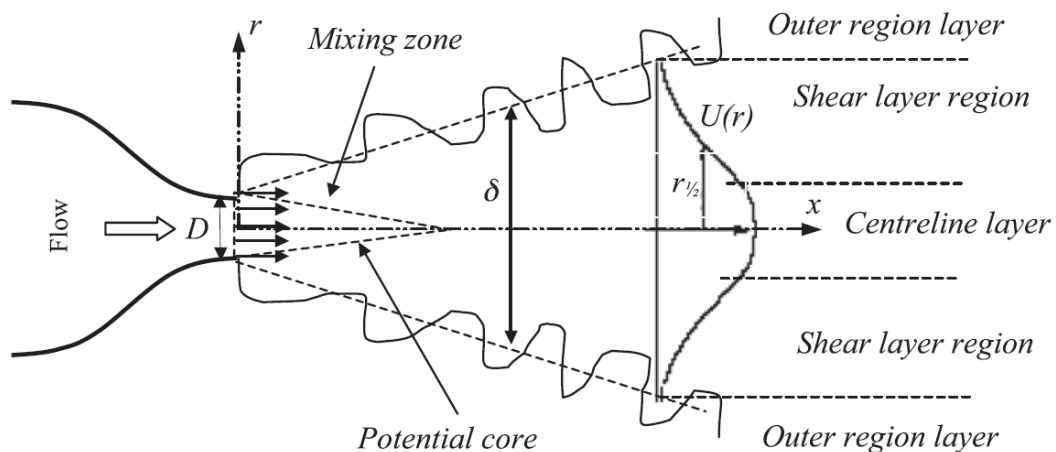
Ένα συγκλινόν ακροφύσιο είναι μια εκροή ρευστού που εκτοπίζεται σε ένα περιβάλλον μέσο, μέσω ενός συγκριτικά μικρότερου ανοίγματος, όπως ένα στόμιο ή ακροφύσιο. Τα συγκλινόντα ακροφύσια αποτελούνται από εγγενείς δομές που παρουσιάζουν ενδιαφέρον για το ευρύ φάσμα των συνεπειών που τείνουν να προκαλέσουν.

Κάθε φορά που ένα κινούμενο ρευστό εισέρχεται σε ένα σώμα ηρεμίας του ίδιου ρευστού, μια διάτμηση ταχύτητας δημιουργείται μεταξύ του εισερχόμενου και του περιβάλλοντος υγρού, προκαλώντας τύρβη και ανάμιξη των στρωμάτων. Κατά συνέπεια, το στρώμα διάτμησης και το συγκλινόν ακροφύσιο εξαπλώνονται πλευρικά προς τα έξω και η ταχύτητα του ακροφυσίου μειώνεται κατάντη. Οι ιδιότητες μιας τυρβώδους ροής εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τη γεωμετρία της περιοχής της ροής και από το είδος των δυνάμεων που δρουν στο ρευστό.

Η κύρια πτυχή των συγκλινόντων ακροφυσίων είναι η στροβιλότητα, $\Omega = \Delta u$ όπου u είναι το πηλίκο ταχύτητας, το οποίο δίνει ένα τοπικό μέτρο της περιστροφής του υγρού. Η στροβιλότητα δημιουργείται κοντά στην έξοδο του ακροφυσίου και η συναγωγή και η διάχυση της σε ένα στενό τμήμα του περιβάλλοντος μέσου προσδίδει την χαρακτηριστική όψη ενός τζετ. Η έναρξη της αστάθειας ροής και η επακόλουθη ενίσχυση της κυμαινόμενης στροβιλότητας προκαλεί μια συσσώρευση στροβιλότητας η οποία μπορεί να

απεικονιστεί με διάφορα μέσα. Το καθεστώς ροής του ακροφυσίου χαρακτηρίζεται από την ταχύτητα εξόδου V του , τη διάμετρο του στην έξοδο του ακροφυσίου ή του σωλήνα D και το αριθμό Reynolds $Re = V D / \nu$ όπου ν είναι το κινηματικό ιξώδες.

Η ανάμιξη μεταξύ ενός τυρβώδους συγκλίνοντος ακροφυσίου και του περιβάλλοντός του πραγματοποιείται σε δύο στάδια- το ένα φέρνοντας σχετικά μεγάλες ποσότητες ρευστών μαζί και το δεύτερο με μικρής κλίμακας διακυμάνσεις ταχύτητας που επιταχύνουν την ανάμιξη σε μοριακό επίπεδο. Οι παραμορφώσεις στην επιφάνεια περιστροφικών και μη περιστροφικών ρευστών που διαθέτουν τις μεγαλύτερες κλίμακες κινούνται με ορισμένη ταχύτητα στο περιβάλλον ρευστό. Η διάδοση αυτών των δομών είναι συνεκτική και εύκολα αναγνωρίσιμη που οδηγεί στην ονομασία τους ως συνεκτικές δομές. Οι δομές αυτές επαναλαμβάνονται στο χώρο και στο χρόνο, γεγονός που σημαίνει ότι έχουν μια ορισμένη επίδραση μέσα στο πεδίο ροής. Είναι επομένως πρωταρχικής σημασίας να κατανοηθεί ο σχηματισμός, η αλληλεπίδραση, η συγχώνευση και ο διαχωρισμός αυτών των συνεκτικών δομών.



Σχήμα 2-1 Πρότυπο ενός τυρβώδους τζετ

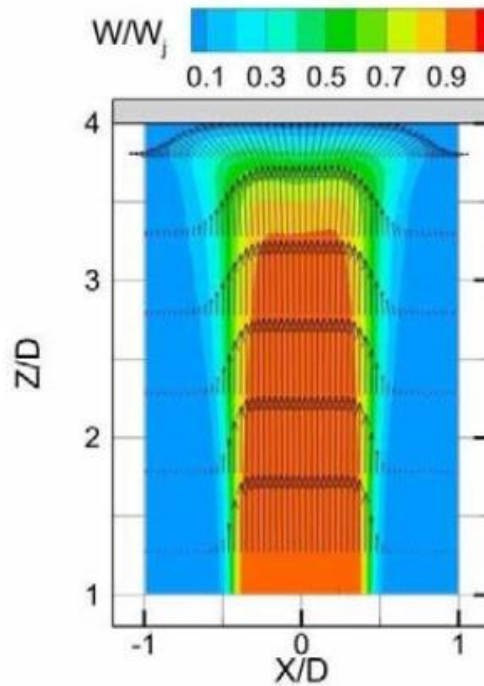
Όταν ένα ακροφύσιο εισέρχεται σε υγρό σε κατάσταση ηρεμίας της ίδιας πυκνότητας, η αρχική κινητική ενέργεια του ακροφυσίου διασκορπίζεται σταδιακά στην περιοχή τυρβώδους μίξης του . Το συγκλίνον ακροφύσιο

διαχωρίζεται από το περιβάλλον με μια ευδιάκριτη επιφανειακή ασυνέχεια. Το περιβάλλον υγρό παρασύρεται σε αυτό το όριο αυξάνοντας τη μάζα του και μειώνοντας την ταχύτητα, διατηρώντας έτσι την ορμή σταθερή. Με αυτόν τον τρόπο, το περίβλημα που περιέχει τύρβη που προκαλούνται από το ακροφύσιο παίρνει σχεδόν κωνικό σχήμα. Αυτό σημαίνει ότι η ακτίνα R του συγκλίνοντος ακροφυσίου είναι ανάλογη της απόστασης x κατάντη του ρευστού. Η γωνία ανοίγματος είναι πάντα η ίδια, ανεξάρτητα από τις ιδιότητες του ρευστού ή του ανοίγματος μέσω του οποίου παρασύρεται. Ακολουθώντας την υπόθεση του Prandtl, ο Tollmien (1926) υπολόγισε την ημιγωνία του κώνου ενός αέριου ακροφυσίου να είναι σχεδόν 12 ή 24 μοίρες πλήρης γωνία (Horn and Thring 1956)). Λαμβάνοντας υπόψη την επαπτομένη της μισής γωνίας ενός ακροφυσίου, $\tan(12^\circ) = 0,2$ δίνει τη σχέση αναλογικότητας της ακτίνας του με την κατάντη απόσταση x .

$$R = \frac{1}{5}x \quad (2-1)$$

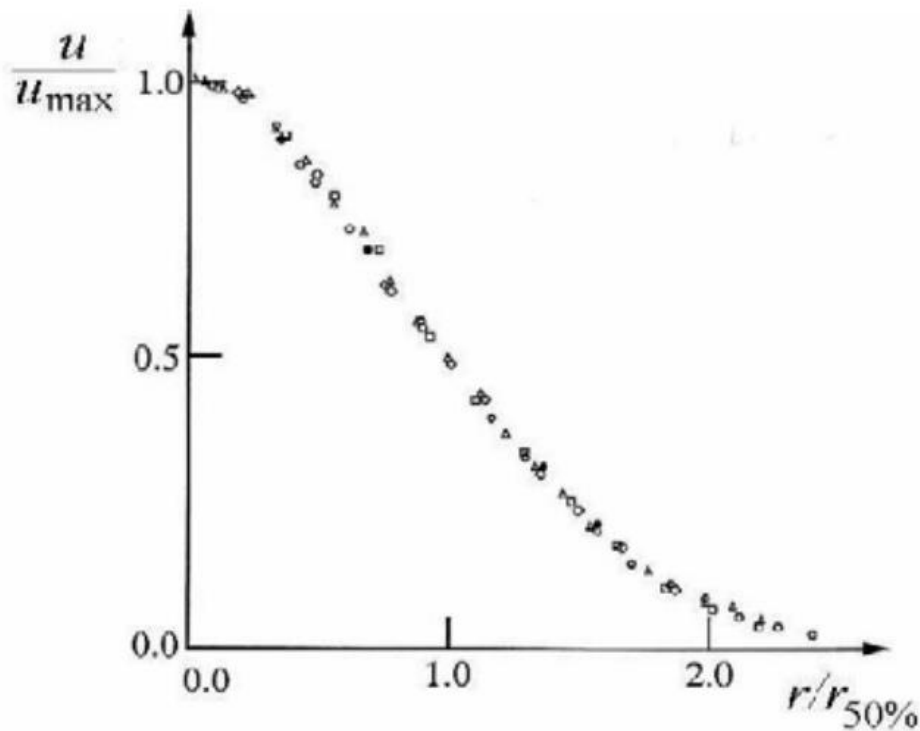
Από το σχήμα 2.1 φαίνεται ότι το σημείο αρχής του κώνου τύρβης δεν βρίσκεται στην έξοδο του ακροφυσίου, αλλά από απόσταση $5D/2$ στο εσωτερικό του σωλήνα, όπου D είναι η διάμετρος του σωλήνα ή ακροφυσίου. Αυτό το σημείο αφετηρίας ονομάζεται εικονική πηγή.

Προηγούμενες πειραματικές έρευνες (Chan and Ko 1978) έχουν αποκαλύψει ότι ένα συγκλίνον ακροφύσιο είναι αυτοομοειδές, δηλαδή τα ακροφύσια τεντώνονται καθώς κινούνται προς τα κάτω, αλλά διατηρούν την εγκάρσια τμηματική εμφάνιση πανομοιότυπη στο χρόνο. Η ταχύτητα κατά μήκος του παρουσιάζει ένα σχεδόν γκαουσιανό σχήμα.



Σχήμα 2-2 Προφίλ ταχύτητας σε ένα συγκλίνον ακροφύσιο(εικόνα από Violato and Scarano (2011))

Τα πειράματα PIV που διεξήχθησαν από τους Violato and Scarano (2011), δείχνουν το προφίλ της κατανομής της ταχύτητας σε διαφορετικές αποστάσεις από την έξοδο του ακροφυσίου. Στο σχήμα 2.2 φαίνεται ότι η ταχύτητα παραμένει σταθερή στην περιοχή του δυναμικού πυρήνα και μετατρέπεται αργά σε καμπύλη καμπάνας πέραν αυτής.



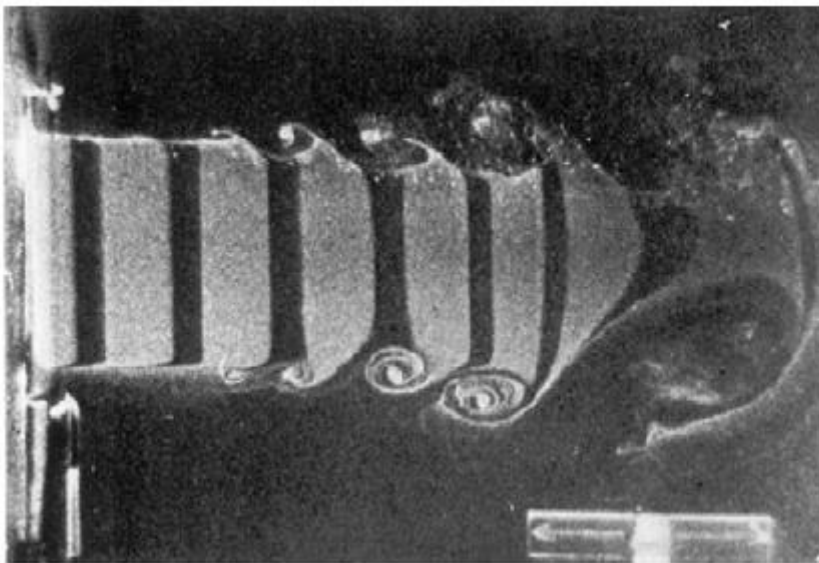
Σχήμα 2-3 Μέση αξονική ταχύτητα κατά μήκος της ακτινικής απόστασης (εικόνα από Pope (2000))

Στο σχήμα 2.3 παρουσιάζεται προφίλ ταχύτητας ενός συγκλίνοντος ακροφυσίου σε σχέση με τις αποστάσεις από το ακροφύσιο εξόδου. Μπορεί να παρατηρηθεί ότι με την αύξηση της αξονικής απόστασης, η ταχύτητα U_0 μειώνεται και εξαπλώνεται περιφερειακά. Το προφίλ μέσης ταχύτητας αλλάζει καθώς το ακροφύσιο κινείται κατάντη, αλλά το βασικό σχήμα του δεν αλλάζει. Οι καμπύλες που παρουσιάζονται εδώ είναι προσαρμοσμένες από τα δεδομένα του Carr, George et al. (1994) που μετρήθηκαν σε $Re = 95500$. Πέρα από την αναπτυσσόμενη περιοχή ($x=D = 30$) τα προφίλ της μέσης ταχύτητας U κανονικοποιημένα με την ταχύτητα της κεντρικής γραμμής εξόδου καταρρέουν σε μια ενιαία καμπύλη. Το Σχήμα 2.3 δείχνει τη μέση αξονική ταχύτητα συναρτήσει της ακτινικής απόστασης σε ένα τυρβώδες στρογγυλό ακροφύσιο σε $10^5 Re$. Η ταχύτητα αδιαστατοποιείται με βάση τη μέγιστη τιμή στο κέντρο του ακροφυσίου και η ακτινική απόσταση με $r_{50\%}$: η απόσταση στην οποία η ταχύτητα πέφτει στο μισό της μέγιστης τιμής της. Από τα σχήματα αυτά μπορεί

να συναχθεί το συμπέρασμα ότι το προφίλ της μέσης ταχύτητας γίνεται αυτόμοιομορφο. Η πιο βασική περίπτωση είναι αυτή ενός ελεύθερου συγκλίνοντος ακροφυσίου που διεισδύει σε ένα κατά τα άλλα αδρανές ρευστό.

2.2 Οι δίνες

Οι δίνες σε ένα συγκλίνον ακροφύσιο υιοθετούν τον κλασσικό ορισμό ενός πεδίου ροής που συνοδεύει μια συγκεντρωμένη, συνεχή, συνεκτική κατανομή στροβιλότητας που είναι ομοιόμορφη στη διεύθυνση της στροβιλότητας και η οποία αυξάνεται σε κλίμακα μέσω ιξώδους διάχυσης. Ο Yule (1978) πραγματοποίησε εκτεταμένες έρευνες για τα στρώματα ανάμιξης ενός στρογγυλού ακροφυσίου και περιέγραψε τις ιδιότητες των στροβίλων σε ένα τζετ. Επιμένει στη χρήση του όρου στροβιλότητας (vortex) μόνο όταν οι δακτύλιοι είναι άρτια εδραιωμένοι, αλλιώς προτιμά τον όρο δίνη (eddy), που περιγράφεται ως περιοχή του ρευστού που περιέχει στροβιλισμό η οποία μπορεί να αναγνωριστεί ως μια κινούμενη συνεκτική δομή σε ένα ρευστό.



Σχήμα 2-4 Ανάπτυξη στρογγυλού τζετ: Μια δισδιάστατη αποτύπωση του στρογγυλού ακροφυσίου σε $Re=9000$ (εικόνα από Yule (1978))

Θα μπορούσε να απεικονιστεί με σαφήνεια από την εργασία των Popiel and Trass (1991) Yule (1978) οι οποίοι φωτογράφησαν γραμμές καπνού που μετέφεραν τις συνεκτικές δομές μαζί τους, ότι το ακροφύσιο ξεκινά ως αρχική

αστάθεια. Ο αέρας που εξέρχεται από την πίσω ακμή ενός συγκλίνοντος ακροφυσίου συγκεντρώνεται σε ένα όριο ενός λεπτού στρωτού διατμητικού στρώματος που είναι εγγενώς ασταθές. Όπως συζητήθηκε από τον Brown and Roshko (1974), αυτό το στρωτό διατμητικό στρώμα παρουσιάζει τα χαρακτηριστικά αστάθειας ενός στρώματος Kelvin-Helmholtz. Από αυτή την αστάθεια αναπτύσσεται μια πρωτογενής δομή. Το στρωματοειδές διατμητικό στρώμα που εξέρχεται από το ακροφύσιο σχηματίζει αμέσως κύματα αυξανόμενου πλάτους,

Στο ίδιο σχήμα παρατηρείται περαιτέρω ότι το κύμα παίρνει ημιτονοειδή μορφή για μικρούς αριθμούς Reynolds. Όταν ο αριθμός Reynolds αυξάνεται από μια τάξη μεγέθους 10^2 σε 10^3 , η αστάθεια εξελίσσεται ως έλικα και αναπτύσσεται ως αξονοσυμμετρικό κύμα. Σε αριθμούς Reynolds της τάξης του 10^4 , οι αξονοσυμμετρικές δομές είναι μεγάλης κλίμακας στροβιλισμός (Champagne and Crow 1971). Ένας μικρός όγκος στροβιλότητας που περιέχεται στο ρευστό διαχωρίζεται από τη κορυφή αυτού του αρχικού κύματος αστάθειας και αρχίζει να συγκεντρώνεται προς τα κάτω. Αυξάνεται σε μέγεθος και δύναμη για να σχηματίσει τον σπειροειδή στρόβιλο που έχει αποδειχθεί από πολλούς ερευνητές ότι είναι η πηγή του θορύβου των τζετ (Brown and Roshko 1974)

Καθώς αυτός ο αρχικός σπειροειδής στρόβιλος συγκεντρώνεται σε ικανή απόσταση κατόντη, ένας νέος στρόβιλος σχηματίζεται στο άκρο του ακροφυσίου που προκαλεί σημαντική συρρίκνωση του δυνητικού πυρήνα του τζετ, προκαλώντας έναν ελαφρύ παλμό στη δράση της ανάντη πίεσης. Ο πυρήνας του δυνητικού ακροφυσίου είναι το κεντρικό τμήμα του ρευστού στο οποίο η ταχύτητα παραμένει η ίδια με εκείνη στο έξοδο του τζετ, ο οποίος τελικά εξαφανίζεται καθώς το στρώμα διάτμησης που τον περιβάλλει από όλες τις πλευρές αρχίζει να συγκλίνει προς τον άξονα. Η ενέργεια αυτή προκαλεί την ταυτόχρονη εμφάνιση ενός νέου κύματος αστάθειας και με τη σειρά του τη γέννηση δίνης γύρω από ολόκληρη την περιφέρεια.

Οι δίνες μπορούν επίσης να απεικονιστούν με σαφήνεια στο σχήμα 2.5 όπως παρουσιάζεται από τους Violato and Scarano (2011). Εντόπισαν τους στρόβιλους χρησιμοποιώντας το κριτήριο λ_2 και οι ταχύτητες συναγωγής

αξιολογούνται σε κάθε χρονική στιγμή. Δείχνει μια χρονική ακολουθία των πεδίων των ροών σε Reynolds αριθμούς 5000 με στιγμιότυπα που χωρίζονται από έναν κανονικοποιημένο χρόνο $\Delta t = 0:61$. Παρατήρησαν ότι η αποβολή των στροβίλων συμβαίνει σε κανονικοποιημένη απόσταση 1 -1,5 η οποία επίσης συμφωνεί με τις παρατηρήσεις των Gharib and Liepmann (1992) και ότι ο πυρήνας του συγκλίνοντος ακροφυσίου προκαλεί μια προς τα έξω ροή στην εμπρόσθια ακμή και προς τα μέσα προς την ουρά, η οποία αυξάνεται καθώς ο δακτύλιος της δίνης μεγαλώνει και μεταφέρεται προς τα κάτω.

2.3 Σύζευξη στροβίλων

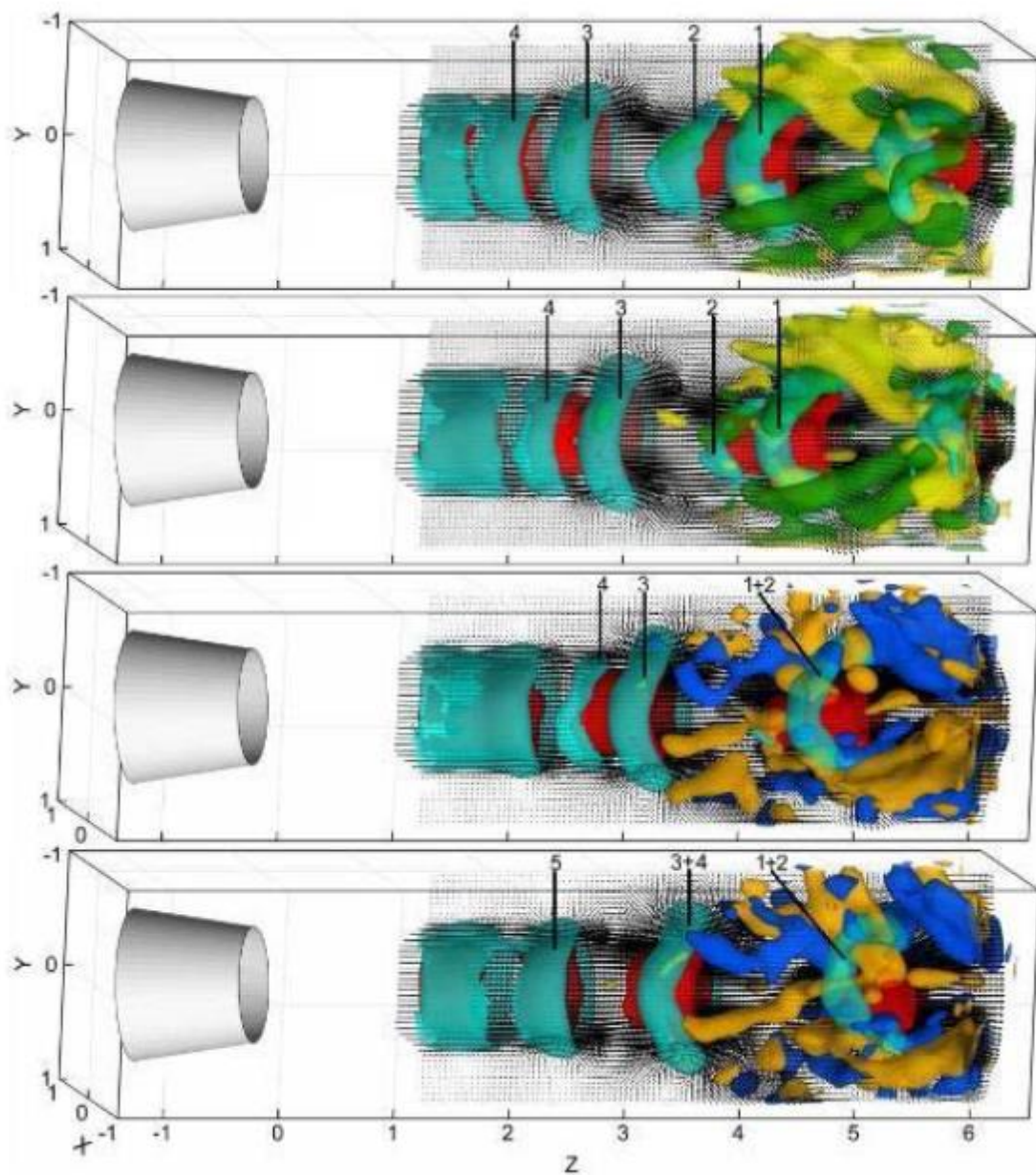
Όταν ένας σπειροειδής στρόβιλος ενεργοποιείται πολύ νωρίς από οποιαδήποτε εσωτερική ή εξωτερική διαταραχή, ο στρόβιλος είναι ασθενέστερος και συνήθως καταπίνεται από τον προηγούμενο μεγαλύτερο στρόβιλο. Αυτό είναι γνωστό ως ζεύξη στροβίλων. Οι Browand and Winant (1974) μελέτησαν εκτενώς τη σύζευξη στροβίλων κατά τη φάση ανάπτυξης του τζετ. Σύμφωνα με αυτούς, καθώς τα ασταθή κύματα αυξάνονται, το ρευστό τυλίγεται σε διακριτές δισδιάστατες στροβιλώδεις δομές όταν αναμιγνύεται με το περιβάλλον ρευστό. Αυτοί οι τυρβώδεις στρόβιλοι αλληλοεπιδρούν στρεφόμενοι μεταξύ τους, σχηματίζοντας μια ενιαία στροβιλώδη δομή, με περίπου διπλάσια απόσταση μεταξύ τους σε σχέση με τους προηγούμενους στρόβιλους.

Οι Violato and Scarano (2011) δίνουν γραφικές λεπτομέρειες σχετικά με το φαινόμενο της σύζευξης στροβίλων μέσω τρισδιάστατων μετρήσεων με τη χρήση τομογραφικού PIV. Στο σχήμα 2.5 φαίνεται καθαρά ότι στο ρεύμα κατάντη του τζετ, οι στρόβιλοι που αποχωρίζονται περιπλέκονται με τους γειτονικούς στρόβιλους που προκαλούν μείωση της συχνότητας στο μισό. Για καλύτερη επεξήγηση, έχουν αριθμηθεί οι στρόβιλοι με τη χρονική ακολουθία που τίθεται. Η ροή που προκαλείται από τον προηγούμενο στρόβιλο (π.χ. δίνη 3) παράγει αξονικές και ακτινικές επιταχύνσεις που κατευθύνονται προς τον πυρήνα του αεριωθούμενου. Ως αποτέλεσμα, ο νεοαπορριφθείς στρόβιλος (στρόβιλος 4) αρχίζει να τεντώνεται κατά μήκος του άξονα αυξάνοντας την ταχύτητα συναγωγής και μειώνοντας τη διάμετρό του. Λόγω αυτής της κίνησης προς τα έξω που προκαλείται στο στη ροή, ο παλαιότερος στρόβιλος τεντώνεται

και αυξάνει τη διάμετρό του, ενώ μειώνει τη συναγωγική του ταχύτητα. Η διαφορά στην ταχύτητα συναγωγής προκαλεί μείωση της απόστασης μεταξύ των δύο στροβίλων και τελικά οδηγεί σε σύζευξη των δύο δομών. Η σύζευξη συμβαίνει επανειλημμένα και επηρεάζει την ανάπτυξη του στρώματος ανάμιξης. Η μέση συχνότητα διέλευσης των πρωτογενών δομών δίνης εκφράζεται με τη μορφή του αριθμού Strouhal

$$St = f \cdot \theta / V \quad (2-2)$$

όπου f είναι η συχνότητα της διάσπασης της δίνης, θ είναι η χαρακτηριστική κλίμακα μήκους του ρευστού και V είναι η ταχύτητα του. Στην περίπτωση αυτή, η χαρακτηριστική κλίμακα μήκους είναι το πάχος ορμής του οριακού στρώματος στο στόμιο του ακροφυσίου. Πειράματα με νήμα καπνού που πραγματοποίησαν οι Popiel and Trass (1991) αποκαλύπτουν ότι πέρα από μια απόσταση $1,5D$, η αναπτυσσόμενη σπειροειδής δίνη μεγαλώνει και μπορεί να συγκριθεί με την ακτίνα του ακροφυσίου. Λόγω αυτής της αύξησης, οι στρόβιλοι μειώνουν τη συχνότητα διέλευσής τους, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα την μίξη των μεταγενέστερων στροβίλων με τους προγενέστερους. Όπως διαπιστώθηκε από τους Champagne and Crow (1971), για αριθμούς Reynolds από 10^4 έως $5 \cdot 10^4$, ένας σταθερός αριθμός Strouhal 0,3 μπορεί να συναχθεί με βάση τη διάμετρο του ακροφυσίου και τη συχνότητα των διερχόμενων στροβίλων.



Σχήμα 2-5 Απεικόνιση χρονικής σειράς κυκλικού συγκλίνοντα ακροφύσιο (εικόνα από Violato and Scarano (2011))

2.4 Απόσταση στροβίλων

Σύμφωνα με τους Armstrong, Michalke et al. (1977), η κλίμακα των συνεκτικών δομών είναι περίπου ανάλογη με το τοπικό πλάτος του στρώματος διάτμησης, το οποίο αυξάνεται γραμμικά με την απόσταση H από το ακροφύσιο.

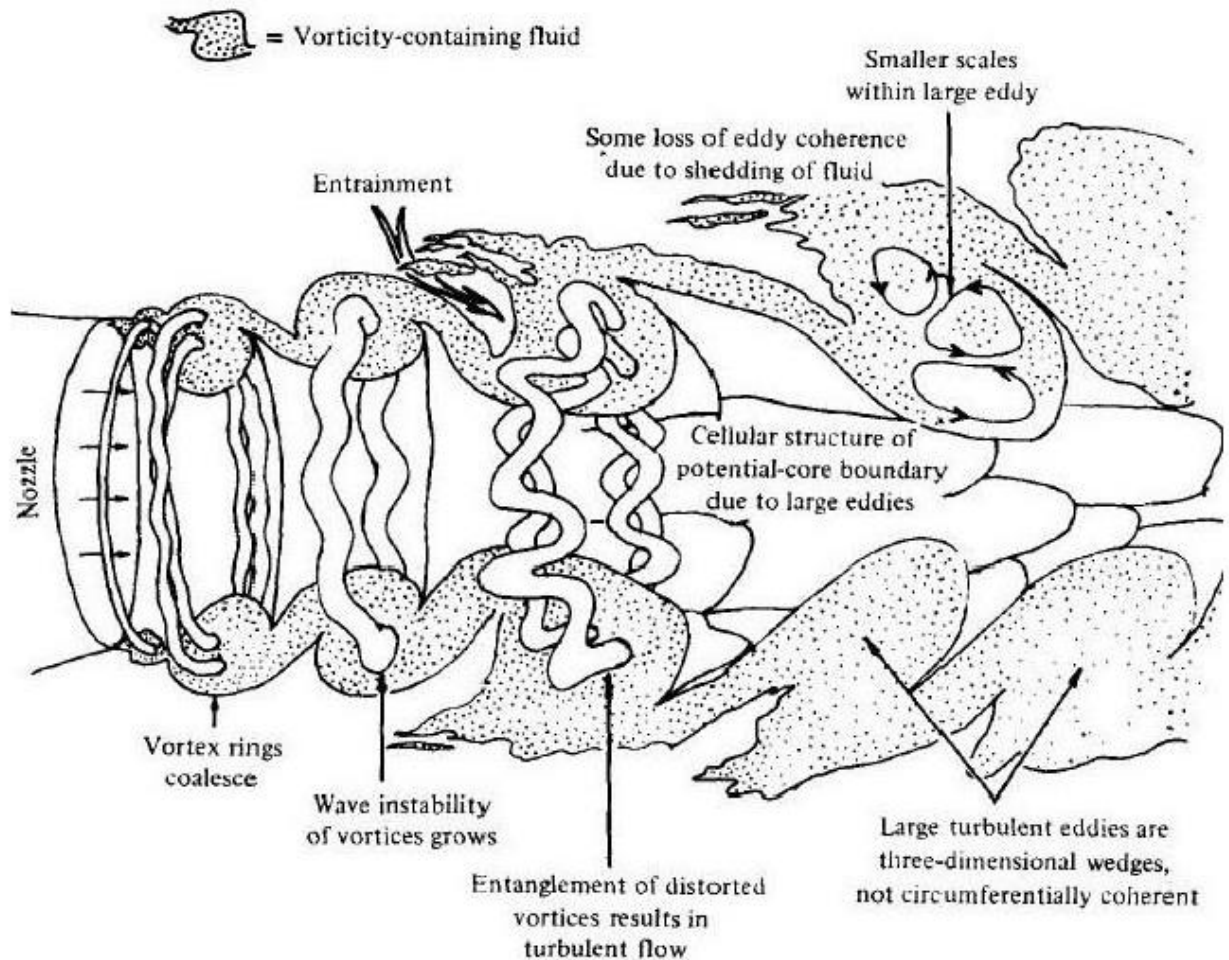
Θεωρήθηκε επίσης ότι η απόσταση διαχωρισμού μεταξύ δύο γειτονικών στροβίλων είναι ανάλογη της απόστασης H . Συμπέραναν μια σχέση της μορφής

$$\lambda/D = 0.55 H/D \quad (2-3)$$

Θα μπορούσε επίσης να αναπαρασταθεί ως-

$$\lambda/D = V_c / f D = (V_c/V) / St \quad (2-4)$$

όπου V_c είναι η ταχύτητα συναγωγής της δίνης, V είναι η ταχύτητα εξόδου του τζετ, f είναι η συχνότητα της δίνης και St ο αριθμός Strouhal, όπως αναφέρεται στην εξίσωση 2.2.



Σχήμα 2-6 Δομή ενός μεταβατικού πίδακα (εικόνα από Yule (1978))

2.5 Μεταβατικοί πίδακες

Η πρώτη σειρά πειραμάτων στην παρούσα διατριβή διεξάγεται στη μεταβατική περιοχή που απαιτεί βαθύτερη κατανόηση αυτού του φαινομένου. Το σχήμα 2.6 από τον Yule (1978) δίνει μια σαφής αναπαράσταση των μεταβατικών ακροφυσίων στο $x=3D$. Το συναλλασσόμενο πεδίο ταχύτητας σε αυτή τη τιμή του x δεν έχει ακόμη αποκτήσει όλες τις ιδιότητες μιας πλήρους ανεπτυγμένης τυρβώδους ροής που αρχίζει μετά το $x=4D$. Η φυσική αστάθεια του αρχικού στρωτού διαμητικού στρώματος παράγει μια οδό συγκεντρώσεων στροβιλότητας που μοιάζουν με δακτυλίους δίνης. Καθώς αυτοί οι δακτύλιοι κινούνται προς τα κάτω, συγχωνεύονται με γειτονικούς δακτυλίους, έτσι ώστε η κλίμακα και ο διαχωρισμός της δίνης δακτυλίων αυξάνονται με την απόσταση από το ακροφύσιο. Ο Yule (1978) παρατήρησε μια σταδιακή αύξηση της ακτινικής ταχύτητας με την απόσταση από το ακροφύσιο κατάντη, λόγω της ομαλής κυματικής παραμόρφωσης των πυρήνων των δακτυλίων δίνης. Μπορούσαν να παρατηρηθούν από ένα έως τουλάχιστον τρεις περιοχές συνένωσης στην περιοχή μετάβασης ανάλογα με τον αριθμό Reynolds του και το πάχος του οριακού στρώματος του ακροφυσίου. Η συνένωση εξαφανίζεται κατάντη της μετάβασης. Ακριβώς πριν αρχίσει η τύρβη, μόνο οι δακτύλιοι δίνης που έχουν παραμορφώσεις πυρήνα μεγαλύτερες από ένα κρίσιμο μέγεθος συνενώνονται, οι οποίοι παράγουν ενισχυμένη στροβιλότητα και μικρές κλίμακες κίνησης. Αυτοί οι περιπλεγμένοι στρόβιλοι εμφανίζονται ως μεγάλες δίνες στο ρεύμα μετάβασης. Οι δακτυλιοειδείς στρόβιλοι και η μείωση της μέγιστης συχνότητας στο μισό που συνδέεται με τη σύζευξη δίνης δεν παρατηρούνται σε περιοχές πέραν της μετάβασης. Η αρχική τάξη, ελικοειδής διεπιφάνεια μεταξύ του συγκλίνοντος ακροφυσίου και του περιβάλλοντος που εισέρχεται στη δίνη διαταράσσεται και διασπάται καθώς νέο ρευστό εισέρχεται και λαμβάνει χώρα η συνένωση.

3 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΑΝΕΜΟΜΕΤΡΙΑΣ ΘΕΡΜΟΥ ΝΗΜΑΤΟΣ

3.1 Εισαγωγή στην ανεμομετρία

Η ανεμομετρία θερμού νήματος βασίζεται στη μεταφορά θερμότητας μέσω συναγωγής από ένα θερμαινόμενο νήμα ή φιλμ τοποθετημένο σε ροή ρευστού. Οποιαδήποτε αλλαγή στις συνθήκες της ροής που επιδρούν στην μεταφορά θερμότητας από το θερμαινόμενο στοιχείο θα εντοπιστεί αυτομάτως από ένα σύστημα σταθερής θερμοκρασίας θερμού νήματος ανεμομετρίας. Άρα η ανεμομετρία θερμού νήματος μπορεί να παρέχει πληροφορίες για καταστάσεις όπως την ταχύτητα και την θερμοκρασία του ρευστού, αλλαγές στην συγκέντρωση(περιεκτικότητα) αέριων μιγμάτων και αλλαγές φάσεως σε πολλαπλών φάσεων ροές(Bruun 1996)

3.1.1 Πλεονεκτήματα ανεμομετρίας θερμού νήματος/φιλμ

Η θερμική ανεμομετρία χρησιμοποιείται ως το κύριο μέσο για την έρευνα των περισσότερων ροών αέρα/αερίων, κυρίως για τυρβώδης ροές χαμηλής ή μέσης έντασης τύρβης. Σε αυτές τις περιπτώσεις τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου απαριθμούνται ως εξής

1. Το κόστος των συστημάτων (HWA, Hot Wire Anemometry) είναι πιο φθινό από το κόστος των συστημάτων Ντοπλερ λέιζερ ανεμομέτρων (LDA, Laser Doppler Anemometer)
2. Η απόκριση συχνότητας: Ένας αισθητήρας probe θερμού νήματος σε συνδυασμό με ένα μοντέρνο ανεμόμετρο σταθερής θερμοκρασίας (CTA-constant temperature anemometry) σε βέλτιστες συνθήκες (εκτός από περιπτώσεις χαμηλών ταχυτήτων) έχουν μια ισόπεδη απόκριση συχνότητας από 0 έως 20-50 kHz. Μετρήσεις ως εκατοντάδες KHz είναι πιο εύκολο να ληφθούν σε σχέση με συστήματα LDA τα οποία περιορίζονται σε συχνότητες κάτω των 30 kHz
3. Μέγεθος: Ένας τυπικός αισθητήρας θερμού νήματος έχει διάμετρο 5 μm και μήκος 1.25 mm και υπάρχουν πιο σπάνια και στοιχεία με διάμετρο 1

μm και μήκος 0.25 mm, σε αντίθεση με ένα τυπικό μοντέλο μέτρησης LDA είναι 50μm διάμετρο με μήκος 0.25 mm

4. Μετρήσεις ταχύτητας: Αισθητήρες θερμικού νήματος με ένα η παραπάνω αισθητήρες είναι διαθέσιμη στην αγορά τα οποία επιτρέπουν λήψη μετρήσεων σε μία δύο ή τρεις συνιστώσες ταχύτητας σε συγκεκριμένα σημεία στο πεδίο ροής. Διατάξεις HWA και LDA λειτουργούν σε μεγάλο εύρος ταχυτήτων σε ροές πολύ χαμηλών ταχυτήτων έως και υψηλών ταχυτήτων (συμπιεστή ροή)
5. Μετρήσεις θερμοκρασίας: Ταυτόχρονες μετρήσεις κυμαινόμενης ταχύτητας και πεδίου θερμοκρασίας είναι δυνατόν να ληφθούν με τη χρήση πολλαπλών αισθητήρων όπου περιλαμβάνεται ένας αισθητήρας σε λειτουργία ψυχρού νήματος.
6. Διπλής φάσης ροή: Αισθητήρες θερμού φιλμ μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μετρήσεις σε ροές που περιλαμβάνουν μια συνεχής τυρβώδη φάση και κατανεμημένες φυσαλίδες (ροή υγρού/αερίου ή ροή υγρού/υγρού). Όταν μια φυσαλίδα(bubble) χτυπήσει τον αισθητήρα, μια αλληλεπίδραση θα λάβει μέρος μεταξύ του probe και της επαφής μεταξύ της φυσαλίδας και της συνεχής φάσης. Αν η φυσαλίδα είναι μεγαλύτερη σε μέγεθος από το στοιχείο του αισθητήρα, αυτή η αλληλεπίδραση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ανάλυση του σήματος, Σε αυτή τη περίπτωση δεν υπάρχει περιορισμός στην συγκέντρωση της φυσαλίδας(void fraction). Αντιθέτως, αν μια τεχνική LDA εφαρμοστεί σε ροή με φυσαλίδες, τότε ένα μικρό κενό κλάσμα (void fraction) πρέπει να χρησιμοποιηθεί καθώς ζητείται η ύπαρξη διαυγούς οπτικού πεδίου
7. Ακρίβεια: Ανεμόμετρα θερμικού νήματος και λείζερ Ντόπλερ μπορούν να αποδώσουν παρόμοια, υψηλής ακρίβειας αποτελέσματα (0.1-0.2%) σε προσεκτικά ελεγχόμενα περιβάλλοντα , αλλά σε πολλές πρακτικές εφαρμογές ακρίβεια 1% είναι πιο πιθανή και στις 2 διατάξεις
8. Λόγος σήματος-ήχου: Ανεμόμετρα θερμικού νήματος έχουν πολύ χαμηλά επίπεδα ήχου. Μία ανάλυση 1 προς 10.000 μπορεί να επιτευχθεί με ευκολία σε αντίθεση με συστήματα LDA όπου ο λόγος 1:1.000 είναι δύσκολος να επιτευχθεί

9. Επιλογή ανάλυσης: Ένα σύστημα HWA είναι σχετικά απλό να λειτουργηθεί καθώς η επιλογή και χρήση αισθητήρων και η αντίστοιχη βαθμονόμηση, λήψη, επεξεργασία δεδομένων και ανάλυσή τους μπορεί να επιτευχθεί με ευκολία
10. Ανάλυση σήματος: Η απόδοση(output) ενός συστήματος HWA είναι ένα συνεχόμενο αναλογικό σήμα, συνεπώς, είναι δυνατή η συμβατική/υπό προϋποθέσεις δειγματοληπτική ανάλυση χρονικού ορισμού και ανάλυση ορισμού συχνότητας
11. Ξεχωριστές πληροφορίες: Η χρήση ενός ή πολλαπλών διαχωρισμένων αισθητήρων επιτρέπει την λήψη μετρήσεων διαφορετικών περιπτώσεων χρόνου και χώρου τύρβης της ροής. Συλλέκτες θερμικού νήματος σε συνδυασμό με υπό όρους δειγματοληψία μπορούν να διακρίνουν την ανάπτυξη αυτών των ταραχών σε επίπεδο χρόνου και χώρου μέσα στη τυρβώδη ροή
12. Ειδικοί αισθητήρες: Εξειδικευμένοι αισθητήρες HWA και η αντίστοιχη ανάλυση σήματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση τυρβωδών ποσοτήτων όπως δίνες, ρυθμό διάχυσης κτλ

3.1.2 Προβλήματα HWA και προτιμώμενες λύσεις

Ροές υψηλής τύρβης: Συμβατικά συστήματα HWA περιορίζονται σε ροές χαμηλής και μέσης τύρβης. Σε υψηλές τιμές τύρβης μπορούν να προκληθούν σφάλματα από 2 περιπτώσεις. Για αισθητήρες μονούς και χ- σύνθεσης, σφάλματα μπορούν να προκύψουν παραμελώντας τα επιτρεπτά όρια ταχυτήτων λειτουργίας. Το δεύτερο είδος σφάλματος αναφέρεται ως σφάλμα διόρθωσης. Εξαιτίας της περιστροφικής συμμετρίας του, το στοιχείο του νήματος δεν εξαρτάται από την αντιστροφή της κατεύθυνσης της ροής η οποία μπορεί να προκληθεί σε ροές μεγάλης τύρβης. Επίσης, για x-wire και τριπλά νήματα, θα προκύψει ασάφεια σήματος όταν το διάνυσμα της ταχύτητας είναι εκτός του αποδεκτού εύρους. Δεν υπάρχουν ικανοποιητικές μέθοδοι απόσβεσης αυτών των σφαλμάτων σε στάσιμους αισθητήρες HWA .

Διατάραξη στελέχους στήριξης αισθητήρα: Τοποθετώντας ένα στέλεχος στη ροή θα επηρεάσει το τοπικό πεδίο ροής. Όμως, για ένα καλώς σχεδιασμένο στοιχείο στήριξης, τα παρελκόμενα σφάλματα θα είναι μικρά και οι σχετικές διαταραχές της ροής θα ενσωματωθούν στην διαδικασία βαθμονόμησης.

Ροή υγρού: Αρκετά είναι τα προβλήματα που μπορούν να παρέλθουν με τη χρήση HWA για την μελέτη μονής φάσης ροής υγρού. Συσσώρευση ρυπαντικού υλικού στον αισθητήρα είναι ένα σοβαρό πρόβλημα το οποίο μπορεί να περιοριστεί με τη χρήση φίλτρου σε μια πειραματική διάταξη ανακυκλοφορίας. Το σφάλμα αυτό είναι μικρότερο σε περιπτώσεις όπου ο αισθητήρας έχει μεγαλύτερες διαστάσεις και για αυτό συνιστάται η χρήση θερμών φιλμ για την μελέτη σε ροές υγρών. Ένα δευτερεύον πρόβλημα είναι η επίδραση της θερμοκρασίας στην βαθμονόμηση του στελέχους στήριξης λόγω του μικρού λόγου υπερθέρμανσης. Ακόμα και μικρές αλλαγές στη θερμοκρασία του υγρού μπορεί να οδηγήσουν σε σημαντικές αλλαγές στη βαθμονόμηση του στοιχείου αναγκάζοντας το χρήστη να εφαρμόζει συχνά επαναληπτικές κινήσεις βαθμονόμησης.

Θραύση στοιχείου στήριξης: Ένα στοιχείο στήριξης hot wire/film είναι ευαίσθητο όργανο το οποίο μπορεί με σωστή χρήση να διαρκέσει για μεγάλα χρονικά διαστήματα(μήνες-χρόνια). Για μελέτες χαμηλής ταχύτητας ροής αέρα, ο κύριος λόγος θραύσης είναι η ακατάλληλη χρήση από άτομα χωρίς εμπειρία. Για αυτό για την αποφυγή ακριβών και χρονοβόρων επισκευών, συνιστάται οι νέοι χρήστες να καθοδηγηθούν προσεχτικά στο πως να χειρίζονται με ασφάλεια τα αισθητήρες. Καταστροφή του αισθητήρα μπορεί να προκληθεί από λάθος στον ορισμό του λόγου υπερθέρμανσης όπου τίθεται πολύ ψηλά ή αν το στέλεχος λειτουργεί για μεγάλο διάστημα σε υψηλές τιμές λόγου υπερθέρμανσης. Σε υψηλής ταχύτητας ροή, τα στελέχη μπορεί να υποστούν ζημιά από λεπτά σωματίδια (αεροσύραγγες) και για αυτό το λόγο συνιστάται η εγκατάσταση φίλτρων αέρα.

Μόλυνση: Η κατάθεση ακαθαρσιών στη ροή του αισθητήρα μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τα χαρακτηριστικά βαθμονόμησης και να μειώσει την απόκριση συχνότητας. Όταν συμβαίνει αυτό, το στοιχείο στήριξης πρέπει να

επανα-βαθμονομηθεί και αν είναι απαραίτητο να καθαριστεί. Αυτή η διαδικασία είναι εξαιρετικά χρονοβόρα για αυτό συνιστάται και η χρήση φίλτρου ροής στην πειραματική διάταξη ροής όποτε είναι πιθανό. Επίσης, σε ροές αέρα, είναι πιθανό να βρεθούν σταγονίδια ελαίων ή «λάσπη» σε ροές νερού. Αναλόγως την περίπτωση, είναι δυνατή η βύθιση υγρού με διαλυτικές ιδιότητες για το καθαρισμό του αισθητήρα. Υγρά με αυτές τις ιδιότητες που χρησιμοποιούνται είναι 4-χλωρίδιο του άνθρακα, ακετόνη (ασετόν) και μεθυλιωμένη αλκοόλ. Ο στροβιλισμός του στελέχους ή ακουστικές ταραχές του υγρού μπορεί να επιταχύνουν την διαδικασία καθαρισμού, μετά την οποία το στοιχείο στήριξης πρέπει να καθαριστεί σε απιονισμένο νερό και να στεγνώσει πριν την εκ νέου βαθμονόμηση

3.1.3 HWA περιορισμοί/LDA εφαρμογές

Οι δύο μέθοδοι ανεμομετρίας HWA και LDA παρότι έχουν ξεχωριστά χαρακτηριστικά, εφαρμογές αλλά και περιορισμούς, υπάρχουν περιπτώσεις όπου μπορούν να χρησιμοποιηθούν και οι 2 μαζί. Η ανεμομετρία θερμού νήματος δεν χρησιμοποιείται σε περιβάλλοντα όπου οι συνθήκες μπορεί να είναι καταστροφικές για τη διάταξη όπως σε περιπτώσεις καύσης όπου θα καταστραφεί το στέλεχος και για αυτό χρησιμοποιείται η μέθοδος LDA. Καταστάσεις όπως τυρβώδεις ροές αερίων και υγρών με στέρεα σωματίδια ή λεπτά σταγονίδια συνήθως μελετώνται με τεχνικές λέιζερ Ντόπλερ. Για μελέτες υγρών ροών, προτιμάται η μέθοδος LDA καθώς ανάγκη σποράς καλύπτεται από λεπτά σωματίδια και λόγω των προβλημάτων που μπορούν να προκύψουν στο στέλεχος στη μέθοδο HWA. Σε ροές υψηλής τύρβης, ένα σύστημα LDA με μεταβολές Ντοπλερ μπορεί να αποδώσει ξεκάθαρα και καλύτερα αποτελέσματα από μια διάταξη HWA με σταθερό αισθητήρα θερμού νήματος. Όμως σε διατάξεις LDA υπάρχουν περιορισμοί όπως υψηλό κόστος, προβλήματα σποράς (seeding) κ.α. Μετρήσεις ταυτόχρονης ταχύτητας(LDA) και θερμοκρασίας (αισθητήρας «ψυχρού» νήματος) δύναται να μην είναι έμπιστες λόγω της παρεμβολής (contamination) από σωματίδια στο νερό ή σωματίδια σποράς στον αέρα. Η τεχνική LDA δεν προσδίδει συνεχόμενο σήμα και το

εύρος της πληροφορίας είναι δύσκολο να εκτιμηθεί και δεν μπορεί να αποδώσει πιο προχωρημένη πληροφορία της τύρβης όπως η μέθοδος HWA.

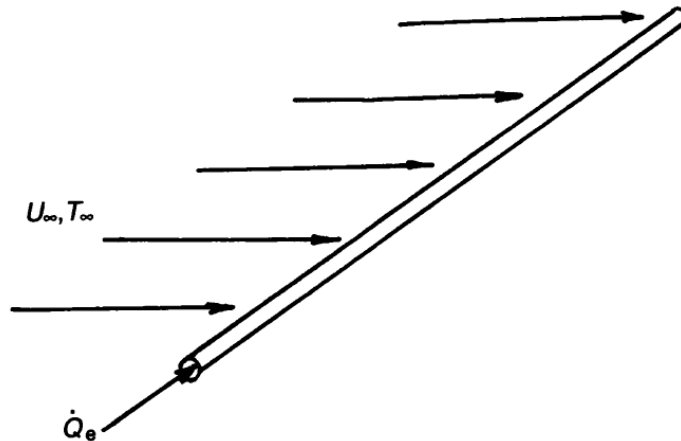
3.1.4 Η ανάγκη για μετρήσεις ροής

Η ροή ρευστού κατέχει σημαντικό ρόλο σε καταστάσεις στην καθημερινή ζωή, σε υδραυλικές μηχανές, στις κατασκευαστικές βιομηχανίες και σε πολλά άλλα πεδία. Οι περισσότερες πρακτικές ροές είναι τυρβώδεις και η διαδικασία της τύρβης εμπλέκεται σημαντικά στη μετάδοση ορμής, θερμότητας και μάζας. Η τύρβη είναι υπεύθυνη για τις περισσότερες απώλειες τριβής στα ρευστά που παρατηρούνται ως απώλειες πίεσης σε συστήματα μεταφοράς ρευστών.

Ο κύριος στόχος μιας πειραματικής ροής και έρευνας μετάδοσης θερμότητας στο παρελθόν ήταν η συνολική απόδοση και εκτέλεση. Για παράδειγμα ένας θερμαινόμενος κύλινδρος (ή σωλήνας με υδροψύξη) τοποθετημένη σε ροή. Οι παράμετροι ροής ήταν η μέση ταχύτητα U και θερμοκρασία T , της προέχουσας ροής και για το κύλινδρο η ηλεκτρική ροή θερμότητας Q_e . Για την εκτίμηση του σχεδιασμού και της απόδοσης τα αποτελέσματα συνοψίζονταν σε μία αδιάστατη εξίσωση

$$Nu = f(Re, Pr) \quad (3-1)$$

συνδέοντας την μεταφορά θερμότητας με τον αριθμό Nusselt (Nu) στο πεδίο ροής με τους αριθμούς Reynolds(Re) και Prandtl(Pr). Από αναλυτικές μετρήσεις αυτών των ποσοτήτων και την εκτίμηση των ιδιοτήτων της ροής σε μία κατάλληλη μέση θερμοκρασία προκύπτει η παραπάνω σχέση. Σε πολλές εφαρμογές ο θερμαινόμενος κύλινδρος αποτελεί μέρος ενός μεγαλύτερου εναλλάκτη θερμότητας όπου αρκετές επιπλέον μετρήσεις χρειάζονται για να καλύψουν τις γεωμετρικές μεταβλητές της τοποθέτησης των στοιχείων αυτών ξεχωριστά. Τέτοιου είδους πειράματα ήταν επαναλαμβανόμενα και χρονοβόρα και αυτή η προσέγγιση περιλάμβανε μόνο την εμπειρική σχέση των μεταβλητών των χρόνο-μέσων με μικρή ή μηδενική απόπειρα να προσδιοριστούν οι επιδράσεις της τύρβης στη ροή.



Σχήμα 3-1 Μετάδοση θερμότητας από έναν θερμαινόμενο κύλινδρο σε μια διασταυρούμενη ροή (εικόνα από Bruun (1996))

Για τις περισσότερες πρακτικές ρευστοδυναμικής και μετάδοσης θερμότητας, ο στόχος είναι να αναπτυχθούν ακριβείς προγνωστικές μέθοδοι και η ραγδαία ανάπτυξη της Υπολογιστικής ΡευστοΔυναμικής (CFD) είχε μεγάλο αντίκτυπο στους στόχους πολλών σύγχρονων πειραματικών μελετών ροής. Στην υπολογιστική ρευστοδυναμική, η μοντελοποίηση της τύρβης είναι το κύριο μέλημα της. Πλέον αναπτυγμένα συστήματα CFD μπορούν να δώσουν αξιόπιστα αποτελέσματα σε πολύπλοκες περιπτώσεις όπως τρισδιάστατη ανακυκλοφορία σε σύνθετες γεωμετρίες, παροδικές ροές, καύση, και διφασικές ροές. Η CFD τεχνολογία χρησιμοποιείται στο σχεδιασμό όπως σε ροές σε κινητήρες/συμπιεστές και θαλάμους καύσης, ροές σε πτερύγια και ολόκληρα σώματα αεροσκαφών, ροές σε μηχανές ντίζελ, ροές γύρω από πλοία και ακριβείς προβλέψεις καιρού 7-10 ημερών. Ο μόνος περιορισμός σε αυτές τις εφαρμογές προκύπτει από τη μοντελοποίηση της τύρβης.

Η υπολογιστική ρευστοδυναμική μπορεί να βοηθήσει στην κατανόηση της φυσικής πολύπλοκων ροών και περιπτώσεις μετάδοσης θερμότητας. Ένα μοντέλο τύρβης αποτελείται από λογικές αρχές και οι συντελεστές βαθμονόμησης προσδιορίζονται από την σύγκριση πειραματικών δεδομένων σε ορισμένες απλές διατμητικές ροές. Εφαρμόζοντας αυτό το μοντέλο (με συνεχείς τιμές των συντελεστών βαθμονόμησης) σε περίπλοκες περιπτώσεις ροής

μπορεί να προσφέρει σημαντικές πληροφορίες. Αν και δεν είναι πιθανή η επίτευξη ακριβών αριθμητικών τιμών, πολύ συχνά οι βασικές αρχές αεροδυναμικής είναι ορθές και ενισχύουν την κατανόηση περίπλοκων συνθηκών για τις οποίες είναι πιθανό να υπάρχει έλλειψη πειραματικών δεδομένων.

Με την ραγδαία ανάπτυξη της CFD τεχνολογίας, έχει προκύψει ένας νέος ρόλος για την τεχνολογία της ανεμομετρίας θερμού νήματος. Για την επαλήθευση υπολογιστικού κώδικα που περιλαμβάνει μοντέλα τύρβης, απαιτούνται υψηλής ακρίβειας πειραματικά δεδομένα ροής. Οι ερευνητές πρέπει να έχουν πολύ καλή γνώση στην υπολογιστική ρευστοδυναμική, τις βασικές αρχές και απλοποιήσεις που υφίστανται σε αυτή. Για την ανάπτυξη μοντέλων τύρβης σε πειραματικές ροές απαιτείται η γνώση απλούστερων περιπτώσεων όπως η απλούστευση πλήρων εξισώσεων Navier-Stokes, η ακρίβεια με την οποία εξισώσεις αυτές προσδιορίζονται σε αλγεβρικές ισοδύναμες εξισώσεις, επιλογή σημείων πλέγματος και ευαισθησία της επίλυσης προς τις οριακές συνθήκες. Η ανεμομετρία θερμού νήματος είναι ιδανική μέθοδος για την πρόσδοση απαραίτητης πληροφορίας για την μέση ταχύτητα και θερμοκρασία σε σχέση με το μέγεθος και την ανάπτυξη της τύρβης. Είναι πρωταρχική μέθοδος για τη μελέτη της φυσικής των τυρβωδών ροών και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αναγνώριση συγκεκριμένα φαινόμενα ροής όπως την μεταφορά από στρωτή σε τυρβώδη ροή, διαχώριση ροής και επαναστρωματοποίησης (relaminarization, επιστροφή της ροής από συνθήκες τύρβης σε συνθήκες στρωτής)

3.1.5 Κύριες εξισώσεις χρόνου

Η ροή ρευστών και κάθε σχετική κατάσταση μεταφοράς θερμότητας προσδιορίζονται από τις εξισώσεις συνέχειας, ορμής (Navier-Stokes) και ενέργειας. Λόγω της πολυπλοκότητας αυτών των εξισώσεων, η υπολογιστική ρευστοδυναμική χρησιμοποιείται κυρίως για την εύρεση λύσεων στις εξισώσεις μέσης τιμής του χρόνου. Για μια σταθερή, ισοθερμική ροή ενός νευτώνιου ρευστού με συνεχής πυκνότητα και ιξώδες αυτές οι εξισώσεις μπορούν να γραφούν σε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων (x,y,z) με συνιστώσες ταχύτητας (U,V,W) στην εξίσωση της συνέχειας ως

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{V}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{W}}{\partial z} = 0 \quad (3-2)$$

Και στην εξίσωση ορμής(Navier-Stokes) ως

$$\rho \left(\bar{U} \frac{\partial \bar{U}}{\partial x} + \bar{V} \frac{\partial \bar{U}}{\partial y} + \bar{W} \frac{\partial \bar{U}}{\partial z} \right) = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + \mu \nabla^2 \bar{U} - \rho \left(\frac{\partial \bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}\bar{w}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{u}\bar{w}}{\partial z} \right) \quad (3-3)$$

$$\rho \left(\bar{U} \frac{\partial \bar{W}}{\partial x} + \bar{V} \frac{\partial \bar{W}}{\partial y} + \bar{W} \frac{\partial \bar{W}}{\partial z} \right) = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial z} + \mu \nabla^2 \bar{W} - \rho \left(\frac{\partial \bar{w}^2}{\partial z} + \frac{\partial \bar{u}\bar{w}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{u}\bar{w}}{\partial x} \right) \quad (3-4)$$

$$\rho \left(\bar{U} \frac{\partial \bar{V}}{\partial x} + \bar{V} \frac{\partial \bar{V}}{\partial y} + \bar{W} \frac{\partial \bar{V}}{\partial z} \right) = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial y} + \mu \nabla^2 \bar{V} - \rho \left(\frac{\partial \bar{v}^2}{\partial y} + \frac{\partial \bar{u}\bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}\bar{v}}{\partial z} \right) \quad (3-5)$$

Στην εξαγωγή αυτών των εξισώσεων, κάθε ποσότητα έχει χωριστεί στη μέση τιμή χρόνου δηλαδή $U = \bar{U} + u$. Για την εξήγηση των βασικών αρχών μοντέλων τύρβης, οι εξισώσεις αυτές μπορούν να εκφραστούν ως:

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial \bar{x}_j} = 0 \quad (3-6)$$

$$\rho \bar{U}_j \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial \bar{x}_j} = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{x}_i} + \frac{\partial}{\partial \bar{x}_j} \left(\mu \frac{\partial U_i}{\partial \bar{x}_j} - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j \right) \quad (3-7)$$

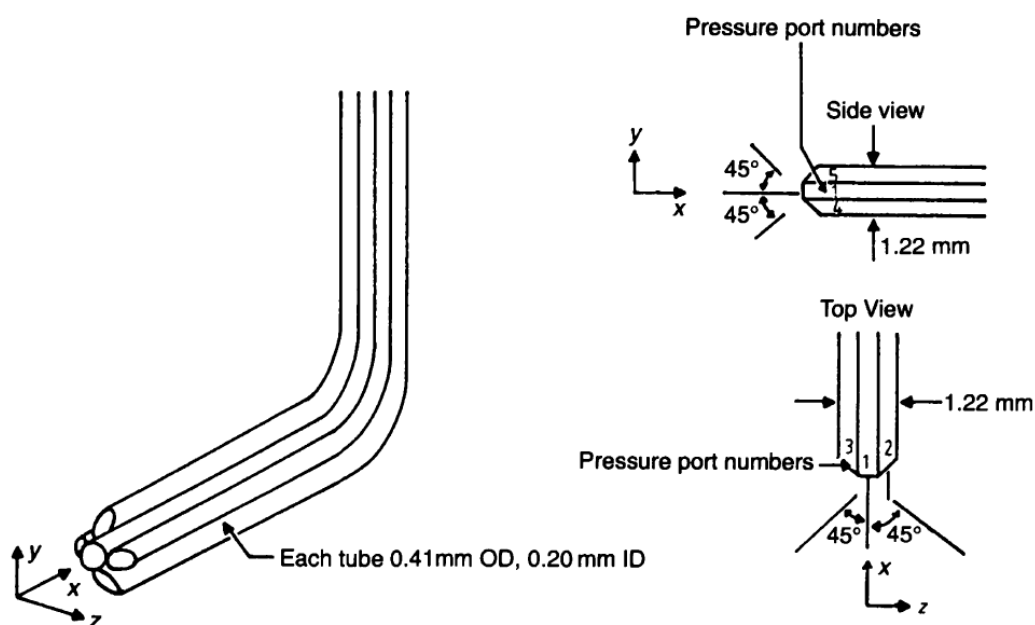
$$\rho \frac{\partial \bar{U}_j \bar{U}_i}{\partial \bar{x}_j} = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{x}_i} + \frac{\partial}{\partial \bar{x}_j} \left(\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial \bar{x}_j} + \frac{\partial U_j}{\partial \bar{x}_i} \right) - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j \right) \quad (3-8)$$

Για ισοθερμική ροή, τα αποτελέσματα κάθε ανάλυσης CFD είναι οι συνιστώσες της μέσης ταχύτητας σε διακριτά σημεία σε όλο πεδίο ροής που ερευνάται. Άρα για την επαλήθευση του κώδικα για την ακρίβεια και την εφαρμογή του, το κύριο ζητούμενο είναι ακριβείς δεδομένα ταχύτητας και πίεσης. Ένας κώδικας CFD μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μια γρήγορη αξιόπιστη μέθοδος σχεδιασμού. Οι πληροφορίες της μέσης ταχύτητας που απαιτούνται μπορούν να ληφθούν με διάφορες μεθόδους HWA. Οι επιδράσεις ενός μοντέλου τύρβης σε ένα κώδικα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής παρατηρείται ως η απώλεια στη τιμή της μέσης τιμής της πίεσης μεταξύ στην είσοδο και τη έξοδο της ροής. Για την βελτιστοποίηση του μοντέλου στον κώδικα απαιτείται η μέτρηση των συνιστωσών της μέσης ταχύτητας και των τάσεων Reynolds ($-\rho \overline{u_i u_j}$).

3.1.6 Μετρήσεις μέσης ταχύτητας

Αν απαιτείται ως ζητούμενο η μέση ταχύτητα τότε χρησιμοποιούνται αισθητήρες πίεσης στις περιπτώσεις όπου η τύρβη είναι χαμηλή ώστε να μην προκύψει αντιστροφή ροής. Για πεδία ροής με γνωστή μέση διεύθυνση ροής, η ταχύτητα συνήθως μετρείται με ένα συμβατικό σωλήνα pitot. Αισθητήρες με 5 οπές χρησιμοποιούνται εκτενώς σε ροές με 3 συνιστώσες ταχύτητας. Αποτελούνται από ένα αεροδυναμικό σώμα με μία κεντρική υποδοχή ολικής πίεσης και 4 συμμετρικές στατικής πίεσης υποδοχές. Οι αισθητήρες τοποθετούνται είτε σε στάσιμη κατάσταση λειτουργίας ή σε λειτουργία μηδενισμού (nulling). Σε λειτουργία nulling το στέλεχος περιστρέφεται ώστε κάθε υποδοχή να διαβάζει την ίδια πίεση. Ο προσανατολισμός του στελέχους μπορεί να προσδιορίσει τη μέση διεύθυνση ροής. Όμως, αυτή η μέθοδος έχει δυσκολία στη διαχείριση και για αυτό οι περισσότεροι αισθητήρες πίεσης χρησιμοποιούνται σε στάσιμη θέση όπου γίνεται λήψη μετρήσεων διαφοράς του άνω με το κάτω αισθητήρα και της διαφοράς των 2 ακριανών αισθητήρων αντίστοιχα. Στη συνέχεια, με διαδικασίες βαθμονόμησης γίνεται η εύρεση της διεύθυνσης της ροής και το μέγεθος της μέσης ταχύτητας. Ο αισθητήρας 5 σωλήνων πίεσης είναι ο πιο συχνός και χρησιμοποιείται για τη μείωση σφαλμάτων στη χωρική ανάλυση και σε περιπτώσεις φραγμού. Επίσης έχει συσταθεί η χρήση αισθητήρα με 7 υποδοχές για την καλύτερη ανάλυση του εύρους της ροής αλλά αυξάνεται η

πολυπλοκότητα της βαθμονόμησης. Κάποια πεδία ροής έχουν πολλές μεταβλητές στη διεύθυνση της ροής. Ένας αισθητήρας πίεσης χρησιμοποιείται για την εύρεση της διεύθυνσης σε κάθε μετρητικό σημείο μαζί με μετρήσεις με αισθητήρα θερμού νήματος. Αλλά, για τις περισσότερες μελέτες HWA που περιέχουν μετρήσεις τυρβωδών ποσοτήτων, η χρήση ενός επιπλέον αισθητήρα θα προσθέσει μόνο περιπλοκότητες στην διαδικασία πειραματισμού χωρίς κέρδος στην ακρίβεια των υπολογίσιμων ποσοτήτων.



Σχήμα 3-2 Αισθητήρας πίεσης 5-οπών για μέτρηση 3 συνιστωσών ταχύτητας σε ροή χαμηλής ταχύτητας (εικόνα από (Bruun 1996))

Η ανεμομετρία θερμού νήματος βασίζεται στην μετάδοση θερμότητας με συναγωγή από ένα θερμαινόμενο αισθητήριο στέλεχος. Οι πιο κοινοί αισθητήρες είναι κυλινδρικά θερμά νήματα και θερμά φιλμ τοποθετημένα σε κυλινδρικές ίνες. Πολλές πτυχές της μετάδοσης θερμότητας είναι όμοιες σε αισθητήρες θερμού νήματος και θερμού φιλμ. Βασικές έννοιες που χρησιμοποιούνται στην ανεμομετρία θερμού νήματος είναι η μετάδοση θερμότητας, οι συντελεστές ευαισθησίας του σήματος του νήματος, η συχνότητα απόκρισης ενός αισθητήρα είτε σε λειτουργία σταθερής θερμοκρασίας είτε σε λειτουργία σταθερού ρεύματος και η χωρική ανάλυση (spatial resolution).

3.2 Μετάδοση θερμότητας

Η μετάδοση θερμότητας από ένα θερμαινόμενο νήμα τοποθετημένο σε μια ροή ρευστού εξαρτάται από τις ιδιότητες του ρευστού (πυκνότητα ρ , ιξώδες μ , θερμική αγωγιμότητα k , ειδική θερμότητα c_p) και τις παραμέτρους της ροής (διάνυσμα ταχύτητας V , πίεση P , θερμοκρασία ρευστού T_a)

3.2.1 Αισθητήρες «απείρου» μήκους νήματος

Πρωταρχικές σχέσεις μετάδοσης θερμότητας είχαν εκφραστεί σε σχέση με αδιάστατα μεγέθη όπως Nusselt(Nu), Reynolds(Re), Prandtl (Pr), Grashof(Gr) και Mach(M):

$$Nu = \frac{hd}{k}, Pr = \frac{c_p \mu}{k}, Re = \frac{\rho U d}{\mu}, Gr = \frac{g \rho^2 d^3 \beta (T_w - T_a)}{\mu^2}, M = \frac{U}{a} \quad (3-9)$$

Όπου h είναι ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας, k είναι η θερμική αγωγιμότητα του ρευστού μ είναι το (μοριακό) ιξώδες του ρευστού, c_p είναι η ειδική θερμότητα του ρευστού σε σταθερή πίεση, ρ η πυκνότητα του ρευστού, g η επιτάχυνση της βαρύτητας, β ο συντελεστής όγκου διαστολής , T_w η θερμοκρασία του θερμού νήματος, T_a η θερμοκρασία του ρευστού, a η ταχύτητα του ήχου, U η ταχύτητα ροής και d η διάμετρος του κυλινδρικού στελέχους.

Η μετάδοση θερμότητας συναγωγής συχνά εκφράζεται με την εξίσωση

$$Nu = A + B Re^{1/2} \quad (3-10)$$

Όπου A και B είναι εμπειρικές σταθερές βαθμονόμησης για κάθε ρευστό. Επιλέγοντας την θερμοκρασία «φιλμ» $T_f = \frac{(T_w - T_a)}{2}$ ως θερμοκρασία αναφοράς για τις ιδιότητες του ρευστού μ ρ και k , για τα εύρη τιμών $0.01 < Re < 10000$ και $0.71 < Pr < 1000$ ισχύει η εξίσωση

$$Nu = 0.42 Pr^{0.2} + 0.57 Pr^{0.33} Re^{0.50} \quad (3-11)$$

Σε υψηλές ταχύτητες ροής σε αέρια (> 100 m/s στον αέρα) οι επιπτώσεις συμπίεστικότητας στη ροή γύρω από το νήμα είναι πολύ σημαντικές και χρησιμοποιούνται οι τιμές M και c_p . Σε ροές χαμηλής πυκνότητας, η κύρια

παράμετρος είναι ο αριθμός Knudsen $Kn = \lambda/d$ όπου λ είναι η μοριακή μέση ελεύθερη διαδρομή. Ο αριθμός Knudsen συνδέεται με τους αριθμούς Mach και Reynolds με τη σχέση :

$$Kn = \left(\frac{\gamma\pi}{2}\right)^{1/2} \frac{M}{Re} \quad (3-12)$$

Όπου γ είναι ο λόγος ειδικών θερμοτήτων.

Σε πολύ χαμηλές ταχύτητες, η φυσική αγωγή από το θερμό νήμα έχει επίδραση στη μετάδοση θερμότητας, που εξαρτάται από τον αριθμό Grashof. Σε πειράματα σε αέρα με αισθητήρες θερμού νήματος με μεγάλες τιμές λόγου μήκους-διαμέτρου l/d , το φαινόμενο θερμικής άνωσης (buoyance) απαλείφεται όταν $Re > Gr^{1/3}$.

Στην περιοχή εξαναγκασμένης μετάδοσης θερμότητας συναγωγής, με τον υπολογισμό των ιδιοτήτων του ρευστού στην θερμοκρασία του φιλμ T_f στο εύρος του $0.02 < Re < 44$, ισχύει η εξίσωση

$$Nu \left[\frac{T_f}{T_a}\right]^{-0.17} = 0.24 + 0.56 Re^{0.45} \quad (3-13)$$

Σε αυτήν την εξίσωση περιλαμβάνεται ο όρος $\left[\frac{T_f}{T_a}\right]^{-0.17}$ όπου οι αναφερόμενες θερμοκρασίες είναι απόλυτες (K). Συμπεραίνεται πως οι ιδιότητες του ρευστού ρ , μ και k , είναι όλες εξαρτώμενες από τη θερμοκρασία και οι τιμές Nu και Re εξαρτώνται από την θερμοκρασία αναφοράς που χρησιμοποιείται

3.2.2 Αισθητήρες θερμού νήματος πεπερασμένου μήκους

Η μεταφορά θερμότητας από ένα στελέχους θερμού νήματος που περιλαμβάνει ένα αισθητήρα πεπερασμένου λόγου απεικόνισης διαφέρει από έναν αντίστοιχο απείρου μήκους. Το αισθητήριο στοιχείο μπορεί να επεκταθεί ως τις υποδοχές (prongs) ή και να αφαιρεθεί από αυτές. Σε σύγκριση με το στοιχείο του νήματος, οι υποδοχές είναι μεγαλύτερες και η θερμοκρασία τους T_p θα παραμείνει σε θερμοκρασία παρόμοια με τη μέση ταχύτητα του ρευστού \bar{T}_a . Το νήμα θα λειτουργήσει σε υψηλή θερμοκρασία με αποτέλεσμα να υπάρχει μετάδοση

θερμότητας προς τα πρongs και μεταφορά θερμοκρασίας μέσα στο νήμα. Η μετάδοση θερμότητας αυτή μπορεί να προσδιοριστεί με την εξίσωση ισοροπίας ροής θερμότητας :

$$d\dot{Q}_e = d\dot{Q}_{fc} + d\dot{Q}_c + d\dot{Q}_r + d\dot{Q}_s \quad (3-14)$$

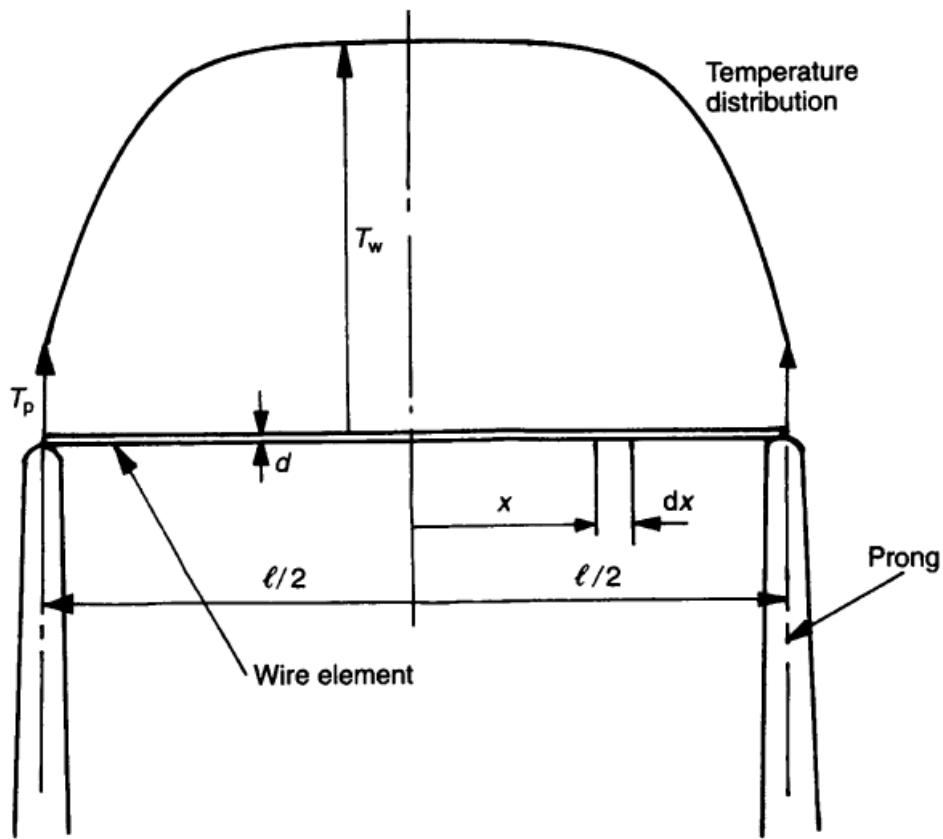
Όπου $d\dot{Q}_e$ είναι ο ηλεκτρικός ρυθμός παραγωγής θερμότητας, $d\dot{Q}_{fc}$ είναι ο ρυθμός μετάδοσης συναγωγής, $d\dot{Q}_c$ είναι ο ρυθμός μετάδοσης αγωγής, $d\dot{Q}_r$ ο ρυθμός μετάδοσης θερμότητας με ακτινοβολία και $d\dot{Q}_s$ ο ρυθμός αποθήκευσης θερμότητας.

Αναλυτικότερα, ο ρυθμός παραγωγής θερμότητας από ένα ηλεκτρικό ρεύμα I ορίζεται ως

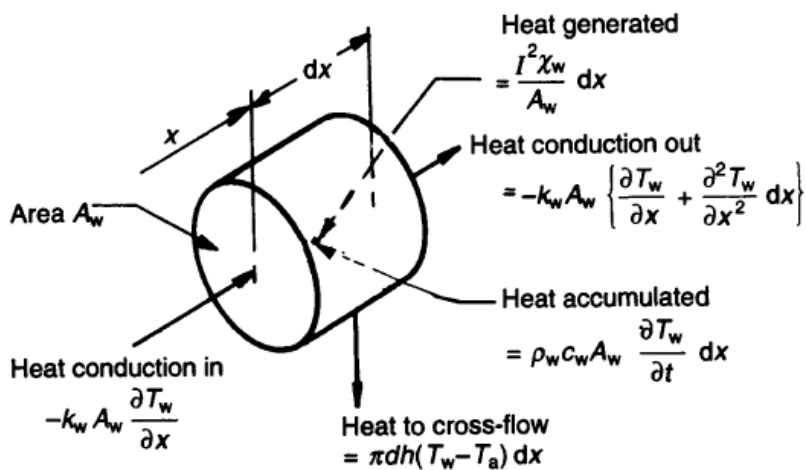
$$d\dot{Q}_e = \frac{I^2 x_w}{A_w} dx \quad (3-15)$$

Όπου x_w είναι η ηλεκτρική αντίσταση του νήματος προς τη τοπική θερμοκρασία T_w και A_w είναι η επιφάνεια διατομής του νήματος. Ο ρυθμός μετάδοσης θερμότητας συναγωγής $d\dot{Q}_{fc}$ προς το ρευστό αποδίδεται με τη χρήση του συντελεστή μετάδοσης h ως

$$d\dot{Q}_{fc} = \pi dh(T_w - T_a)dx \quad (3-16)$$



Σχήμα 3-3 Η γεωμετρία ενός θερμού νήματος (Bruun (1996))



Σχήμα 3-4 Η ισορροπία θερμοτήτων σε ένα θερμό νήμα (εικόνα από Bruun (1996))

Από το σχήμα 2.4 παρατηρείται πως ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης θερμότητας εκτός του στοιχείου είναι

$$d\dot{Q}_c = -k_w A_w \frac{\partial^2 T_w}{\partial x^2} dx \quad (3-17)$$

Όπου k_w είναι η θερμική αγωγιμότητα του νήματος στη θερμοκρασία T_w . Ο ρυθμός μετάδοσης θερμότητας ακτινοβολίας είναι

$$d\dot{Q}_r = \pi d \sigma \varepsilon (T_w^4 - T_s^4) dx \quad (3-18)$$

Όπου σ είναι η σταθερά Stefan-Boltzmann, ε είναι η εκπομπή του αισθητήρα και T_s είναι η θερμοκρασία που το περιβάλλει. Στις περισσότερες εφαρμογές ανεμομετρίας θερμικού νήματος η ποσότητα αυτή είναι μικρή και παραλείπεται. Ο ρυθμός αποθήκευσης θερμότητας είναι

$$d\dot{Q}_s = \rho_w c_w A_w \frac{\partial T_w}{\partial t} dx \quad (3-19)$$

Όπου ρ_w είναι η πυκνότητα του νήματος και c_w είναι η ειδική θερμότητα του στοιχείου του νήματος ανά μονάδα μάζας. Με τη σύνδεση αυτών των εξισώσεων προκύπτει η σχέση

$$k_w A_w \frac{\partial^2 T_w}{\partial x^2} + \frac{I^2 x_w}{A_w} - \pi d h (T_w - T_a) - \rho_w c_w A_w \frac{\partial T_w}{\partial t} = 0 \quad (3-20)$$

3.2.2.1 Κατανομή θερμοκρασίας στον αισθητήρα

Υπό σταθερές συνθήκες $\frac{\partial T_w}{\partial t} = 0$ και $x_w = x_a + x_o a_o (T_w - T_a)$ όπου x_a και x_o είναι η ηλεκτρική αντίσταση(resistivity) στην θερμοκρασία του περιβάλλοντος ρευστού T_a και σε 0°C , με a_o το θερμοκρασιακό συντελεστή αντίστασης(resistivity) σε 0°C η εξίσωση γράφεται ως

$$k_w A_w \frac{d^2 T_w}{dx^2} + \left[\frac{I^2 x_o a_o}{A_w} - \pi d h \right] (T_w - T_a) + \frac{I^2 x_a}{A_w} = 0 \quad (3-21)$$

Αφού η θερμοκρασία T_w είναι σταθερή κατά μήκος του νήματος, η εξίσωση είναι της μορφής

$$\frac{d^2 T_1}{dx^2} + K_1 T_1 + K_2 = 0 \quad (3-22)$$

Όπου

$$T_1 = T_w - T_a \quad (3-23)$$

$$K_1 = \frac{I^2 x_o a_o}{k_w A_w^2} - \frac{\pi dh}{k_w A_w} \quad (3-24)$$

$$K_2 = \frac{I^2 x_a}{k_w A_w^2} \quad (3-25)$$

Σε προηγούμενες μελέτες , λήφθηκε μια σταθερά τιμή h ώστε η τιμή K_1 να παραμείνει σταθερή. Αναλόγως τη τιμή του h , η τιμή του K_1 μπορεί να είναι θετική ή αρνητική. Στις περισσότερες εφαρμογές θερμού νήματος , η K_1 θα είναι αρνητική οπότε η θερμοκρασία T_w ενός νήματος μήκους l ορίζεται ως

$$T_w = \frac{K_2}{|K_1|} \left[1 - \frac{\cosh\left(|K_1| \frac{1}{2} x\right)}{\cosh\left(\frac{|K_1| \frac{1}{2} l}{2}\right)} \right] + T_a \quad (3-26)$$

Η μέση τιμή της θερμοκρασίας του νήματος $T_{w,m}$ προσδιορίζεται με την ενσωμάτωση της θερμοκρασιακής κατανομής $T_w(x)$ κατά το μήκος l του νήματος :

$$T_{w,m} = \frac{K_2}{|K_1|} \left[1 - \frac{\tanh\left(|K_1| \frac{1}{2} x\right)}{\frac{|K_1| \frac{1}{2} l}{2}} \right] + T_a \quad (3-27)$$

Η απώλεια αγωγίμης θερμότητας Q_{cp} στα 2 άκρα (prongs) είναι $2k_w A_w |dT_w/dx|_{x=\frac{l}{2}}$ και η βαθμίδα θερμοκρασίας στο τέλος του νήματος ορίζεται από την εξίσωση

$$\left. \frac{dT_w}{dx} \right|_{x=\frac{l}{2}} = \frac{K_2}{|K_1|^{\frac{1}{2}}} \tanh\left(\frac{|K_1|^{\frac{1}{2}} l}{2}\right) \quad (3-28)$$

Η θερμοκρασιακή κατανομή $T_w(x)$ μπορεί να συγκριθεί με τη θερμοκρασία $T_{w,\infty}$ ενός παρόμοιου απείρου μήκους νήμα που θερμαίνεται από ένα ρεύμα Ι. Χρησιμοποιώντας την ανάλυση της μετάδοσης θερμότητας στην ενότητα 3.2.2.3 μπορεί να αποδειχθεί πως

$$\frac{K_2}{|K_1|^{\frac{1}{2}}} = T_{w,\infty} - T_a \quad (3-29)$$

και

$$\frac{1}{|K_1|^{\frac{1}{2}}} = l_c = \frac{d}{2} \left(\frac{k_w R_w}{k R_a Nu} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3-30)$$

Όπου R_w, R_a είναι οι αντιστάσεις του αισθητήρα στις θερμοκρασίες T_w, T_a αντίστοιχα. Η εξίσωση αυτή είναι η εξίσωση του «ψυχρού νήματος» l_c και άρα μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

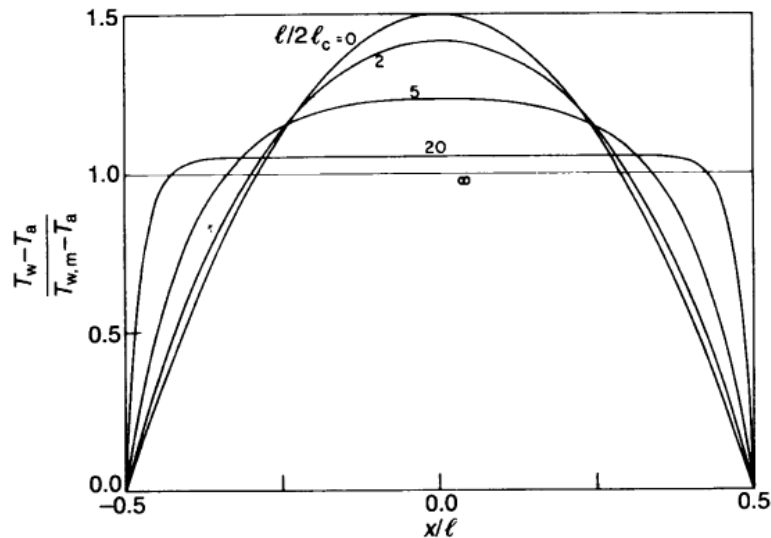
$$\frac{T_w - T_a}{T_{w,\infty} - T_a} = 1 - \frac{\cosh\left(\frac{x}{l_c}\right)}{\cosh\left(\frac{l}{2l_c}\right)} \quad (3-31)$$

Και αντιστοίχως για τη μέση τιμή θερμοκρασίας του νήματος $T_{w,m}$

$$\frac{T_{w,m} - T_a}{T_{w,\infty} - T_a} = 1 - \frac{\tanh\left(\frac{l}{2l_c}\right)}{\frac{l}{2l_c}} \quad (3-32)$$

Η διαφορά στο προφίλ της θερμοκρασίας, κατά τη μορφή $\frac{T_w - T_a}{T_{w,m} - T_a}$ ως λειτουργία $\frac{l}{2l_c}$ παρατηρείται στο παρακάτω σχήμα όπου η σχέση μεταξύ της μέγιστης θερμοκρασίας $T_{w,max}$ (στο $x \sim 0$) και της μέσης ταχύτητας του νήματος $T_{w,m}$ δίνεται από τη σχέση

$$\frac{T_{w,max} - T_a}{T_{w,m} - T_a} = \frac{\left(\frac{l}{2l_c}\right) \cosh\left(\frac{l}{2l_c}\right) - \frac{l}{2l_c}}{\left(\frac{l}{2l_c}\right) \cosh\left(\frac{l}{2l_c}\right) - \sinh\left(\frac{l}{2l_c}\right)} \quad (3-33)$$



Σχήμα 3-5 Η κατανομή της θερμοκρασίας κατά μήκος ενός θερμού νήματος για διάφορες τιμές του $\frac{l}{2l_c}$ (εικόνα από Bruun (1996))

Το μήκος «κρούς νήματος» l_c είναι ανεξάρτητο από το μήκος του νήματος l , π.χ. ένα νήμα βολφραμίου 5 μm με λόγο υπερθέρμανσης R_w/R_a 1.8 θα προκύψει l_c είναι 30d. Τα πρότυπα αισθητήρια hot-wire έχουν ενεργό μήκος 1.25mm με λόγο $\frac{l}{2l_c}$ ίσο με 4 και $\frac{T_{w,max}-T_a}{T_{w,m}-T_a}$ ίσο με 1.3

Για εφαρμογές HWA, συνήθως στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του ρυθμού απωλειών θερμότητας αγωγής \dot{Q}_{cp} σε σχέση με το ρυθμό μετάδοσης συναγωγής \dot{Q}_{fc} από ένα νήμα μήκους l

$$\dot{Q}_{cp} = \frac{2k_w A_w (T_{w,\infty} - T_a)}{l_c} \tanh(l/2l_c) \quad (3-34)$$

$$\dot{Q}_{fc} = \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \pi dh (T_w - T_a) dx \quad (3-35)$$

Εάν θεωρηθεί πως ο συντελεστής h είναι σταθερός λαμβάνεται η νέα εξίσωση

$$\dot{Q}_{fc} = \pi dlh(T_{w,\infty} - T_a) \left[1 - \frac{2l_c}{l} \tanh \frac{l}{2l_c} \right] \quad (3-36)$$

Παρατηρείται πως οι απώλειες αγωγής διαφέρουν όταν αυξηθεί το μήκος του νήματος για $l > 2l_c$. Αντιθέτως, η μετάδοση θερμότητας εκ συναγωγής αυξάνεται γραμμικά με το μήκος l . Άρα, για να ελαττωθούν οι απώλειες, το μήκος νήματος θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερο και το υλικό του να έχει χαμηλή τιμή k_w . Όμως για να έχει καλύτερη ανάλυση διασποράς, το πρότυπο νήμα θα είναι από βολφράμιο με 4-5 μm διάμετρο και ενεργό μήκος 1.25 mm. Σε αυτή τη περίπτωση αισθητήρα, οι απώλειες υπολογίζονται γύρω στο 15% της συνολικής μετάδοσης θερμότητας από το θερμαινόμενο στοιχείο.

Για μεγαλύτερες διαμέτρους $d = 25-70 \mu\text{m}$ οι τιμές του λόγου l/d είναι πολύ μικρότερες (20-50) το πάχος των συρμάτων είναι πιο λεπτό και οι απώλειες είναι σχετικά μικρές. Η επίδραση των απωλειών αγωγής στα άκρα είναι παρόμοιο με ένα νήμα βολφραμίου και ένα αισθητήρα φιλμ του οποίου ο λόγος l/d είναι περίπου το 1/16 του αντίστοιχου ενός νήματος.

3.2.2.2 Αντίσταση των στοιχείων του αισθητήρα

Η αντίσταση R ενός νήματος δίνεται από τη σχέση

$$R = \frac{\chi l}{A_w} \quad (3-37)$$

Όπου A_w είναι το εμβαδόν της διατομής, χ είναι η αντίσταση (resistivity) ορισμένη ως η αντίσταση ανά μονάδα μήκους και ανά μονάδα εμβαδού διατομής. Οι κατασκευαστές των στελεχών θερμού νήματος συνήθως συμβολίζουν την αντίσταση σε θερμοκρασία δωματίου 20°C του στοιχείου ως R_{20} .

Η θερμοκρασία $T_w(x)$ ενός θερμαινόμενου νήματος διαφέρει κατά το μήκος του. Με γνωστή $T_w(x)$ είναι δυνατός ο υπολογισμός της μέσης θερμοκρασίας νήματος $T_{w,m}$:

$$T_{w,m} = \frac{1}{l} \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} T_w(x) dx \quad (3-38)$$

Material	Ultimate tensile strength (N cm ⁻²)	Temperature coefficient of resistivity, α ₂₀ (°C ⁻¹)	Resistivity, χ ₂₀ (μΩ cm)	Thermal conductivity, k _w (W cm ⁻¹ °C ⁻¹)	Density, ρ _w (kg m ⁻³)	Specific heat, c _w (kJ kg ⁻¹ °C ⁻¹)	Available as Wollaston wire?	Melting point (°C)	Comments
Tungsten	250 000	0.0036	5.5	1.9	19 300	0.14	No	3410	Oxidizes above 350 °C, cannot be soldered
Platinum	35 000	0.0038	9.8	0.7	21 500	0.13	Yes	1770	Soft and weak
Platinum-rhodium (90-10%)	70 000	0.0016	19	0.4	19 900	0.15	Yes	1830	Stronger than Pt
Platinum-iridium (80-20%)	140 000	0.0008	32	0.17	21 600	0.13	Yes	1840	Stronger than Pt

Πίνακας 3-1 Φυσικές ιδιότητες κοινών υλικών θερμού νήματος

Η $T_{w,m}$ μπορεί να προσδιοριστεί με την αντίστοιχη αντίσταση R_w του αισθητήρα σε σχέση με το μήκος του ως εξής:

$$R_w = \int_{-l/2}^{l/2} \frac{x_w}{A_w} dx \quad (3-39)$$

Η θερμοκρασιακή εξάρτηση της αντίστασης των υλικών θερμού νήματος εκφράζεται με τη μορφή της εξίσωσης

$$x_w = x_0 [1 + a_0(T_w - T_0) + \beta_0(T_w - T_0)^2] \quad (3-40)$$

Όπου $T_0(0^\circ\text{C})$ είναι η θερμοκρασία αναφοράς για τα x_0, a_0, β_0 . Για τον ακριβή υπολογισμό της μέσης θερμοκρασίας νήματος $T_{w,m}$, για μετρήσεις ταχύτητας, χρησιμοποιείται η γραμμική προσέγγιση

$$x_w = x_0 [1 + a_0(T_w - T_0)] \quad (3-41)$$

Με συνέπεια να λαμβάνονται οι νέες εξισώσεις :

$$R_w = \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \frac{x_0 [1 + a_0(T_w - T_0)]}{A_w} dx \quad (3-42)$$

Και

$$R_w = R_0[1 + a_0(T_w - T_0)] \quad (3-43)$$

Όπου είναι εμφανής η σχέση μεταξύ της αντίστασης R_w και της μέσης θερμοκρασίας T_w του νήματος. Σε πρακτικές εφαρμογές hot-wire anemometry ως θερμοκρασία αναφοράς επιλέγεται η θερμοκρασία δωματίου (20°C) και αντιστοίχως προκύπτει

$$R_w = R_{20}[1 + a_{20}(T_w - T_{20})] \quad (3-44)$$

Με την αλλαγή αυτή της τιμής της θερμοκρασίας αναφοράς, αναλόγως αλλάζει και η αντίστοιχη τιμή a ως εξής :

$$a_{20} = \frac{R_0}{R_{20}} a_0 \quad (3-45)$$

3.2.2.3 Σχέση μετάδοσης θερμότητας

Μια απλή σχέση μετάδοσης θερμότητας μπορεί να αναπτυχθεί για ένα απείρου μήκους νήμα αγνοώντας τις απώλειες αγωγής. Η ισορροπία θερμότητας για ένα στοιχείο νήματος μήκους l γράφεται ως:

$$I^2 R_{w,\infty} = \pi d h l (T_{w,\infty} - T_a) = \pi l k (T_{w,\infty} - T_a) Nu \quad (3-46)$$

Και

$$T_{w,\infty} - T_a = \frac{R_{w,\infty} - R_a}{a_0 R_0} \quad (3-47)$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει

$$I^2 R_{w,\infty} = \frac{\pi l k}{a_0} \frac{R_{w,\infty} - R_a}{R_0} (0.42 Pr^{0.2} + 0.57 Pr^{0.33} Re^{0.50}) \quad (3-48)$$

Για εφαρμογές ανεμομετρίας θερμού νήματος χρησιμοποιείται η εξίσωση με τη νέα μορφή

$$\frac{I^2 R_{w,\infty}}{R_{w,\infty} - R_a} = A + BU^{0.5} \quad (3-49)$$

Όπου

$$A = 0.42 \frac{\pi k l}{a_0 R_0} Pr^{0.20} \quad (3-50)$$

$$B = 0.57 \frac{\pi k l}{a_0 R_0} Pr^{0.33} \left[\frac{\rho d}{\mu} \right]^{0.50} \quad (3-51)$$

Για ένα θερμό νήμα με ορισμένο μήκος ενεργού νήματος, οι απώλειες αγωγής δεν δύνανται να απαλειφθούν:

$$\frac{I^2 R_{w,\infty}}{R_{w,\infty} - R_a} = A + BU^n \quad (3-52)$$

Όπου R_w είναι η πραγματική αντίσταση του νήματος, που σχετίζεται με τη πραγματική μέση θερμοκρασία T_w

$$T_w - T_a = \frac{R_w - R_a}{a_0 R_0} \quad (3-53)$$

Αισθητήρες θερμού νήματος χρησιμοποιούνται κυρίως για την μέτρηση διακυμάνσεων ταχύτητας και θερμοκρασίας, και οι συνθήκες λειτουργίας μαζί με τη γεωμετρία του αισθητήρα εξαρτώνται από περιορισμούς ευαισθησίας ταχύτητας και θερμοκρασίας. Αυτές οι συνθήκες είναι απαραίτητες και σε λειτουργία σταθερής θερμοκρασίας και σε λειτουργία σταθερού ρεύματος (constant temperature CTA mode, constant current CCA mode). Εξίσου σημαντική είναι η συχνότητα απόκρισης ενός αισθητήριου ενός θερμού νήματος.

3.2.2.4 Ευαισθησίες ταχύτητας και θερμοκρασίας

Θέτοντας τάση νήματος $E_w = IR_w$ και έχοντας υπόψιν τη θερμοκρασιακή διαφορά ($T_w - T_a$) λαμβάνεται η σχέση

$$\frac{E_w^2}{R_w} = (A + BU^n)(T_w - T_a) \quad (3-54)$$

Όπου το $a_0 R_0$ περιλαμβάνεται στις σταθερές βαθμονόμησης A και B. Για μετρητικούς σκοπούς, η συχνότητα απόκρισης εκφράζεται ως έξοδος ανεμομέτρου E (anemometer output) και για μια ισορροπημένη γέφυρα ανεμομέτρου, η σχέση E και E_w είναι

$$E = \frac{R_1 + R_L + R_w}{R_w} E_w \quad (3-55)$$

Όπου R_1, R_L είναι αντιστάσεις probe και καλωδίου αντιστοίχως, και αντικαθιστώντας προς E προκύπτει η εξίσωση

$$\frac{E^2 R_w}{(R_1 + R_L + R_w)^2} = (A + BU^n)(T_w - T_a) \quad (3-56)$$

Στη λειτουργία CTA (ανεμομετρία σταθερής θερμοκρασίας), η θερμή αντίσταση R_w θεωρείται συνεχώς σταθερή ανεξάρτητα από τις συνθήκες ροής. Επίσης, οι τιμές A, B και n θεωρείται ότι έχουν σταθερές τιμές που είναι ανεξάρτητες από τη ταχύτητα και τη θερμοκρασία.

Η ευαισθησία ταχύτητας και θερμοκρασίας σε λειτουργία σταθερής θερμοκρασίας δίνονται από τις σχέσεις

$$S_u = \frac{\partial E_w}{\partial U} = \frac{nBU^{n-1}}{2} \left[\frac{R_w(T_w - T_a)}{A + BU^n} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3-57)$$

$$S_\theta = \frac{\partial E_w}{\partial \theta} = -\frac{1}{2} \left[\frac{R_w(A + BU^n)}{T_w - T_a} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3-58)$$

Όπου θ εκφράζει μια μικρή διακύμανση στη θερμοκρασία ρευστού T_a . Το σήμα τάσης του νήματος e_w σχετίζεται με την ταχύτητα u και τη θερμοκρασία θ μέσω των εξισώσεων

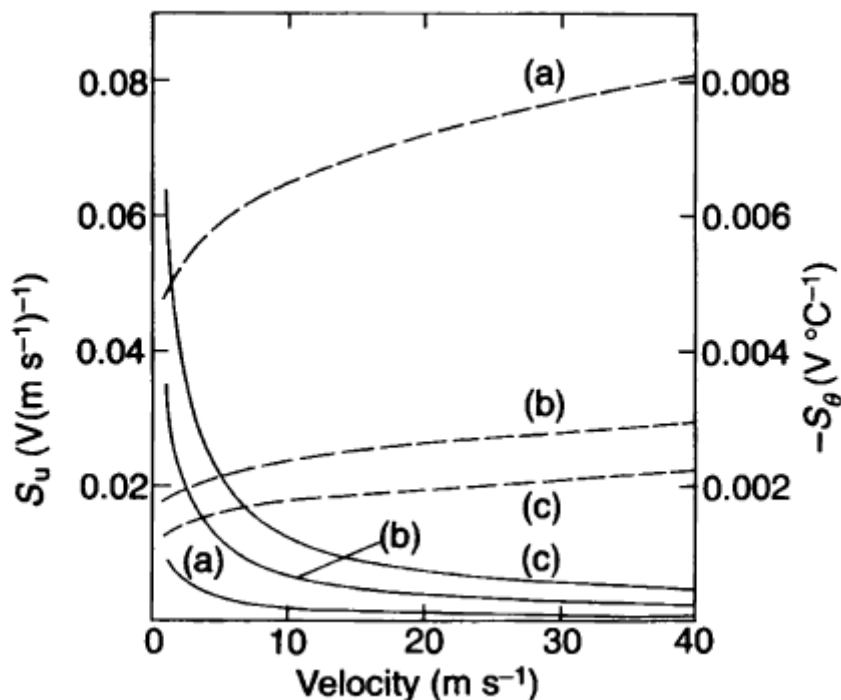
$$e_w = S_u u + S_\theta \theta \quad (3-59)$$

Για πρακτικές εφαρμογές, η εξίσωση αυτή διατυπώνεται σε σχέση με την διακυμαινόμενη τάση ανεμόμετρου e ως

$$e = S_u u + S_\theta \theta \quad (3-60)$$

$$\text{Με } S_u = \frac{\partial E}{\partial U} \text{ και } S_\theta = \frac{\partial E}{\partial \theta}$$

Τυπικές τιμές S_u, S_θ για νήμα διαμέτρου 5μm και μήκος 2mm ,από βολφράμιο για χρήση σε CTA παρουσιάζονται στο πίνακα 3.1



Σχήμα 3-6 Μεταβολές στην απόκλιση θερμοκρασίας και ταχύτητας για θερμοκρασιακή διαφορά $T_w - T_a$: α) 10°C β) 100°C και γ) 250°C (εικόνα από Bruun (1996))

Για μία δεδομένη ταχύτητα U , οι αποκλίσεις S_u, S_θ διαφέρουν με βάση τη θερμοκρασιακή διαφορά, με τη τιμή S_u να αυξάνεται και τη τιμή S_θ να μειώνεται όσο αυξάνεται το $T_w - T_a$. Ένας υψηλός λόγος υπερθέρμανσης συνιστάται για τη μέτρηση διακυμάνσεων ταχύτητας. Για την επίτευξη υψηλής θερμοκρασιακής απόκλισης, συνιστάται μικρός λόγος υπερθέρμανσης.

Για μετρήσεις θερμοκρασίας, ένα θερμό νήμα χρησιμοποιείται στη λειτουργία CCA(σταθερό ρεύμα) ως θερμομέτρο αντίστασης με τη χρήση ενός μικρού λόγου υπερθέρμανσης. Όταν ένας αισθητήρας τοποθετηθεί σε μια μη-ισοθερμική τυρβώδης ροή, οι αντιστάσεις R_a, R_w ποικίλουν με το χρόνο, και οι αποκλίσεις θερμοκρασίας και ταχύτητας στη λειτουργία CCA μπορούν να εκφραστούν σε σχέση με τις μέσες τιμές χρόνου \bar{R}_w, \bar{R}_a :

$$S_{u,\infty} = -\frac{(\bar{R}_w - \bar{R}_a)^2 n B \bar{U}^{n-1}}{I \bar{R}_a} = -\frac{n B \bar{U}^{n-1} I^3 \bar{R}_w^2}{\bar{R}_a (A + B \bar{U}^n)^2} \quad (3-61)$$

$$S_{\theta,\infty} = \frac{\alpha_0 I \bar{R}_w R_0}{\bar{R}_a} \quad (3-62)$$

Το διακυμαινόμενο σήμα τάσης e_w από το νήμα-αντίσταση συνδέεται με τις διακυμάνσεις θερμοκρασίας και ταχύτητας με τη σχέση

$$e_w = S_{\theta,cc} \theta + S_{u,cc} u \quad (3-63)$$

Και για την αποφυγή σφαλμάτων στο σήμα της θερμοκρασίας από τις διακυμάνσεις της ταχύτητας ο λόγος

$$\frac{S_{u,cc}}{S_{\theta,cc}} = \frac{n B \bar{U}^{n-1} I^2 \bar{R}_w}{(A + B \bar{U}^n)^2 R_0 \alpha_0} \quad (3-64)$$

Θα πρέπει να ελαχιστοποιείται με τη λειτουργία του νήματος-αντίσταση σε όσο το δυνατόν χαμηλότερη τιμή έντασης ρεύματος I , διατηρώντας ένα επαρκώς υψηλό λόγο σήματος-ήχου του συστήματος CCA

3.3 Θερμικό ανεμόμετρο

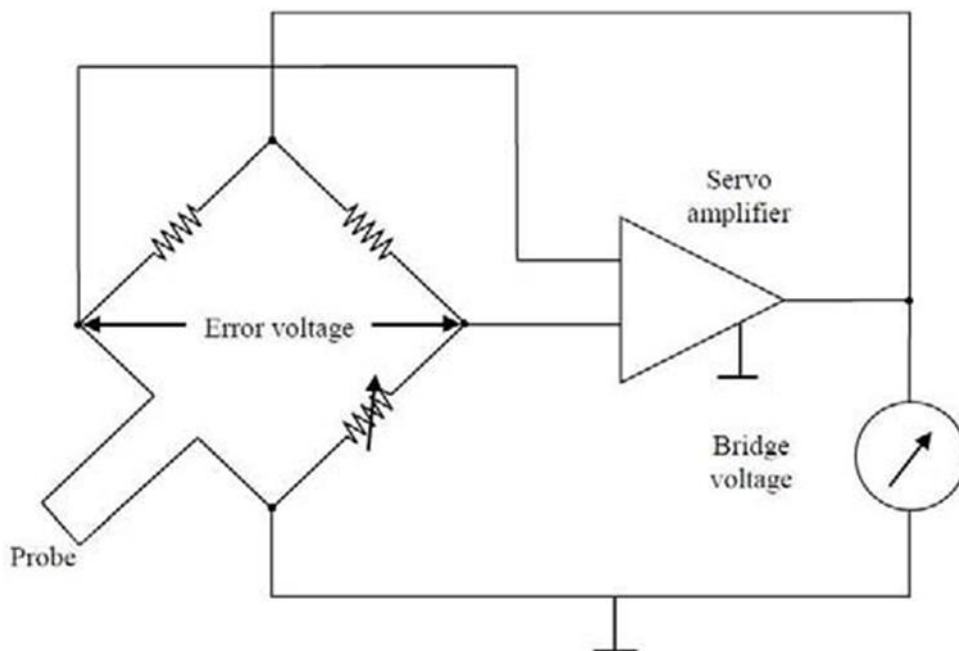
Οι πειραματικές διαδικασίες αυτής της εργασίας έγιναν στο εργαστήριο Μετρήσεων/Ρευστών και Αεροδυναμικής του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών. Στόχος αυτών των πειραμάτων είναι η μελέτη της διάταξης κυκλικού συγκλίνοντος ακροφυσίου του εργαστηρίου με παράλληλη χρήση ανεμομέτρου θερμού νήματος (hot-wire anemometry). Τα προφίλ ταχύτητας που λήφθηκαν με τη χρήση μανομέτρου αποσκοπούν στην κατανόηση της λειτουργίας του συγκλίνοντος ακροφυσίου και της συμπεριφοράς της ροής του σε διάφορες περιπτώσεις ταχύτητας (αριθμού Reynolds). Με τη χρήση του ανεμομέτρου, στόχος είναι η υπόδειξη διακυμάνσεων στην λήψη των μετρήσεων και το spectra για την καλύτερη κατανόηση της ομαλής λειτουργίας του τζετ.

Το ανεμόμετρο είναι όργανο μέτρησης ταχύτητας ρευστών, είτε αέριων είτε υγρών. Ανεμόμετρα θερμού νήματος ή θερμού φιλμ μετρούν την ταχύτητα του

ρευστού με τη χρήση ενός probe από βολφράμιο (W) / λευκόχρυσο (Pt) ή λεπτά μεταλλικά φιλμ, το οποίο θερμαίνεται σε μια θερμοκρασία μεγαλύτερη από τη μέση θερμοκρασία του ρευστού. Χρησιμοποιώντας ηλεκτρικό κύκλωμα, το ανεμόμετρο σταθεροποιεί και διατηρεί τη θερμοκρασία του probe συνεχώς κατά τη διάρκεια της λήψης μετρήσεων. Αφού το ρευστό που διαρρέει το probe έχει χαμηλότερη θερμοκρασία, το νήμα/φιλμ ψύχεται συνεχόμενα από τη ροή και όσο μεγαλύτερη η ταχύτητα του τόσο μεγαλύτερος θα είναι και ο ρυθμός ψύξης. Το ανεμόμετρο πρέπει να μπορεί να διατηρεί τη θερμοκρασία του probe σε σταθερό επίπεδο, οπότε είναι ευαίσθητο στο ρυθμό με τον οποίο ψύχεται. Η ταχύτητα του ρευστού μεταφράζεται σε μια συνεχώς μεταβαλλόμενη τάση η οποία έχει μη γραμμική σχέση με τη ταχύτητα. Το σήμα της τάσης επεξεργάζεται (signal conditioning) ώστε να απομονωθεί ο ήχος και να βελτιωθεί ο λόγος σήμα/ήχου

Με την κατάλληλη βαθμονόμηση των καναλιών (probe channels), είναι εφικτό να μετρηθεί η ταχύτητα ρευστών με ακρίβεια 0.005%, αναλόγως το εύρος μετρήσεων και την ποιότητα της βαθμονόμησης. Ο χρόνος ανταπόκρισης μεταξύ μέτρησης και εξόδου οργάνου είναι πολύ μικρή σε σχέση με άλλες μεθόδους μέτρησης ροής ρευστών.

Ένα σύστημα ανεμομετρίας θερμού νήματος/θερμού φιλμ σταθερής θερμοκρασίας αποτελείται από το αισθητήριο στέλεχος (probe) και τα σχετικά μέλη του, ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα ανάδρασης το οποίο «οδηγεί» το αισθητήριο και παράγει τάση ανάλογη της ταχύτητας και ένα κύκλωμα επεξεργασίας σήματος το οποίο προσδίδει μείωση θορύβων και ενίσχυση.



Σχήμα 3-7 Διάταξη κυκλώματος γέφυρας ανεμομέτρου (Εγχειρίδιο χρήσης)

Ο αισθητήρας συνδέεται με μία γέφυρα Wheatstone η οποία ισορροπεί σχεδόν σε θερμοκρασία δωματίου. Κατά την λειτουργία, το κύκλωμα ανάδρασης προσπαθεί συνεχόμενα να ισορροπήσει τη γέφυρα, για παράδειγμα όταν η αντίσταση του αισθητήριου μέλους μειώνεται λόγω ψύξης συναγωγής, η τάση στην οριζόντια διαγώνια της γέφυρας αυξάνεται. Αυτή η τάση τροφοδοτείται σε ένα σέρβο-ενισχυτή ο οποίος με τη σειρά του εφαρμόζει μια αντίστοιχη τάση στη κάθετη διαγώνια της γέφυρας δημιουργώντας ένα «θερμαινόμενο» ρεύμα το οποίο ρέει στο probe και το θερμαίνει, αυξάνοντας την αντίσταση σε σημείο όπου η γέφυρα ισορροπεί ξανά. Η τάση στην οριζόντια διαγώνια της γέφυρας γίνεται 0. Στην περίπτωση της μειωμένης ροής ρευστού, η ίδια διαδικασία συμβαίνει όπως παραπάνω με την διαφορά πως τα ρεύματα έχουν αντιστραφεί.

Η τάση εξόδου (output voltage) του ενισχυτή, που ενδεικνύει το βαθμό που θερμαίνεται ο αισθητήρας, μας δίνει μια μέτρηση του ρυθμού ψύξης του από το ρευστό το οποίο είναι ανάλογο του ρυθμού της ροής του ρευστού.

Ο λόγος της γέφυρας είναι ο λόγος της αντίστασης του μέλους του probe της αντίστασης προς την αντίσταση του απέναντι μέλους της γέφυρας. Καθορίζει το

λόγο του ρεύματος που θερμαίνει το probe προς το ρεύμα στο απέναντι κάτω μέλος της γέφυρας. Η αναλογία με την οποία το κύκλωμα μπορεί να αντιδράσει στις μεταβολές της αντίστασης του probe και να προσαρμόσει το ρεύμα θέρμανσης ή την συχνότητα απόκρισης του κυκλώματος είναι περιορισμένη και εξαρτάται από 3 μεταβλητές: το λόγο υπερθέρμανσης (OHR), το κέρδος βρόχου και την αντιστάθμιση του καλωδίου

$$f \propto OHR; f \propto \frac{1}{Gain} \quad (3-65)$$

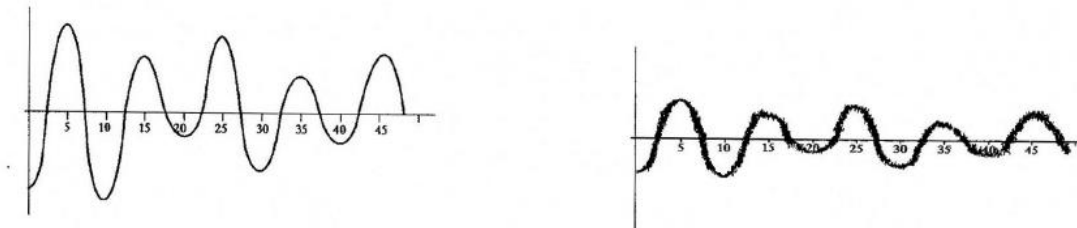
Ο λόγος OHR εφαρμόζεται από τον χρήστη για να φτιάξει την διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του probe και του περιβάλλον αέρα (1.05-1.2 για νερό, 1.2-3.0 για αέρα). Όσο μεγαλύτερος ο λόγος OHR τόσο μεγαλύτερο είναι το εύρος του συστήματος αλλά και η ευαισθησία του probe σε αλλαγές στη ροή ρευστού. Εάν ξεπεραστεί μία συγκεκριμένη θερμοκρασία, το probe θα καταστραφεί ή θα προηγηθούν ανεπιθύμητες συνέπειες στη ροή, οπότε συνίσταται να χρησιμοποιούνται οι τιμές που ενδείκνυνται από το κατασκευαστή για κάθε περίπτωση. Ακατάλληλη απόσβεση (damping) του κυκλώματος του ανεμομέτρου μπορεί να προκαλέσει ταλαντώσεις (oscillations) που μπορούν να καταστρέψουν το probe πολύ γρήγορα.

Η τάση της γέφυρας εισέρχεται σε μονάδα επεξεργασίας σήματος όπου μέσω ενίσχυσης (amplification) και φιλτραρίσματος γίνεται διαθέσιμη για μέτρηση ως μία συνεχώς μεταβαλλόμενη τάση. Αυτή η έξοδος μπορεί να καταγραφεί από έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή χρησιμοποιώντας σύστημα λήψης δεδομένων και συσκευές αποθήκευσης αρχείων. Η μεταβολή των μετρήσεων τάσης σε ταχύτητα ρευστού (Volts → m/sec) απαιτεί τη χρήση γραφήματος βαθμονόμησης, αφού η σχέση τάσης και ταχύτητας είναι μη γραμμική.

Ανεμομετρία σταθερού ρεύματος (CCA) είναι παρόμοια με τη CTA, αντί όμως να διατηρείται το κάτω μέλος της γέφυρας σε σταθερή αντίσταση (ή θερμοκρασία), για τη μέτρηση ταχύτητας, ένα σταθερό ρεύμα περνά μέσω του probe μέλους ώστε να μετρηθεί η θερμοκρασία του ρευστού που διαρρέει το probe.

3.3.1 Επεξεργασία Σήματος

Το σήμα που παράγεται από τη τάση στο probe πρέπει να επεξεργαστεί ώστε να προκύψουν χρήσιμες μετρήσεις. Οι κύριες επεξεργασίες είναι η ενίσχυση (amplify), φιλτράρισμα και αντιστάθμιση (offset) του σήματος. Στη μονάδα μας (AN-1005) κάθε κανάλι διαθέτει ρυθμίσεις για το κέρδος, ενίσχυση, DC αντιστάθμιση και συχνότητα αποκοπής φίλτρου



Σχήμα 3-8. Σήμα πριν και μετά την επεξεργασία σήματος (Εγχειρίδιο χρήσης)

DC offset: Η αντιστάθμιση είναι μία συνεχής τάση DC η οποία αποκόπτεται από το σήμα. Για παράδειγμα, ένα σήμα είναι μεταξύ -1V έως 5V αλλά ο αναλογικός-ψηφιακός μετατροπέας είναι περιορισμένος σε ένα εύρος 0V έως 10V , με την αφαίρεση ενός DC Offset -6V από το σήμα θα μεταβάλλει το εύρος σε +1V ..+5V εντός του εύρους του μετατροπέα. Εφόσον η τάση εξόδου του ανεμομέτρου είναι αρνητική και αυξάνεται αρνητικά όσο αυξάνεται η ταχύτητα, μία αρνητική αντιστάθμιση τάσης αφαιρείται ώστε να μετατοπιστεί το σήμα σε θετικές τιμές. Μόνο μετά την αντιστάθμιση γίνεται η ενίσχυση ώστε να υπάρχει μέγιστο κέρδος χωρίς κορεσμό του ενισχυτή. Για παράδειγμα, εάν η τάση της γέφυρας είναι μεταξύ -4V..-3.5V και στόχος είναι το κέρδος 40 τότε η έξοδος θα έχει εύρος 20V αλλά αν το DC μέλος δεν έχει μηδενιστεί πριν την ενίσχυση, η τάση εξόδου θα είναι μεταξύ -140V..-160V το οποίο είναι εκτός του δυνατού εύρους του ανεμομέτρου ($\pm 10V$). Αν όμως χρησιμοποιηθεί DC offset -3.75V θα έχει τάση εξόδου του σήματος επεξεργασίας μεταξύ -10V..+10V το οποίο αρμόζει τα περισσότερα συστήματα μετατροπής A/D. Η εξίσωση κέρδους (gain) είναι:

$$V_{output} = (V_{in} - V_{offset}) * GAIN \quad (3-66)$$

Gain: Το κέρδος συνήθως επιλέγεται ώστε να εκμεταλλευθεί τη μέγιστη ανάλυση ενός συστήματος λήψης δεδομένων. Αντιστοιχίζοντας το εύρος εξόδου του ανεμομέτρου με το μέγιστο εύρος εισόδου του μετατροπέα A/D, επιτυγχάνεται μέγιστη ανάλυση. Για παράδειγμα αν το εύρος εισόδου του μετατροπέα A/D είναι $-10V..+10V$ και η έξοδος του ανεμομέτρου είναι $-4V..-2V$, μόνο το 10% του εύρους του μετατροπέα χρησιμοποιείται όταν λαμβάνεται το σήμα. Αν όμως το σήμα ενισχύεται με κέρδος 10 (και αντιστάθμιση $-3V$) πριν τη δειγματοληψία, εκμεταλλεύεται μεγαλύτερο εύρος χρήσης του μετατροπέα και έχει καλύτερη ανάλυση/

Filter: Το φιλτράρισμα έχει ως στόχο την εξάλειψη του ήχου, συγκεκριμένα line noise, ήχου σταθερής επιρροής περί τα 50-60 Hz, white noise thermal noise κτλ. Άλλες μεταβλητές είναι ο περιορισμός του εύρους λήψης του σήματος εξόδου πριν τη λήψη δεδομένων. Το φιλτράρισμα περιλαμβάνει την αφαίρεση συχνοτήτων κάποιων τμημάτων από το σήμα

Ένα low pass φίλτρο χρησιμοποιείται για να θέσει ένα μέγιστο όριο στις συχνότητες του σήματος εξόδου πριν την επεξεργασία. Η συχνότητα αποκοπής του low pass φίλτρου επιλέγεται από τον χρήστη αναλόγως το μετρητικό σύστημα του (για παράδειγμα με τη χρήση ενός A/D converter με μέγιστη συχνότητα δείγματος 20 KHz ανά κανάλι πρέπει να περιορίσει το σήμα εισόδου στο μέγιστο σε 10 KHz το οποίο επηρεάζει την επιλογή της συχνότητας αποκοπής.

Ήχος: Ο ήχος είναι ανεπιθύμητη παρεμβολή που διαστρέφει το πρωτότυπο σήμα. Υπάρχει ένα σύνολο πηγών ήχου το οποίο μπορεί να προστεθεί στο σήμα σε οποιαδήποτε σημείο από τη πηγή του, μέσω ανίχνευσης, ενίσχυσης, ως το τελικό αποτέλεσμα

Δυναμικές μηχανικές τάσεις στο φύλλο βολφραμίου ενός αισθητήρα θερμού νήματος μπορούν να μεταβάλλουν τις ηλεκτρικές ιδιότητες στις οποίες βασίζεται η ανεμομετρία σταθερής θερμοκρασίας. Τα νήματα θερμού νήματος τα οποία δεν είναι σωστά συγκολλημένα στα άκρα συμβάλλουν αρκετά στη παραγωγή ήχου. Κακές ηλεκτρικές συνδέσεις, όπως βρώμικες ή ελαττωματικές BNC συνδέσεις μπορούν να προκαλέσουν αιφνίδιες διακυμάνσεις τάσης, μη ορθή

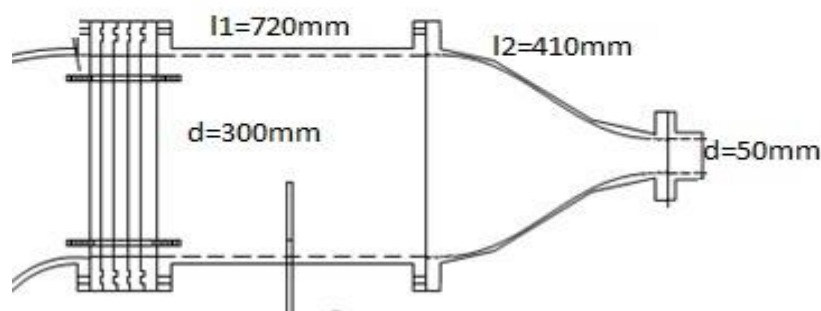
τοποθέτηση των καλωδίων μπορεί να εισάγει ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή από εξωτερικές πηγές, βρόχοι γείωσης μπορούν να προκαλέσουν διασταυρώσεις μεταξύ των καναλιών, κυκλώματα ενισχυτών θα εισάγουν ήχο ως αποτέλεσμα από τη θέρμανση ή κβαντικά θερμικά φαινόμενα και ήχος από τη γραμμή της παροχής ρεύματος, χαμηλή ανάλυση ή κακή βαθμονόμηση στην μετατροπή A/D μονάδων θα συμβάλλουν σε αλλοίωση του σήματος καθώς και σε επιρροές στη ποσοτική και μη γραμμική κατάσταση των μονάδων μέτρησης. Ο ήχος μπορεί να εισαχθεί και από πηγές εκτός του μετρητικού συστήματος όπως ήχος από τον υπολογιστή, από μοτέρ, απεικονίσεις CRT (καθόδου) κ.α.

Καμία από τις παραπάνω πηγές μπορούν να μηδενιστούν αλλά μπορούν να ελαχιστοποιηθούν. Το μεγαλύτερο μέρος από τη μείωση θορύβων γίνεται με τη χρήση ηλεκτρονικών φίλτρων που περιλαμβάνονται στη μονάδα επεξεργασίας του σήματος.

4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Στο κεφάλαιο αυτό, ακολουθεί περιγραφή των διαστάσεων της διάταξης του συγκλίνοντος ακροφυσίου, καθώς και η βαθμονόμηση των στροφών κινητήρα-ταχύτητας. Επίσης, παρουσιάζονται τα απαραίτητα βήματα για την χρήση και βαθμονόμηση του θερμικού ανεμομέτρου του εργαστηρίου.

Η διάταξη του συγκλίνοντος ακροφυσίου τέθηκε για πρώτη φορά σε λειτουργία στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής για την μελέτη και χαρακτηρισμό της ροής και της τύρβης μετά την ανάμιξη των ροών κατόπιν της εξόδου του ακροφυσίου. Έγιναν οι πρώτες μετρήσεις ταχύτητας στην έξοδο του και χαρτογράφηση της ταχύτητας σε σχέση με τη συχνότητα περιστροφής του κινητήρα. Χαρακτηριστικά μεγέθη της διάταξης είναι η διάμετρος του ακροφυσίου ανάντη της εξόδου του συγκλίνοντος, $D=300\text{mm}$, η διάμετρος της εξόδου του συγκλίνοντος ακροφυσίου $d=50\text{mm}$, $l_1=360\text{ mm} = l_2$ (l_1, l_2 μήκος μελών της διάταξης ανάντη του ακροφυσίου), $l_3=410\text{mm}$ (αξονικό μήκος κωνικού μέλους διάταξης κατόπιν του ακροφυσίου)



Σχήμα 4-1. Χαρακτηριστικά μεγέθη διάταξης ακροφυσίου

4.1 Διαστασιολόγηση εύρους ταχυτήτων εύρους ταχυτήτων της διάταξης ροής συγκλίνοντος ακροφυσίου

Για τη χαρτογράφηση/ διαστασιολόγηση του εύρους ταχυτήτων στις οποίες λειτουργεί η διάταξη ροής συγκλίνοντος ακροφυσίου, χρησιμοποιήθηκε ένα μανόμετρο και υπολογίστηκαν με αυτό οι ταχύτητες οι οποίες αντιστοιχούν σε

κάθε τιμή εισόδου συχνότητας (Hz) στο πίνακα ελέγχου της διάταξης. Αρχικώς μετρήθηκαν με το μανόμετρο η διαφορά πίεσης στη διάμετρο του ακροφυσίου με την ατμοσφαιρική και προέκυψε ένα προφίλ ταχυτήτων και στη συνέχεια ένα δεύτερο καταγράφοντας τη διαφορά πίεσης στην έξοδο του συγκλίνοντος ακροφυσίου με τη χρήση ενός σωλήνα pitot.



Σχήμα 4-2. Διάταξη ροής συγκλίνοντος ακροφυσίου

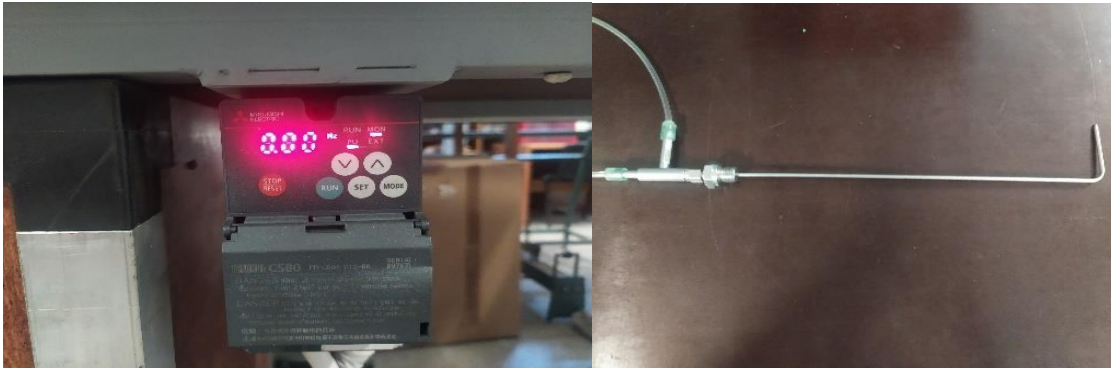
Αφού τέθηκε σε λειτουργία η διάταξη για τιμές συχνότητας 10 έως 50 Hz (μέγιστη δυνατή τιμή), χρησιμοποιήθηκε το μανόμετρο και λήφθηκαν τιμές διαφοράς πίεσης ΔP ανά 1 Hz. Λύνοντας την εξίσωση

$$p_{dyn} = \Delta p = \frac{1}{2} \rho u^2 \quad (4-1)$$

ως προς τη ταχύτητα u προκύπτει

$$u = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (4-2)$$

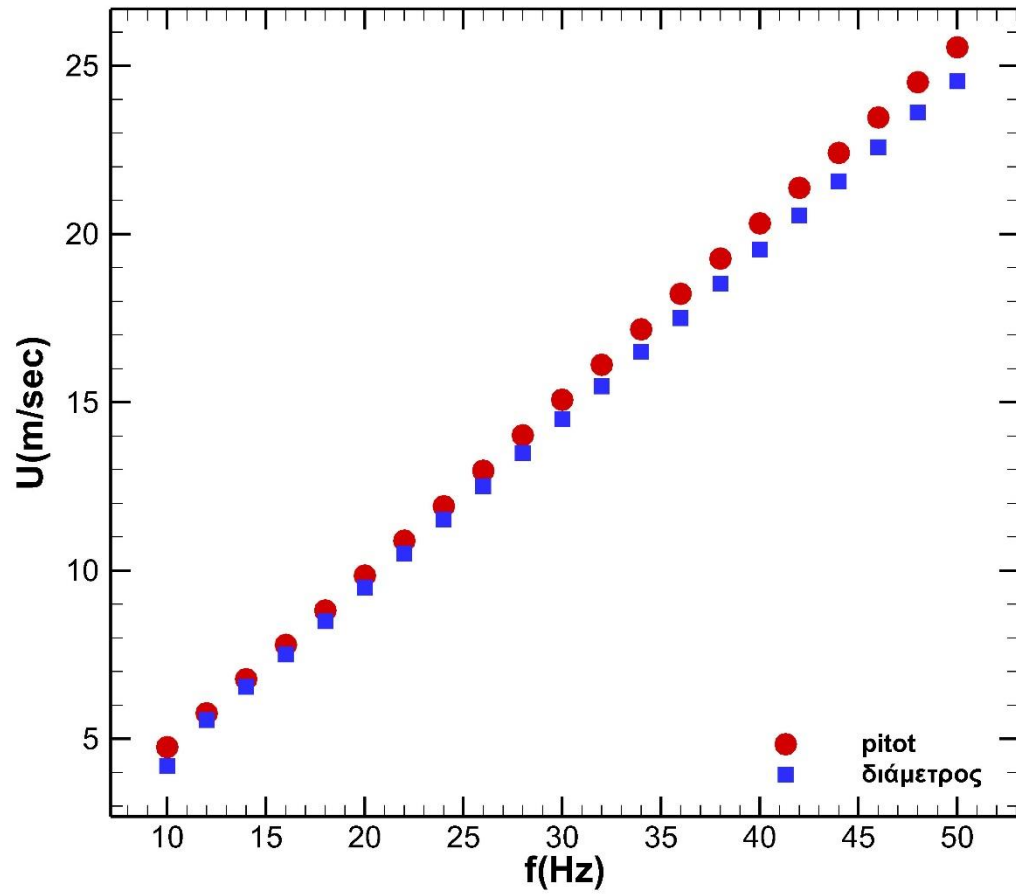
Με ρ πυκνότητα του αέρα $1,2 \text{ kg/m}^3$



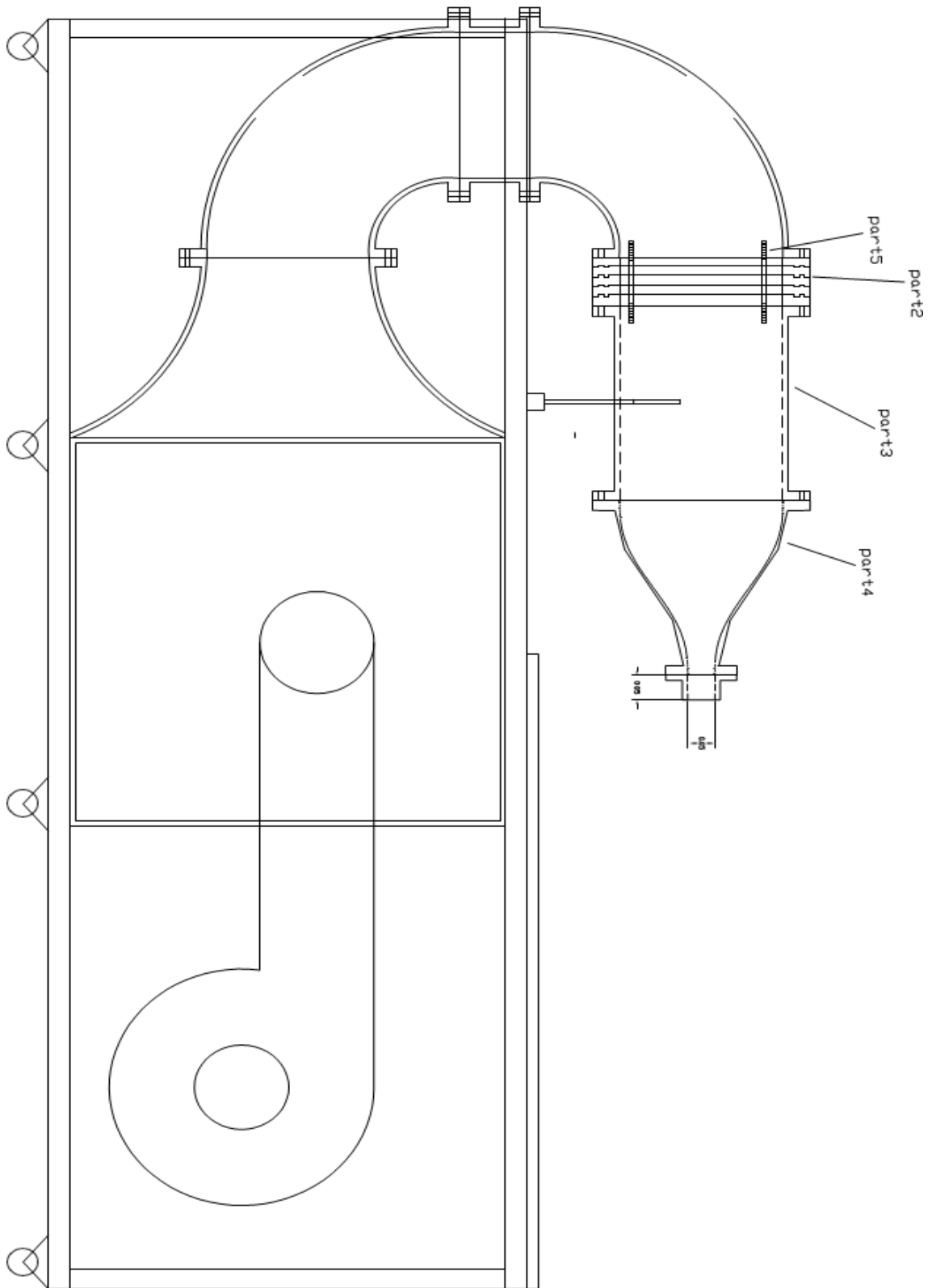
Σχήμα 4-3. Α) πίνακας λειτουργίας κινητήρα διάταξης β) σωλήνας pitot



Σχήμα 4-4. Μανόμετρο Furness Controls FCO560



Σχήμα 4-5 Διάγραμμα ταχυτήτων-συχνότητας περιστροφής κινητήρα διάταξης για μετρήσεις στην έξοδο του συγκλίνοντος ακροφυσίου με σωλήνα pitot και για μετρήσεις στη πίσω διάμετρο του ακροφυσίου



Σχήμα 4-6 Σχέδιο διάταξης ροής συγκλίνοντος ακροφυσίου

4.2 Οδηγίες χρήσης διάταξης θερμικού ανεμομέτρου

Οδηγίες χρήσης διάταξης θερμικού ανεμομέτρου για την αποφυγή καταστροφής του αισθητήρα

- Ποτέ δεν τοποθετείται ή αφαιρείται διάταξη καναλιού ενώ η διάταξη είναι ενεργή (ON)
- Ποτέ δεν συνδέεται ή αφαιρείται ο αισθητήρας όταν ο διακόπτης N/Adjust/Operate είναι στη θέση Operate
- Ποτέ δεν τίθεται ο κύριος διακόπτης ενέργειας της μονάδας όταν τα κανάλια με τους αισθητήρες είναι στην λειτουργία Operate
- Δεν αλλάζει ποτέ ο ρυθμιστής δεκαδικών όταν το ανεμόμετρο είναι στη θέση Operate
- Δεν επιλέγεται ποτέ η λειτουργία Operate πριν εφαρμοστεί πρώτα η εξισορρόπηση της γέφυρας wheatstone και ο λόγος υπερθέρμανσης
- Δεν επιλέγεται η λειτουργία pulse πριν διαβεβαιωθεί ότι η τάση εξόδου του ανεμόμετρου (anemometer output voltage) είναι μεταξύ των τιμών -9V έως -14V (όταν το κανάλι είναι στη θέση λειτουργίας N (neutral). Αν η επιλογή υψηλής συχνότητας (04) είναι εγκατεστημένη στην μονάδα, απαιτείται επιβεβαίωση πως η βίδα φερρίτη είναι σχεδόν εκτός πριν επιλεγεί η λειτουργία operate. Αν ο ίδιος αισθητήρας χρησιμοποιηθεί ξανά με το ίδιο κανάλι, το βήμα αυτό μπορεί να αγνοηθεί
- Ποτέ δεν διαλέγεται ο διακόπτης 1x/10x όταν το ανεμόμετρο είναι στη θέση operate

Δεν συνιστάται η λειτουργία του ανεμομέτρου με αισθητήρες κοινού ελάσματος (common wire) καθώς μπορεί να προκαλέσουν ταλαντώσεις (oscillations) και να βλάψουν τον αισθητήρα και το όργανο

Η καθορισμένη παροχή ρεύματος εγκατεστημένη στο σύστημα είναι ικανή να τροφοδοτήσει 4 κανάλια με λόγο γέφυρας 1:10 ή 3 κανάλια 1:1 με μέγιστη ένταση 2A

4.3 Βαθμονόμηση καναλιού για λειτουργία CTA (continuous temperature anemometry)

Για την βαθμονόμηση χρησιμοποιούνται ένα κατσαβίδι και το αντίστοιχο λογισμικό στον υπολογιστή (VIEW/PULSE RESPONSE MODE). Για την επίτευξη ακριβότερων μετρήσεων και την ασφαλή λειτουργία της διάταξης ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα:

1. Τίθεται το εύρος συχνότητας φίλτρου με το διακόπτη στο κανάλι PCB. Η θέση 1 είναι χαμηλής συχνότητας και η θέση 2 είναι υψηλής συχνότητας
2. Τίθεται ο αντιστάτης του αισθητήρα με το διακόπτη S2 (ενισχυτής υψηλής συχνότητας). Η θέση up είναι για κανονική λειτουργία σε αέρα και νερό με μέγιστο ρεύμα 300mA και η θέση down είναι για υψηλής συχνότητας λειτουργία σε νερό με μέγιστη ένταση 600mA Τοποθετείται η μονάδα καναλιού στη κεντρική μονάδα του οργάνου και γίνεται επιβεβαίωση ότι είναι σωστά συνδεδεμένα
3. Ενεργοποιείται στην οθόνη του οργάνου η ένδειξη top of bridge και τοποθετούνται όλοι οι διακόπτες του καναλιού στη θέση N ή Adjust
4. Ενεργοποιείται ο κύριος διακόπτη παροχής του ανεμόμετρου
5. Γίνεται σύνδεση ενός καλωδίου στην ένδειξη «ANEMOMETER OUTPUT» στο όργανο και θέτεται στο πρόγραμμα υπολογιστή PC View/Scope TOB input
6. Τίθεται το όργανο σε λειτουργία top of bridge
7. Επιλέγονται τα κανάλια προς βαθμονόμηση ώστε να εμφανίζονται στην οθόνη του οργάνου χρησιμοποιώντας το μενού ρύθμισης της διάταξης
8. Ενώνεται η ράβδος υποστήριξης και το καλώδιο στην είσοδο probe του επιλεγμένου καναλιού της μονάδας
9. Θέτεται ο διακόπτης της λειτουργίας καναλιού στη θέση adjust
10. Γίνεται επιλογή του εύρος δεκαδικού με το διακόπτη 1x/10x
11. Συνδέεται ένα μικρό καλώδιο στη ράβδο στήριξης ώστε να δημιουργηθεί ένα βραχυκύκλωμα μεταξύ του σήματος και των γραμμών με απώτερο σκοπό τον υπολογισμό της αντίστασης όλων των μελών της ράβδου και της στήριξης
12. Θέτονται τα δεκαδικά ψηφία στη θέση 0.00 (η εικονική αντίσταση τώρα θα είναι 0)
13. Ισορροπείται η αντίσταση καλωδίου με τον επιλογέα null ώστε να βρίσκεται στο 0 η ένδειξη και να μηδενιστεί η αντίσταση του καλωδίου (τιμές μεταξύ -0.3 V και 0.3V είναι αποδεκτές)
14. Συνδέεται ο αισθητήρας hot wire στη θέση του καλωδίου βραχυκυκλώματος
15. Ρυθμίζεται ο διακόπτης των δεκαδικών της αντίστασης μέχρι να εξισορροπηθεί με τη γέφυρα και να ληφθεί η αντίσταση του αισθητήρα στην ένδειξη

16. Πολλαπλασιάζεται η αντίσταση του αισθητήρα με τον λόγο υπερθέρμανσης αναλόγως με το μέσο που πρόκειται να γίνει η μελέτη (1.05-1.20 νερό, 1.20-2.00 αέρα). Θέτονται τα δεκαδικά της αντίστασης στη νέα τιμή που λαμβάνεται. Όταν το κύκλωμα ισορροπήσει τη γέφυρα (αφού τεθεί σε λειτουργία operate) θα θερμάνει τον αισθητήρα μέχρι η αντίσταση να είναι ίδια με την αντίσταση στην ένδειξη
 17. Γίνεται αλλαγή της λειτουργίας του καναλιού της μονάδας σε λειτουργία στη θέση N. Με τη χρήση του DAMPING μεταβάλλεται η τάση εξόδου σε -9V ώστε να αποφευχθούν ταλαντώσεις κατά τη μετάβαση σε λειτουργία operate.
 18. Αλλάζει η λειτουργία του καναλιού στη θέση operate . Το κύκλωμα είναι συνδεδεμένο στη ράβδο και στο πρόγραμμα του λογισμικού τίθεται File/Configuration/Display/Pulse 800k sampling rate 1 V F.S
 19. Γίνεται επιλογή στο πρόγραμμα VIEW/PULSE RESPONSE και τα κανάλια προς ρύθμιση για την απεικόνιση της απόρροιας της συχνότητας
 20. Μεταβάλλεται η απόσβεση της συχνότητας με τον επιλογέα DAMPING με προσοχή να αποφευχθούν ταλαντώσεις που μπορεί να καταστρέψουν τον αισθητήρα
 21. Τίθεται ο διακόπτης TOB/ERR στη θέση Top Of Bridge
 22. Επιλέγεται η ένδειξη Gain adjustment στην οθόνη της μονάδας. Σήμα DC 0.1V εισέρχεται στο επιλεγμένο κανάλι ως ενίσχυση για τη βαθμονόμηση DC gain
 23. Θέτεται ο διακόπτης DC offset αντίθετα με τη φορά του ρολογιού (CCW) μέχρι το 0
 24. Με το κατσαβίδι ρυθμίζεται το σήμα DC gain
 25. Γίνεται επιλογή του DC offset στην οθόνη και ρυθμίζεται με το κατσαβίδι η ένδειξη. Τώρα επιλέγεται στην οθόνη AMPLIFIER OUTPUT (έξοδος ενισχυτή) και παρατηρείται η τάση εξόδου κάθε καναλιού. Το κανάλι είναι έτοιμο για λήψη μετρήσεων
- Επαναλαμβάνονται τα βήματα για κάθε κανάλι προς χρήση



Σχήμα 4-7. Μονάδα διάταξης θερμικού ανεμομέτρου

5 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Σε αυτό το κεφάλαιο, παρουσιάζονται οι μετρήσεις ταχύτητας στη διάταξη του συγκλίνοντος ακροφυσίου με τη χρήση του θερμικού ανεμομέτρου. Λαμβάνει μέρος εκ νέου βαθμονόμηση της ταχύτητας ως προς τον αριθμό Reynolds και υπολογίζονται η διακύμανση των μετρήσεων ταχύτητας και η ένταση της τύρβης T.I. Επίσης δίνεται παράδειγμα σχέσης $E = f(U)$ μεταξύ της τάσεως που καταμετρείται και της ταχύτητας που εκφράζει.

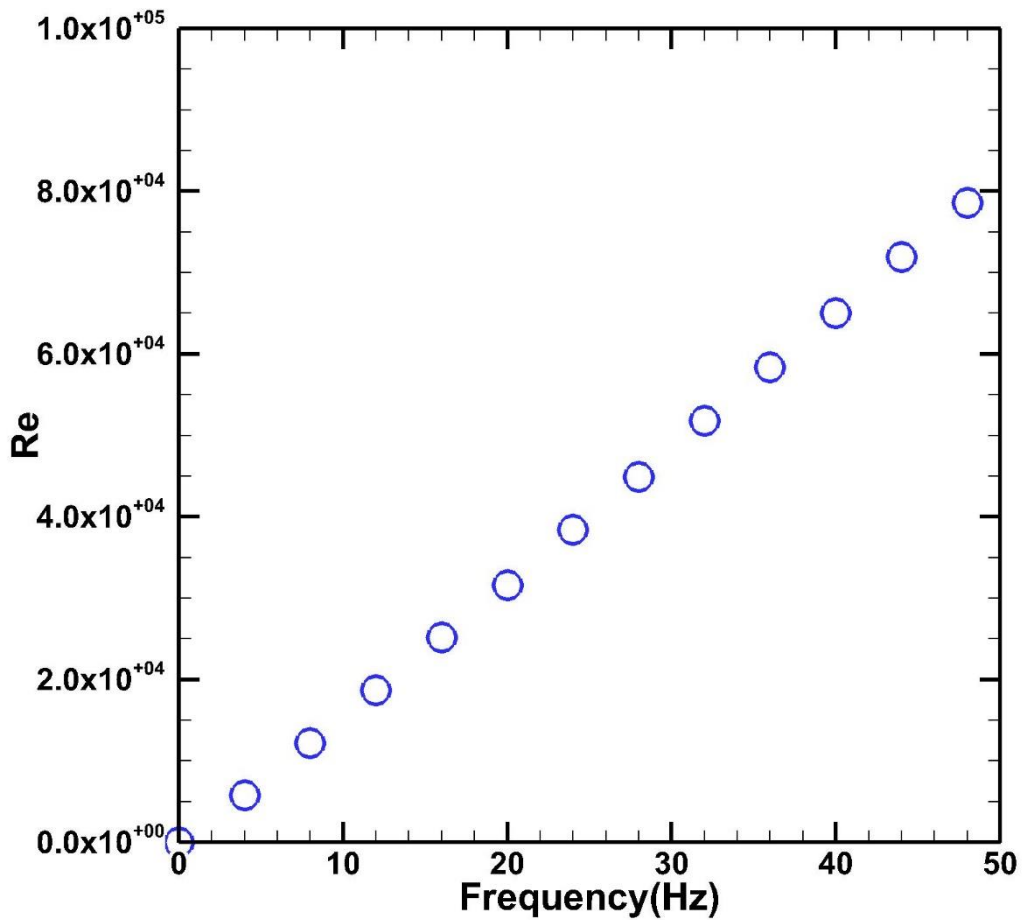
5.1 Βαθμονόμηση της ταχύτητας της ροής συγκλίνοντος ακροφυσίου ως προς τον αριθμό Reynolds και υπολογισμός turbulent intensity (T.I.)

Με τη χρήση του μανομέτρου, πραγματοποιήθηκε εκ νέου χαρτογράφηση της λειτουργίας της διάταξης σε διάφορες τιμές συχνότητας (Hz) του πίνακα λειτουργίας του. Με το μανόμετρο λήφθηκαν τιμές ΔP (Pa) στην έξοδο του ακροφυσίου ($l/d=0$) και στη συνέχεια υπολογίστηκε η ταχύτητα U (m/s) και ο αριθμός Reynolds:

$$\Delta P = \frac{1}{2} * U^2 * \rho \Rightarrow U = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (5-1)$$

$$Re = U * \frac{D}{\nu} \quad (5-2)$$

Όπου $D=0,05\text{m}$ η διάμετρος του ακροφυσίου εξόδου του $\rho=1,2 \text{ kg/ m}^3$ η πυκνότητα του αέρα και $\nu=1,5 * 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ το κινηματικό ιξώδες



Σχήμα 5-1 Διάγραμμα συχνότητας περιστροφής κινητήρα (Hz) – αριθμού Reynolds

Πίνακας 5-1 Χαρακτηριστικά μεγέθη των 4 καταστάσεων ροής που συγκρίνονται

Επιθυμητό Re	Συχνότητα περιστροφής κινητήρα (Hz)	ΔP (Pa)	U (m/s)	Επιτεύξιμο Re	Κατάσταση Ροής
5000	3.5	1.4	1.512	5038.41	Στρωτή
10000	7	6.1	3.189	10628.40	Μεταβατική
20000	13	22.3	6.096	20321.49	Τυρβώδης
50000	31	135.2	15.011	50037.02	Ανεπτυγμένη τυρβώδης

Στη συνέχεια, λαμβάνονται μετρήσεις ταχύτητας με τη χρήση του βραχίονα στο κέντρο του ακροφυσίου για $l/d=0,75$ με το ανεμόμετρο θερμού νήματος (single wire). Κάθε χρονοσειρά μετρήσεων που λήφθηκε, είχε ίδια συχνότητα και μέγεθος δείγματος (10000samples, $f=2000$ Hz). Παρακάτω παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη του ακροφυσίου με τις μετρήσεις του ανεμομέτρου:

$$s^2 = \frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n} \quad (5-3)$$

$$T.I. = \frac{s}{U_m} \quad (5-4)$$

Όπου s^2 η διακύμανση και $T.I.$ (turbulent intensity) ένταση τύρβης

Πίνακας 5-2 Χαρακτηριστικά μεγέθη των μετρήσεων με ανεμόμετρο

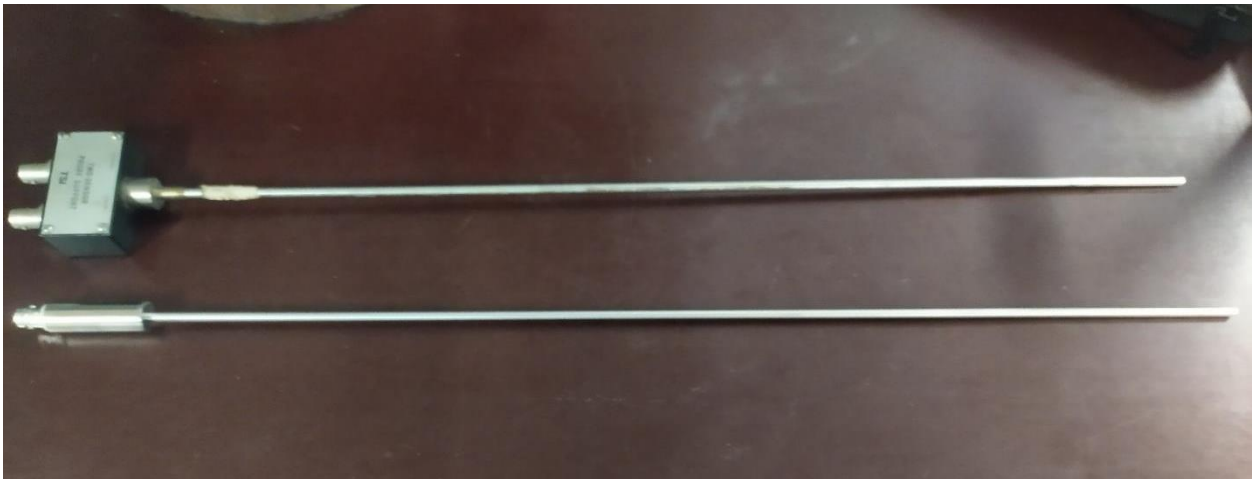
Re	Umean (m/s)	s^2	s	Turbulent Intensity	Turbulent Intensity (%)
50000	15.0132	0.0134	0.1158	0.0077	0.771387
20000	6.1930	0.0052	0.0723	0.0117	1.167787
10000	3.2252	0.0010	0.0324	0.0100	1.004406
5000	1.5093	0.0005	0.0217	0.0144	1.435061

5.2 Μετρήσεις ταχύτητας με single και double-wire στην έξοδο του συγκλίνοντος ακροφυσίου

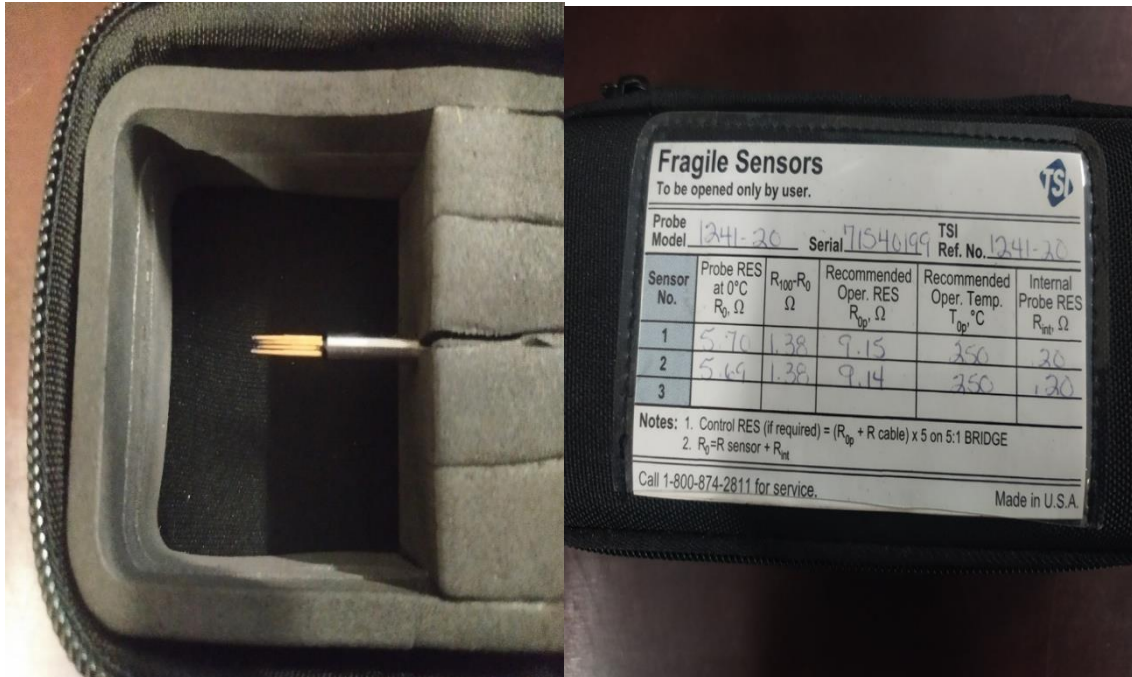
Για την καλύτερη κατανόηση των φαινομένων, έχουν ληφθεί μετρήσεις ταχύτητας με hot-wire CTA ανεμόμετρο (constant temperature anemometry). Για την εκπόνηση της εργασίας, έγινε χρήση και λήψη μετρήσεων με single-wire.



Σχήμα 5-2 Μονός αισθητήρας θερμού νήματος



Σχήμα 5-3 Στήριξη μονού και διπλού αισθητήρα

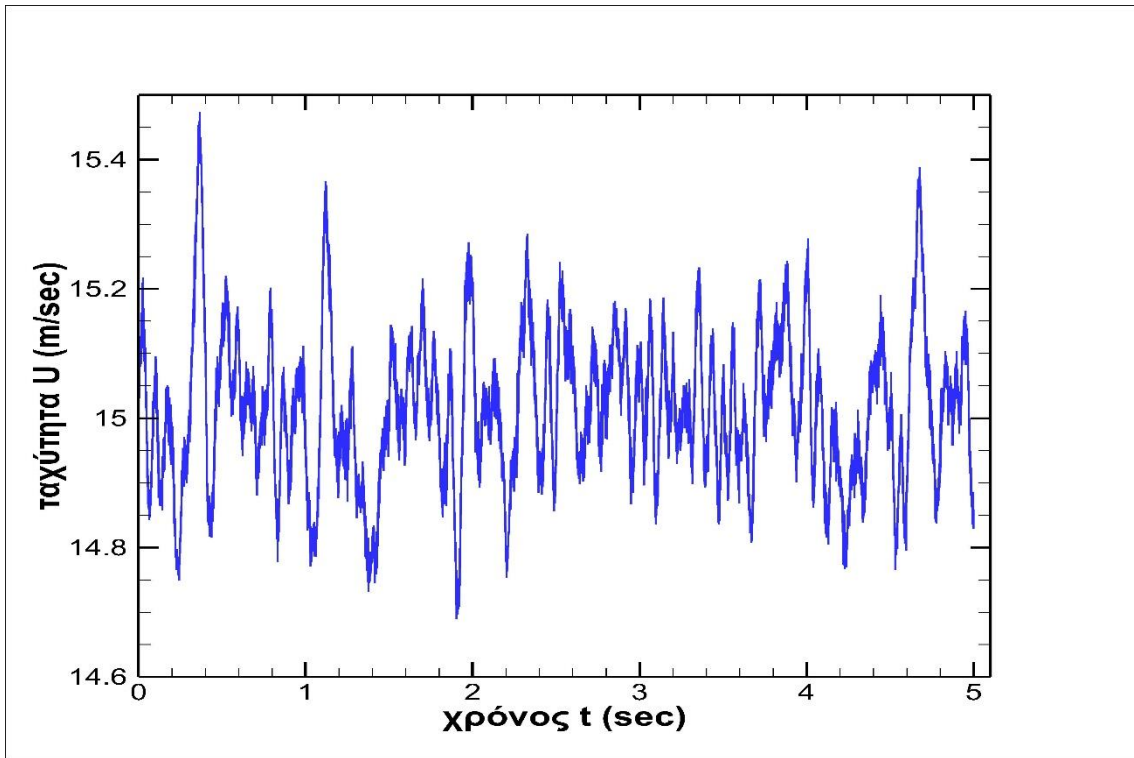


Σχήμα 5-4 Αισθητήρας διπλού θερμού νήματος

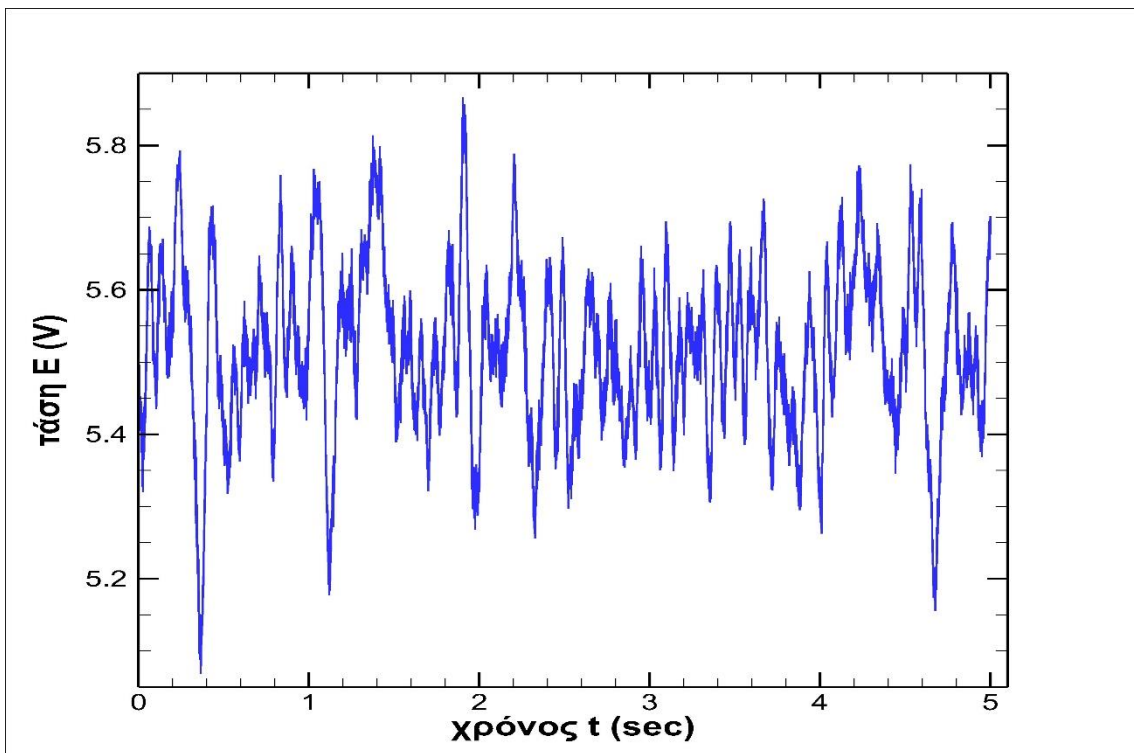
Το ανεμόμετρο έχει ρυθμιστεί σε συνθήκες περιβάλλοντος για να ληφθούν μετρήσεις single wire στην έξοδο του συγκλίνοντος ακροφυσίου. Αρχικώς, παρουσιάζονται τα σήματα των μετρήσεων που πάρθηκαν και θα μελετηθούν αναλυτικά. Ακολουθώντας τις οδηγίες του εγχειριδίου χρήσης της διάταξης, το αρχικό σήμα που λαμβάνεται είναι σήμα τάσης ρεύματος το οποίο μέσω επεξεργασίας και μετατροπής μέσω του ίδιου λογισμικού, μετατρέπεται σε νέο σήμα ταχύτητας. Η σχέση που διέπει την τάση και την ταχύτητα εκφράζεται ως

$$E = C_0 + C_1 * U + C_2 * U^2 + C_3 U^3 + C_4 U^4 \quad (5-5)$$

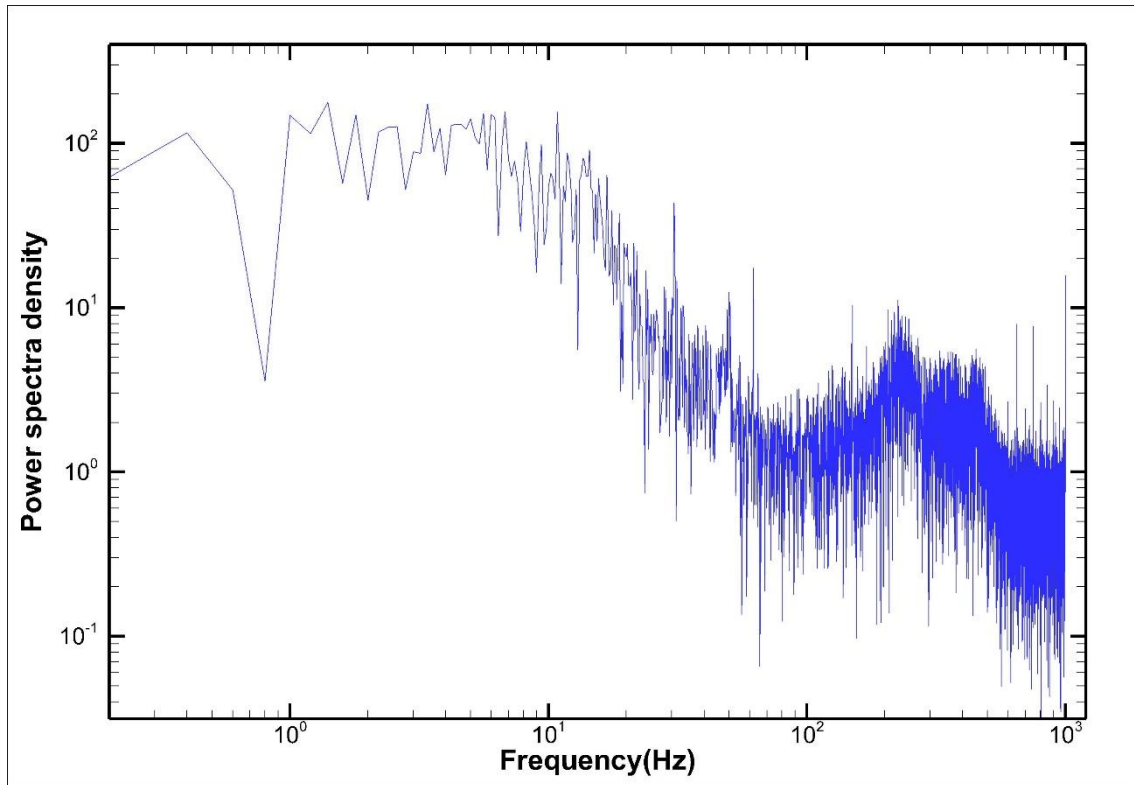
Παρακάτω διατίθενται διαγράμματα ταχύτητας-χρόνου δειγματοληψίας όπως αυτά λήφθηκαν από το λογισμικό AN-1005 του ανεμομέτρου με ίδιο αριθμό δείγματος (N=10000 samples) συχνότητα δειγματοληψίας f=2000 Hz και t=5 sec συνολικό χρόνο λήψης.



Σχήμα 5-5 Μετρήσεις ταχύτητας single wire στην έξοδο του ακροφυσίου σε αριθμό $Re=50.000$



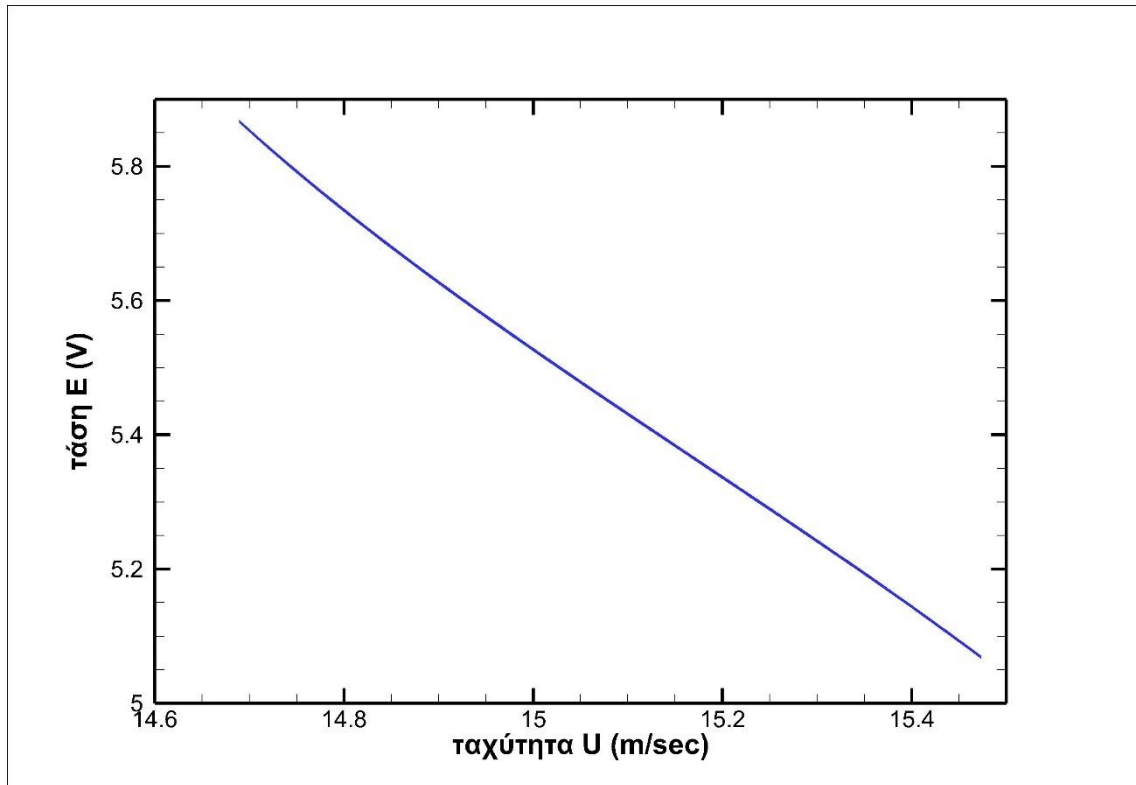
Σχήμα 5-6 Μετρήσεις τάσης single wire στην έξοδο του ακροφυσίου σε αριθμό $Re=50.000$



Σχήμα 5-7 Διάγραμμα FFT για μετρήσεις ταχύτητας στην έξοδο του ακροφυσίου για $Re=50000$

Με τη χρήση του λογισμικού Tecplot και την εντολή Fourier function transform λήφθηκαν αντιστοίχως τα διαγράμματα FFT σε λογαριθμική κλίμακα. Σκοπός είναι να κατανοηθεί που μπορεί να οφείλονται σφάλματα στα αποτελέσματα με στόχο να αποδειχθεί η μεταβλητότητα στη συχνότητα και η ύπαρξη διακυμάνσεων λόγω της τύρβης.

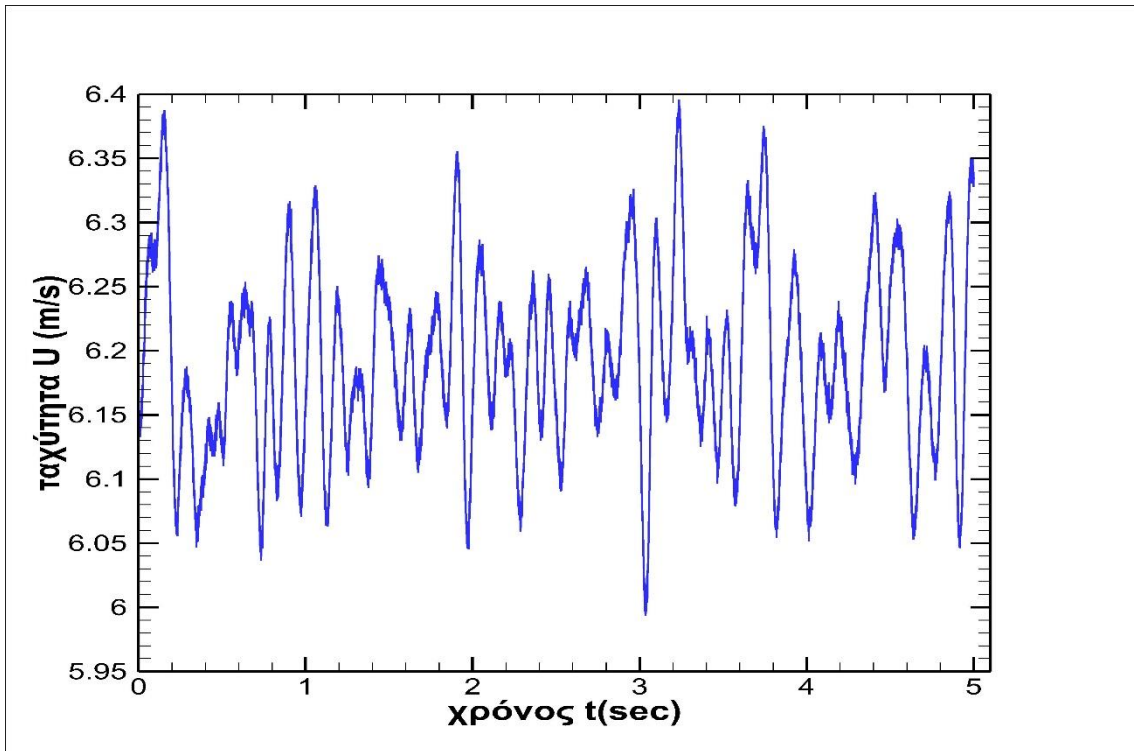
Μπορεί να οφείλεται σε μη πλήρη ανάπτυξη της ροής, υψηλή τύρβη στη διάταξη, θόρυβος από τη λειτουργία της διάταξης ή «ιδιοθόρυβος» (αυτό-επαγόμενος θόρυβος) από την ίδια την διάταξη του ανεμομέτρου και τον ηλεκτρονικό θόρυβο που παράγεται για τη μεταφορά και μετατροπή του σήματος



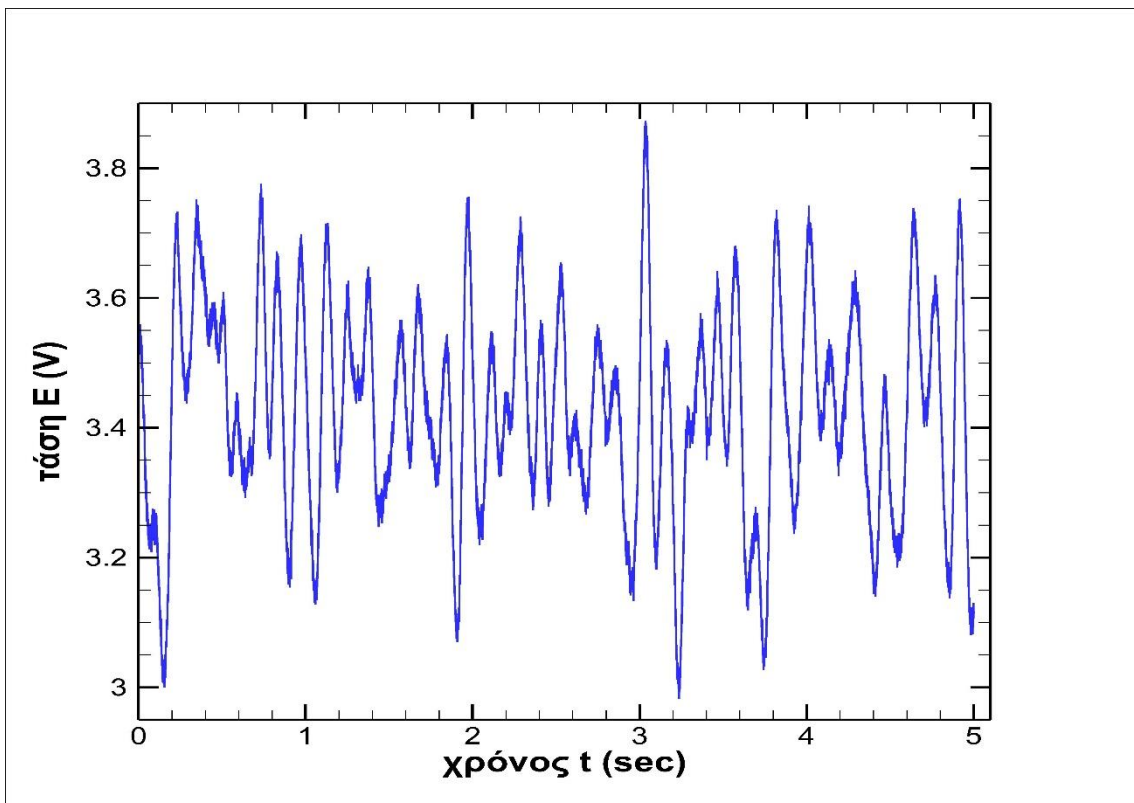
Σχήμα 5-8 Διάγραμμα ταχύτητας-τάσεων για single wire στην έξοδο του ακροφυσίου για $Re=50000$

Με τη βοήθεια του ίδιου του λογισμικού και τη χρήση γραμμής τάσης πολωνύμου 4^{ου} βαθμού, προκύπτει η παρακάτω εξίσωση σε ροή $Re=50000$ από την 5-1 ως

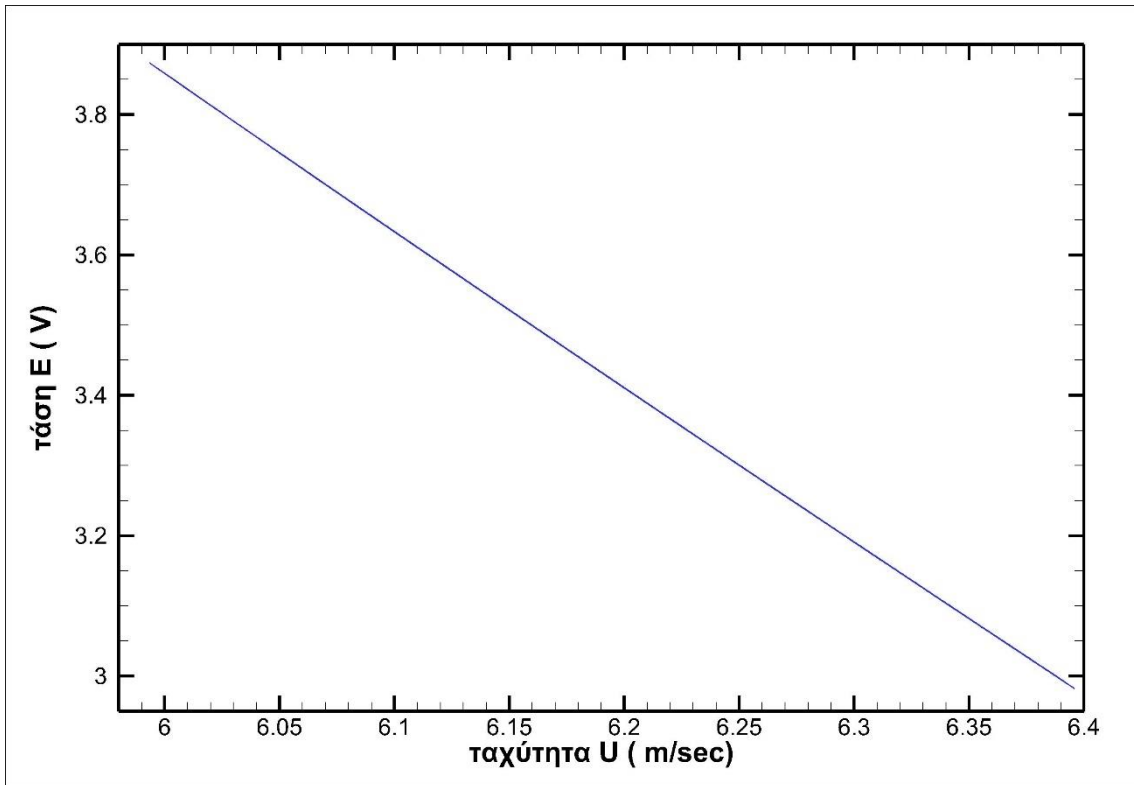
$$E = 0.1379 U^4 - 8.742 U^3 + 207.44 U^2 - 2184,9U + 8628.4 \quad (5-6)$$



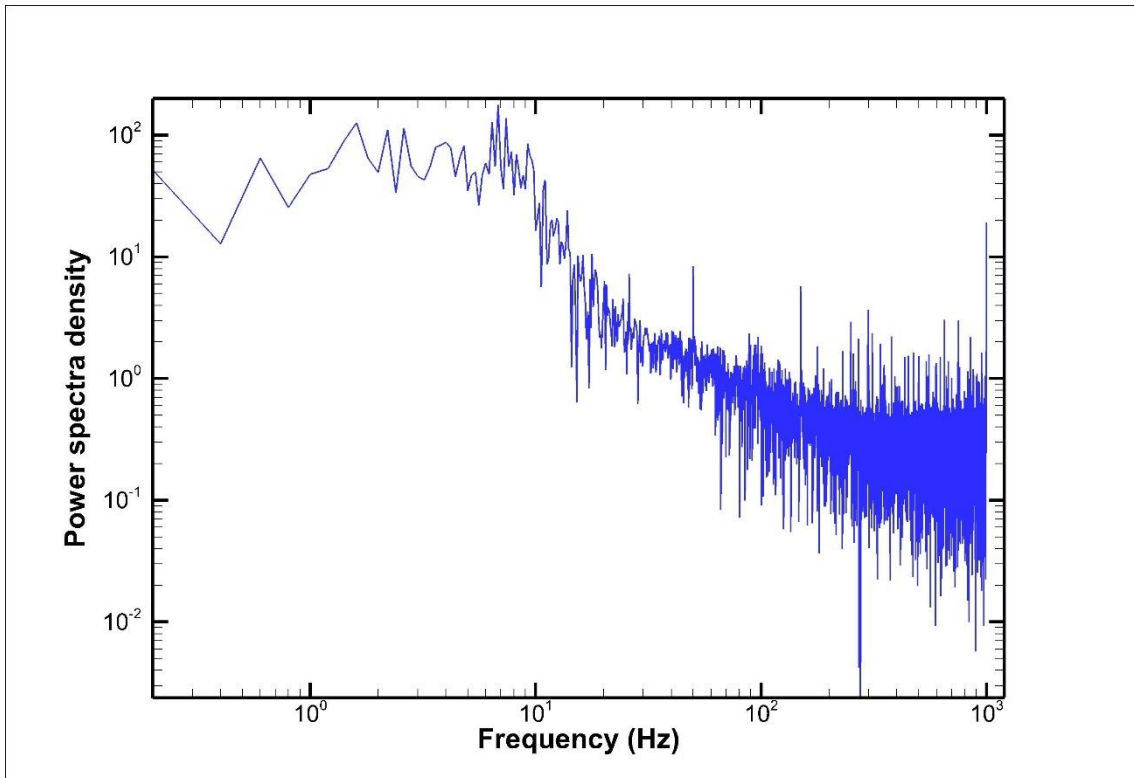
Σχήμα 5-9 Μετρήσεις ταχύτητας single wire στην έξοδο του ακροφυσίου σε αριθμό $Re=20.000$



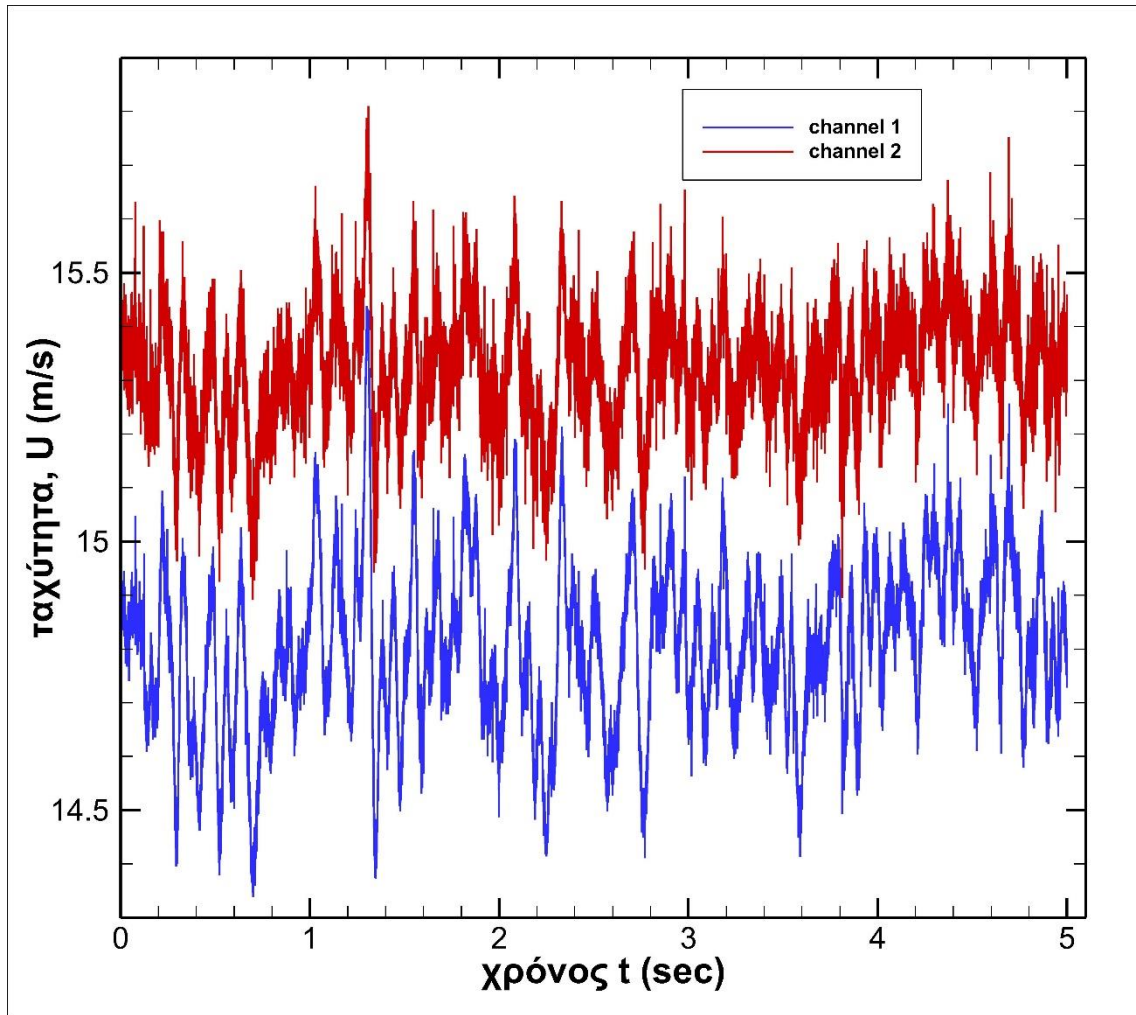
Σχήμα 5-10 Μετρήσεις τάσης single wire στην έξοδο του ακροφυσίου σε αριθμό $Re=20.000$



Σχήμα 5-11 Διάγραμμα ταχύτητας-τάσεων για single wire στην έξοδο του ακροφυσίου για $Re=20000$



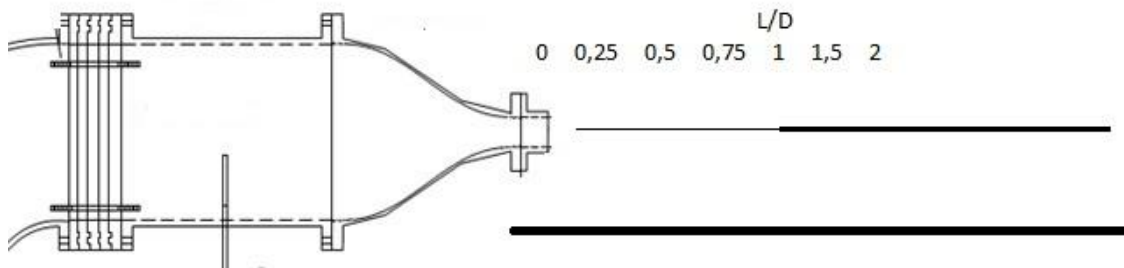
Σχήμα 5-12 Διάγραμμα FFT για μετρήσεις ταχύτητας στην έξοδο του ακροφυσίου για $Re=20000$



Σχήμα 5-13 Παράδειγμα διαγράμματος μετρήσεων ταχύτητας two-wire CTA στην έξοδο του συγκλίνοντος ακροφυσίου σε $Re=50000$

6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στόχος αυτού του κεφαλαίου είναι η επεξεργασία και η ερμηνεία των μετρήσεων του κεφαλαίου 5 για να ταυτοποιήσουμε το είδος της ροής, τα ποσοστά της τύρβης και τις διακυμάνσεις στη ροή με βάση τον αριθμό Reynolds, την απόσταση L/D από την έξοδο του ακροφυσίου.



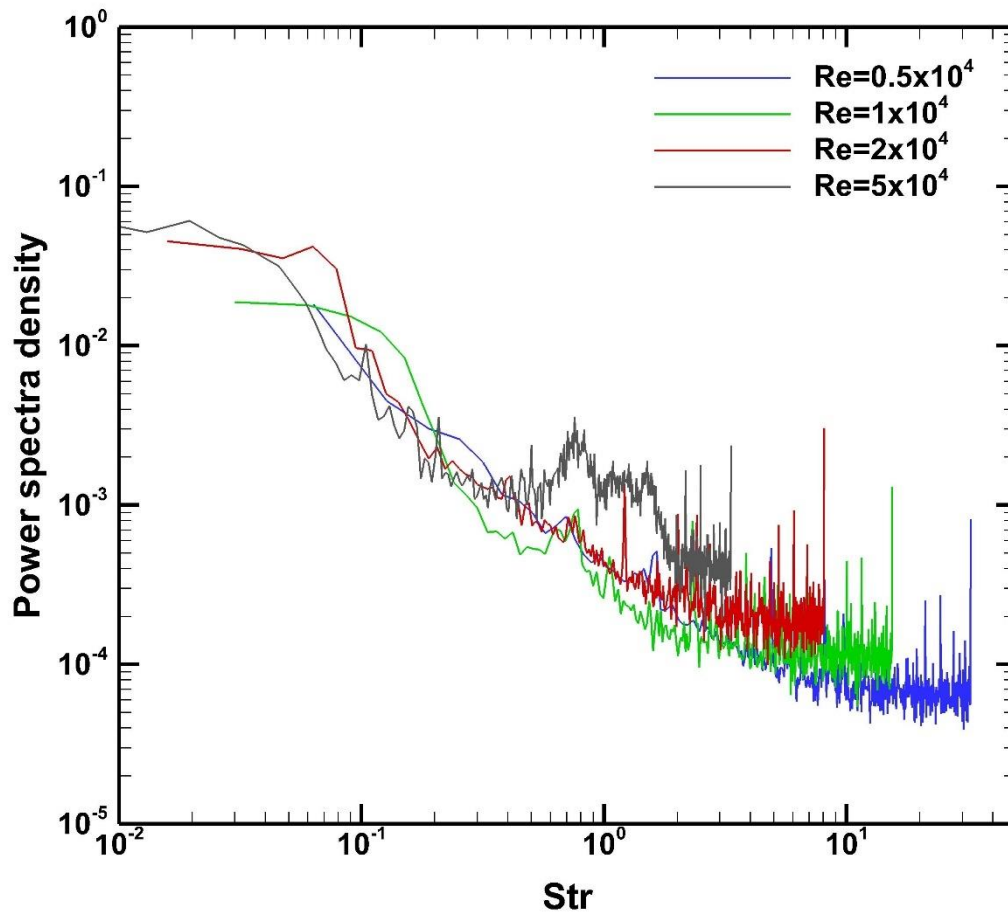
Σχήμα 6-1 Απεικόνιση μετρήσεων ροής με το θερμικό ανεμόμετρο σε διάφορες αποστάσεις L/D στη ροή συγκλίνοντος ακροφυσίου

6.1 Διαγράμματα average window FFT-αριθμό Strouhal για ροή του συγκλίνοντος ακροφυσίου σε 4 αριθμούς Reynolds

Για την καλύτερη απεικόνιση των αποτελεσμάτων, με χρήση φόρμουλας στο MATLAB υπολογίζεται το average window FFT των 4 σημάτων που λαμβάνονται από το ανεμόμετρο και τον αριθμό Strouhal για κάθε συχνότητα

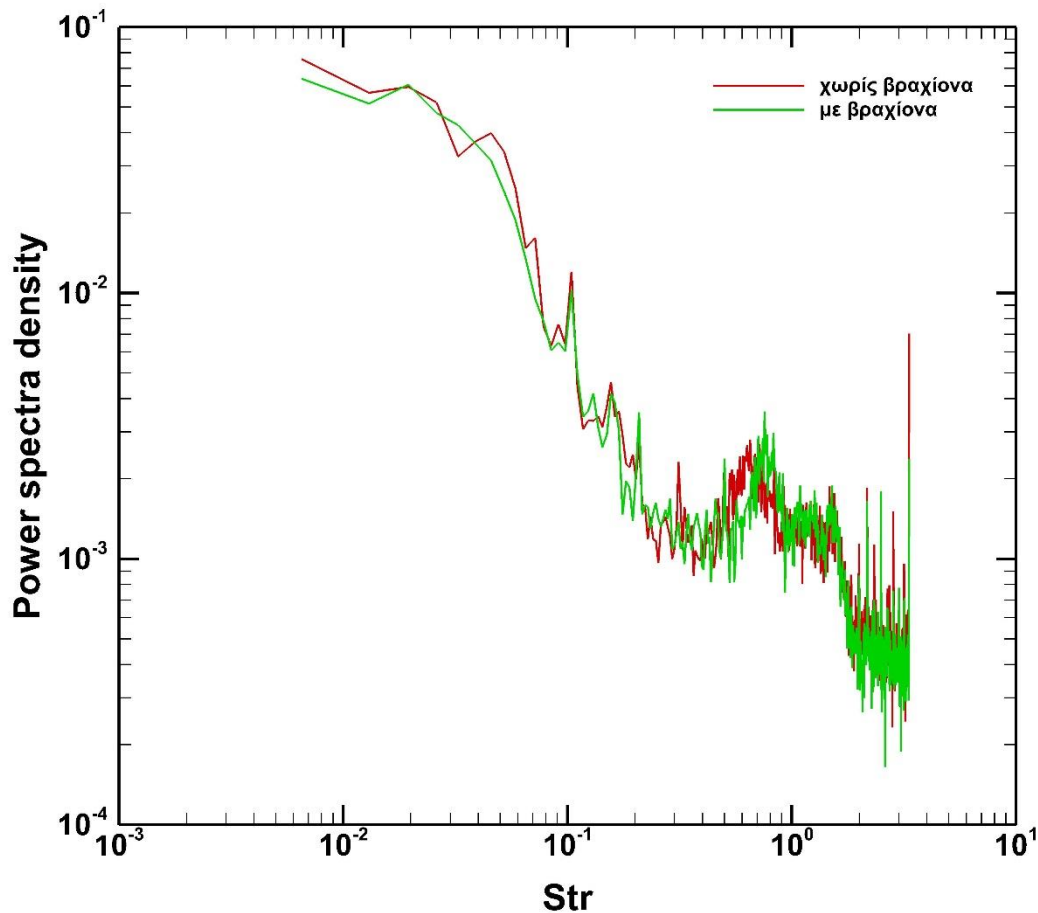
$$Str = \frac{f * L}{U} \quad (6-1)$$

Όπου f η συχνότητα (Hz) L=D=0,05m το χαρακτηριστικό μέγεθος της ροής δηλαδή η διάμετρος του συγκλίνοντος ακροφυσίου και U η μέση ταχύτητα σε κάθε χρονοσειρά μετρήσεων



Σχήμα 6-2 Average window FFT-Αριθμός Strouhal

Παρακάτω δίνεται ένα συγκριτικό διάγραμμα average window FFT-Strouhal Number για ίδιο αριθμό Reynolds $Re=50000$ όπου η μία χρονοσειρά λήφθηκε με τη βοήθεια του βραχίονα μπροστά από την έξοδο και η δεύτερη με τη χρήση του traversing (χωρίς το βραχίονα)



Σχήμα 6-3 Διάγραμμα Power/N-Strouhal number για λήψη μετρήσεων σε «ελεύθερο» χώρο και με τη χρήση του βραχίονα διαστάσεων

6.2 Διαγράμματα average FFT-Strouhal number για αριθμούς $Re=20000$ $Re=50000$ και $Re=50000$ με τη χρήση συχνότητας αποκοπής ($f=380\text{Hz}$)

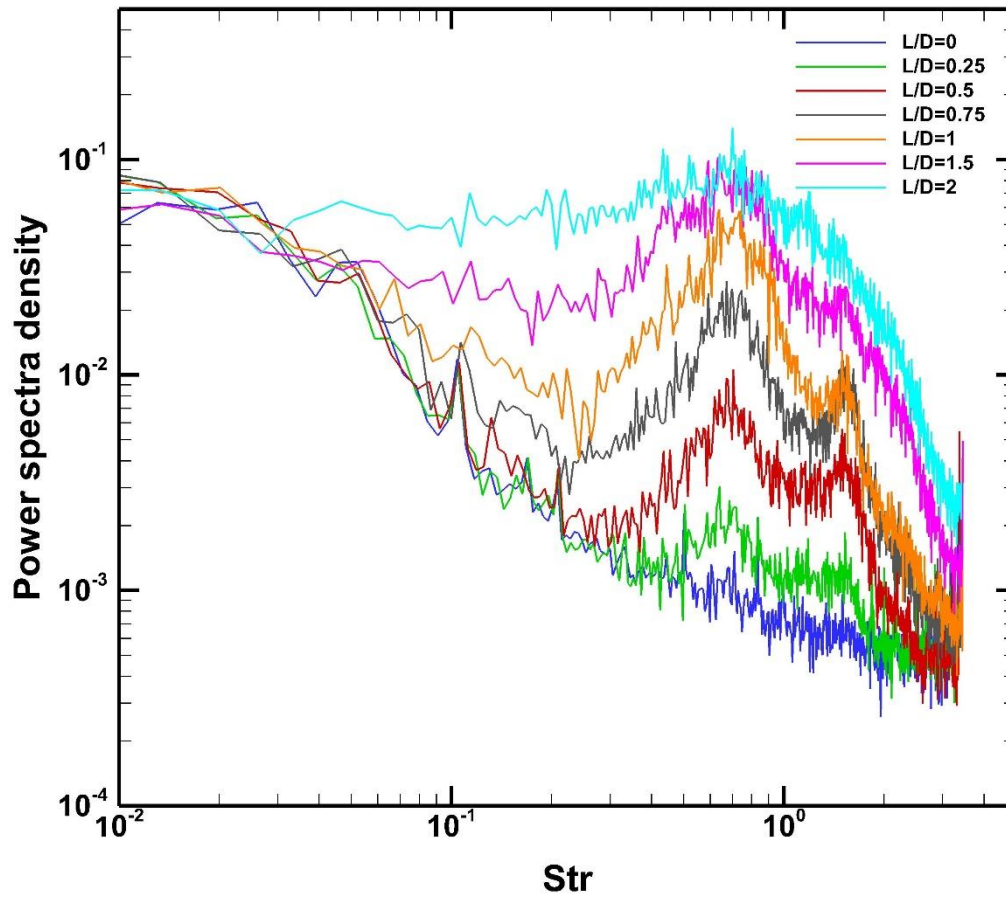
Θέτοντας σε λειτουργία το κινητήρα και τη μονάδα θερμικής ανεμομετρίας, γίνεται στη συνέχεια λήψη μετρήσεων τάσης με τη χρήση του αισθητήρα θερμού νήματος. Με τη χρήση του λογισμικού και της βαθμονόμησης της σχέσεως τάσης-ταχύτητας λαμβάνονται μετρήσεις ταχύτητας στην έξοδο του συγκλίνοντος ακροφυσίου, σε διαφορετικές αποστάσεις L/D από την έξοδο του με τη χρήση ενός traversing. Για καλύτερη απεικόνιση των αποτελεσμάτων γίνεται λήψη μετρήσεων στο potential core του ακροφυσίου μέχρι τιμές $L/D=2$. Όπως παρατηρείται και στη συνέχεια, όσο απομακρυνόμαστε από την

ανάπτυξη της ροής, τόσο αυξάνεται η ένταση της τύρβης όπου έχουμε και μεγαλύτερες διακυμάνσεις ταχύτητας. Επίσης, για να αυξήσουμε την ευχέρεια των αποτελεσμάτων, μετατρέπουμε τις χρονοσειρές ταχύτητας με τη χρήση FFT (fast fourier transform) και τη χρήση μέσου όρου μεσοδιαστήματος αυτών (averaged window). Τα τελικά διαγράμματα που παρουσιάζονται είναι διαγράμματα spectra προς αριθμούς Strouhal για την καλύτερη κατανόηση των φαινομένων.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά και τα διαγράμματα μετρήσεων σε αριθμούς Reynolds 20000 και 50000 όπου κρίνεται πως γίνεται ανάπτυξη της τυρβώδους ροής

Πίνακας 6-1 Χαρακτηριστικά της ροής συγκλίνοντος ακροφυσίου για $Re=50000$ σε διάφορες θέσεις του αισθητήρα από την έξοδο του

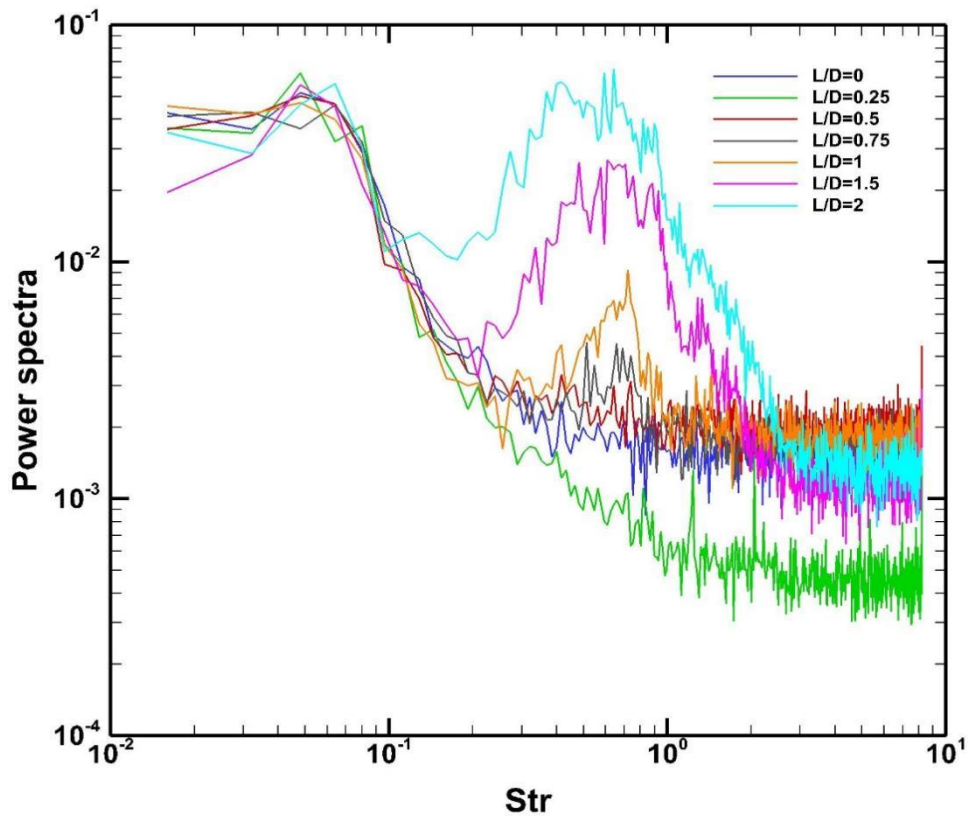
Re=50000				
L/D	Umean (m/s)	s ²	s	Turbulent Intensity (%)
0	15.0004	0.0129	0.1138	0.7584
0.25	14.9475	0.0201	0.1417	0.9477
0.5	14.8268	0.0226	0.1503	1.0140
0.75	14.6637	0.0388	0.1969	1.3426
1	14.5032	0.0950	0.3081	2.1247
1.5	14.4931	0.2918	0.5402	3.7275
2	14.6424	0.6548	0.8092	5.5263



Σχήμα 6-4 Συγκριτικό διάγραμμα Power spectra-Strouhal Number σε $Re=50000$ για διαφορετικές τιμές L/D

Πίνακας 6-2 Χαρακτηριστικά της ροής συγκλίνοντος ακροφυσίου για $Re=20000$ σε διάφορες θέσεις του αισθητήρα από την έξοδο του

Re=20000				
L/D	U _{mean} (m/s)	s ²	s	Turbulent Intensity (%)
0	5.9320	0.0071	0.0843	1.4212
0.25	5.9069	0.0068	0.0827	1.4015
0.5	5.8761	0.0074	0.0862	1.4683
0.75	5.8675	0.0064	0.0801	1.3659
1	5.8371	0.0075	0.0871	1.4933
1.5	5.7747	0.0153	0.1239	2.1469
2	5.7768	0.0566	0.2380	4.1203

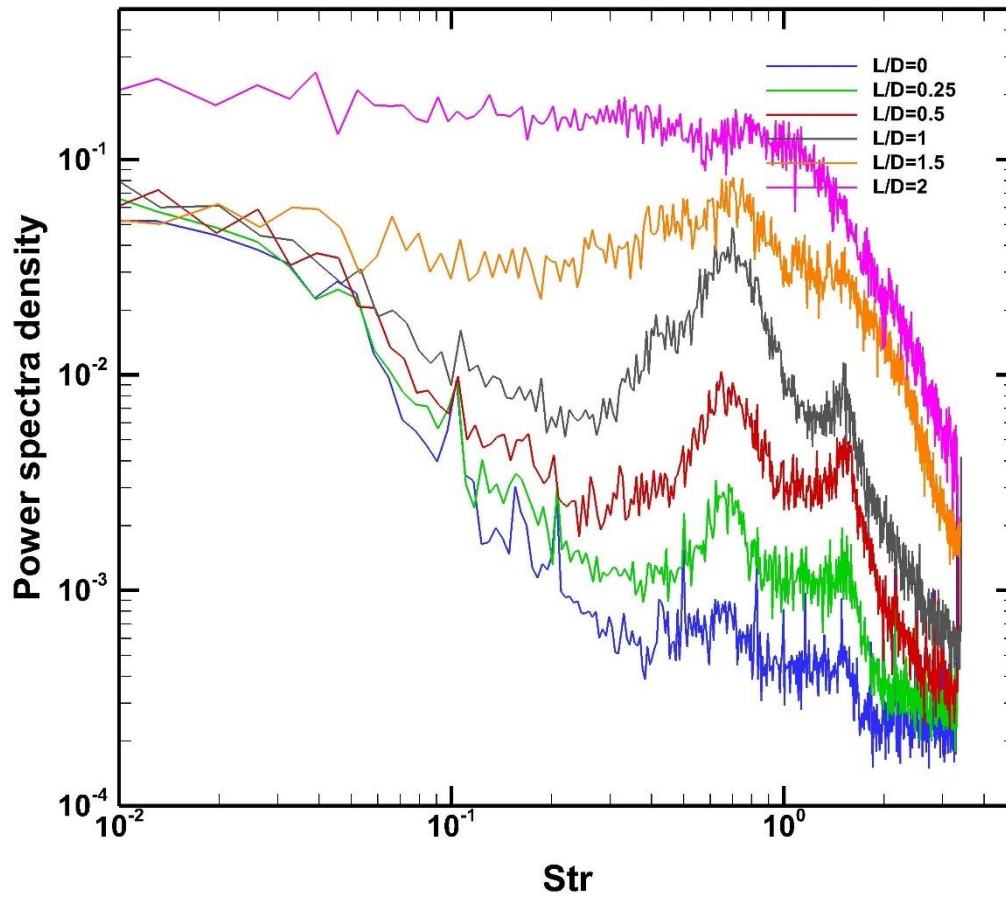


Σχήμα 6-5 Συγκριτικό διάγραμμα Power spectra-Strouhal Number σε $Re=20000$ για διαφορετικές τιμές L/D

Για να κατανοήσουμε πλήρως την ροή και την λειτουργικότητα του ανεμομέτρου έγινε εκ νέου λήψη μετρήσεων για $Re=50000$ με τη χρήση συχνότητας αποκοπής ώστε να περιορίσουμε εξωτερικές συχνότητες που διαβάλλουν το σήμα κατά τη λήψη των δεδομένων.

Πίνακας 6-3 Χαρακτηριστικά της ροής συγκλίνοντος ακροφυσίου για $Re=50000$ σε διάφορες θέσεις του αισθητήρα από την έξοδο του

Re=50000				
L/D	Umean (m/s)	s ²	s	Turbulent Intensity (%)
0	15.0765	0.0087	0.0934	0.6201
0.25	15.0041	0.0144	0.1201	0.8001
0.5	14.9131	0.0184	0.1356	0.9095
1	14.6605	0.0704	0.2654	1.8108
1.5	14.7123	0.3025	0.5501	3.7389
2	14.9953	2.8713	1.6945	11.3001



Σχήμα 6-6 Συγκριτικό διάγραμμα Power spectra-Strouhal Number σε $Re=50000$ με τη χρήση συχνότητας αποκοπής για διαφορετικές τιμές L/D

7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτή τη διπλωματική έγινε μελέτη της λειτουργίας μιας πειραματικής διάταξης συγκλίνοντος ακροφυσίου και μελέτη της ροής σε αυτό με τη λήψη μετρήσεων ταχύτητας με θερμική ανεμομετρία σταθερής θερμοκρασίας (CTA).

Στο κεφάλαιο 4 έγινε παρουσίαση των χαρακτηριστικών της πειραματικής διάταξης του ακροφυσίου και δημιουργία προφίλ ταχυτήτων με βάση την συχνότητα περιστροφής του κινητήρα με τη χρήση σωλήνα pitot και μανομέτρου. Παρατηρείται πως σε μέγιστη ισχύ, οι ταχύτητες που αναπτύσσονται στην έξοδο του συγκλίνοντος ακροφυσίου φτάνουν τα 25 m/s .

Στο κεφάλαιο 5 έγινε λήψη μετρήσεων ταχύτητας με τη χρήση του ανεμομέτρου θερμικού νήματος σε λειτουργία σταθερής θερμοκρασίας. Στη συνέχεια, προέκυψε διαστασιολόγηση του συγκλίνοντος ακροφυσίου με βάση την συχνότητα περιστροφής του κινητήρα σε σχέση με τον αριθμό Reynolds της ροής. Μελετήθηκε περαιτέρω η ταχύτητα σε 4 φάσεις της ροής σε 4 αριθμούς Reynolds(5000, 10000, 20000 , 50000) όπου χαρακτηρίστηκαν ως στρωτή, μεταβατική, τυρβώδης και υψηλή τυρβώδη. Με τη χρήση του μετασχηματισμού Fourier για την αναγνώριση των συχνοτήτων του σήματος και τη χρήση του αριθμού Strouhal για την έκφραση της στροβιλότητας της ροής, προέκυψε το σχήμα 5.10 όπου γίνεται σύγκριση των 4 σημάτων στην έξοδο του ακροφυσίου. Για αριθμό Strouhal 0,3 και για τους 4 αριθμούς Reynolds παρατηρείται η αρχή των διαταραχών στις συχνότητες όσο αυξάνεται ο αριθμός Strouhal.

Στο κεφάλαιο 6, ερευνάται πιο αναλυτικά η ανάπτυξη της ροής στο ακροφύσιο στις 2 τιμές Reynolds όπου έχει αναπτυχθεί τυρβώδη ροή. Γίνεται λήψη μετρήσεων ταχύτητας με τη χρήση συστήματος traversing για διάφορες τιμές L/D για την μελέτη της ροής μακριά από την έξοδο. Παρατηρείται πως για Re=5000 αυξάνεται πιο γρήγορα η ένταση της τύρβης όσο απομακρυνόμαστε από τη πηγή. Χαρακτηριστικά για Re=50000, συμπεραίνεται πως η ένταση της τύρβης αυξάνεται καθώς μεγαλώνει η απόσταση από την έξοδο του ακροφυσίου και συγκεκριμένα, η ροή εκτός του πυρήνα του συγκλίνοντος ακροφυσίου (L/D=0,75) παρουσιάζει αύξηση της τύρβης. Για L/D= 0,75

προκύπτει $T.I = 1,34\%$ και σε $L/D=1$ $2,12\%$ αύξηση κατά 60% . Ομοίως για $L/D=0,75$ και $L/D= 1,5$ παρατηρείται αύξηση της τύρβης κατά 177% , και για $L/D=2$ παρατηρείται τετραπλασιασμός της τύρβης σε σχέση με τη θέση της πλήρης ανάμιξης της ροής. Επίσης, σημειώνεται πως με την αύξηση της απόστασης L/D από την έξοδο του ακροφυσίου αυξάνεται η τύρβη και παράλληλα αυξάνεται η μεταβλητότητα και τα «peaks» των συχνοτήτων.

Επίσης, γίνεται σύγκριση των δεδομένων για $Re=50000$ με τη λήψη νέας σειράς ταχυτήτων με τη χρήση cut off frequency για τον εντοπισμό της δεύτερης συχνότητας που παρατηρείται στα διαγράμματα Power Spectra Density-Str και την πιθανή εξάλειψη της, καθώς η ύπαρξη της υποδεικνύει την παρεμβολή εξωτερικού παράγοντα στην λήψη των δεδομένων με το ανεμόμετρο (ήχος, ιδιοθόρυβος, βλάβη αισθητήρα κτλ) .

Για την καλύτερη κατανόηση της ροής του συγκλίνοντος ακροφυσίου, προτείνεται η μελέτη της ροής με τη χρήση PIV για την καλύτερη απεικόνισή της και ανάλυση της με τη χρήση CFD.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Armstrong, R. R., et al. (1977). "Coherent Structures in Jet Turbulence and Noise." AIAA Journal **15**(7): 1011-1017.

Browand, F. K. and C. D. Winant (1974). "Vortex pairing : the mechanism of turbulent mixing-layer growth at moderate Reynolds number." Journal of Fluid Mechanics **63**(2): 237-255.

Brown, G. L. and A. Roshko (1974). "On density effects and large structure in turbulent mixing layers." Journal of Fluid Mechanics **64**(4): 775-816.

Bruun, H. H. (1996). "Hot-wire anemometry: principles and signal analysis." Measurement Science and Technology **7**(10): 024.

Capp, S. P., et al. (1994). "Velocity measurements in a high-Reynolds-number, momentum-conserving, axisymmetric, turbulent jet." Journal of Fluid Mechanics **258**: 31-75.

Champagne, F. H. and S. C. Crow (1971). "Orderly structure in jet turbulence." Journal of Fluid Mechanics **48**(3): 547-591.

Chan, W. T. and N. W. M. Ko (1978). "Coherent structures in the outer mixing region of annular jets." Journal of Fluid Mechanics **89**(3): 515-533.

Gharib, M. and D. Liepmann (1992). "The role of streamwise vorticity in the near-field entrainment of round jets." Journal of Fluid Mechanics **245**: 643-668.

Horn, G. and M. W. Thring (1956). "Angle of Spread of Free Jets." Nature **178**(4526): 205-206.

Pope, S. B. (2000). Turbulent Flows, Cambridge University Press.

Popiel, C. O. and O. Trass (1991). "Visualization of a free and impinging round jet." Experimental Thermal and Fluid Science **4**(3): 253-264.

Tollmien, W. (1926). "Berechnung turbulenter Ausbreitungsvorgänge." ZAMM - Journal of Applied Mathematics and Mechanics / Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik **6**(6): 468-478.

Violato, D. and F. Scarano (2011). "Three-dimensional evolution of flow structures in transitional circular and chevron jets." Physics of Fluids **23**(12).

Yule, A. J. (1978). "Large-scale structure in the mixing layer of a round jet." Journal of Fluid Mechanics **89**(3): 413-432.

Εγχειρίδιο (χρήσης). Anemometer A.A. LAB SYSTEMS MODEL 1005 User's Guide.

ΠΡΟΣΑΡΤΗΜΑΤΑ

Εντολές σε MATLAB για την λήψη Fournier function transform με τη χρήση μέσου όρου μεσοδιαστήματος

```
%function fastfourier_window_aver_function(filename, win_size)
% Read time series data file with two rows
data = load('50000.dat');
time = data(:,1);
values = data(:,2);

% Compute time differences between adjacent samples
dt = diff(time);

% Determine minimum time step
min_dt = min(dt(dt>0));

% Compute half time step for interpolated data
half_dt = 1* min_dt;

% Define new time step
new_time_step = half_dt;

% Define new time vector with smaller time step
new_time = time(1):new_time_step:time(end);

% Interpolate values using new time vector
new_values = interp1(time, values, new_time);

% Write interpolated data to new file
fid = fopen('interpolated_data_aver_maxCo20_Ux.dat', 'w');
fprintf(fid, '%8s %8s\n', 'Time', 'Values');
fprintf(fid, '%8.4f %8.4f\n', [new_time; new_values]);
fclose(fid);

%Window Size
win_size = 1024;

% Compute number of windows
N = floor(length(new_values)/ win_size);

% Initialize array for FFT results
P1_sum = zeros(1, win_size/2+1);

% Loop over windows
for i = 1:N
    % Get current window
    window = new_values((i-1)*win_size+1 : i*win_size);

    % Perform FFT on window
    Y = fft(window);
    P2 = abs(Y/win_size);
    P1 = P2(1:win_size/2+1);
    P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);
```

```

        % Add FFT results to running sum
        P1_sum = P1_sum + P1;
    end

    % Compute average FFT result
    P1_avg = P1_sum / N;

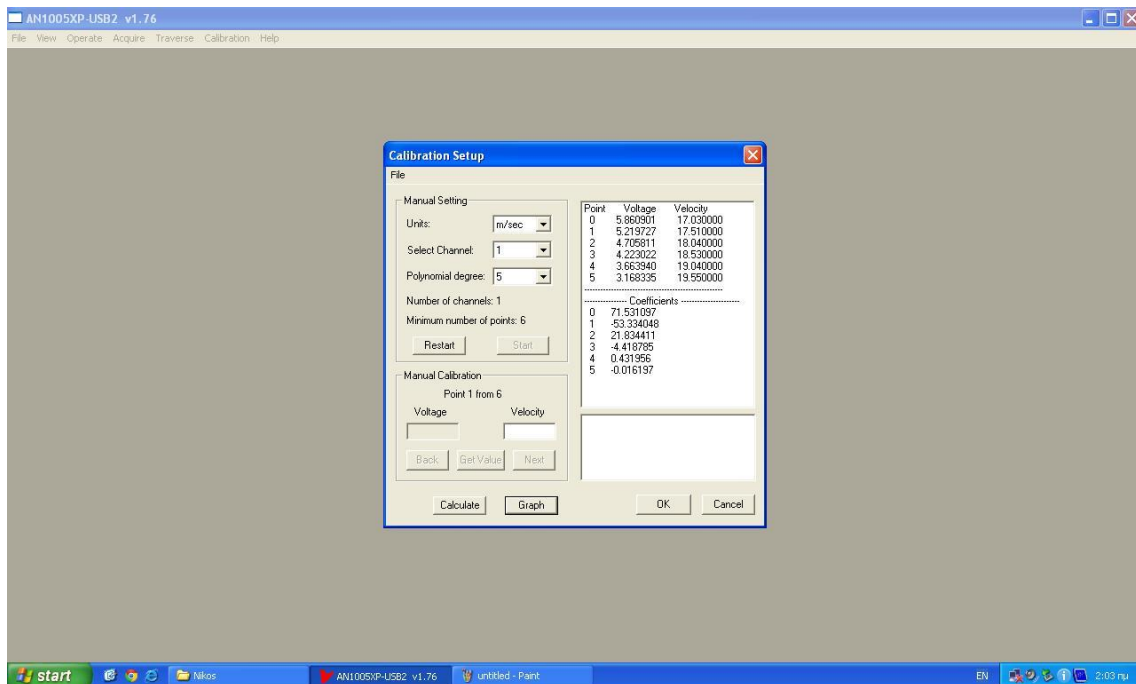
    % Compute frequency axis
    Fs = 1/new_time_step;
    f = Fs*(0:(win_size/2))/win_size;

    % Write FFT data to new file
    fid = fopen('fft_data_aver_maxCo20_Ux.dat', 'w');
    fprintf(fid, '%10s %10s\n', 'Frequency', 'Amplitude');
    fprintf(fid, '%10.4f %10.8f\n', [f; P1_avg]);
    fclose(fid);

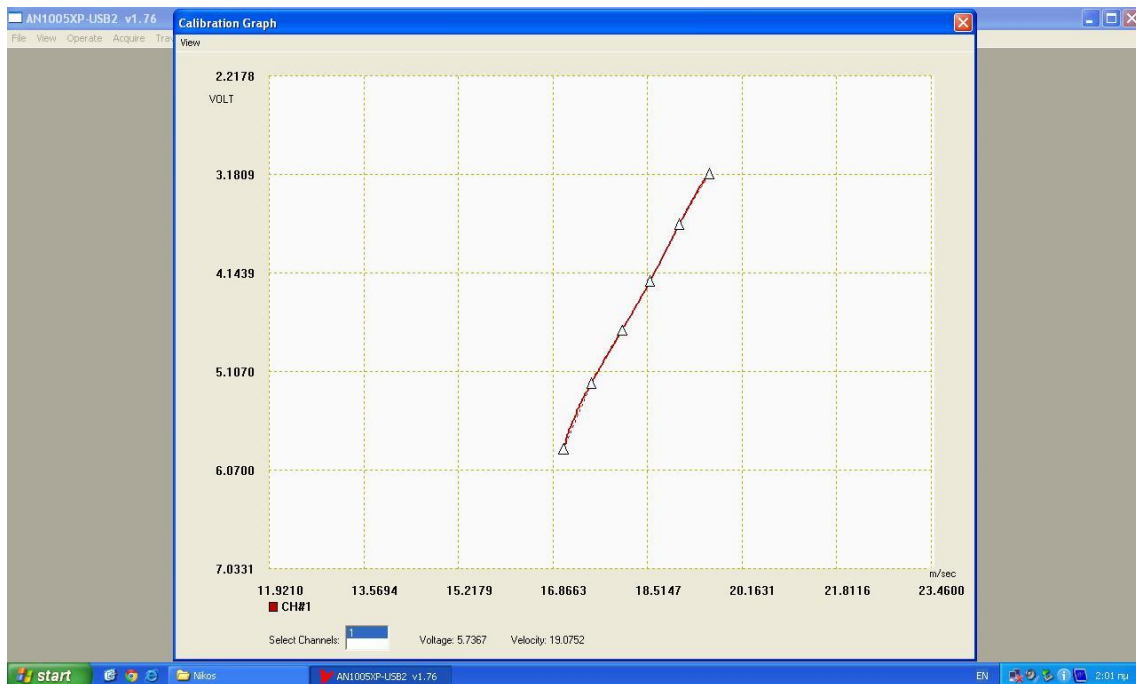
    % Plot original and interpolated data
    figure;
    subplot(2,1,1);
    plot(time, values, 'o', new_time, new_values, '-');
    legend('Original Data', 'Interpolated Data');
    xlabel('Time');
    ylabel('Values');

    % Plot FFT result
    subplot(2,1,2);
    loglog(f, P1_avg);
    xlabel('Frequency (Hz)');
    ylabel('Power/N');
    title(['FFT (averaged over ' num2str(N) ' windows)']);
    %end

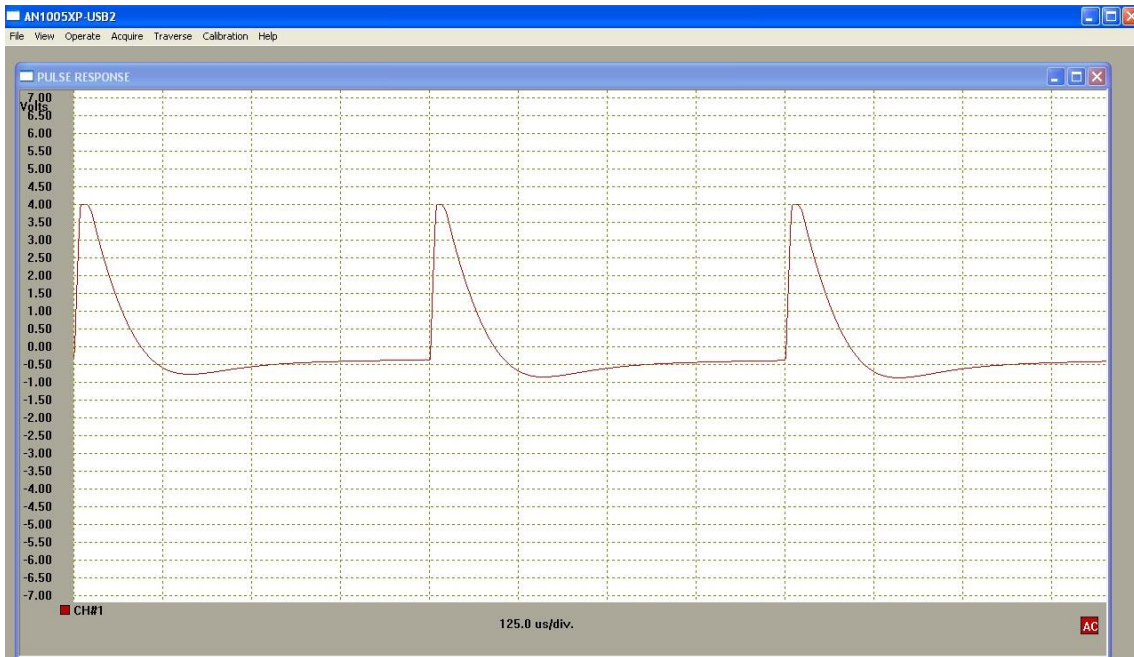
```



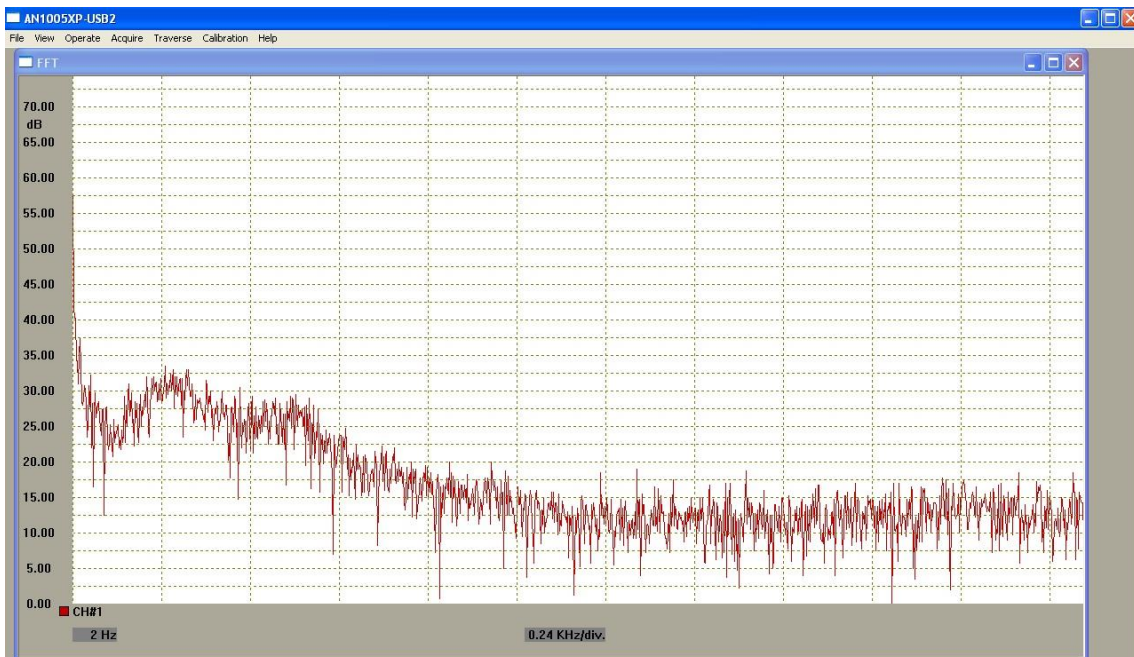
Σχήμα 1. Υπολογισμός βαθμονόμησης με τη χρήση του λογισμικού του ανεμομέτρου



Σχήμα 2. Καμπύλη βαθμονόμησης όπως προκύπτει από το λογισμικό



Σχήμα 3. Καμπύλη απόκρισης παλμού μέσω του λογισμικού



Σχήμα 4. Γραμμική σειρά FFT του σήματος μέσω του λογισμικού