

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ



ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΝΑΥΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΝΙΚΟΛΑΟΥ ΑΝΤΩΝΙΟΣ

**ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΡΟΗΣ ΜΕ HOT - WIRE ΓΙΑ
ΛΕΠΤΟΜΕΡΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΠΕΔΙΟΥ ΠΑΡΟΧΗΣ ΑΕΡΑ
ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ DIESEL**

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Ν.Π. ΚΥΡΤΑΤΟΣ

ΑΘΗΝΑ, ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2015

Ευχαριστίες

Από τη θέση αυτή αισθάνομαι το χρέος και την επιθυμία να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα κ. Ν. Κυρτάτο, Καθηγητή του τμήματος Ναυπηγών Μ.Μ. Ε.Μ.Π., για την ευκαιρία που μου έδωσε να πραγματοποιήσω την παρούσα διπλωματική εργασία. Επίσης θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον υποψήφιο διδάκτορα Ν. Βρεττάκο για τη βοήθεια και την καθοδήγησή του. Ιδιαίτερες ευχαριστές στον Δρ. Ν. Αλεξανδράκη, οι συμβουλές και οι κατευθύνσεις του οποίου υπήρξαν πολύτιμες για την ολοκλήρωση της εργασίας, όπως και στο τεχνικό προσωπικό του ΕΝΜ για τη συνεργασία.

Περίληψη

Τα μετρητικά τύπου Hot-Wire έχουν ευρεία εφαρμογή στις μετρήσεις τυρβώδους ροής των αερίων, καθώς η χρήση τους δίνει πληθώρα πληροφοριών, εξαιρετικής πειραματικής ακρίβειας. Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζονται οι βασικές αρχές λειτουργίας τους και βάσει αυτών τα μετρητικά βαθμονομούνται σε κατάλληλη διάταξη. Πραγματοποιείται λεπτομερής υπολογισμός πεδίου παροχής αέρα τόσο στην πρότυπη διάταξη δοκιμών αέρα του ENM, όσο και στο πεδίο παροχής αέρα κινητήρα Diesel. Επιπλέον με χρήση του Hot-Wire και ανάλυση των μετρήσεων στο πεδίο των συχνοτήτων, υπολογίζεται η συχνότητα στάσιμου ακουστικού κύματος που δημιουργείται σε αγωγό με οπή όταν αυτός διαρρέεται από αέρα, καθώς και η συχνότητα περιστροφής της φτερωτής συμβατικού ανεμιστήρα. Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων εξακριβώνεται μέσω σύγκρισης με πρότυπες μεθόδους, στα πλαίσια του ελέγχου της ορθής χρήσης και λειτουργίας των διαθέσιμων μετρητικών.

Πίνακας περιεχομένων

Λίστα συμβόλων.....	6
Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή	8
1.1 Εισαγωγή και ανασκόπηση της βιβλιογραφίας.....	8
1.2 Σκοπός εργασίας	8
1.3 Δομή της διπλωματικής εργασίας.....	9
1.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της ανεμομετρίας θερμού νήματος	10
Κεφάλαιο 2 Μετρητικά Ταχύτητας Ροής Τύπου Hot-Wire	12
2.1 Ανεμόμετρα θερμού νήματος και θερμού φιλμ.....	12
2.1.1 Υλικά Κατασκευής και συνήθης διαστάσεις	12
2.2 Βασικές Αρχές Ανεμομετρίας Θερμού Νήματος.....	13
2.2.1 Μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία	13
2.2.2 HWA και μεταφοράς θερμότητας.....	13
2.2.3 Προσέγγιση με βάση τη ροή	15
2.2.4 Βαθμονόμηση μετρητικών HWA, γενικευμένος νόμος του King.....	15
Κεφάλαιο 3 Εξοπλισμός ENM, Βαθμονόμηση HWA.....	18
3.1 Εξοπλισμός HWA και διάταξη δοκιμών αέρα ENM	18
3.1.1 Συνδεσμολογία CTA.....	18
3.1.2 MiniCTA 54T42	18
3.1.3 Αισθητήρες.....	19
3.1.4 Probe Support.....	20
3.1.5 Διάταξη δοκιμών αέρα	20
3.2 Μέτρηση ταχυτήτων αναφοράς (reference velocities)	21
3.2.1 Σωλήνας Prandtl.....	21
3.3 Βαθμονόμηση μετρητικών HWA.....	23
3.3.1 Διαδικασία Βαθμονόμησης.....	23
3.3.2 Καμπύλες Βαθμονόμησης.....	25
3.3.3 Βαθμονόμηση θερμού νήματος.....	25
3.3.4 Βαθμονόμηση θερμού φιλμ.....	27
3.3.5 Σχολιασμός αποτελεσμάτων.....	29
Κεφάλαιο 4 Μετρήσεις στο Πεδίο του Χρόνου	31
4.1 HWA στη διάταξη δοκιμών παροχής αέρα του ENM.....	31
4.1.1 Εισαγωγή	31
4.1.2 Αναλυτική μέτρηση ροής, προφίλ ταχύτητας.....	33

4.1.3 Υπολογισμός Ογκομετρικής Παροχής	38
4.1.4 Προφίλ ταχύτητας και ογκομετρική παροχή με το διάφραγμα στο ροή.....	40
4.2 Μετρήσεις στην εισαγωγή αέρα κινητήρα	43
4.2.1 Ηλεκτροπαραγωγό Ζεύγος (H/Z).....	43
4.2.2 Υπολογισμός προφίλ ταχύτητας αέρα στην εισαγωγή του H/Z.....	44
4.2.3 Σχεδιασμός συγκλίνοντος αγωγού εισαγωγής αέρα (Bellmouth), επανυπολογισμός των προφίλ ταχύτητας	47
Κεφάλαιο 5 Μετρήσεις στο Πεδίο των Συχνότητων	51
5.1 Επεξεργασία σήματος HWA στο πεδίο των συχνοτήτων.....	51
5.1.1 Στοιχεία ανάλυσης Fourier.....	51
5.1.2 Δειγματοληψία HWA, παραθυροποίηση.....	52
5.2 Μετρήσεις ροής αέρα συμβατικού ανεμιστήρα.....	53
5.2.1 Χαρακτηριστικά ανεμιστήρα.....	53
5.2.2 Ανάλυση παροχής αέρα ανεμιστήρα στο πεδίο των συχνοτήτων.....	53
5.3 Στάσιμο κύμα.....	59
5.3.1 Υπέρθυση κυμάτων, στάσιμα κύματα αέρα	59
5.3.2 Στάσιμα κύματα σε στήλες αέρα	60
5.3.3 Μέτρηση συχνότητας στάσιμου ακουστικού κύματος.....	61
Συμπεράσματα. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	65
Βιβλιογραφία	66
Παράρτημα Α	68
A.1 Χαρακτηριστικά μετρητικά όργανα ροών.....	68
A.2 Εφαρμογές της ανεμομετρίας θερμού νήματος.....	69
A.3 Στοιχεία Μηχανικής των Ρευστών	71
A.4 Ροή αέρα σε σωληνώσεις	74
A.5 Βασικές αρχές μεταφοράς θερμότητας.....	79
Παράρτημα Β	80
B.1 Ανεμόμετρο θερμού νήματος και θερμού φίλμ	80
B.2 Συντελεστής υπερθέρμανσης	82
B.3 Ηλεκτρικές διατάξεις ανεμομετρίας θερμού νήματος	82
B.4 Διαδικασία λήψης ταχύτητας με ανεμομετρία νήματος σταθερής θερμοκρασίας.....	86
Παράρτημα Γ	88
Γ.1 Χαρακτηριστικά MiniCTA 54T42.....	88
Γ.2 Χαρακτηριστικά ηλεκτροκινητήρα	88

Γ.3 Απόκριση κατεύθυνσης HWA.....	89
Γ.4 Αλγόριθμος σε προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab.....	89
Γ.5 Αλγόριθμος υπολογισμού παροχής ENM.....	92
Γ.6 Σχέδιο Bellmouth	93
Γ.7 Υπολογισμός θεμελιώδους συχνότητας Helmholtz σωλήνα δοκιμών αέρα ENM.....	95
Παράρτημα Δ	96
Δ.1 Μετρήσεις ταχύτητας με σωλήνα Prandtl	96
Δ.2 Βαθμονόμηση θερμού νήματος.....	98
Δ.3 Βαθμονόμηση θερμού φιλμ	100
Παράρτημα Ε.....	102
Ε.1 Μετρήσεις ταχύτητας αέρα στην πρότυπη διάταξη δοκιμών	102
Ε.2 Μετρήσεις στην εισαγωγή κινητήρα.....	108

Λίστα συμβόλων

Αγγλικοί χαρακτήρες

A:	επιφάνεια διατομής
c:	ειδική θερμοχωρητικότητα
D:	διάμετρος
E:	ηλεκτρική τάση στο νήμα
f:	συχνότητα
h:	συντελεστής συναγωγής
I:	ένταση ηλεκτρικού ρεύματος
k:	κυματαριθμός
L:	μήκος αγωγού
L_e :	μήκος ανάπτυξης της ροής
M:	αριθμός Mach
Nu:	αριθμός Nusselt
m:	μάζα
n_{ov} :	ονομαστικές στροφές λειτουργίας
P:	πίεση
P_s :	στατική πίεση
Pr:	αριθμός Prandtl
Q_c :	θερμότητα αγωγής
Q_e :	ηλεκτρική ισχύς
Q_f :	θερμότητα συναγωγής
q_m :	μαζικός ρυθμός ροής
Q_r :	θερμότητα ακτινοβολίας
Q_s :	αποθηκευόμενη ενέργεια
q_v :	ογκομετρική παροχή
R:	παγκόσμια σταθερά των αερίων
r:	ακτινική απόσταση
Re:	αριθμός Reynolds
R_θ :	ηλεκτρική αντίσταση σε θεοκρασία θ
T:	θερμοκρασία σε βαθμούς Kelvin
V:	ηλεκτρική τάση
\bar{x} :	μέσος όρος μεγέθους x

Ελληνικοί χαρακτήρες

α :	συντελεστής υπερθέρμανσης
α_x :	θερμικός συντελεστής αντίστασης σε θερμοκρασία x
ΔP	διαφορά πίεσης
θ :	θερμοκρασία σε °C
λ :	μήκος κύματος
μ :	συντελεστής ιξώδους
ν :	κινηματικό ιξώδες ρευστού
ρ :	πυκνότητα

σ: τυπική απόκλιση
υ: ταχύτητα
ω: κυκλική συχνότητα

Συντομογραφίες

CCA: Constant Current Anemometer
CTA: Constant Temperature Anemometer
CTHWA: Constant Temperature Hot Wire Anemometer
CVA: Constant Voltage Anemometer
DFT: Discrete Fourier Transform
FFT: Fast Fourier Transform
HWA: Hot Wire Anemometer/Anemometry
LDA: Laser Doppler Anemometer
PIV: Particle Image Velocimetry
ENM: Εργαστήριο Ναυτικής Μηχανολογίας

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Οι αισθητήρες μέτρησης ροής έχουν καταστεί τόσο συνηθισμένοι στη σύγχρονη κοινωνία, που η ύπαρξή τους συχνά θεωρείται δεδομένη. Αυτό δημιουργεί την απαίτηση, οι τεχνικοί και οι μηχανικοί να έχουν μια πρακτική γνώση για αυτά τα όργανα, ώστε να μπορούν να επιλέξουν το καταλληλότερο από ένα κατάλογο με αναλυτικές προδιαγραφές, καθώς και να βαθμονομούν τους αισθητήρες που ήδη υπάρχουν σε κάποιο τμήμα του εξοπλισμού που χρησιμοποιούν.

1.1 Εισαγωγή και ανασκόπηση της βιβλιογραφίας

Το ανεμόμετρο θερμού νήματος (Hot-Wire Anemometer) αποτελεί ένα πολύ διαδεδομένο όργανο μέτρησης στον τομέα της πειραματικής μηχανικής των ρευστών και οι εφαρμογές του εκτείνονται τόσο στη μελέτη υγρών (θερμό φιλμ) όσο και αερίων. Αποτελεί ένα αισθητήριο με δυνατότητες μετρήσεως πολύ υψηλής συχνότητας και μεγάλης ακρίβειας. Συμπεράσματα από τέτοιου είδους μετρήσεις συμβάλλουν στην πειραματική τεκμηρίωση και μελέτη των μοντέλων της τύρβης.

Η βασική αρχή λειτουργίας της ανεμομετρίας θερμού νήματος βασίζεται στην απαγωγή θερμότητας από ένα θερμό νήμα προς το ρευστό, εντός της ροής του οποίου τοποθετείται το μετρητικό. Το νήμα βρίσκεται σε υψηλότερη θερμοκρασία από το ρέον ρευστό, εκτός από περιπτώσεις που το ρευστό είναι πολύ υψηλής θερμοκρασίας. Οποιαδήποτε αλλαγή στη ροή, επηρεάζει άμεσα το ρυθμό μετάδοσης θερμότητας μεταξύ νήματος - ρευστού. Αυτή η αλλαγή, αντιστοιχεί σε μεταβολή των ηλεκτρικών μεγεθών λειτουργίας του οργάνου, μέσω των οποίων λαμβάνονται οι πληροφορίες σχετικές με τη ροή.

Ο Comte-Bellot [1] αναφέρει ότι η ακριβής προέλευση της ανεμομετρίας θερμού νήματος δεν μπορεί να καθοριστεί με ακρίβεια. Μια από τις πρώτες μελέτες μεταφοράς θερμότητας από θερμό νήμα έγινε από τον Boussinesq [2] το 1905. Τα αποτελέσματα των μελετών του διευρύνθηκαν από τον King [3] (1914), ο οποίος επικεντρώθηκε τόσο στην θεωρητική, όσο και στην πειραματική τεκμηρίωση της μεθόδου. Ορισμένες από τις εκτεταμένες μελέτες για τα σύγχρονα συστήματα ανεμομετρίας, τις δυνατότητες και τους περιορισμούς τους, περιγράφονται από τους Hinze 1975 [4], Perry 1982 [5], Lomas 1985 [6] και Bruun 1996 [7].

1.2 Σκοπός εργασίας

Αρχικός στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μέτρηση ταχυτήτων αέρα και συγκεκριμένα, του χαρακτηριστικότερου μεγέθους που προκύπτει από την ανεμομετρία θερμού νήματος, δηλαδή της σημειακής ταχύτητας ρευστού.

Μεγάλο τμήμα της πειραματικής διαδικασίας επικεντρώνεται σε μετρήσεις σημειακής ταχύτητας αέρα εντός σωληνώσεων, που ακολουθείται από τον λεπτομερή υπολογισμό του πεδίου παροχής αέρα της πρότυπης διάταξης δοκιμών του ENM καθώς και της εισαγωγής ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους. Ο λεπτομερής υπολογισμός των πεδίων παροχής αέρα περιλαμβάνει την δημιουργία προφίλ ταχυτήτων σε δυο διατομές, κάθετες μεταξύ τους, μέσω των οποίων προκύπτει η ογκομετρική παροχή. Επιπλέον στόχος είναι η πραγματοποίηση μετρήσεων μη μόνιμων ροών, όπως η μέτρηση της συχνότητας του πεδίου παροχής αέρα συμβατικού ανεμιστήρα, καθώς και της συχνότητας στάσιμου κύματος που δημιουργείται σε αγωγό με σπή, όταν διαρρέεται από αέρα.

Η επίτευξη των προαναφερθέντων στόχων προαπαιτεί: την κατανόηση των αρχών λειτουργίας των HWA, την βαθμονόμηση αυτών, πειραματικές μετρήσεις και επεξεργασία των δεδομένων και παράλληλα σύγκριση των αποτελεσμάτων με πρότυπες μεθόδους.

Το σύνολο των διαδικασιών αποσκοπεί στην εξακρίβωση της ομαλής λειτουργίας και της ορθής χρήσης του διαθέσιμου ανεμομέτρου, σε μετρήσεις μεταβατικών και μόνιμων φαινομένων. Στο πλαίσιο αυτό, τα αποτελέσματα συγκρίνονται με πρότυπες μεθόδους, όπου αυτό είναι εφικτό.

1.3 Δομή της διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα εργασία χωρίζεται σε δύο μέρη. Στα κεφάλαια 1 και 2 γίνεται μια εισαγωγική θεωρητική αναφορά στις έννοιες που θα μας απασχολήσουν, ενώ στα κεφάλαια 3, 4 και 5 παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα της παρούσας έρευνας.

Τα κεφάλαια 1 και 2 συνοδεύονται από τα παραρτήματα Α και Β, όπου γίνεται παρουσίαση βασικών στοιχείων της μηχανικής των ρευστών, της θερμοδυναμικής και των κύριων διατάξεων μετρητικών τύπου HWA.

Στο κεφάλαιο 3 γίνεται αναλυτική περιγραφή του διαθέσιμου εξοπλισμού και περιγράφεται η διαδικασία βαθμονόμησης του, ενώ εκτενή πειραματικά δεδομένα του κεφαλαίου αυτού παρατίθενται στο παράρτημα Δ υπό μορφή πινάκων.

Τα αποτελέσματα μετρήσεων HWA στο πεδίο του χρόνου παρατίθενται στο κεφάλαιο 4, παράλληλα με τους αντίστοιχους πίνακες που συγκεντρώνονται στο παράρτημα Ε. Το κεφάλαιο 5 περιλαμβάνει τα αποτελέσματα ανάλυσης μετρήσεων HWA στο πεδίο των συχνοτήτων.

Τέλος, το παράρτημα Γ αποτελείται από ορισμένους πίνακες τεχνικών χαρακτηριστικών του διαθέσιμου εξοπλισμού και από τους αλγόριθμους που χρησιμοποιήθηκαν για την ολοκλήρωση της εργασίας αυτής.

1.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της ανεμομετρίας θερμού νήματος

Η ανεμομετρία θερμού νήματος παρουσιάζει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα συγκριτικά με άλλα μετρητικά όργανα ροών, ορισμένα από τα οποία παρουσιάζονται στο παράρτημα Α.

Τα βασικότερα επιθυμητά χαρακτηριστικά (ιδανικά) ενός αισθητήρα είναι : η γραμμική και χωρίς θόρυβο απόκριση, χρόνος απόκρισης που να ισοδυναμεί με στιγμιαία απόκριση, άπειρο για στιγμιαία απόκριση εύρος συχνοτήτων καθώς και άπειρη διακριτική ικανότητα και περιοχή λειτουργίας.

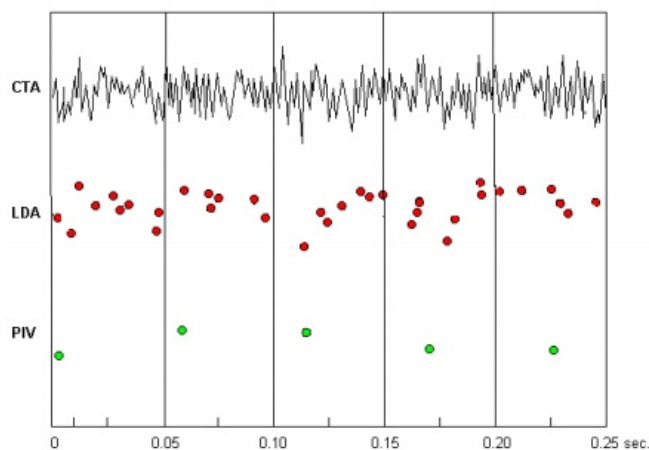
Αντίθετα, ανεπιθύμητα χαρακτηριστικά αισθητήρων είναι η χαμηλή ευαισθησία, η ολίσθηση της ευαισθησίας που συνεπάγεται μεταβολή της εξόδου με το χρόνο, το συστηματικό λάθος στην έξοδο του αισθητήρα, η γήρανση δηλαδή η μεταβολή της εξόδου με το χρόνο, η υστέρηση, που οδηγεί σε συστηματικό σφάλμα στην μετρούμενη ποσότητα και ο θόρυβος που δημιουργεί ένα ανεπιθύμητο τυχαίο σήμα στην έξοδο.

Τα κύρια πλεονεκτήματα των μετρητικών τύπου HWA που τα καθιστούν ως μια από τις πλέον καταξιωμένες μεθόδους μεταξύ των παρεμφερών οργάνων είναι τα εξής:

- Μικρό μέγεθος, το οποίο διαταράσσει σε πολύ μικρό βαθμό τη ροή
- Καλή χωρική διακριτικότητα (spatial resolution)¹. Υψηλή χωρική διακριτικότητα οργάνου συνεπάγεται δυνατότητα μέτρησης διαταραχών που συμβαίνουν σε μικρή κλίμακα χώρου, όπως οι τύρβες
- Μεγάλο εύρος ταχυτήτων στο οποίο μπορούν να χρησιμοποιηθούν
- Πληθώρα διαθέσιμων αισθητηρίων που δίνουν τη δυνατότητα για ταυτόχρονες μετρήσεις σε περισσότερες από μια κατευθύνσεις της ροής
- Ευρεία απόκριση συχνότητας. Με κατάλληλη τροποποίηση της δειγματοληψίας, εκτός της τοπικής χρονικά μέσης ταχύτητας, μπορούν να μετρηθούν και υψηλόσυχνες διακυμάνσεις της ταχύτητας
- Πολύ μεγάλη ακρίβεια. Υπό ελεγχόμενες συνθήκες, η διαφορά μετρούμενης – πραγματικής ταχύτητας κυμαίνεται μεταξύ 0.1-0.2%
- Χαμηλό κόστος σε σύγκριση με αντίστοιχα μετρητικά όπως τα Laser Doppler Anemometers. Τείνουν να είναι πιο ακριβά από τους σωλήνες Pitot αλλά μπορούν να μετρούν ροές που δεν είναι σταθερές ως προς τη διακύμανσή τους.

Στο Σχήμα 1.1 διακρίνεται το πλεονέκτημα της ανεμομετρίας θερμού νήματος σε σύγκριση με άλλες μεθόδους μέτρησης μεγεθών ροής (PIV, LDA βλέπε παράρτημα Α), δηλαδή η δυνατότητα υψηλόσυχνης λήψης της στιγμιαίας ταχύτητας, ως απόρροια του αναλογικού σήματος που προσφέρει.

¹ Η χωρική διακριτικότητα (SR) ενός μετρητικού οργάνου ορίζεται ως το αντίστροφο του ελάχιστου ανιχνεύσιμου μήκους στο πεδίο ροής. Συνήθη μεγέθη SR για την HWA είναι 10^5m^{-1} , για την LDA 10^4m^{-1} και για σωλήνες Pitot $3 \times 10^2 \text{m}^{-1}$



Σχήμα 1. 1 Σήμα εξόδου CTA (HWA), LDA, PIV [11]

Ως μειονεκτήματα των HWA, μπορούν να αναφερθούν τα εξής:

- Παρεμβολή του μετρητικού οργάνου στη ροή που οδηγεί στην ανάγκη διάνοιξης οπών ή άλλων επεμβάσεων σε έναν αγωγό.
- Τα αισθητήρια είναι πολύ εύθραυστα όργανα. Για το λόγο αυτό απαιτείται πολύ μεγάλη προσοχή κατά την τοποθέτηση του αισθητηρίου στη ροή, καθώς και ειδική μέριμνα (π.χ. φίλτρο) ώστε να μην έρθει σε επαφή με μέρος του ρέοντος ρευστού (π.χ. λάδι, αιωρούμενα τμήματα προερχόμενα από το περιβάλλον) που ενδέχεται να του προκαλέσει βλάβη.
- Απαίτηση συχνής βαθμονόμησης του ανεμομέτρου, ειδικότερα όταν αλλάζουν οι συνθήκες μέτρησης (περισσότερα στο κεφάλαιο 3).
- Αδυναμία μέτρησης της αναστροφής της ροής, σύνηθες φαινόμενο σε μοντέλα ροών υψηλής τύρβης.

Ο εκάστοτε μελετητής πρέπει να επιλέγει το καταλληλότερο μετρητικό όργανο λαμβάνοντας υπόψη του τις συνθήκες της μέτρησης, την ακρίβεια που απαιτείται, την ευελιξία της μεθόδου, το κόστος, την αξιοπιστία, την καταλληλότητα του οργάνου για χρήση σε συγκεκριμένο περιβάλλον και το είδος των αποτελεσμάτων που θέλει να επιτύχει.

Κεφάλαιο 2

Μετρητικά Ταχύτητας Ροής Τύπου Hot-Wire

Σύνοψη κεφαλαίου

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά και οι αρχές που διέπουν τα μετρητικά ανεμομετρίας θερμού νήματος και φιλμ. Οι αρχές λειτουργίας νήματος και φιλμ είναι παρεμφερείς και παρουσιάζονται από κοινού για τα δυο είδη μετρητικών.

2.1 Ανεμόμετρα θερμού νήματος και θερμού φιλμ

2.1.1 Υλικά Κατασκευής και συνήθεις διαστάσεις

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας επιτρέπει την κατασκευή πολυπλοκότερων, μικρότερων διαστάσεων και συνεπώς πιο ευαίσθητων μετρητικών τύπου HWA, ενώ η συνεχής βελτίωση των ηλεκτρονικών διατάξεων βοηθά στη λήψη μετρήσεων υψηλής συχνότητας με μεγάλη ακρίβεια. Εκτενέστερη αναφορά στα υλικά κατασκευής των HWA μπορεί να βρεθεί στο παράρτημα Β.

Στις μετρήσεις αερίων συνήθως το νήμα έχει διάμετρο D μεταξύ 1 και 10 μm και μήκος από 0.5 έως 2mm. Το σύρμα υποστηρίζεται από ανοξείδωτο χάλυβα με διάμετρο στις άκρες από 0.1 έως 0.2mm. Τέτοιων διαστάσεων νήματα χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση των επιπέδων τύρβης σε αεροσήραγγες καθώς και για μετρήσεις της ροής γύρω από πειραματικά μοντέλα και φτερωτές συμπιεστών. Σε κάθε περίπτωση τα στηρίγματα του σύρματος είναι μεγάλων διαστάσεων σχετικά με τη διάμετρό του, για λόγους μηχανικής αντοχής.



Σχήμα 2. 1 Θερμό Νήμα (αριστερά) και Φιλμ (δεξιά) Εργαστηρίου Ναυτικής Μηχανολογίας ΕΜΠ

Το αισθητήριο θερμού φιλμ είναι ουσιαστικά ένα αγώγιμο φύλλο πάνω σε ένα κεραμικό υπόστρωμα. Συνήθεις διαστάσεις για την επιμετάλλωση του αισθητήριου κυμαίνονται

μεταξύ 1 και 5μm σε πάχος. Το αγώγιμο υλικό εναποτίθεται σε υπόστρωμα σχήματος κώνου, σφήνας, κυλίνδρου ή επίπεδης επιφάνειας. Το υλικό που χρησιμοποιείται ευρέως ως υπόστρωμα είναι ο χαλαζίας. Η χρήση του θερμού φιλμ συνηθίζεται σε εφαρμογές όπου ένα θερμό νήμα θα αστοχούσε - έσπαγε σύντομα, όπως σε μετρήσεις ροής υγρών.

Στο παράρτημα Β παρατίθεται μια συνοπτική σύγκριση μεταξύ ενός θερμού νήματος και ενός φιλμ αντίστοιχων διαστάσεων.

2.2 Βασικές Αρχές Ανεμομετρίας Θερμού Νήματος

2.2.1 Μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία

Τα μετρητικά τύπου HWA μπορούν να προσεγγιστούν ως ηλεκτρικές αντιστάσεις, αφού παρασκευάζονται συνήθως από κάποιο μέταλλο ή κράμα. Η αλλαγή της ηλεκτρικής αντίστασης είναι συνέπεια της εξάρτησης των ωμικών αντιστάσεων από τη θερμοκρασία. Όταν ο αγωγός διαρρέεται από ρεύμα, η θερμοκρασία του διαφοροποιείται από αυτή του περιβάλλοντος και μεταβάλλεται με την τάση.

Η αντίσταση ενός αγωγού εξαρτάται από τα γεωμετρικά του χαρακτηριστικά και δίνεται από τη σχέση:

$$R_{\theta} = \rho \frac{L}{S} \quad (2.1)$$

όπου L είναι το μήκος του αγωγού, S η επιφάνεια της πρισματικής διατομής του και ρ η ειδική αντίσταση που εξαρτάται από τη φύση του υλικού και τη θερμοκρασία.

Η σχέση που συνδέει την αντίσταση με τη θερμοκρασία στην περιοχή υψηλών θερμοκρασιών δεν είναι γραμμική, αλλά έχει την εξής μορφή:

$$R_{\theta} = R_0(1 + \alpha\theta + \beta\theta^2 + \gamma\theta^3 + \dots) \quad (2.2)$$

όπου R_{θ} η τιμή της αντίστασης σε θερμοκρασία θ , R_0 η αντίσταση σε θερμοκρασία θ_0 και α είναι σταθερά θερμοκρασίας που ονομάζεται θερμικός συντελεστής αντίστασης, εξαρτάται από το υλικό και έχει διάσταση $^{\circ}\text{C}^{-1}$. Σε πολλές εφαρμογές, οι όροι υψηλότερης τάξης θεωρούνται αμελητέοι και εφαρμόζεται προσεγγιστικά η εξίσωση:

$$R_{\theta} = R_0[1 + \alpha(\theta - \theta_0)] \quad (2.3)$$

Σε αυτές συγκαταλέγεται και η πλειονότητα των εφαρμογών HWA .

2.2.2 HWA και μεταφοράς θερμότητας

Στην πλειονότητα των μετρούμενων ροών, το αισθητήριο του HWA διατηρείται σε υψηλότερη θερμοκρασία από το ρευστό και λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας το νήμα ψύχεται. Το ισοζύγιο ενέργειας στο σύστημα ρευστό-νήμα δίνει:

$$d\dot{Q}_e = d\dot{Q}_{fc} + d\dot{Q}_c + d\dot{Q}_r + d\dot{Q}_s \quad (2.4)$$

όπου \dot{Q}_e ο ρυθμός παρεχόμενης θερμικής ενέργειας με τη μορφή ηλεκτρικής ισχύος και \dot{Q}_{fc} , \dot{Q}_c , \dot{Q}_r οι ρυθμοί μεταφοράς θερμότητας εξαναγκασμένης συναγωγής, αγωγής και ακτινοβολίας αντίστοιχα (παράρτημα Α.5). \dot{Q}_s είναι ο ρυθμός αποθήκευσης ενέργειας.

Για στοιχειώδες μήκος νήματος dx (incremental wire element), η παρεχόμενη ηλεκτρική ισχύς είναι:

$$d\dot{Q}_e = \frac{I^2 \chi_w}{A_w} dx \quad (2.5)$$

με I την ένταση ρεύματος που διαρρέει το νήμα και χ_w την αντίσταση νήματος διατομής A_w σε θερμοκρασία T_w . Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας με εξαναγκασμένη συναγωγή και αγωγή δίνονται από τους εξής τύπους:

$$d\dot{Q}_{fc} = \pi dh(T_w - T_f) dx \quad (2.6)$$

$$d\dot{Q}_c = -k_w A_w \frac{\partial^2 T_w}{\partial x^2} dx \quad (2.7)$$

όπου h ο συντελεστής συναγωγής (heat transfer coefficient), T_f η θερμοκρασία ρευστού και k_w ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας. Τονίζεται ότι ο συντελεστής συναγωγής h μπορεί να γραφεί ως συνάρτηση του αριθμού Nusselt, όπως παρουσιάζεται στη συνέχεια.

Η μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία είναι πολύ μικρή ποσότητα στις περισσότερες εφαρμογές και παραλείπεται [7], ενώ ο ρυθμός αποθήκευσης ενέργειας είναι:

$$d\dot{Q}_s = \rho_w c_w A_w \frac{\partial T_w}{\partial t} dx \quad (2.8)$$

όπου ρ_w η πυκνότητα του υλικού του νήματος και c_w η ειδική θερμοχωρητικότητα του.

Αντικαθιστώντας στη σχέση 2.4, προκύπτει η τελική μορφή της εξίσωσης διατήρησης ενέργειας για την HWA που είναι:

$$k_w A_w \frac{\partial^2 T_w}{\partial x^2} + \frac{I^2 \chi_w}{A_w} - \pi dh(T_w - T_f) - \rho_w c_w A_w \frac{\partial T_w}{\partial t} = 0 \quad (2.9)$$

Το είδος της ροής και η εφαρμογή είναι αυτά που καθορίζουν ποιοι από τους όρους της τελευταίας σχέσης θα ληφθούν υπόψη και ποιοι θα παραληφθούν. Π.χ. στην ανεμομετρία CTA, ο ρυθμός αποθήκευσης ενέργειας λαμβάνεται ίσος με το μηδέν, αφού η θερμοκρασία του νήματος διατηρείται σταθερή με αποτέλεσμα το μηδενισμό της αντίστοιχης παραγώγου της σχέσης 2.9. Επιπλέον θεωρώντας τον όρο της αγωγής αμελητέο (παράγραφος 2.2.3) προκύπτει:

$$\frac{I^2 \chi_w}{A_w} = \pi dh(T_w - T_f) \quad (2.10)$$

2.2.3 Προσέγγιση με βάση τη ροή

Βασιζόμενες στις αρχές της μεταφοράς θερμότητας, οι εφαρμογές της ανεμομετρίας θερμού νήματος μπορούν να μελετηθούν ξεχωριστά στις εξής κατηγορίες ροής:

- υποηχητική ασυμπίεστη,
- υποηχητική συμπιεστή, διηχητική και χαμηλή υπερηχητική (low supersonic),
- υπερηχητική και υπερ-υπερηχητική (hypersonic)

Στην υποηχητική ασυμπίεστη ροή η απαγόμενη από το νήμα θερμότητα είναι συνάρτηση της παροχής μάζας του ρευστού και της διαφοράς θερμοκρασίας νήματος ρευστού. Εφόσον η διαφορά στην πυκνότητα θεωρείται μηδενική (ασυμπίεστη ροή), οι διαφοροποιήσεις της ροής μάζας οφείλονται αποκλειστικά στην αλλαγή της ταχύτητας του ρευστού. Με βάση τις παραπάνω παραδοχές, ο αριθμός Nusselt θεωρείται συνάρτηση των αριθμών Reynolds και Prandtl, ενώ υπάρχουν ενδείξεις ότι εξαρτάται και από το λόγο T_w/T_0 [22]. Ο αριθμός Prandtl θεωρείται σταθερός.

Στην υποηχητική συμπιεστή, διηχητική και χαμηλή υπερηχητική ροή, η συμπιεστότητα επηρεάζει το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας, η οποία σε αυτή την περίπτωση εξαρτάται και από την πυκνότητα. Ο αριθμός Nusselt θεωρείται συνάρτηση του αριθμού Reynolds, Mach και του λόγου T_w/T_0 .² Τέλος, στην υπερηχητική ροή έχουμε τη δημιουργία ενός υποηχητικού στρώματος ροής γύρω από το νήμα, εξαιτίας της έντονης πρόσπτωσης του ρευστού στο σώμα. Έχει βρεθεί πειραματικά ότι η ο αριθμός Nusselt αυτής της κατηγορίας εξαρτάται μόνο από τον αριθμό Reynolds και το λόγο T_w/T_0 ,³ ενώ η μεταφορά θερμότητας είναι συνάρτηση της παροχής μάζας και των θερμοκρασιών νήματος ρευστού[23].

Σε κάθε μια από τις παραπάνω περιοχές ροής, μπορούν να διακριθούν οι υποκατηγορίες:

- ροή συνεχούς μέσου (continuum flow)
- ελεύθερη μοριακή ροή (free molecular flow)
- μεταβατική ροή (slip flow), δηλαδή η ενδιάμεση κατάσταση μεταξύ των παραπάνω

Στην πρώτη, η μέση ελεύθερη διαδρομή των μορίων του ρευστού είναι πολύ μικρότερη από τη διάμετρο του νήματος και έτσι μπορεί να εφαρμοστεί η θεωρία της συναγωγής, ενώ οι αρχές της ανεμομετρίας νήματος για ελεύθερη μοριακή ροή γίνονται με βάση την Κινητική Θεωρία. Η επίδραση από τη μη συνέχεια του μέσου πρέπει να συμπεριλαμβάνεται στις σταθερές βαθμονόμησης του οργάνου.

2.2.4 Βαθμονόμηση μετρητικών HWA, γενικευμένος νόμος του King

Ο αριθμός Nusselt της ροής εξαρτάται από: α) την ταχύτητα της ροής, β) τις φυσικές ιδιότητες του ρευστού, γ) τη διάμετρο του σύρματος, δ) τις φυσικές ιδιότητες του σύρματος και ε) τη θερμοκρασιακή διαφορά σύρματος ρευστού. Ορίζεται ως:

$$Nu = h \frac{d}{k_f} \quad (2.11)$$

² $q=f(u,\rho,T_0,T_w)$ και $Nu=f(Re,M,\frac{T_w}{T_0})$

³ $Nu=f(Re,\frac{T_w}{T_0})$

Αν και η εύρεση μιας σχέσης για τον αριθμό Nusselt της ροής γύρω από κύλινδρο μέσα σε παράλληλη ροή έχει γίνει αντικείμενο έρευνας για πολλά χρόνια, δεν έχει διατυπωθεί μια γενικευμένη σχέση για όλες τις περιοχές Reynolds.

Στο πειραματικό επίπεδο της εργασίας αυτής, οι ροές που μελετήθηκαν αφορούν συνεχές μέσο⁴, ασυμπίεστο ρευστό και αμελητέα επίδραση του αριθμού Mach. Σε αυτές ισχύει:

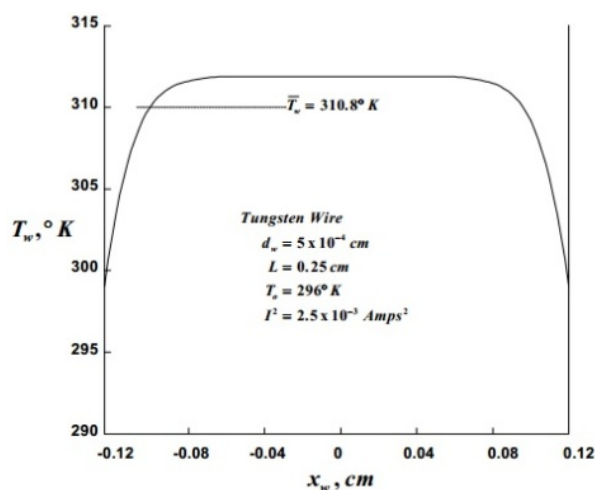
$$Nu = Nu \left(Re, Pr, \frac{T_f}{T_w} \right) \quad (2.12)$$

όπου Pr ο αριθμός Prandtl, οριζόμενος ως: $Pr = \frac{c_p \mu}{k}$ με c_p την ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση του ρευστού και μ το συντελεστή ιξώδους του ρευστού. Έχουν διατυπωθεί πολλές εξισώσεις που συνδέουν τα μεγέθη της σχέσης 2.7. Η πλέον διαδεδομένη εμπειρική εξίσωση, είναι αυτή των Collins και Williams⁵, ενώ μια ακόμα έχει διατυπωθεί από τον Kramer⁶. Πολύ πριν επιβληθεί η χρήση αυτών των σχέσεων, ο King ανέπτυξε την εξής σχέση:

$$Nu = A + BRe^n \quad (2.13)$$

Η εμπειρική αυτή σχέση ($Nu=Nu(Re)$) καλείται γενικευμένος νόμος του King ($n \cong 0.5$) και ισχύει με τις προϋποθέσεις: α) άπειρου μήκους νήματος, β) χρονικά αμετάβλητου θερμοκρασιακά πεδίου [19].

Σε νήμα πεπερασμένου μήκους, η διανομή της θερμοκρασίας του νήματος δεν είναι σταθερή κατά το μήκος, αφού εκτός της ψύξης του λόγω εξαναγκασμένης συναγωγής, υπάρχει και ψύξη λόγω αγωγιμότητας προς τα στηρίγματά του. Το ποσοστό θερμότητας που μεταφέρεται στα στηρίγματα είναι συνάρτηση του λόγου l/d (μήκος/διάμετρος) και μια συνήθης τιμή είναι 15% αυτής που μεταφέρεται στο ρευστό.



Σχήμα 2. 2 Τυπική κατανομή θερμοκρασίας νήματος με κυρίαρχο τρόπο απαγωγής θερμότητας την συναγωγή[23]

⁴ αριθμός Knudsen < 0.01. $Kn = \frac{\lambda}{d}$, λ η μέση ελεύθερη διαδρομή των μορίων του αερίου

⁵ $Nu = (A + BRe^n)(1 + \theta/2)^{0.17}$

⁶ $Nu = 0.42Pr^{0.2} + 0.57Pr^{0.33}Re^{0.5}$

Για την επίτευξη σταθερής αντίστασης νήματος R_w , επιλέγονται κατάλληλοι λόγοι l/d καθώς και l/l_c ⁷, οι οποίοι εξαρτώνται τόσο από την ταχύτητα του μέσου, όσο και από τις ιδιότητες του υλικού κατασκευής.

Συνδυάζοντας το γενικευμένο νόμο του King, τις παραδοχές που αναπτύχθηκαν στις τελευταίες παραγράφους για τον αριθμό Nusselt και τη σχέση που συνδέει την αντίσταση αγωγού με τη θερμοκρασία (σχέση 2.3) προκύπτει :

$$E^2 = E_0^2 + Bv^n = A + Bv^n \quad (2.14)$$

Όπου E είναι η στιγμιαία τάση λειτουργίας του αισθητηρίου και v η ταχύτητα της ροής. Η τάση E_0 αντιστοιχεί σε μηδενική ταχύτητα ροής και μπορεί να υπολογιστεί όπως και η σταθερά B κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης. Η τιμή του εκθέτη n παίρνει τιμές κοντά στο 0.5. Ο νόμος του King αποτελεί ένδειξη της τάξης μεγέθους των σταθερών A , B και του εκθέτη, οπότε κάθε αισθητήριο χρειάζεται τη δική του βαθμονόμηση για τον προσδιορισμό των σταθερών αυτών.

⁷ l_c το μήκος της ψυχρής περιοχής του νήματος

Κεφάλαιο 3

Εξοπλισμός ENM, Βαθμονόμηση HWA

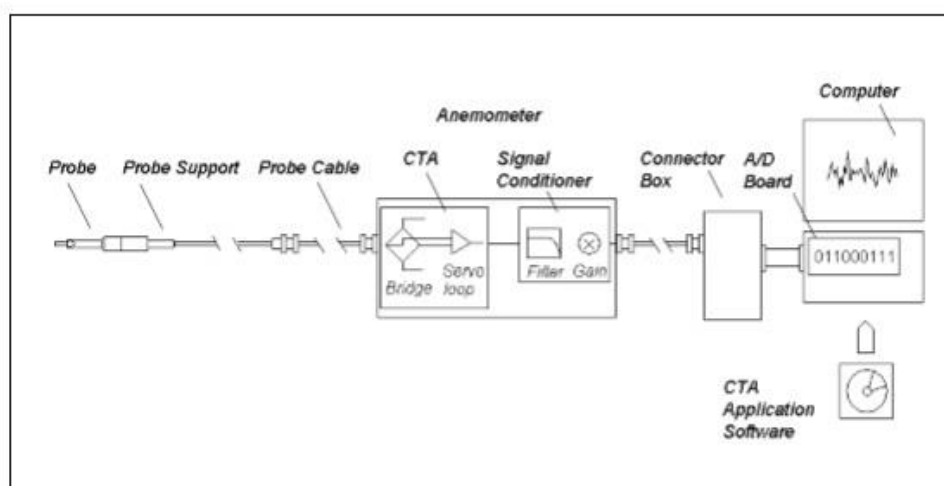
3.1 Εξοπλισμός HWA και διάταξη δοκιμών αέρα ENM

3.1.1 Συνδεσμολογία CTA

Το διαθέσιμο μετρητικό όργανο ανεμομετρίας θερμού νήματος του ENM αποτελείται από:

1. Τα αισθητήρια νήματος και φιλμ, μοντέλα 55P11 και 55R02
2. Το στέλεχος υποστήριξης –οδηγό των αισθητηρίων, probe support 55H21
3. Τη γέφυρα MiniCTA 54T42
4. Κάρτα λήψης δεδομένων/μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (A/D converter), National Instruments 9215
5. Ηλεκτρονικό υπολογιστή και πολύμετρο για τη λήψη των μετρήσεων

Η διάταξη παρουσιάζεται στο σχήμα 3.1. Οι απαραίτητες συνδέσεις πραγματοποιούνται με καλώδια BNC που παρέχονται από την κατασκευάστρια εταιρία. Κατά την πειραματική διαδικασία αποφεύγεται η συστροφή των καλωδίων και η επαφή των αγώγιμων τμημάτων τους με μεταλλικές επιφάνειες, καθώς ενδέχεται να προκληθεί αλλοίωση του σήματος που λαμβάνεται.



Σχήμα 3. 1Τυπική διάταξη CTA [20]

3.1.2 MiniCTA 54T42

Η γέφυρα Wheatstone με τον ενισχυτή ανατροφοδότησης που χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική διαδικασία, είναι η MiniCTA 54T42 της εταιρίας Dantec Dynamics A/S. Το κύκλωμά της είναι βελτιστοποιημένο για μετρήσεις με νήμα ή φιλμ σε αέρα. Το εύρος ζώνης υπερβαίνει τα 50kHz σε ταχύτητα 50m/s και λειτουργεί υπό συνδυασμό ωμικής αντίστασης 4-36 Ohms (αντίσταση αισθητήριου και καλωδίου σύνδεσης). Δεν απαιτείται προσαρμογή του λόγου υπερθέρμανσης (παράρτημα B.2), καθώς η γέφυρα είναι

ρυθμισμένη για λειτουργία υπό το διαθέσιμο συνδυασμό νημάτων-καλωδίου. Αναλυτικότερα χαρακτηριστικά της μπορούν να βρεθούν στο παράρτημα Γ.1.

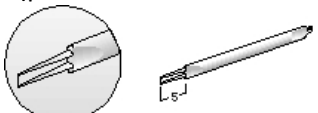
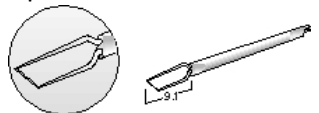


Σχήμα 3. 2 MiniCTA 54T42

3.1.3 Αισθητήρες

Τα μοντέλα νήματος και φιλμ είναι το 55P11 και το 55R02. Τα χαρακτηριστικά τους συνοψίζονται στον πίνακα 3.1.

Τα αισθητήρια είναι κατάλληλα μόνο για μετρήσεις αερίων, αφού η επίστρωση 0.5μm που διαθέτει το φιλμ δεν το καθιστά κατάλληλο για μετρήσεις σε υγρά. Το νήμα έχει άνω όριο συχνότητας 150kHz σε ταχύτητες ροής 100m/s, ενώ το αντίστοιχο όριο για το φιλμ είναι 90kHz. Και στα δύο, τα στηρίγματα των αισθητηρίων είναι παράλληλα στο στέλεχος υποστήριξης (probe support). Η διεύθυνση του νήματος είναι κάθετη στα στηρίγματα του, ενώ στην περίπτωση του φιλμ σχηματίζεται γωνία 45° μεταξύ του φιλμ και του άξονα υποστήριξης. Η γωνία αυτή δίνει τη δυνατότητα μετρήσεων μέσης ταχύτητας ροής και τάσεων Reynolds σε μονοδιάστατη, διδιάστατη και τρισδιάστατη ροή, περιστρέφοντας το αισθητήριο ώστε να προκύψουν οι συνιστώσες της ταχύτητας.

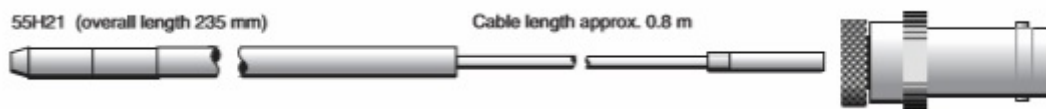
Μοντέλο	Νήμα: 55P11  55P11 Straight general-purpose type	Φιλμ: 55R02  55R02 (0.5 μm coating) 45° slanting sensor type 55R12 (2 μm coating)
$R_{20} (\Omega)$	3.45	6.09
$R_L (\Omega)$	0.5	0.5
$\alpha_{20} (^{\circ}\text{C}^{-1})$	0.36	0.49
$T_{\text{sensor}} (^{\circ}\text{C})$	Μέγιστη 300	Μέγιστη 300
Ελάχιστη Ταχύτητα (m/s)	0.2	0.2
Μέγιστη Ταχύτητα (m/s)	500	350

Πίνακας 3. 1 Χαρακτηριστικά νήματος και φιλμ



Σχήμα 3. 3 Θερμό νήμα (αριστερά) και θερμό φιλμ (δεξιά)

3.1.4 Probe Support

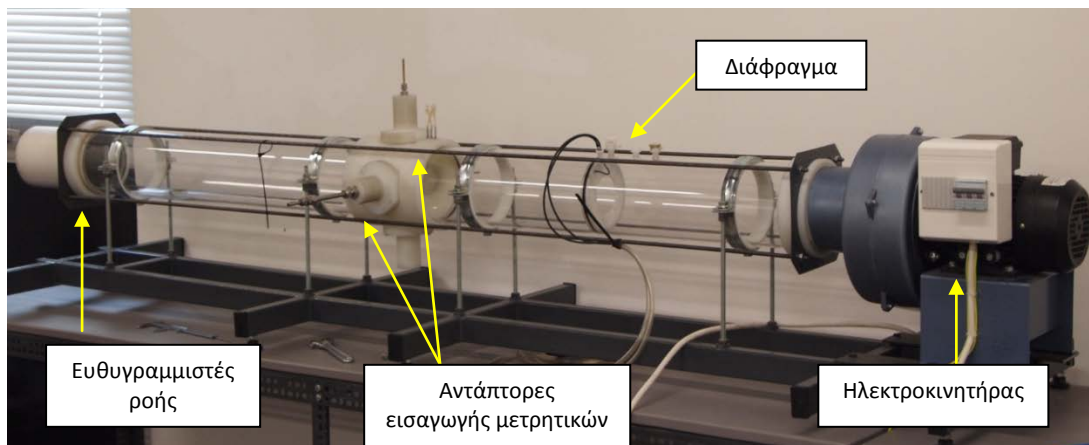


Σχήμα 3. 4 Στέλεχος υποστήριξης [Dantec Dynamics]

Το θερμό νήμα ή φιλμ συνδέεται (plug-in) στο στέλεχος υποστήριξης 55H21 της εταιρίας Dantec Dynamics. Το μοντέλο είναι ευθύγραμμο, κυκλικής διατομής, εξωτερικής διαμέτρου 4mm και μήκους 235mm. Λειτουργεί σαν οδηγός για τα αισθητήρια και καθυετριάζεται εντός ροής μέσω αντάπτορα, ο οποίος το συγκρατεί στην επιθυμητή θέση μέτρησης. Επειδή η διαδικασία τοποθέτησης είναι χειροκίνητη, το νήμα ή το φιλμ σε καμία πειραματική διάταξη δεν τοποθετήθηκαν σε απόσταση μικρότερη των 5mm από τα τοιχώματα των στερεών ορίων της αντίστοιχης διάταξης, για την αποφυγή επαφής με αυτά και θραύσης των αισθητηρίων.

3.1.5 Διάταξη δοκιμών αέρα

Η διάταξη δοκιμών ροής αέρα (air flow test bench) του ENM είναι προτυποποιημένη βάσει του ISO5167 [26]. Πρόκειται για ευθύγραμμο αγωγό κυκλικής διατομής, εσωτερικής διαμέτρου 14cm και μήκους 2.10m. Η αναρρόφηση του αέρα γίνεται μέσω φυσητήρα που περιστρέφεται από τριφασικό κινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος. Η τροφοδοσία του ηλεκτροκινητήρα γίνεται μέσω γεννήτριας τριφασικού ρεύματος (inverter) η οποία λειτουργεί σε εύρος συχνοτήτων 0 έως 50Hz.



Σχήμα 3. 5 Διάταξη δοκιμών αέρα ENM

Στην είσοδο του αέρα στο σωλήνα είναι εγκατεστημένη διάταξη ευθυγραμμιστών ροής (flow straighteners) σύμφωνα με τις απαιτήσεις του προτύπου ISO 5167. 115cm κατάντι της εισόδου, υπάρχουν κατάλληλοι αντάπτορες, τόσο για τον σωλήνα Prandtl, όσο και για τα αισθητήρια της ανεμομετρίας. Σε απόσταση 50cm από τους αντάπτορες, υπάρχει πρότυπο διάφραγμα αφαιρούμενο κατά βούληση. Το διάφραγμα δίνει τη δυνατότητα μέτρησης της παροχής αέρα, ενώ παράλληλα αποτρέπει το ενδεχόμενο περιστροφής του αέρα κατά το μήκος της ροής (swirl από την περιστροφή του φυσητήρα).

Η ονομαστική ταχύτητα του ηλεκτροκινητήρα σε μηχανικές στροφές ανά λεπτό (n_{ov}) προκύπτει μέσω του πλήθους των πόλων (p) και της ηλεκτρικής συχνότητας (f):

$$n_{ov} = \frac{120f}{p} \quad (3.1)$$

Δεδομένου ότι ο κινητήρας στρέφεται στο 92.33% των ονομαστικών του στροφών στα 55 Hz (παράρτημα Γ.2), προκύπτει ότι η τιμή της ολίσθησης κυμαίνεται στο 7.67% σε αυτό το εύρος συχνοτήτων.

Ο φυσητήρας αναρρόφησης είναι σε ευθεία σύνδεση με τον ηλεκτροκινητήρα, επομένως οι στροφές λειτουργίας του δεύτερου καθορίζουν την ογκομετρική παροχή της διάταξης.

3.2 Μέτρηση ταχυτήτων αναφοράς (reference velocities)

3.2.1 Σωλήνας Prandtl

Ο συνδυασμός σωλήνα Pitot και ομόκεντρου εξωτερικού στατικού σωλήνα ονομάζεται σωλήνας Prandtl. Μετρά την ολική (P_t) και τη στατική πίεση (P_s) αερίου εντός ροής. Μέσω αυτών και με την εφαρμογή της εξίσωσης Bernoulli υπολογίζεται η σημειακή ταχύτητα του ρευστού.

Για την κατάσταση ανακοπής στο άκρο του σωλήνα Prandtl ισχύει:

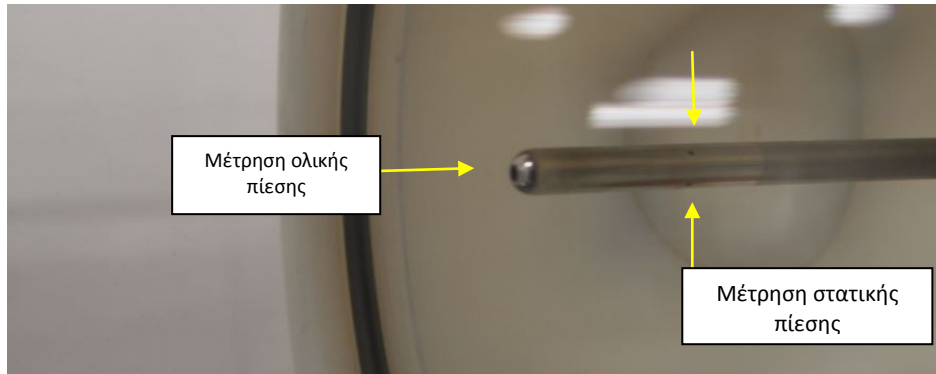
$$h = \frac{1}{2}w_1^2 = u + \frac{P}{\rho} + \frac{1}{2}w_1^2 = const. \quad (3.2)$$

όπου h η ειδική ενθαλπία του ρευστού. Θεωρώντας αδιαβατική μεταβολή $\dot{q}dt = du = 0 \Rightarrow u = const$, προκύπτει:

$$\frac{P}{\rho} + \frac{1}{2}w_1^2 = \frac{P_t}{\rho} \quad (3.3)$$

Από την τελευταία υπολογίζεται η ταχύτητα του ρευστού $u=w_1$ ίση με

$$v = \sqrt{\frac{2}{\rho}(P_t - P)} = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (3.4)$$



Σχήμα 3. 6 Σωλήνας Prandtl εντός ροής

Ο σωλήνας Prandtl τοποθετείται εντός ροής με διεύθυνση παράλληλη προς αυτή της ταχύτητας του ρευστού. Το ανοικτό στόμιο είναι πάντα στραμμένο προς την κατεύθυνση της ροής ενώ οι οπές μέτρησης της στατικής πίεσης είναι κάθετες προς το κέντρο του σωλήνα. Στην περίπτωση που ο σωλήνας δεν είναι ευθυγραμμισμένος με τη ροή η μετρούμενη ολική πίεση διαφέρει της πραγματικής. Υπάρχει όμως ένα όριο απόκλισης, συνήθως μικρότερο των 10° , κάτω από το οποίο η ένδειξη δε διαφέρει σημαντικά από την πραγματική τιμή.

Μετρήσεις ταχύτητας στο μέσο διαμέτρου

Οι τιμές της θερμοκρασίας και της ατμοσφαιρικής πίεσης λαμβάνονταν κατά την έναρξη κάθε πειραματικής διαδικασίας και ελέγχονταν κατά τακτά χρονικά διαστήματα σε όλη τη διάρκεια των πειραμάτων.

Ο σωλήνας Prandtl συνδέθηκε σε μανόμετρο και οι τιμές των πιέσεων ελήφθησαν υπό μορφή Volts μέσω πολυμέτρου μέτρησης διαφορικής πίεσης. Το μανόμετρο ήταν κατάλληλα βαθμονομημένο, με εύρος λειτουργίας -5 ως 5 Volts, που αντιστοιχούσαν σε -800 έως 800 Pascal.



Σχήμα 3. 7 α) Κατάληξη σωλήνα Prandtl εκτός ροής, β) Μανόμετρο για μέτρηση διαφοράς ολικής-στατικής πίεσης, γ) Πολύμετρο

Η τιμή της ολικής πίεσης (P_t) μετράται στο ανοικτό στόμιο του σωλήνα, ενώ η στατική (P_s) μεταφέρεται στο μανόμετρο μέσω οπών. Οι οπές βρίσκονται σε διατομή του εξωτερικού στατικού σωλήνα (προτυποποιημένη απόσταση από το άκρο). Αναλυτική παρουσίαση του υπολογισμού της ταχύτητας αέρα μέσω του σωλήνα Prandtl παρουσιάζεται στο παράρτημα Δ.1.

Σημειώνεται ότι ο σωλήνας Prandtl λειτουργεί ικανοποιητικά για ροές με αριθμούς Reynolds μεταξύ 10^4 και 10^5 [10]. Όπως παρουσιάζεται στον πίνακα Δ.1 (παράρτημα Δ), οι ταχύτητες στο μέσο της διατομής κυμαίνονται μεταξύ 1.5m/s και 10m/s, με τον ηλεκτροκινητήρα να λειτουργεί υπό το ελάχιστο και μέγιστο φορτίο αντίστοιχα και με το διάφραγμα να είναι τοποθετημένο στη διάταξη. Σε πειράματα που ακολούθησαν μετρήθηκαν ταχύτητες έως 30m/s. Με το κινηματικό ιξώδες του αέρα (ν) να παίρνει τιμές κοντά στο $15.13 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ στους 20°C [26] και για σωλήνα διαμέτρου 14cm προκύπτει:

$$0.95 \times 10^4 < Re < 2.8 \times 10^5$$

δηλαδή όλες οι μετρήσεις έγιναν σε τυρβώδεις ροές, με ικανοποιητικό επίπεδο αριθμού Reynolds για τον σωλήνα Prandtl.

Μετρήσεις κατά το μήκος διατομής

Ο σωλήνας Prandtl μπορεί να τοποθετηθεί σε οποιοδήποτε σημείο κατά μήκος της διαμέτρου μετρήσεων του σωλήνα δοκιμών. Στον πίνακα Δ.2 (παράρτημα Δ) παρουσιάζεται σειρά μετρήσεων σε διάφορα σημεία της κυκλικής διατομής, υπό πέντε διαφορετικές παροχές αέρα.

Τα προαναφερθέντα πείραμα αποτέλεσαν προεργασία για την τοποθέτηση και βαθμονόμηση του θερμού νήματος/φίλμ σε αντίστοιχες θέσεις, σε πειράματα που ακολούθησαν.

3.3 Βαθμονόμηση μετρητικών HWA

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται αντιπροσωπευτικό δείγμα των βαθμονομήσεων που πραγματοποιούνταν σε όλα τα στάδια της πειραματικής διαδικασίας. Το σύνολο των βαθμονομήσεων πραγματοποιήθηκε στην πρότυπη διάταξη δοκιμών αέρα του ENM, σύμφωνα με τα βήματα που αναπτύσσονται στην παράγραφο που ακολουθεί.

3.3.1 Διαδικασία Βαθμονόμησης

Μια από τις παραμέτρους που χαρακτηρίζει ένα μετρητικό όργανο είναι η καμπύλη βαθμονόμησης. Ως καμπύλη βαθμονόμησης ορίζεται η συνάρτηση που συνδέει το φυσικό μέγεθος με την έξοδο του οργάνου, η οποία συνήθως λαμβάνεται σε μορφή ηλεκτρικής τάσης.

Η καμπύλη βαθμονόμησης δίνεται από τον κατασκευαστή, αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως και στην ανεμομετρία θερμού νήματος, αυτό δεν είναι εφικτό. Παράμετροι που δεν επιτρέπουν την ύπαρξη μοναδικής καμπύλης βαθμονόμησης για το θερμό νήμα είναι η αλλαγή θερμοκρασίας περιβάλλοντος, η αλλοίωση των χαρακτηριστικών του οργάνου λόγω γήρανσης, η παρουσία σκόνης στο αισθητήριο και γενικότερα όλοι οι μεταβαλλόμενοι παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν το τελικό αποτέλεσμα της μέτρησης. Για την αποφυγή λαθών, επιβάλλεται ο επαναπροσδιορισμός της καμπύλης βαθμονόμησης στον

ίδιο χώρο που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί το όργανο και υπό τις συγκεκριμένες συνθήκες μετρήσεων.

Οι μετρήσεις των ταχυτήτων που απαιτούνται για τη βαθμονόμηση του HWA (ταχύτητες αναφοράς) έγιναν με σωλήνα Prandtl, ενώ για την πραγματοποίηση των βαθμονομήσεων ελήφθησαν υπόψη τα χαρακτηριστικά της ροής και του HWA, όπως αυτά αναπτύσσονται στο κεφάλαιο 2 και στα παραρτήματα Α και Β. Για τη λήψη ορθών αποτελεσμάτων, η διαδικασία βαθμονόμησης πραγματοποιήθηκε σε εξομαλυμένη ροή, με δυνατότητα μεταβολής της παροχής/ταχύτητας, χωρίς έντονη διακύμανση της ταχύτητας. Τέτοια ροή συναντάται στην πρότυπη διάταξη μετρήσεων αέρα του ENM. Η διατομή της διαμέτρου όπου γίνεται η βαθμονόμηση βρίσκεται σε ικανοποιητική απόσταση (>1m) από την είσοδο του αέρα στον αγωγό, ώστε η ροή να είναι ανεπτυγμένη. Επιπλέον το κέντρο της διαμέτρου επιλέχθηκε ως το πλέον κατάλληλο σημείο λήψης μετρήσεων αναφοράς, αφού στη θέση αυτή αναμένονται οι λιγότερες διακυμάνσεις της ταχύτητας.

Η διαδικασία βαθμονόμησης πραγματοποιείται με την εξής σειρά:

1. Μετρήσεις σημειακών ταχυτήτων με σωλήνα Prandtl στο μέσο της διατομής.
2. Αφαίρεση του σωλήνα Prandtl από τη διάταξη και τοποθέτηση του νήματος ή του φιλμ στην ίδια θέση.
3. Λήψη δεδομένων από το νήμα ή το φιλμ στις ίδιες συνθήκες ροής (ίδιες στροφές λειτουργίας ηλεκτροκινητήρα) με τον σωλήνα Prandtl. Τα δεδομένα λαμβάνονται υπό μορφή τάσης μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή με τη χρήση του προγράμματος LabVIEW® ή μέσω πολυμέτρου.
4. Επεξεργασία δεδομένων και εξαγωγή καμπύλης βαθμονόμησης μέσω συσχέτισης των δυο ομάδων δεδομένων.

Λόγω των διακυμάνσεων που συμβαίνουν ακόμη και στις καλύτερες εγκαταστάσεις βαθμονόμησης, οι τιμές αναφοράς (reference E, u) πρέπει να είναι οι χρονικά μέσες τιμές για ένα εύλογο χρονικό διάστημα (10-30s) [7]. Σε βαθμονομήσεις που η λήψη των μεγεθών (V) γίνεται με πολύμετρο, η παραπάνω συνθήκη ικανοποιείται με παρατήρηση των διακυμάνσεων, ενώ σε αυτές που τα δεδομένα λαμβάνονται μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή (πρόγραμμα LabVIEW®), υπολογίζεται η μέση τιμή τους. Τονίζεται ότι για τη λήψη οποιασδήποτε μέτρησης, έπειτα από αλλαγή των στροφών του ηλεκτρικού κινητήρα, δίνεται επαρκές χρονικό διάστημα (>10s) ώστε να αποκατασταθεί σταθερή ροή.

Ο προσανατολισμός του θερμού νήματος ή φιλμ σε σχέση με τη ροή, αποτελεί παράγοντα καθοριστικής σημασίας για τη μέτρηση. Τα αισθητήρια ανεμομετρίας τοποθετούνται εντός ροής με τον άξονά τους (του νήματος ή του φιλμ) κάθετα στην διεύθυνση της ροής. Σε αντίθετη περίπτωση, υποεκτιμάται η μετρούμενη σημειακή ταχύτητα, αφού δε λαμβάνονται υπόψη οι συνιστώσες της σε όλες τις κατευθύνσεις. Περισσότερα μπορούν να βρεθούν στο Παράρτημα Γ.3, απόκριση κατεύθυνσης HWA.

3.3.2 Καμπύλες Βαθμονόμησης

Οι καμπύλες βαθμονόμησης μπορούν να είναι:

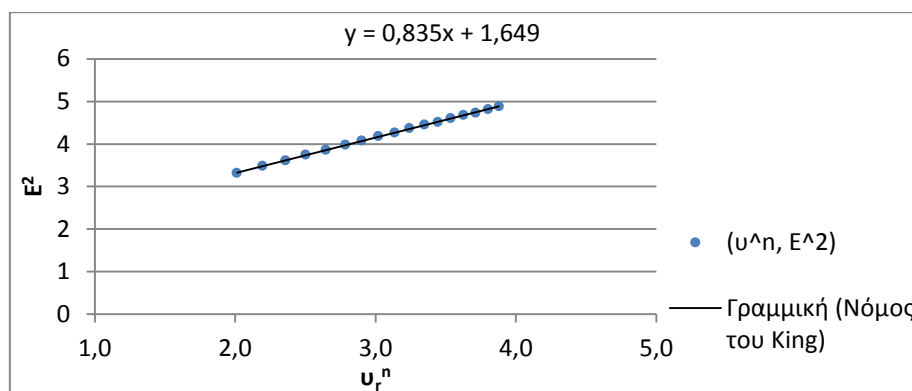
1. Εκθετικές συναρτήσεις (power laws), με χαρακτηριστικότερη το νόμο του King
 $E^2 = A + Bv^n$
2. Πολυωνυμικές συναρτήσεις (Polynomial curve fits)
3. Καμπύλες Spline (Spline-fits)

Σύμφωνα με τον King [3], ο εκθέτης (n) παίρνει την τιμή 0.5. Σε μετέπειτα έρευνες (Bruun 1976, Bruun και Tropea 1986, Swaminathan 1983 και άλλοι [7]), ο εκθέτης (n) εξετάσθηκε ως μεταβλητή παράμετρος. Από τα αποτελέσματα των μελετών αυτών προκύπτει ότι η τιμή του μπορεί να διαφέρει από το 0.5, ενώ για ένα τυπικό νήμα βολφραμίου 5μm, η τιμή του κυμαίνεται μεταξύ 0.4 και 0.45. Οι σταθερές A και B υπολογίζονται με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων.

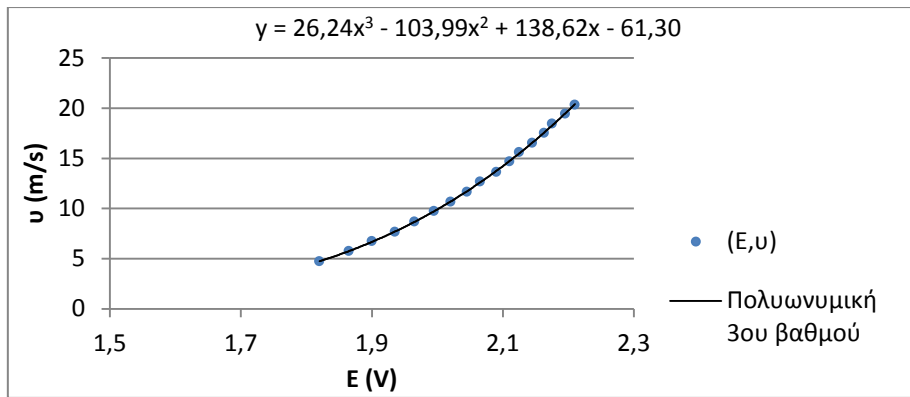
Η ακρίβεια της παρεμβολής των πολυωνυμικών συναρτήσεων είναι εφάμιλλη των εκθετικών, όταν χρησιμοποιούνται πλήρη πολυώνυμα τετάρτου βαθμού. Για πολυώνυμα μεγαλύτερου βαθμού δεν προκύπτει σημαντικό κέρδος [28]. Οι καμπύλες Spline μπορούν να δώσουν πολύ ακριβείς καμπύλες βαθμονόμησης, με χρήση των σημείων (E,u) ως κόμβους. Συνήθως όμως η εξαγωγή τέτοιων καμπυλών είναι χρονοβόρος και μη ευέλικτη μέθοδος [7] και δεν εφαρμόζεται στη συγκεκριμένη εργασία.

3.3.3 Βαθμονόμηση θερμού νήματος

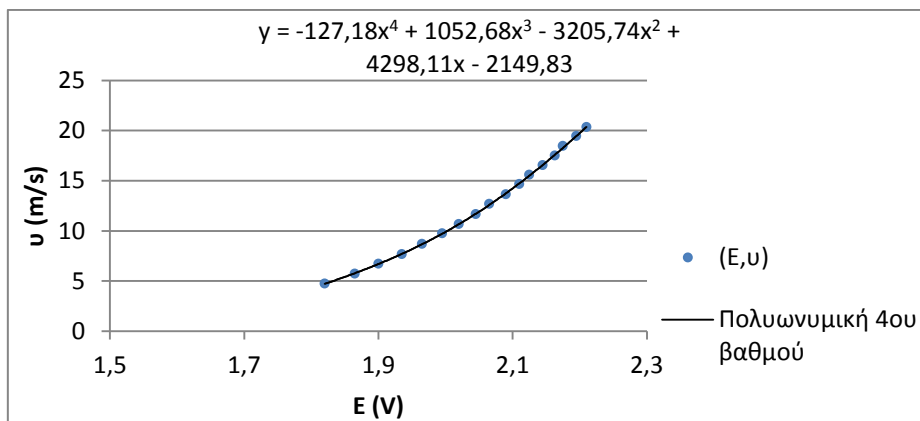
Η διαδικασία βαθμονόμησης πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τα όσα αναπτύχθηκαν στην παράγραφο 3.3.1. Στα διαγράμματα 3.1 έως 3.4 που ακολουθούν, παρουσιάζονται τέσσερις καμπύλες βαθμονόμησης του θερμού νήματος, που προκύπτουν από τα δεδομένα του πίνακα Δ.3 (παράρτημα Δ). Τα διαγράμματα προκύπτουν με χρήση του προγράμματος Excel. Το διάγραμμα 3.1 αποτελεί την εφαρμογή του νόμου του King, ενώ στα τρία επόμενα διαγράμματα οι καμπύλες βαθμονόμησης είναι πολυωνυμικές συναρτήσεις.



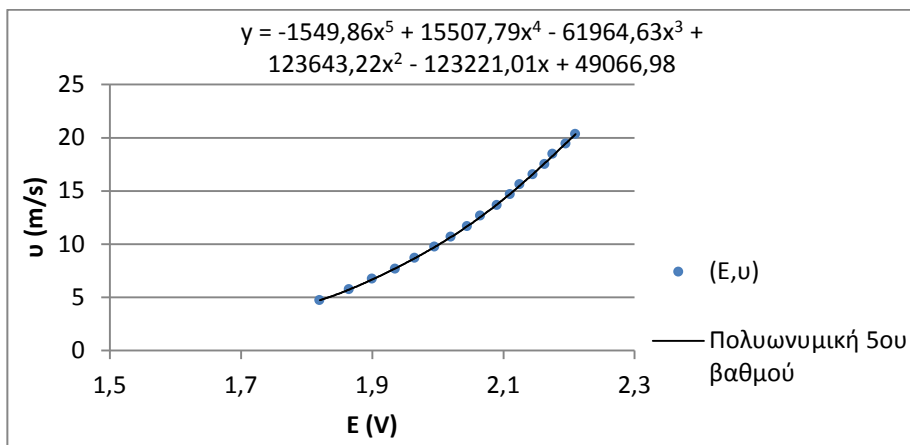
Διάγραμμα 3.1 Γραμμική παρεμβολή σημείων αναφοράς



Διάγραμμα 3. 2 Πολυωνυμική παρεμβολή σημείων αναφοράς 3^{ου} βαθμού



Διάγραμμα 3. 3 Πολυωνυμική παρεμβολή σημείων αναφοράς 4^{ου} βαθμού



Διάγραμμα 3. 4 Πολυωνυμική παρεμβολή σημείων αναφοράς 5^{ου} βαθμού

Εξάγονται οι εξής πολυωνυμικές καμπύλες βαθμονόμησης:

$$v = 26.24E^3 - 103.99E^2 + 138.62E - 61.30 \quad (3.5)$$

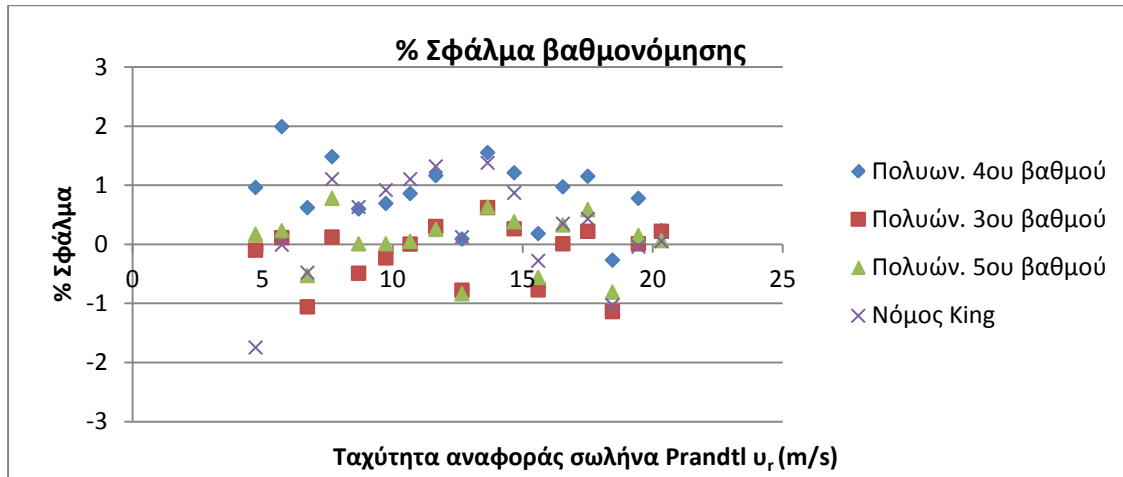
$$v = -127.18E^4 + 1052.68E^3 - 3205.74E^2 + 4298.11E - 2149.83 \quad (3.6)$$

$$v = -1549,86E^5 + 15507,79E^4 - 61964,63E^3 + 123643,22E^2 - 123221,01E + 49066,98 \quad (3.7)$$

και από το νόμο του King, $E^2 = A + Bu^n$ προκύπτει:

$$v = \left(\frac{E^2 - 1.648}{0,834} \right)^{1/0,45} \quad (3.8)$$

Στο διάγραμμα 3.5 παρουσιάζονται οι διαφορές (%) ανάμεσα στις τιμές της ταχύτητας αναφοράς που δίνει ο σωλήνας Prandtl και στις τιμές ταχύτητας που προκύπτουν από τις καμπύλες βαθμονόμησης.



Διάγραμμα 3.5 Απόκλιση καμπυλών βαθμονόμησης στα σημεία αναφοράς (πίνακας Δ.4)

Για όλες τις καμπύλες ο μέσος όρος των απολύτων τιμών των διαφορών κυμαίνεται κάτω του 1%, ενώ παρατηρείται αύξηση της απόκλισης των καμπυλών βαθμονόμησης στις μικρές ταχύτητες (<10m/s) ιδίως για τις πολυωνυμικές καμπύλες βαθμονόμησης.

Στη συγκεκριμένη βαθμονόμηση, η πολυωνυμική καμπύλη 3^{ου} βαθμού παρεμβάλλει με μεγαλύτερη ακρίβεια τα σημεία αναφοράς σε σχέση με την πολυωνυμική 4^{ου} βαθμού. Το γεγονός αυτό σε καμία περίπτωση δεν μπορεί να γενικευτεί, αφού στην πλειονότητα των βαθμονομήσεων, η αύξηση του βαθμού του πολυωνύμου οδηγεί σε καλύτερη παρεμβολή των σημείων και άρα σε μικρότερο σφάλμα βαθμονόμησης.

3.3.4 Βαθμονόμηση θερμού φιλμ

Για την ακόλουθη βαθμονόμηση του θερμού φιλμ πραγματοποιήθηκε μεγαλύτερο πλήθος μετρήσεων σε χαμηλές ταχύτητες (<10m/s). Σκοπός ήταν ο έλεγχος της καμπύλης βαθμονόμησης στο συγκεκριμένο εύρος, όπου και παρουσιάστηκαν οι μεγαλύτερες αποκλίσεις καμπύλης βαθμονόμησης - σημείων αναφοράς.

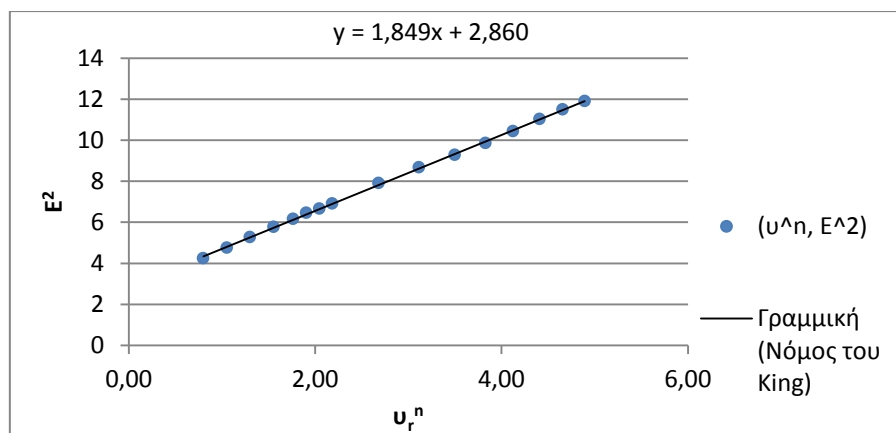
Οι αποκλίσεις οφείλονται τόσο στη λειτουργία του σωλήνα Prandtl, όσο και στα χαρακτηριστικά λειτουργίας του HWA. Ο αριθμός Reynolds πλησιάζει στα όρια ικανοποιητικής λειτουργίας του σωλήνα Prandtl, ενώ το πλήθος των σημαντικών ψηφίων που λαμβάνονται είναι πολύ κοντά στα όρια λειτουργίας των οργάνων. Ως αποτέλεσμα μικρό σφάλμα μέτρησης της τιμής $\Delta P(V)$ οδηγεί σε μεγάλη ποσοστιαία διαφορά ανάμεσα στη μετρούμενη και την πραγματική τιμή της ταχύτητας. Επιπλέον σε μικρές ταχύτητες αλλάζει σταδιακά ο τρόπος μετάδοσης θερμότητας από το νήμα προς το ρευστό, όπως έχει προαναφερθεί στο Κεφάλαιο 2.

Τα διαγράμματα 3.6 και 3.7 προκύπτουν από τα δεδομένα του πίνακα Δ.5 (παράρτημα Δ). Η διαδικασία εξαγωγής των καμπυλών βαθμονόμησης είναι όμοια με αυτή που ακολουθήθηκε στο θερμό νήμα. Εφαρμόζοντας τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, η ταχύτητα προκύπτει από την πολυωνυμική καμπύλη:

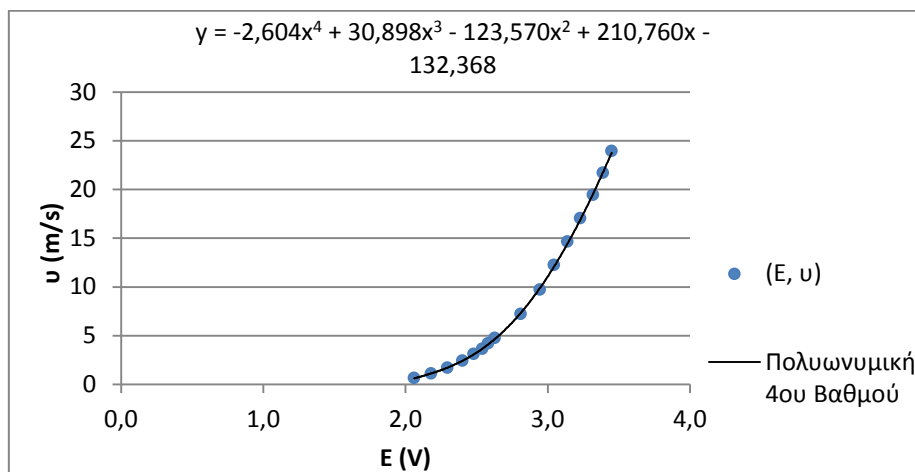
$$v = -2,60E^4 + 30,90E^3 - 123,57E^2 + 210,76E - 132,37 \quad (3.9)$$

ή από το νόμο του King με $n=0.5$:

$$v = \left(\frac{E^2 - 2,860}{1,849} \right)^{1/0,5} \quad (3.10)$$



Διάγραμμα 3. 6 Γραμμική παρεμβολή σημείων αναφοράς



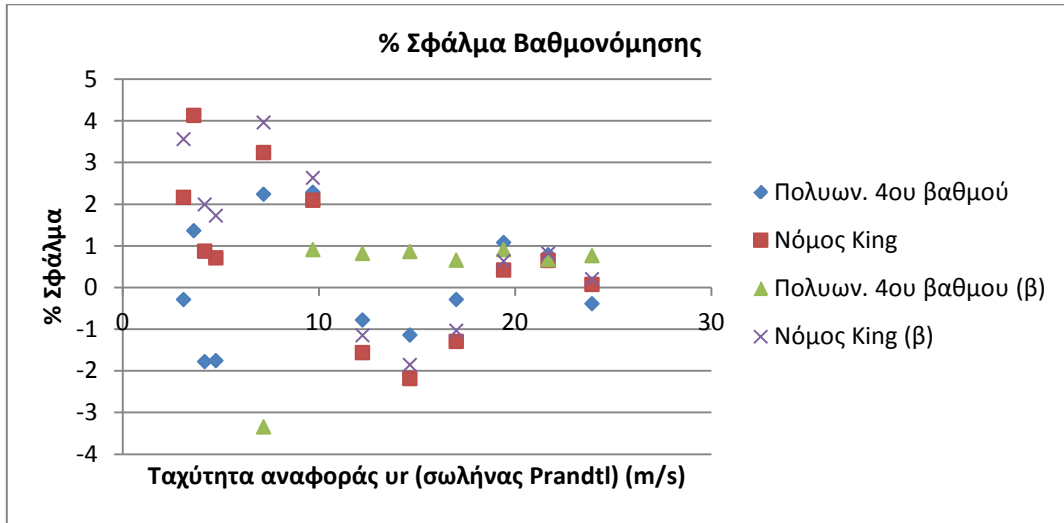
Διάγραμμα 3. 7 Πολυωνυμική παρεμβολή σημείων αναφοράς 4^{ου} βαθμού

Στο διάγραμμα 3.8 παρουσιάζονται τα σφάλματα των καμπυλών βαθμονόμησης των εξισώσεων 3.9, 3.10.

Επιπλέον, με βάση τα παραπάνω δεδομένα (πίνακας Δ.5), υπολογίζονται δύο νέες καμπύλες βαθμονόμησης, οι οποίες προκύπτουν από 7 σημεία αναφοράς, για ταχύτητες μεγαλύτερες του 9,7m/s. Οι δύο νέες καμπύλες (εξισώσεις 3.9β, 3.10β) είναι οι εξής:

$$v = 106,65E^4 - 1325,70E^3 + 6178,09E^2 - 12.767,15E + 9865,06 \quad (3.9\beta)$$

$$v = \left(\frac{E^2 - 2,827}{1,853} \right)^{1/0,5} \quad (3.10\beta)$$



Διάγραμμα 3. 8 Απόκλιση καμπυλών βαθμονόμησης στα σημεία αναφοράς (πίνακας Δ.6)

Παρατηρείται ότι οι νέες καμπύλες βαθμονόμησης (εξισώσεις 3.9β, 3.10β) δίνουν μικρότερο σφάλμα εντός του εύρους βαθμονόμησης τους, όμως η παρεκβολή αυτών πέραν του συγκεκριμένου εύρους αυξάνει σημαντικά το σφάλμα, ιδιαίτερα στην περίπτωση της πολυωνυμικής συνάρτησης 4^{ου} βαθμού. Το ποσοστιαίο σφάλμα της ξεπερνά το 100% στην περιοχή εκτός εύρους βαθμονόμησης και για το λόγο αυτό δεν παρουσιάζεται στο παραπάνω διάγραμμα.

3.3.5 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Το πλήθος των σημείων αναφοράς (E,u) διαφοροποιείται σε κάθε βαθμονόμηση, ενώ εξαρτάται από το εύρος των ταχυτήτων αναφοράς.

Η επιλογή βαθμονόμησης του θερμού φιλμ με περισσότερα σημεία αναφοράς στην περιοχή χαμηλών ταχυτήτων επηρεάζει σαφώς την μορφή των καμπυλών συνολικά, αφού τα σημεία αναφοράς δεν είναι ισοκαταμεμημένα σε όλο το εύρος των ταχυτήτων βαθμονόμησης.

Τονίζεται ότι σε περιπτώσεις όπου απαιτείται παρεκβολή (extrapolation) της καμπύλης βαθμονόμησης, η εφαρμογή του νόμου του King πλεονεκτεί έναντι των πολυωνυμικών. Το γεγονός, οφείλεται κυρίως στο ότι τα πολυώνυμα έχουν την τάση να αποκλίνουν έντονα έξω από την περιοχή βαθμονόμησης [29]. Για το λόγο αυτό, οι τιμές αναφοράς πρέπει να λαμβάνονται υπό παρόμοιες συνθήκες με αυτές που αναμένονται στις μετρήσεις ταχύτητας με το ανεμόμετρο. Αυτό ισχύει τόσο για τις περιβαλλοντικές συνθήκες, όσο και για το εύρος ταχυτήτων. Σε διαφορετική περίπτωση ενδέχεται να επιτευχθεί καλή προσαρμογή (curve fitting) της καμπύλης βαθμονόμησης στις ταχύτητες αναφοράς, αλλά η παρεκβολή της καμπύλης (extrapolation) για διαφορετικό εύρος ταχυτήτων μέτρησης να δώσει ανακριβή αποτελέσματα.

Η αποφυγή χρήσης μικρών ταχυτήτων αναφοράς στη βαθμονόμηση (όπως παρουσιάστηκε στην περίπτωση του θερμού φιλμ), εφαρμόστηκε μόνο σε περιπτώσεις όπου οι τιμές της ταχύτητας που πρόκειται να ληφθούν με το ανεμόμετρο δεν αναμένεται να είναι στο συγκεκριμένο εύρος (μικρών ταχυτήτων).

Κεφάλαιο 4

Μετρήσεις στο Πεδίο του Χρόνου

Σύνοψη Κεφαλαίου

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται ο λεπτομερής υπολογισμός πεδίου ροής αέρα στην πρότυπη διάταξη δοκιμών του ENM και στο σύστημα παροχής αέρα κινητήρα diesel. Παρατίθενται τα προφίλ ταχύτητας και η εκτίμηση της ογκομετρικής παροχής για τις δυο διατάξεις. Πειραματικά αποτελέσματα υπό μορφή πινάκων για το παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται στο παράρτημα Ε.

4.1 ΗWA στη διάταξη δοκιμών παροχής αέρα του ENM

4.1.1 Εισαγωγή

Πριν από την τοποθέτηση του ΗWA στη διάταξη παροχής αέρα κινητήρα, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ταχύτητας σε σειρά σημείων, εκτός του κέντρου της κυκλικής διατομής της διάταξης δοκιμών αέρα.

Σκοπός είναι, σε εξομαλυμένη ροή, να πραγματοποιηθούν: α) μετρήσεις ταχυτήτων με το ανεμόμετρο θερμού νήματος, β) δημιουργία προφίλ ταχύτητας, γ) εκτίμηση της ογκομετρικής παροχής.

Η δημιουργία των προφίλ ταχύτητας, η οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων και η εκτίμηση της ογκομετρικής παροχής πραγματοποιούνται μέσω αλγόριθμου που αναπτύχθηκε στο προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB®.

Μετρήσεις τάσης ΗWA (LabVIEW®)

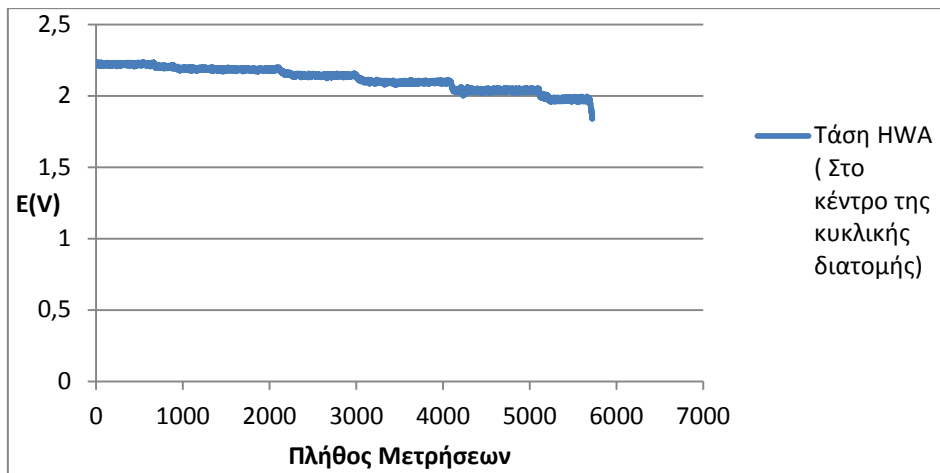
Οι στιγμιαίες τάσεις του νήματος ελήφθησαν μέσω του προγράμματος LabVIEW® και οι τιμές που παρουσιάζονται είναι ο μέσος όρος των μετρημένων τάσεων για χρονικό διάστημα μεγαλύτερο των 20s. Η συχνότητα δειγματοληψίας έχει οριστεί στα 100Hz.

Μέσος όρος μεγέθους x , με n : πλήθος δεδομένων

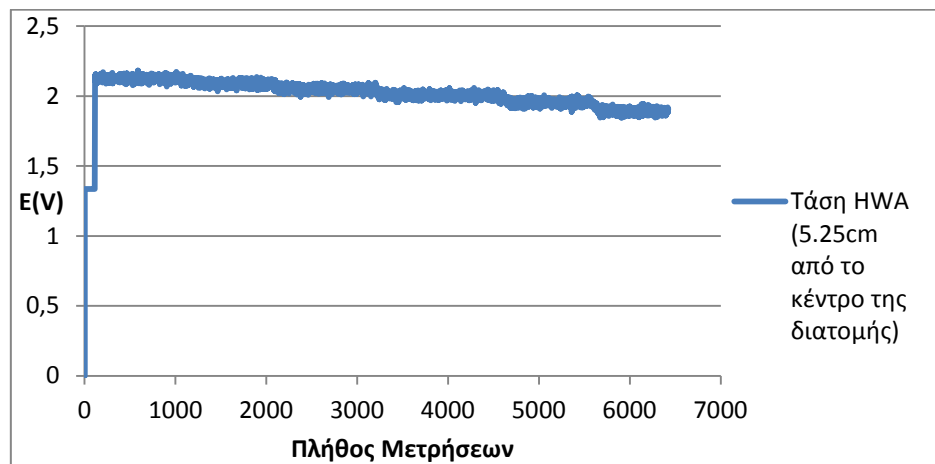
$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4.1)$$

Στο διάγραμμα 4.1 παρουσιάζεται το σήμα, υπό μορφή Volts, που δίνει το ανεμόμετρο για έξι διαφορετικές παροχές. Οι παροχές αντιστοιχούν σε ονομαστικές στροφές 2700, 2400, 2100, 1800, 1500 και 1200RPM λειτουργίας του ηλεκτρικού κινητήρα αναρρόφησης αέρα. Τα δεδομένα λαμβάνονται στο μέσο της διαμέτρου. Στο Διάγραμμα 4.2 παρουσιάζονται τα

αντίστοιχα δεδομένα, με τη διαφορά ότι οι μετρήσεις γίνονται σε απόσταση 5.25cm από το μέσο, δηλαδή πλησιέστερα στο τοίχωμα.



Διάγραμμα 4. 1 Τάση θερμού νήματος υπό έξι διαφορετικές παροχές



Διάγραμμα 4. 2 Τάση θερμού νήματος στις ίδιες παροχές με αυτές του διαγράμματος 4.1

Παρατηρείται ότι η διακύμανση της τάσης, συνεπώς και της ταχύτητας, πλησιέστερα στο τοίχωμα είναι εντονότερη. Το συμπέρασμα αυτό εξάγεται και από τον υπολογισμό της τυπικής απόκλισης:

$$s = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.2)$$

Λειτουργία γεννήτριας (Hz)	Τυπική απόκλιση τάσης στο μέσο της διατομής	Τυπική απόκλιση τάσης σε απόσταση 5,25cm από το μέσο της διατομής
1200	0,0075	0,0175
1500	0,0072	0,0159
1800	0,0058	0,0161
2100	0,0053	0,0160
2400	0,0052	0,0166
2700	0,0064	0,0158

Πίνακας 4. 1 Τυπική απόκλιση τάσης

Επομένως επιβεβαιώνεται η επιλογή του μέσου της διατομής της πρότυπης διάταξης δοκιμών αέρα ως η πλέον ενδεδειγμένη για τη βαθμονόμηση του HWA.

4.1.2 Αναλυτική μέτρηση ροής, προφίλ ταχύτητας

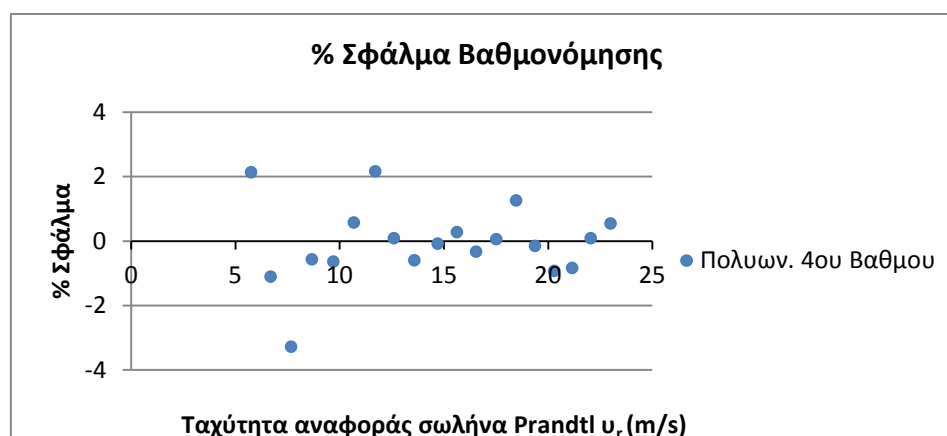
Προφίλ ταχύτητας αέρα δεν εξαγονται άμεσα με χρήση ανεμομετρίας θερμού νήματος, αφού το θερμό νήμα μετρά μόνο σημειακές ταχύτητες. Προκύπτουν με κατάλληλη παρεμβολή των σημειακών ταχυτήτων σε σειρά σημείων μιας διατομής. Ο ορισμός της τοπικής ταχύτητας που χρησιμοποιείται για την κατασκευή των προφίλ είναι ο μέσος χρονικά όρος της ταχύτητας για χρονικό διάστημα αρκετά μεγαλύτερο από την περίοδο των διαταραχών της (τυρβώδης ροή). Τα προαναφερθέντα ισχύουν για κάθε διάγραμμα προφίλ ταχύτητας που παρουσιάζεται στη συνέχεια.

Βαθμονόμηση θερμού νήματος

Σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 3, για θερμοκρασία 21°C και ατμοσφαιρική πίεση 994.5mbar προκύπτουν οι εξής καμπύλες βαθμονόμησης (παράρτημα E, πίνακας E.1) :

$$v = -224,69E^4 + 1804,32E^3 - 5375,99E^2 + 7079,74E - 3484,73 \quad (4.3)$$

$$v = \left(\frac{E^2 + 1,715}{1,147} \right)^{1/0,45}, n=0,45 \quad (4.4)$$

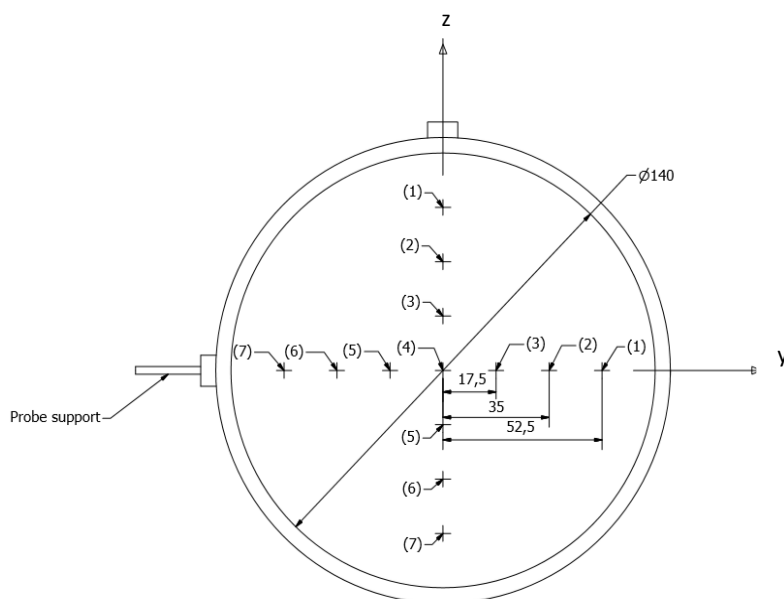


Διάγραμμα 4. 3 Απόκλιση καμπυλών βαθμονόμησης στα σημεία αναφοράς

Μετρήσεις

Στην παράγραφο αυτή παρατίθενται τα προφίλ ταχύτητας στα επίπεδα xy και xz κυκλικής διατομής της διάταξης δοκιμών αέρα. Η θέση της διατομής κατά το μήκος του σωλήνα, είναι αυτή όπου πραγματοποιήθηκαν οι βαθμονομήσεις των HWA (κεφάλαιο 3). Για τη δημιουργία των προφίλ χρησιμοποιήθηκαν εννιά ισοκατανεμημένα σημεία ελέγχου σε δύο διαμέτρους. Οι διάμετροι βρίσκονται στον άξονα γ και στον άξονα z, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 4.1. Ο άξονας x είναι παράλληλος κατά το μήκος του σωλήνα. Στα τοιχώματα ($r=R$) του σωλήνα η ταχύτητα τίθεται ίση με το μηδέν, σύμφωνα με τις συνοριακές συνθήκες.

Το θερμό νήμα τοποθετήθηκε σταδιακά σε κάθε ένα από τα 14 σημεία μέτρησης και ακολούθως πραγματοποιήθηκε η επεξεργασία των μετρήσεων με βάση τις καμπύλες βαθμονόμησης (σχέσεις 4.3 και 4.4).



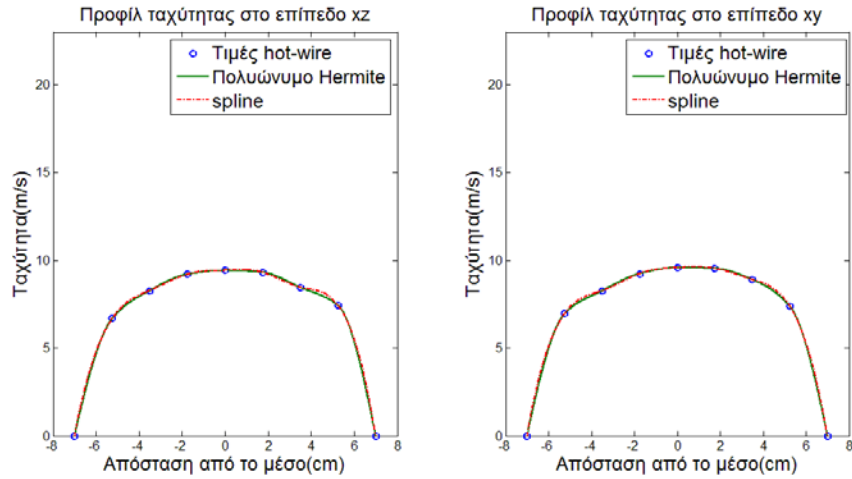
Σχήμα 4. 1 Διακεκριμένα σημεία μετρήσεων (mm), επίπεδο yz

Τα διαγράμματα 4.4 έως 4.9 προκύπτουν από τα δεδομένα των πινάκων E.2 και E.3 (παράρτημα E), όπου με \bar{v} συμβολίζεται η μέση τιμή της ταχύτητας, ενώ το τυπικό σφάλμα της μέσης τιμής είναι η τυπική απόκλιση της μέσης τιμής $\sigma_{\bar{v}}$ [30].

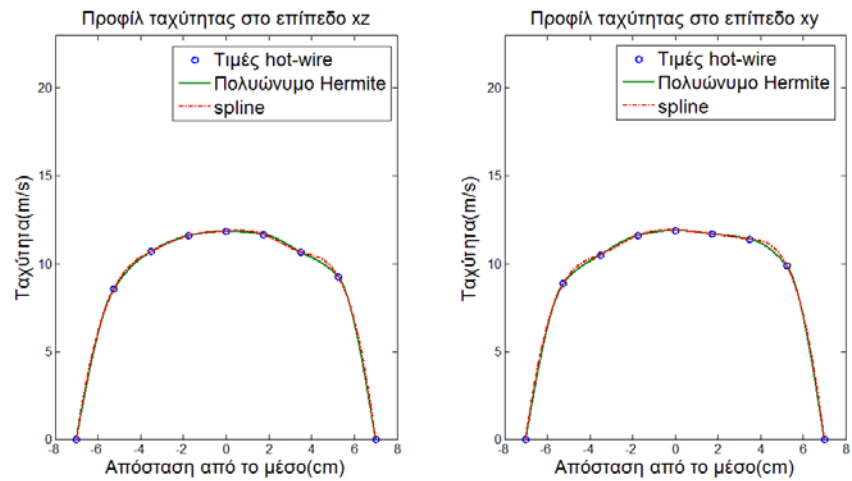
$$\sigma_{\bar{v}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.5)$$

Ακολούθως παρουσιάζονται τα προφίλ των ταχυτήτων στο οριζόντιο και στο κατακόρυφο επίπεδο. Τα διαγράμματα αντιστοιχούν σε έξι διαφορετικές παροχές αέρα, σταδιακά αυξανόμενες, οι οποίες καθορίζονται μέσω του inverter που κινεί τον φυσητήρα αναρρόφησης αέρα της διάταξης.

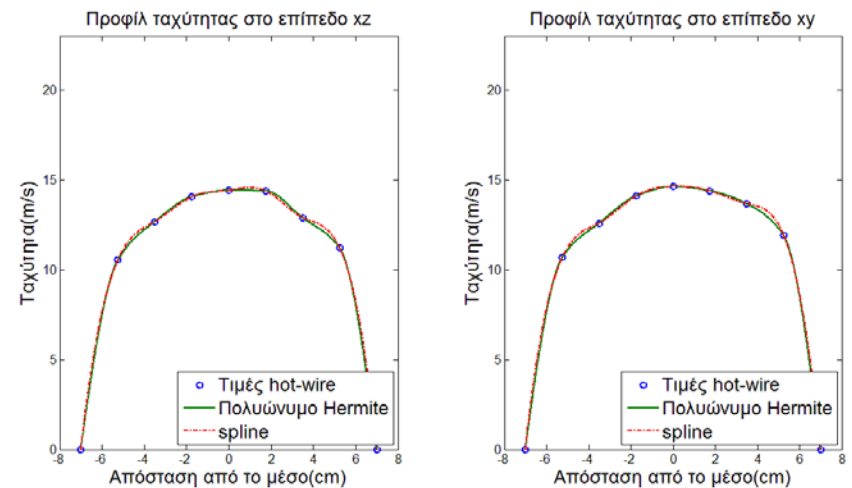
Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται στο παράρτημα Γ (Γ.4 Αλγόριθμος σε προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB®). Στον αλγόριθμο εισάγονται οι θέσεις μέτρησης ως απόσταση (cm) από το κέντρο της διαμέτρου καθώς και οι τιμές της ταχύτητας (m/s) που μετρήθηκαν.



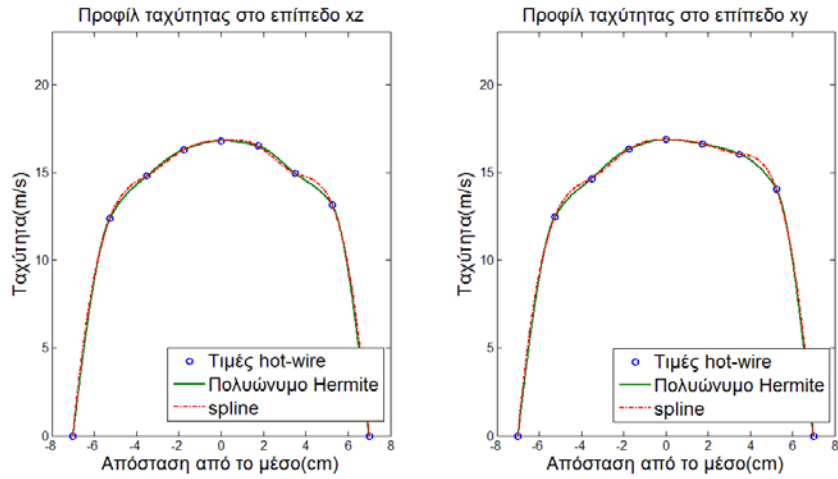
Διάγραμμα 4. 4 Προφίλ ταχύτητας στις 1200RPM λειτουργίας του φουσητήρα



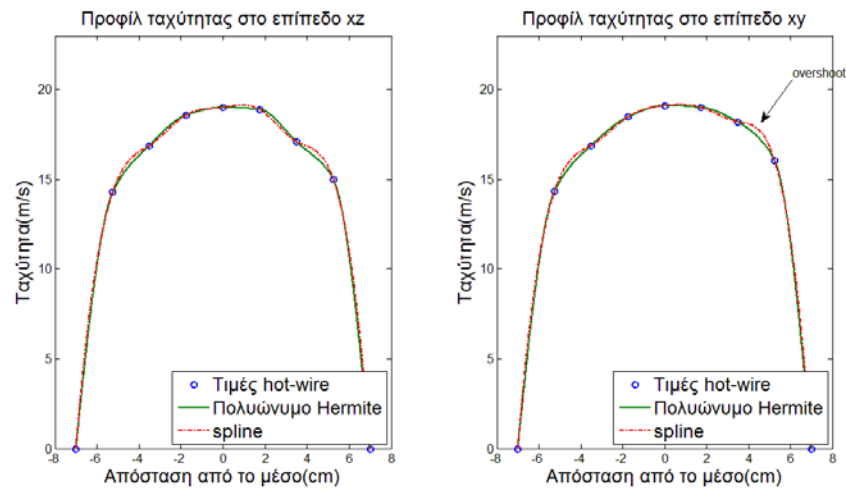
Διάγραμμα 4. 5 Προφίλ ταχύτητας στις 1500RPM λειτουργίας του φουσητήρα



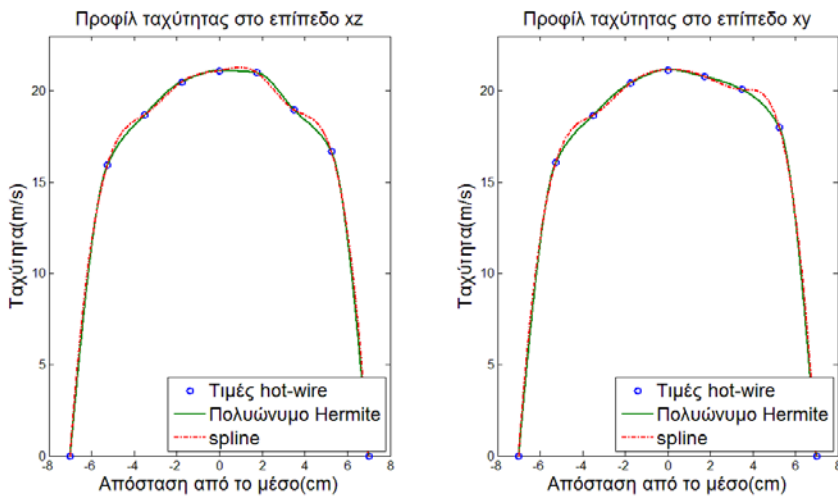
Διάγραμμα 4. 6 Προφίλ ταχύτητας στις 1800RPM λειτουργίας του φουσητήρα



Διάγραμμα 4. 7 Προφίλ ταχύτητας στις 2100RPM λειτουργίας του φουσητήρα

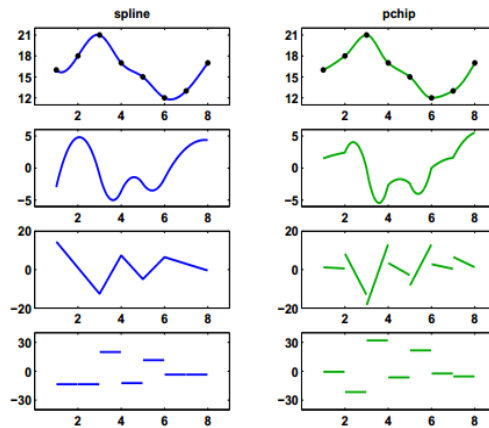


Διάγραμμα 4. 8 Προφίλ ταχύτητας στις 2400RPM λειτουργίας του φουσητήρα



Διάγραμμα 4. 9 Προφίλ ταχύτητας στις 2700RPM λειτουργίας του φουσητήρα

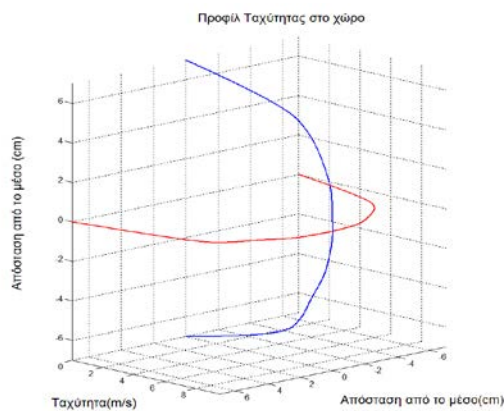
Η παρεμβολή των σημείων για το σχηματισμό των προφίλ ταχυτήτων γίνεται με δύο τρόπους. Με συναρτήσεις παρεμβολής Splines, οι οποίες είναι κατά τμήματα πολυώνυμα τρίτου βαθμού και με πολυώνυμα παρεμβολής Hermite⁸. Οι εντολές στο προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab® είναι η `spline` και η `pchip` αντίστοιχα. Η κύρια διαφορά των δυο εντολών είναι ότι ενώ στην περίπτωση της παρεμβολής `spline` η καμπύλη έχει συνεχή πρώτη και δεύτερη παράγωγο, στην περίπτωση παρεμβολής με πολυώνυμο Hermite (`pchip`) αυτό ισχύει μόνο για την πρώτη παράγωγο. Περισσότερα για τον τρόπο παρεμβολής μπορούν να βρεθούν στο Numerical Computing with Matlab [31].



Σχήμα 4. 2 Καμπύλες παρεμβολής `spline`/`pchip` και οι τρεις πρώτες παράγωγοί τους [31]

Για την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων καθώς και για την εκτίμηση της παροχής, χρησιμοποιούνται αποκλειστικά οι καμπύλες που εξάγονται μέσω της εντολής `pchip` καθώς η τμηματικά κυβική παρεμβολή που εκτελεί, διατηρεί το σχήμα των δεδομένων, ως απόρροια των προαναφερθέντων. Αντίθετα, σε αρκετές περιπτώσεις παρεμβολής με καμπύλη `spline` παρουσιάζεται υπερακόνηση (*overshoot*) των σημείων μέτρησης, με αποτέλεσμα τα προφίλ ταχύτητας να μην ανταποκρίνονται στα θεωρητικά μοντέλα καθώς παρουσιάζουν αφύσικη μορφή (παράρτημα Α).

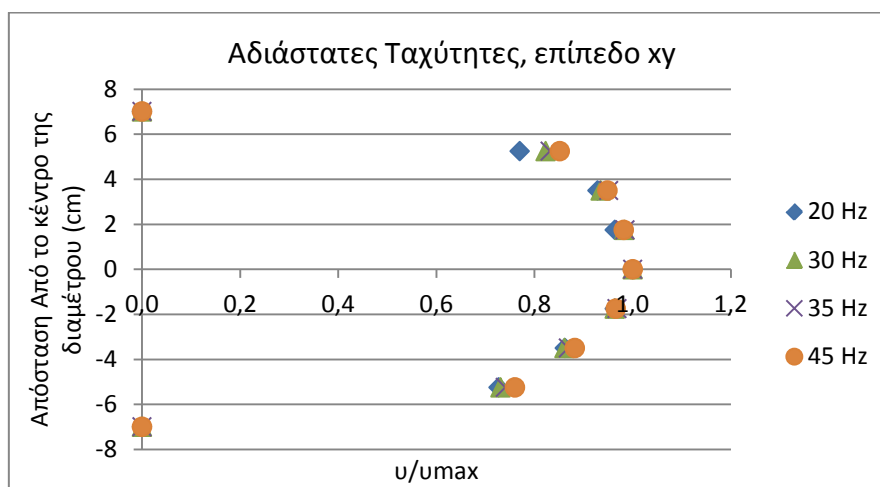
Στο γράφημα 4.1 παρουσιάζονται δύο προφίλ ταχύτητας στο χώρο. Αντιστοιχούν σε 1200RPM λειτουργίας του ηλεκτροκινητήρα.



Γράφημα 4. 1 Προφίλ ταχύτητας στο χώρο

⁸ Piecewise cubic Hermite interpolating polynomial.

Σύμφωνα με τα όσα αναπτύχθηκαν στο παράρτημα Α, αυξανόμενης της παροχής και συνεπώς του αριθμού Reynolds, το προφίλ της ταχύτητας αποκτά περισσότερο πεπλατυσμένο σχήμα. Η αλλαγή αυτή παρατηρείται στη σύγκριση των αδιάστατων ταχυτήτων που παρουσιάζονται στους πίνακες Ε.2, Ε.3 και στο διάγραμμα 4.10.



Διάγραμμα 4. 10 Προφίλ αδιάστατων ταχυτήτων σε 4 διαφορετικές παροχές

4.1.3 Υπολογισμός Ογκομετρικής Παροχής

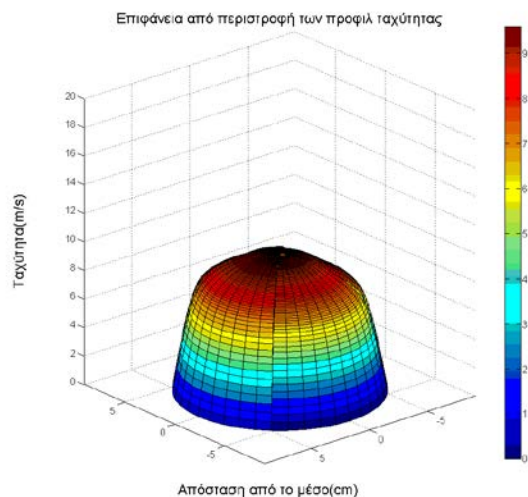
Για την εκτίμηση της ογκομετρικής παροχής σε αγωγό με HWA, θα πρέπει να ληφθεί ακτινικά ολόκληρο το προφίλ της ταχύτητας και να ολοκληρωθεί στην κατεύθυνση της ακτίνας της επιφάνειας διατομής του.

Ο υπολογισμός γίνεται σύμφωνα με το δεύτερο θεώρημα του Guldin: ο όγκος που παράγεται όταν επίπεδη επιφάνεια περιστρέφεται γύρω από άξονα που βρίσκεται στο επίπεδό της, ισούται με το γινόμενο του εμβαδού της επιφάνειας επί το μήκος του τόξου που διαγράφει κατά την περιστροφή το κεντροειδές της επιφάνειας.

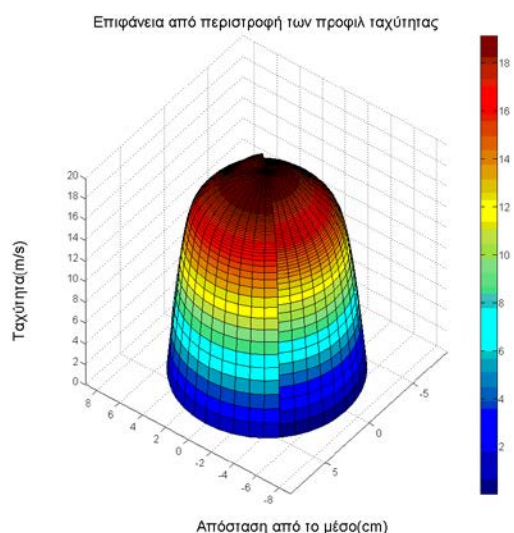
$$V = 2\pi r_c A \quad (4.6)$$

Όπου: V ο όγκος που δημιουργείται από την περιστροφή της επιφάνειας A κατά 2π και r_c η απόσταση του κεντροειδούς της επιφάνειας A από τον άξονα περιστροφής.

Οι καμπύλες (πολυώνυμα Hermite) για τον υπολογισμό της ογκομετρικής παροχής είναι τα προφίλ της ταχύτητας στα επίπεδα xy και xz που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Τα προφίλ περιστρέφονται γύρω από τον άξονα x κατά $90^\circ (\pm 45^\circ)$. Ο όγκος που δημιουργείται από την περιστροφή των επιφανειών παρουσιάζεται στα αντιπροσωπευτικά σχήματα 4.3 και 4.4.



Γράφημα 4. 2 Επιφάνεια εκ περιστροφής των προφίλ ταχύτητας 1200RPM



Γράφημα 4. 3 Επιφάνεια εκ περιστροφής των προφίλ ταχύτητας 2400RPM

Τα αποτελέσματα ογκομετρικής παροχής συγκεντρώνονται στον πίνακα 4.4. Στον ίδιο πίνακα παρουσιάζονται, οι τιμές ογκομετρικής παροχής που δίνει ο αλγόριθμος του ENM (Παράρτημα Γ, Γ.5 Αλγόριθμος ENM), εισάγοντας σε αυτόν τις τιμές των ταχυτήτων που μετρήθηκαν για κάθε παροχή.

n_{ov} (RPM)	Ογκομετρική παροχή (m^3/s)	Ογκομετρική παροχή (m^3/s) Αλγόριθμος ENM
1200	0,0997	0,1012
1500	0,1271	0,1272
1800	0,1538	0,1519
2100	0,1799	0,1744
2400	0,2045	0,2003
2700	0,2276	0,2216

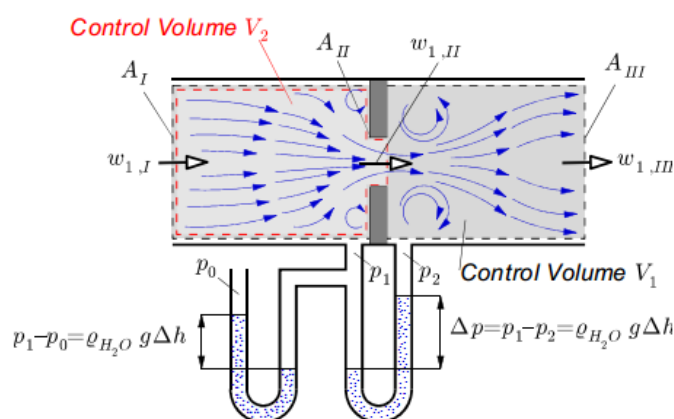
Πίνακας 4. 2 Ογκομετρική παροχή σε διάφορες στροφές λειτουργίας του ηλεκτροκινητήρα

4.1.4 Προφίλ ταχύτητας και ογκομετρική παροχή με το διάφραγμα στο ροή

Στα πειραματικά αποτελέσματα που παρουσιάζονται στη συνέχεια, το διάφραγμα είχε τοποθετηθεί στη διάταξη δοκιμών αέρα, ώστε να υπάρχει ένα μέτρο σύγκρισης της εκτίμησης παροχής που υπολογίζεται μέσω των ταχυτήτων (HWA) και της πραγματικής ογκομετρικής παροχής (τιμή διαφράγματος).

Μετρητικό διάφραγμα

Το μετρητικό διάφραγμα είναι μια συσκευή μέτρησης παροχής ρευστού μέσω μέτρησης διαφοράς πίεσης στα άκρα του. Πρόκειται για μια επίπεδη πλάκα με κυκλική οπή διαμέτρου d , η οποία τοποθετείται κάθετα στη ροή και ομόκεντρα με το σωλήνα διαμέτρου D , όπου πραγματοποιούνται οι μετρήσεις ροής. Το μετρητικό διαφράγματος της διάταξης δοκιμών αέρα είναι προτυποποιημένο με βάση το ISO 5167-2 [26].



Σχήμα 4. 3Μετρητικό διάφραγμα [10]

Η παρουσία του διαφράγματος εντός ροής, δημιουργεί διαφορά στατικής πίεσης (ΔP) μεταξύ δυο σημείων μέτρησης, πριν και μετά από το διάφραγμα (σχήμα 4.3). Η παροχή μάζας q_m υπολογίζεται από τον τύπο:

$$q_m = \frac{C}{\sqrt{1 - \beta^4}} \varepsilon \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2 \Delta P \rho} \quad (4.7)$$

ενώ η ογκομετρική παροχή q_v :

$$q_v = \frac{q_m}{\rho} \quad (4.8)$$

Όπου ρ η πυκνότητα του ρευστού, $\beta = \frac{d}{D}$, C^9 συντελεστής διόρθωσης και ε^{10} συντελεστής αναγωγής που λαμβάνεται από πίνακα του ISO 5167-2 [26].

Η τιμή του συντελεστή C υπολογίζεται από τη συνάρτηση:

$$C = 0.5959 + 0.03\beta^2 - 0.184\beta^8 + 91.71 \frac{\beta^{2.5}}{Re^{0.75}} \quad (4.9)$$

⁹ Discharge coefficient, C

¹⁰ Expansibility factor, ε

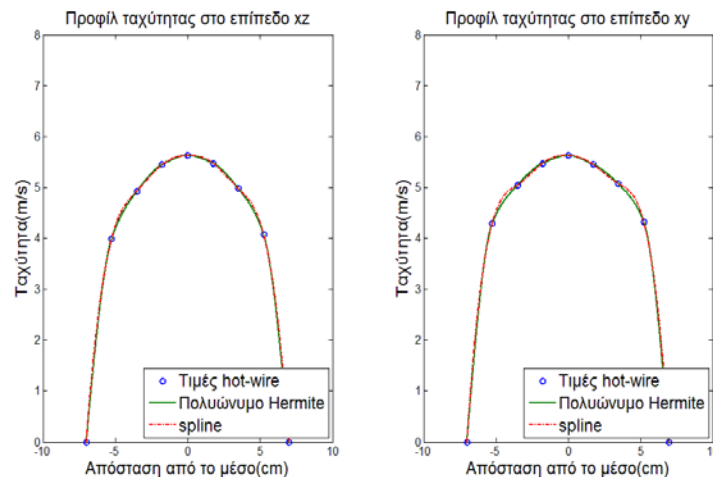
Βαθμονόμηση και υπολογισμός προφίλ ταχύτητας

Για τον υπολογισμό των ταχυτήτων της παρούσας παραγράφου χρησιμοποιήθηκε η καμπύλη βαθμονόμησης με βάση το νόμο του King για $n=0.45$ (πίνακας Ε.4).

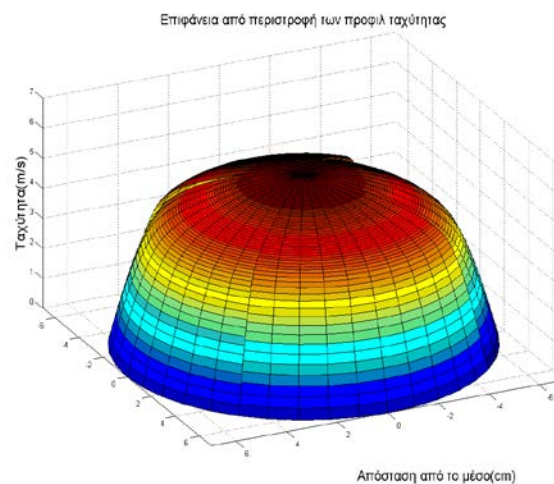
$$v = \left(\frac{E^2 - 1.540}{0.847} \right)^{1/0.45} \quad (4.10)$$

Το μέγιστο σφάλμα της καμπύλης βαθμονόμησης στο εύρος ταχυτήτων των μετρήσεων είναι 3%.

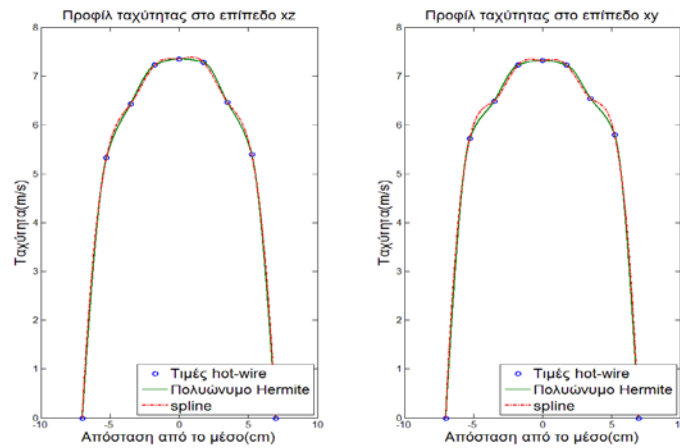
Οι τιμές ταχύτητας για το παρόν πείραμα ελήφθησαν σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφηκε στην παράγραφο 4.1.2. Η εισαγωγή των τιμών ταχύτητας (πίνακας Ε.5) στον αλγόριθμο που αναπτύχθηκε, δίνει τα προφίλ ταχύτητας των διαγραμμάτων 4.11, 4.12, η περιστροφή των οποίων γύρω από τον άξονα x δίνει τον όγκο υπολογισμού των αντίστοιχων παροχών, γραφήματα 4.4, 4.5.



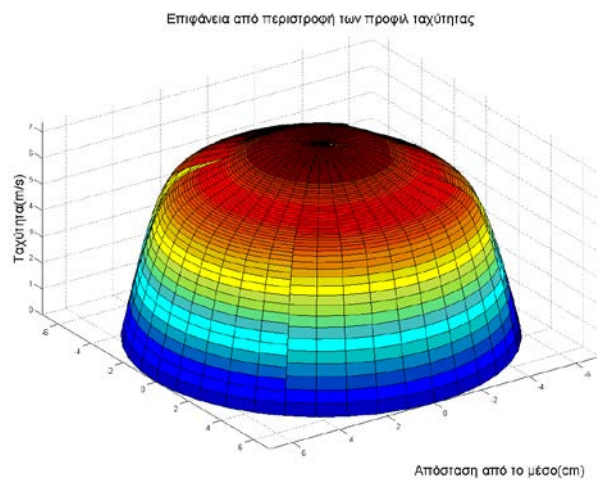
Διάγραμμα 4. 11 Προφίλ ταχύτητας στις 1800RPM λειτουργίας του φυσητήρα



Γράφημα 4. 4 Επιφάνεια εκ περιστροφής των προφίλ ταχύτητας 1800RPM



Διάγραμμα 4. 12 Προφίλ ταχύτητας στις 2400RPM λειτουργίας του φυσητήρα



Γράφημα 4. 5 Επιφάνεια εκ περιστροφής των προφίλ ταχύτητας 2400RPM

Ογκομετρική παροχή

n_{ov} (RPM)	(HWA) Ογκομετρική παροχή μέσω ταχυτήτων (m^3/s)	Ογκομετρική παροχή μέσω διαφράγματος (m^3/s) ISO 5167
1800	0,0633	0,0654
2400	0,0807	0,0820

Πίνακας 4. 3 Εκτίμηση ογκομετρικής παροχής σε σύγκριση με την τιμή του διαφράγματος

Η εκτίμηση της ογκομετρικής παροχής από τις τιμές ταχύτητας του πίνακα E.5 παρουσιάζεται στην πρώτη στήλη του παραπάνω πίνακα, ενώ η ογκομετρική παροχή που υπολογίστηκε από το διάφραγμα προκύπτει από την εξίσωση 4.8. Η απόκλιση του υπολογισμού παρεχόμενου όγκου αέρα μέσω διαφράγματος για ευθυγραμμισμένη ροή σε χρονικά αμετάβλητες συνθήκες, δεν υπερβαίνει τις ± 5 ποσοστιαίες μονάδες.

Ο υπολογισμός της διαφοράς πίεσης που χρησιμοποιείται στην εξίσωση 4.8 έγινε με το μανόμετρο που έχει χρησιμοποιηθεί σε όλες τις βαθμονομήσεις.

Η ποσοστιαία διαφορά υπολογισμού της ογκομετρικής στις 1800 RPM λειτουργίας του ηλεκτροκινητήρα δεν ξεπερνά το 3.5%, ενώ στην περίπτωση των 2400 RPM η διαφορά κυμαίνεται κάτω του 1.5%. Δεδομένου του μέγιστου σφάλματος βαθμονόμησης (3%, αφορά τις ταχύτητες αέρα) και της απόκλισης υπολογισμού ογκομετρικής παροχής μέσω διαφράγματος (5%), μέσω του πειράματος αυτού επιβεβαιώνεται η δυνατότητα υπολογισμού ογκομετρικής παροχής με χρήση HWA.

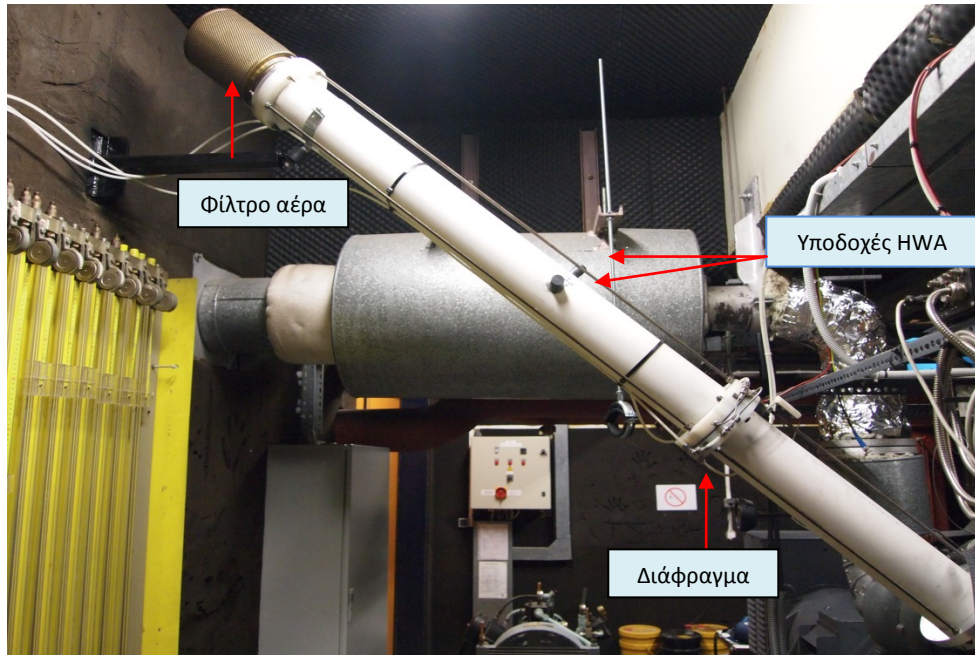
Τονίζεται ότι οι μετρήσεις που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο αυτή αφορούν εξομαλυμένη και σταθερή ροή αέρα. Το γεγονός αυτό δίνει τη δυνατότητα της σταδιακής τοποθέτησης του HWA στα επιθυμητά σημεία μέτρησης της ταχύτητας, αφού η ταχύτητα σε κάθε θέση παραμένει σταθερή (μέση τιμή) καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος.

4.2 Μετρήσεις στην εισαγωγή αέρα κινητήρα

4.2.1 Ηλεκτροπαραγωγό Ζεύγος (H/Z)

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μετρήσεων σημειακών ταχυτήτων αέρα με HWA στην εισαγωγή αέρα κινητήρα, Ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους. Το H/Z αποτελείται από υπερπληρωμένο κινητήρα diesel της εταιρίας MAN, μοντέλο D 2866LE, ονομαστικής ισχύος 230 kW σε 1500RPM στροφές λειτουργίας, που βρίσκεται σε ευθεία σύνδεση με τριφασική γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος DKBN 49/300-4kW.

Η εισαγωγή αέρα στον κινητήρα γίνεται μέσω σωλήνα $\Phi 125 \times 32$, που διαθέτει φίλτρο αέρα στο ελεύθερο άκρο του (σχήμα 4.4). Ο σωλήνας έχει τροποποιηθεί κατάλληλα με αντάπτορες ώστε να μπορεί να παρεμβληθεί το HWA στη ροή αέρα. Οι τροποποιήσεις δίνουν τη δυνατότητα τοποθέτησης του νήματος σε δυο διευθύνσεις, κάθετες μεταξύ τους. Το θερμό νήμα μπορεί να κινηθεί κατά το μήκος των δυο διαμέτρων, άξονας γ και άξονας z . Το συνολικό μήκος του σωλήνα είναι 1.8m. Η κυκλική διατομή μετρήσεων με HWA βρίσκεται σε απόσταση 80cm από το φίλτρο αέρα της εισαγωγής. Σε απόσταση 45cm κατάντι της διατομής μετρήσεων υπάρχει εγκατεστημένο μετρητικό διάφραγμα, σύμφωνα με το πρότυπο ISO5167.



Σχήμα 4. 4 Αγωγός εισαγωγής αέρα στον κινητήρα (H/Z)

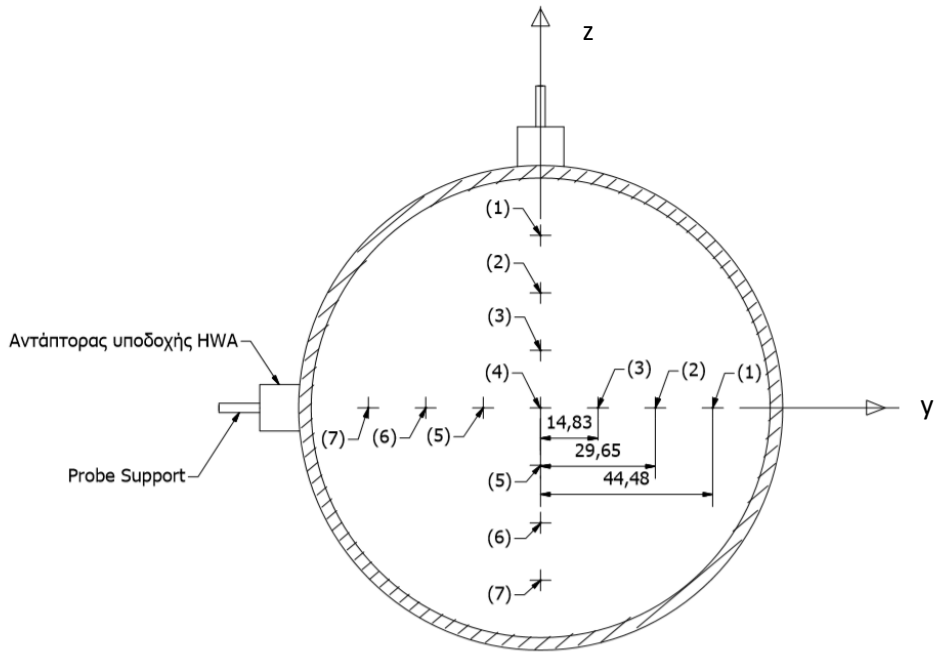
4.2.2 Υπολογισμός προφίλ ταχύτητας αέρα στην εισαγωγή του H/Z

Η καμπύλη βαθμονόμησης που χρησιμοποιείται προκύπτει από το νόμο του King με $n=0.45$ (πίνακας Ε.6). Το μέγιστο σφάλμα βαθμονόμησης είναι 2%.

$$v = \left(\frac{E^2 - 1,586}{0,843} \right)^{1/0,45} \quad (4.11)$$

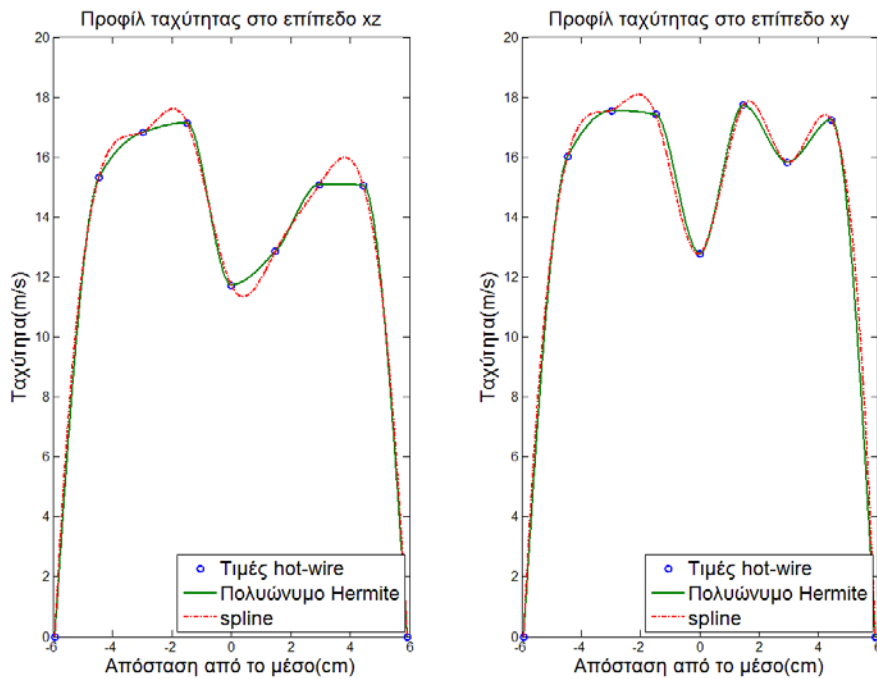
Το φορτίο λειτουργίας του κινητήρα diesel είναι 115kW, που αντιστοιχεί στο 50% της ονομαστικής ισχύος του κινητήρα.

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε τοποθετώντας σταδιακά το HWA στις 14 διακεκριμένες θέσεις μέτρησης. Οι θέσεις μέτρησης βρίσκονται σε δύο κάθετες μεταξύ τους κατευθύνσεις στη διατομή μετρήσεων, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 4.5. Κατά τη διάρκεια του πειράματος υπήρχε εγκατεστημένο φίλτρο αέρα στην εισαγωγή του κινητήρα.



Σχήμα 4. 5 Κυκλική διατομή αγωγού παροχής αέρα Η/Ζ. Θέσεις μετρήσεως (mm) με ΗWA.

Σύμφωνα με τις μετρήσεις ταχύτητας αέρα στα 14 αυτά σημεία (πίνακας Ε.7), προκύπτει το προφίλ ταχύτητας αέρα στην εισαγωγή του κινητήρα diesel, το οποίο παρουσιάζεται στο διάγραμμα 4.13.



Διάγραμμα 4. 13 Προφίλ ταχύτητας στην εισαγωγή αέρα κινητήρα DIESEL

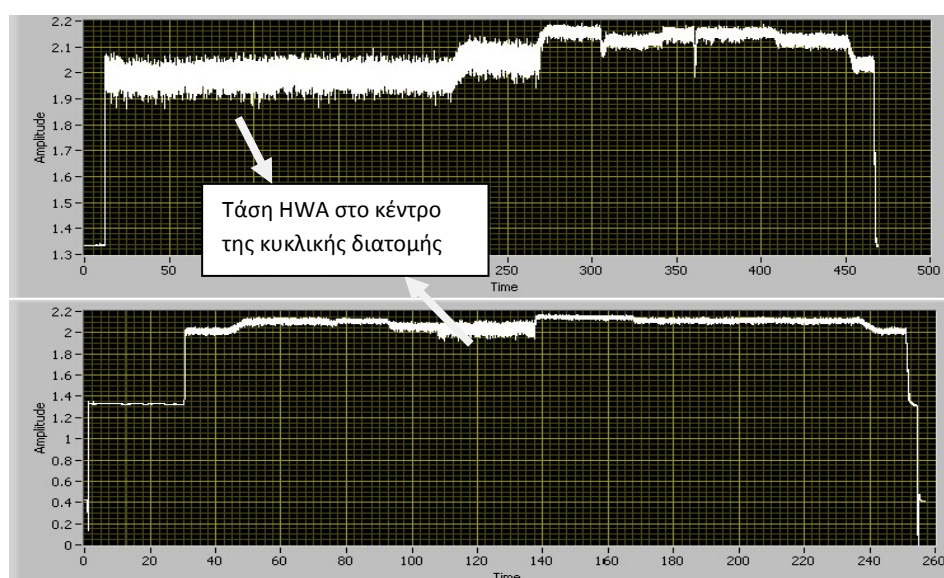
Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Η ροή στην εισαγωγή του κινητήρα δεν είναι εξομαλυμένη και όπως παρουσιάζεται στο διάγραμμα 4.13 δε συνάδει με το αξονοσυμμετρικό μοντέλο ροής σε αγωγούς. Το γεγονός αυτό παρατηρήθηκε και κατά τη διάρκεια του πειράματος. Διαπιστώθηκε πτώση της μετρούμενης τάσης -συνεπώς πτώση της ταχύτητας- στο μέσο της διατομής, όπου σύμφωνα με τα θεωρητικά μοντέλα η ταχύτητα αποκτά τη μέγιστη τιμή της.

Για τον έλεγχο της προαναφερθείσας ανακολουθίας, το στέλεχος υποστήριξης του νήματος περιστράφηκε¹¹ σε όλο το εύρος των $180^\circ(\pm 90^\circ)$, ώστε να διαπιστωθεί αν η κατεύθυνση της ταχύτητας στο μέσο της διατομής είναι παράλληλη κατά το μήκος του σωλήνα (αξονική ροή) ή αν υπάρχει συστροφή της ροής εντός του σωλήνα. Δε διαπιστώθηκε αύξηση της μετρούμενης τάσης.

Η τυπική απόκλιση της μέσης τιμής της ταχύτητας είναι μεγαλύτερη στις μετρήσεις που πραγματοποιούνται στο μέσο της κυκλικής διατομής. Συγκριτικά με τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στην εξομαλυμένη ροή της διάταξης δοκιμών αέρα, η τυπική απόκλιση στην εισαγωγή του κινητήρα λαμβάνει τιμές έως και επτά φορές μεγαλύτερες, απόρροια της υψηλής έντασης τύρβης στο σωλήνα εισαγωγής του κινητήρα.

Η διακύμανση της ταχύτητας είναι μεγαλύτερη όταν το στέλεχος υποστήριξης βρίσκεται στον άξονα y , δηλαδή σε οριζόντια θέση. Το γεγονός αυτό ισχύει για όλες τις θέσεις μέτρησης. Εκτός του επιπέδου της τύρβης, σε ορισμένες θέσεις προκύπτει από το συντονισμό του στελέχους υποστήριξης με τους κραδασμούς της λειτουργίας του κινητήρα, ως απόρροια της μεγάλης ευαισθησίας του οργάνου.



Σχήμα 4. 6 Στιγμιότυπα μετρούμενης τάσης HWA, πρόγραμμα LabVIEW®. (Πάνω: μετρήσεις σε σημεία του άξονα y , Κάτω: Μετρήσεις σε σημεία του άξονα z)

¹¹ Ο άξονας του αισθητηρίου θερμού νήματος πρέπει να τοποθετείται κάθετα στη διεύθυνση της ροής, αφού σε αντίθετη περίπτωση υποεκτιμάται η μετρούμενη ταχύτητα.

4.2.3 Σχεδιασμός συγκλίνοντος αγωγού εισαγωγής αέρα (Bellmouth), επανυπολογισμός των προφίλ ταχύτητας.

Η ανακολουθία μεταξύ μετρούμενων προφίλ ταχύτητας (παράγραφος 4.4.2) και αξονοσυμμετρικού μοντέλου ροής σε αγωγούς εξομαλύνθηκε με την τοποθέτηση Bellmouth στο ελεύθερο άκρο της εισαγωγής αέρα του κινητήρα diesel.

Το σχέδιο που δημιουργήθηκε για την κατασκευή του Bellmouth παρουσιάζεται στο παράρτημα Γ.6. Ο σχεδιασμός του είναι τέτοιος ώστε να διευκολύνει την κατασκευή του από το προσωπικό του ENM και παράλληλα να επιτρέπει την εύκολη συναρμογή του με το σωλήνα εισαγωγής αέρα. Υλικό κατασκευής είναι το πολυαμίδιο (Ερταλόν).

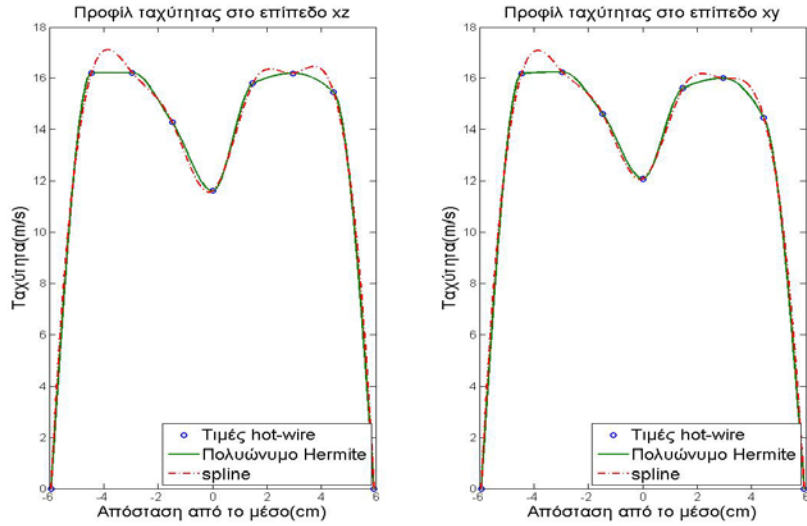


Σχήμα 4. 7 α) Φίλτρο αέρα εισαγωγής Η/Ζ, β) Bellmouth

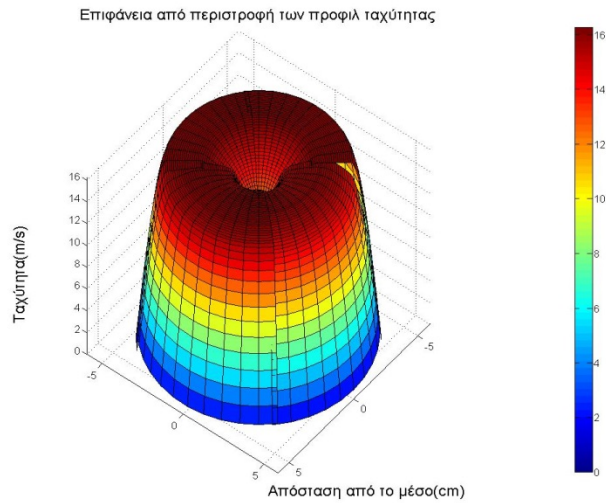
Αρχικά πραγματοποιήθηκε επανάληψη του πειράματος υπολογισμού των προφίλ ταχύτητας αέρα στην εισαγωγή του κινητήρα, με το φίλτρο αέρα στην εισαγωγή. Από το πείραμα αυτό προέκυψε το διάγραμμα 4.14 και το γράφημα 4.6. Οι μη αναμενόμενες (μικρότερες) τιμές ταχύτητας περί το κέντρο του αγωγού συνέχισαν να υφίστανται και για το λόγο αυτό, το φίλτρο της εισαγωγής αφαιρέθηκε και στη θέση του τοποθετήθηκε το Bellmouth που κατασκευάστηκε στο εργαστήριο. Η επανάληψη του πειράματος έδωσε το διάγραμμα 4.15 και το γράφημα 4.7. Συγκεντρωτικός πίνακας με τα δεδομένα των ταχυτήτων μπορεί να βρεθεί στο παράρτημα Ε (πίνακας Ε.8). Από τον πίνακα αυτό και με εισαγωγή των δεδομένων του στον αλγόριθμο που έχει αναπτυχθεί (παράρτημα Γ), υπολογίστηκε η τιμή της ογκομετρικής παροχής αέρα μέσω των ταχυτήτων που μετρήθηκαν με το ΗWA (πίνακας 4.4).

Η καμπύλη βαθμονόμησης που χρησιμοποιήθηκε για τη μετατροπή των τάσεων σε ταχύτητες είναι η εξίσωση 4.11 καθώς οι πειραματικές συνθήκες ήταν παρόμοιες. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε, όπως και τα σημεία μέτρησης της ταχύτητας αέρα, παραμένει ίδια με αυτή που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα (σχήμα 4.5).

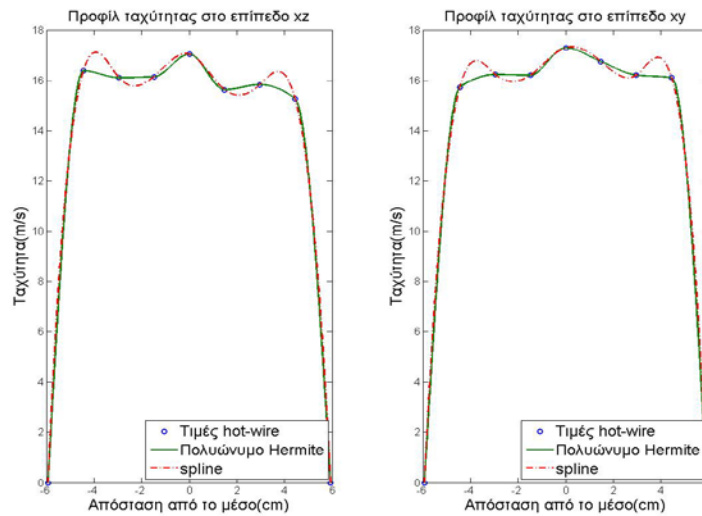
Το φορτίο στον κινητήρα DIESEL κατά τη διάρκεια του πειράματος ήταν 110kW. Ακολούθως παρουσιάζονται τα προφίλ ταχύτητας και οι επιφάνειες υπολογισμού της ογκομετρικής παροχής.



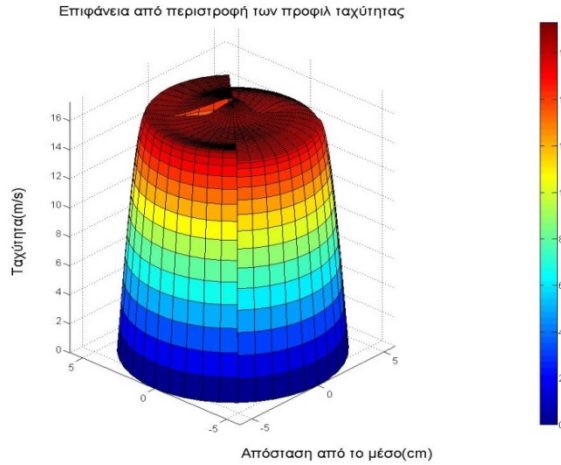
Διάγραμμα 4. 14 Προφίλ ταχύτητας αέρα εισαγωγής H/Z με το φίλτρο αέρα στη διάταξη



Γράφημα 4. 6 Επιφάνεια εκ περιστροφής των προφίλ ταχύτητας στο H/Z (φίλτρο αέρα)



Διάγραμμα 4. 15 Προφίλ ταχύτητας αέρα εισαγωγής H/Z με το bellmouth στη διάταξη



Γράφημα 4. 7 Επιφάνεια εκ περιστροφής των προφίλ ταχύτητας στο H/Z (bellmouth)

Επιπλέον υπολογίστηκε η ογκομετρική παροχή (q_v) μέσω διαφράγματος που υπάρχει στη διάταξη (σχέση 4.8). Η διαφορά πίεσης μετρήθηκε με μανόμετρο στήλης υγρού. Η απόκλιση του υπολογισμού παρεχόμενου όγκου αέρα μέσω του διαφράγματος δεν υπερβαίνει τις ± 5 ποσοστιαίες μονάδες.

Διάταξη	q_v (m^3/s) (μέσω ταχυτήτων) Αλγόριθμος ENM	q_v (m^3/s) Διάφραγμα
Με το φίλτρο αέρα στην εισαγωγή	0,1563	0,1694
Με το Bellmouth στην εισαγωγή αέρα	0,1621	0,1694

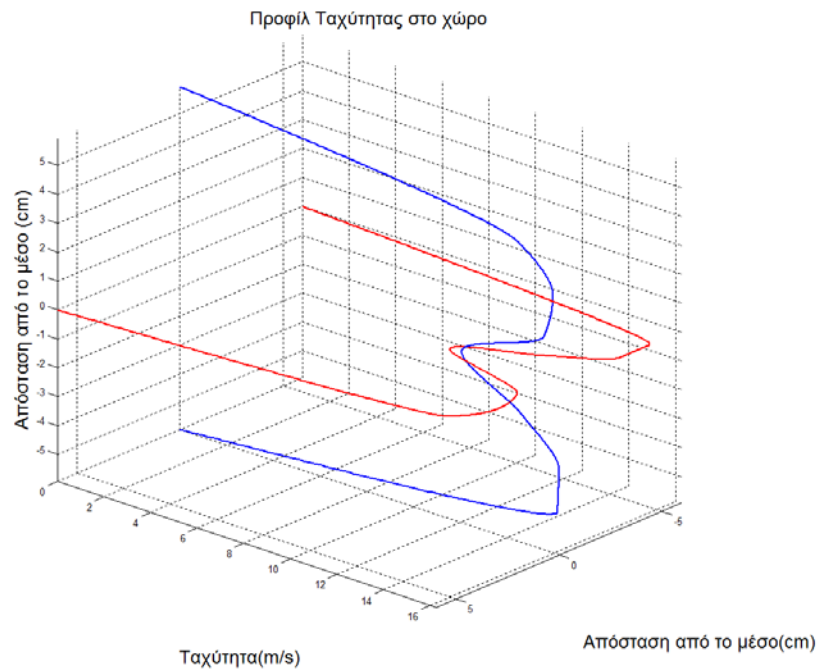
Πίνακας 4. 4 Τιμές ογκομετρικής παροχής

Από τα δεδομένα του παραπάνω πίνακα, γίνεται εμφανές ότι η ακρίβεια μέτρησης ογκομετρικής παροχής με HWA είναι ακριβέστερη σε εξομαλυμένη ροή και εν προκειμένω με το Bellmouth στην εισαγωγή αέρα του κινητήρα.

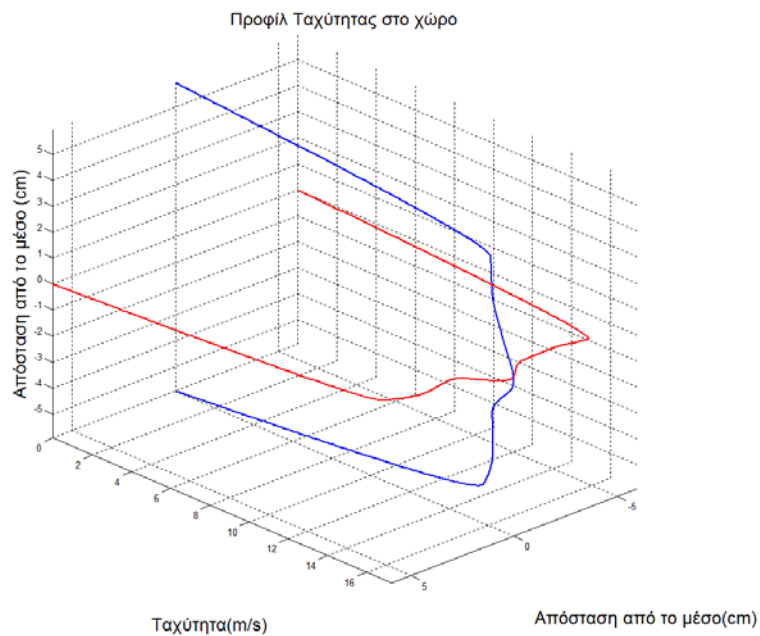
Η μέθοδος υπολογισμού της παροχής μέσω των προφίλ ταχύτητας, ειδικότερα στην περίπτωση ύπαρξης του φίλτρου αέρα στην εισαγωγή, παρουσιάζει σημαντική απόκλιση σε σχέση με την τιμή του διαφράγματος. Η απόκλιση οφείλεται στην ύπαρξη υψηλών επιπέδων τύρβης στη ροή, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε σφάλμα μέτρησης της μέσης σημειακής ταχύτητας. Επιπλέον, ο υπολογισμός της ταχύτητας -πέραν του τυπικού σφάλματος που παρουσιάζεται στους πίνακες - περιέχει σφάλμα βαθμονόμησης $\pm 2\%$.

Σημειώνεται ότι δεν υπήρχε η δυνατότητα μετρήσεων σε απόσταση μικρότερη του 1cm από το τοίχωμα του σωλήνα, καθώς η διαδικασία τοποθέτησής του εντός ροής είναι χειροκίνητη και υπάρχει κίνδυνος θραύσης του οργάνου. Το γεγονός αυτό ενδέχεται να συμβάλει στο μέγεθος της απόκλισης βάσει του αλγορίθμου που αναπτύχθηκε, καθώς σε τυρβώδεις ροές το προφίλ της ταχύτητας αποκτά πεπλατυσμένο σχήμα.

Τέλος οι αποκλίσεις που παρουσιάζονται στις μετρήσεις που γίνονται στο ίδιο σημείο, συγκεκριμένα στο μέσο της διατομής, οφείλονται και στη διαφοροποίηση της ροής μεταξύ των δύο χρονικών περιόδων λήψης δεδομένων.



Γράφημα 4. 8 Προφίλ ταχύτητας αέρα εισαγωγής H/Z στο χώρο. (με το φίλτρο αέρα στην εισαγωγή)



Γράφημα 4. 9 Προφίλ ταχύτητας αέρα εισαγωγής H/Z στο χώρο. (με το φίλτρο bellmouth στην εισαγωγή)

Κεφάλαιο 5

Μετρήσεις στο Πεδίο των Συχνοτήτων

Σύνοψη Κεφαλαίου

Στα πλαίσια των μετρήσεων μη μόνιμων ροών με ΗWA, υπολογίστηκε η συχνότητα στάσιμου ακουστικού κύματος. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στο πεδίο ροής αέρα συμβατικού ανεμιστήρα. Στην αρχή του κεφαλαίου, γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση του θεωρητικού υπόβαθρου στο οποίο στηρίζονται οι υπολογισμοί που ακολουθούν.

5.1 Επεξεργασία σήματος ΗWA στο πεδίο των συχνοτήτων

5.1.1 Στοιχεία ανάλυσης Fourier

Ο μετασχηματισμός Fourier που εφαρμόζεται σε σήματα διακριτού χρόνου ορίζεται ως εξής:

$$X(k) = \sum_{n=0}^N x(n)e^{-j\left(\frac{2\pi}{N}k\right)n} \quad k: \text{ακέραιος}, \frac{2\pi}{N} = \omega \quad (5.1)$$

Η ακολουθία $X(k)$ είναι N -περιοδική.

Η εναλλακτική μορφή του μετασχηματισμού Fourier που χρησιμοποιείται για υπολογισμούς σε ηλεκτρονικούς υπολογιστές, ονομάζεται Διακριτός Μετασχηματισμός Fourier (Discrete Fourier Transform ή DFT) και για ακολουθίες πεπερασμένης διάρκειας παίρνει την ακόλουθη μορφή:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n]W_N^{-k}[n] \quad (5.2\alpha)$$

όπου:

$$W_N^k[n] = W_N^{-kn} = e^{j\frac{2\pi}{N}kn} \quad (5.2\beta)$$

Η αναγωγή του DFT σε πολλούς DFT μικρότερου μήκους, με σκοπό την μείωση του υπολογιστικού κόστους, οδήγησε στην ανάπτυξη του ταχέως μετασχηματισμού Fourier (Fast Fourier Transform ή FFT).

Σημαντικό βήμα στη διαδικασία μετατροπής ενός σήματος από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο των συχνοτήτων, αποτελεί η παραθυροποίηση (windowing) του σήματος. Το είδος του παραθύρου που εφαρμόζεται, έχει επίδραση στη συχνοτική αναπαράσταση που θα

προκύψει, καθώς κάθε πολλαπλασιασμός στο πεδίο του χρόνου, όπως αυτός μεταξύ του σήματος και μιας συνάρτησης παραθύρου, ισοδυναμεί με τη συνέλιξη στο πεδίο της συχνότητας, των μετασχηματισμών Fourier των σημάτων.

5.1.2 Δειγματοληψία HWA, παραθυροποίηση

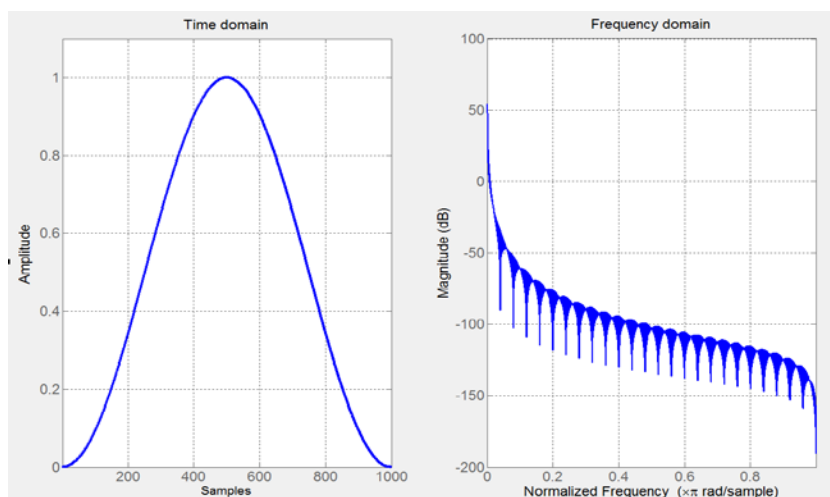
Σύμφωνα με τη θεωρία του Nyquist, η συχνότητα δειγματοληψίας (f_s) πρέπει να είναι τουλάχιστον δύο φορές υψηλότερη, από την υψηλότερη συχνότητα που ενδιαφέρει τη μέτρηση (είναι δυνατό να μετρηθεί, f_0).

$$f_s > 2f_0 \quad (5.3)$$

Η θεωρία Nyquist, οδήγησε στην ρύθμιση της συχνότητας δειγματοληψίας του ανεμομέτρου στο 1kHz, τιμή πολλαπλάσια (\approx δεκαπλάσια) των συχνοτήτων που αναμενόταν να μετρηθούν. Επιλέχθηκε επαρκές χρονικό διάστημα μέτρησης ($>20s$), ώστε να υπάρχει ικανοποιητική πληροφορία στις μετρούμενες χρονοσειρές. Τόσο η συχνότητα δειγματοληψίας, όσο και ο χρόνος μέτρησης, ρυθμίστηκαν στα επιθυμητά μεγέθη μέσω του προγράμματος LabVIEW®.

Το σήμα που λαμβάνεται μέσω της ανεμομετρίας θερμού νήματος (Volts) στο πεδίο του χρόνου, μετασχηματίζεται στο πεδίο των συχνοτήτων, με χρήση του μετασχηματισμού Fourier. Στην παρούσα εργασία, ο μετασχηματισμός Fourier σήματος $E(V)$ υπολογίστηκε στο προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB®, με την συνάρτηση `fft`.

Η παραθυροποίηση του σήματος στο Matlab®, πραγματοποιήθηκε με παράθυρο τύπου Hanning, που επιτυγχάνει την εξασθένιση στα άκρα κάθε πλαισίου που υπόκειται σε `fft`, με σκοπό την ορθότερη συχνοτική αναπαράσταση των δεδομένων.



Διάγραμμα 5. 1 Παράθυρο Hanning

5.2 Μετρήσεις ροής αέρα συμβατικού ανεμιστήρα

5.2.1 Χαρακτηριστικά ανεμιστήρα

Η περιστροφή των πτερυγίων του ανεμιστήρα προσδίδει κινητική ενέργεια στα μόρια του αέρα. Ως αποτέλεσμα, δημιουργείται ροή αέρα που καθορίζεται από τη γεωμετρία της φτερωτής και από την ταχύτητα περιστροφής της. Η ροή είναι στροβιλώδης, μη μόνιμη, αφού η λειτουργία της φτερωτής δημιουργεί περιοδικά φαινόμενα θέτοντας τη ροή του αέρα σε παλλόμενη κίνηση.



Σχήμα 5. 1 Απεικόνιση περιστροφικής κίνησης ροής αέρα στο πεδίο παροχής ανεμιστήρα

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε διακριτές θέσεις του πεδίου παροχής αέρα ανεμιστήρα τριών πτερυγίων. Ο ανεμιστήρας έχει επιλογή λειτουργίας τριών επιπέδων ταχύτητας. Οι στροφές περιστροφής της φτερωτής (RPM) για κάθε επίπεδο μετρήθηκαν με ψηφιακό στροφόμετρο. Η ακρίβεια των μετρήσεων είναι $\pm 5\%$, εξαιτίας της μη σταθερής λειτουργίας του ανεμιστήρα.

Επίπεδο Ταχύτητας	Στροφές (RPM)	Στροφές (Hz)
1	850	14,17
2	1075	17,92
3	1175	19,58

Πίνακας 5. 1 Στροφές περιστροφής φτερωτής

Το μεταλλικό πλέγμα (κάλυμμα προστασίας) του ανεμιστήρα αφαιρέθηκε, ώστε να μην υπάρχει αλλοίωση του πεδίου ροής.

5.2.2 Ανάλυση παροχής αέρα ανεμιστήρα στο πεδίο των συχνοτήτων

Πραγματοποιήθηκαν τρία σετ πειραμάτων. Αρχικά, το θερμό νήμα τοποθετήθηκε σε απόσταση 1.5m από τη φτερωτή του ανεμιστήρα, στη συνέχεια σε απόσταση 30cm από αυτή και τέλος σε απόσταση 8cm. Σε κάθε θέση, ελήφθησαν τιμές και για τρία επίπεδα ταχύτητας περιστροφής της φτερωτής.

HWA σε απόσταση 1.5m από την φτερωτή

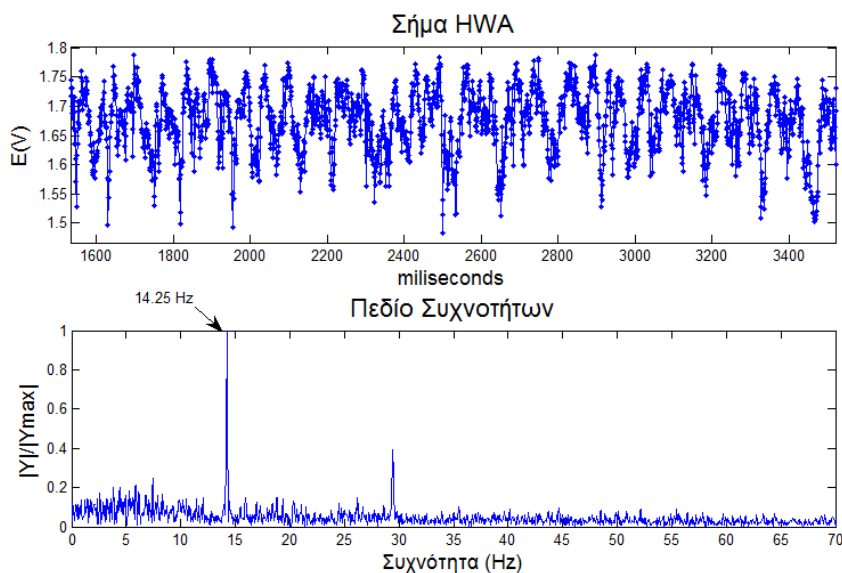
Η τοποθέτηση του θερμού νήματος σε απόσταση 1.5m από τον υπό λειτουργία ανεμιστήρα, δίνει σήμα με αυξημένα επίπεδα θορύβου. Δεν παρατηρείται κάποια περιοδική διακύμανση της μετρούμενης τάσης. Σε αυτή την απόσταση, το θερμό νήμα μπορεί να μετρήσει την μέση ταχύτητα του αέρα, όμως η ανάλυση στο πεδίο των συχνοτήτων δεν δίνει κάποιο αποτέλεσμα, πέραν του υψηλού επιπέδου θορύβου. Παρόμοια αποτελέσματα παρουσιάζονται στην παράγραφο 5.3.

HWA σε απόσταση 0.3m από τη φτερωτή

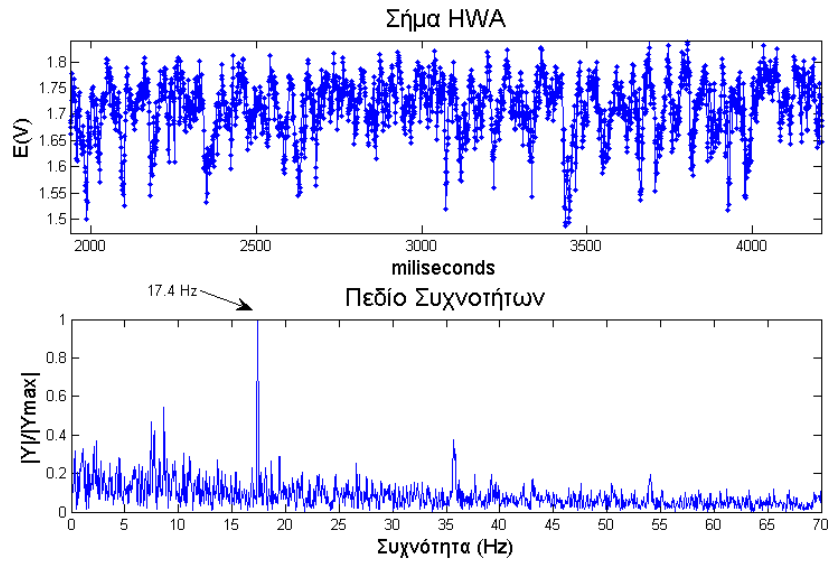
Το ανεμόμετρο θερμού νήματος τοποθετήθηκε σε απόσταση 30cm από τη φτερωτή του ανεμιστήρα. Η ακτινική απόσταση από την προέκταση του άξονα περιστροφής της φτερωτής ήταν 14cm. Ο άξονας του νήματος ήταν κάθετος στον άξονα περιστροφής της φτερωτής.

Στα διαγράμματα που ακολουθούν, παρουσιάζεται το σήμα υπό μορφή Volts που δίνει το ανεμόμετρο, καθώς και η ανάλυση του σήματος στο πεδίο των συχνοτήτων. Το πλήθος μετρήσεων είναι 20000 σημεία για κάθε επίπεδο ταχύτητας. Μεγάλο πλήθος σημείων συνεπάγεται ελάττωση του βήματος $\omega = \frac{2\pi}{N}$ και αύξηση της πυκνότητας του φάσματος που προκύπτει από το μετασχηματισμό Fourier.

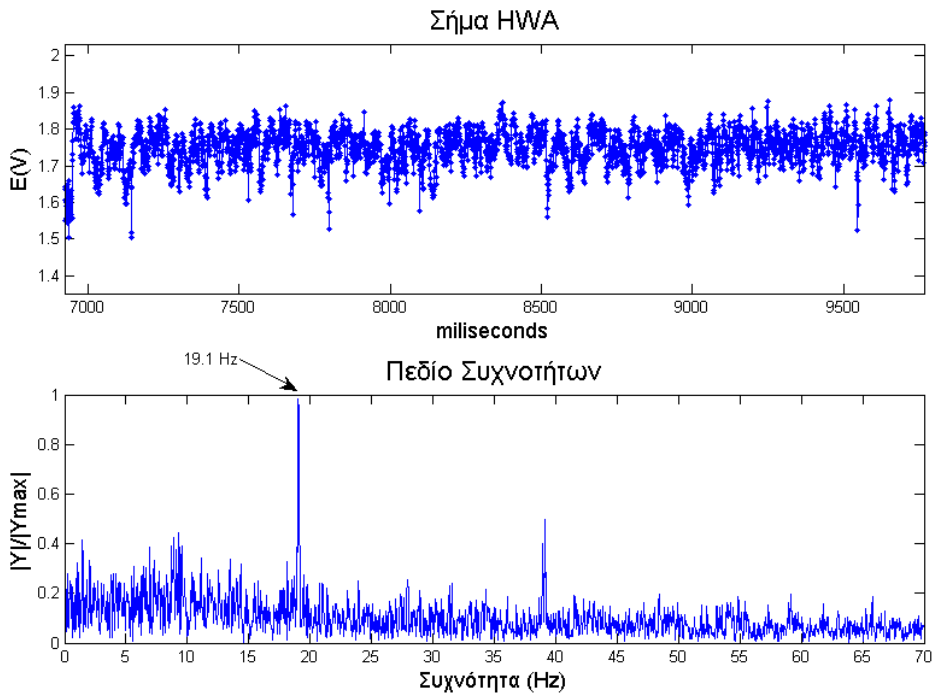
Τα μεγέθη Y και Y_{max} αντιστοιχούν στις απόλυτες τιμές του πίνακα μιγαδικών αριθμών που δημιουργεί ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε στο Matlab, έπειτα από την εφαρμογή της συνάρτησης fft στο σήμα του HWA, $E(V)$. Υψηλές τιμές στον άξονα γ αντιστοιχούν σε αυξημένα επίπεδα ενέργειας στις αντίστοιχες συχνότητες.



Διάγραμμα 5. 2 HWA στο πεδίο παροχής ανεμιστήρα. Ταχύτητα περιστροφής φτερωτής 850RPM



Διάγραμμα 5. 3 HWA στο πεδίο παροχής ανεμιστήρα. Ταχύτητα περιστροφής φτερωτής 1075RPM



Διάγραμμα 5. 4 HWA στο πεδίο παροχής ανεμιστήρα. Ταχύτητα περιστροφής φτερωτής 1175RPM

Η κυρίαρχη συχνότητα (βασική ή θεμελιώδης αρμονική) για κάθε ένα από τα παραπάνω διαγράμματα είναι κατά σειρά: 14.25Hz στις 850 RPM, 17.41Hz στις 1075RPM και 19.14Hz στις 1175 RPM περιστροφής της φτερωτής. Και στα τρία διαγράμματα διακρίνονται οι δεύτερες αρμονικές συχνότητες που είναι πολλαπλάσια των αντίστοιχων θεμελιωδών συχνοτήτων.

Οι θεμελιώδεις συχνότητες που υπολογίστηκαν, προκύπτουν από την περιστροφή της φτερωτής σε συγκεκριμένες στροφές λειτουργίας. Η περιστροφή της, δημιουργεί παλλόμενη κίνηση του αέρα στο πεδίο παροχής του ανεμιστήρα, κίνηση που ανιχνεύεται από το μετρητικό HWA. Η διαφορά φάσης πίεσης - ταχύτητας αέρα είναι $\frac{\pi}{2}$.

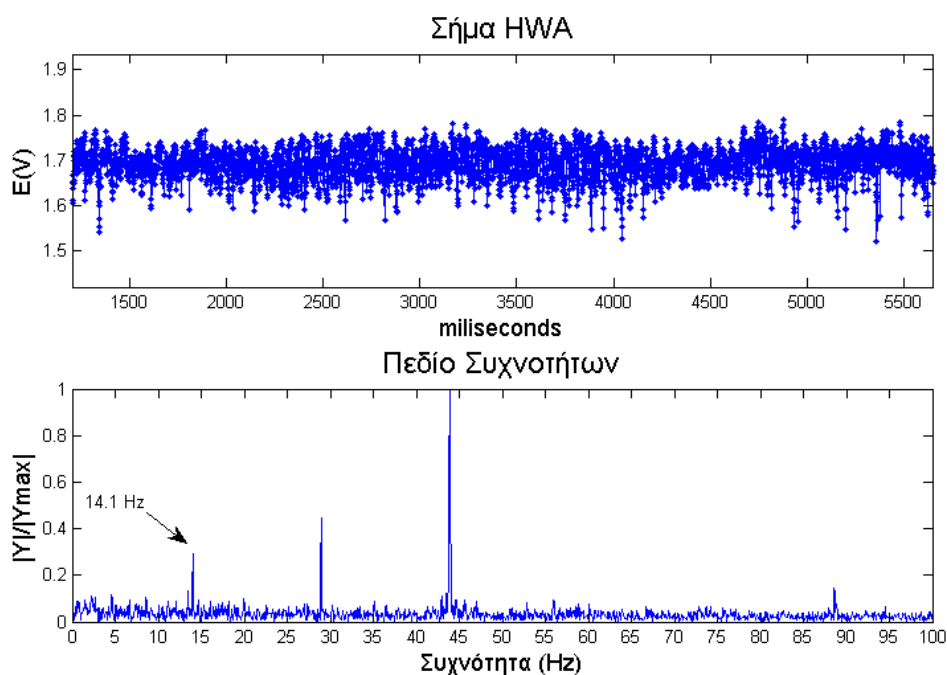
HWA σε απόσταση 0.08m από τη φτερωτή

Το θερμό νήμα τοποθετήθηκε πλησιέστερα στον ανεμιστήρα, σε απόσταση 8cm από τη φτερωτή. Η ακτινική απόσταση από την προέκταση του άξονα περιστροφής της φτερωτής ήταν 3cm.

Όπως παρατηρείται στα διαγράμματα 5.5 έως 5.7, η πρώτη συχνότητα όπου υπάρχει σημαντική αύξηση του επιπέδου ενέργειας παραμένει σταθερή¹² και στα τρία επίπεδα περιστροφής της φτερωτής, σε σχέση με τις μετρήσεις της προηγούμενης παραγράφου.

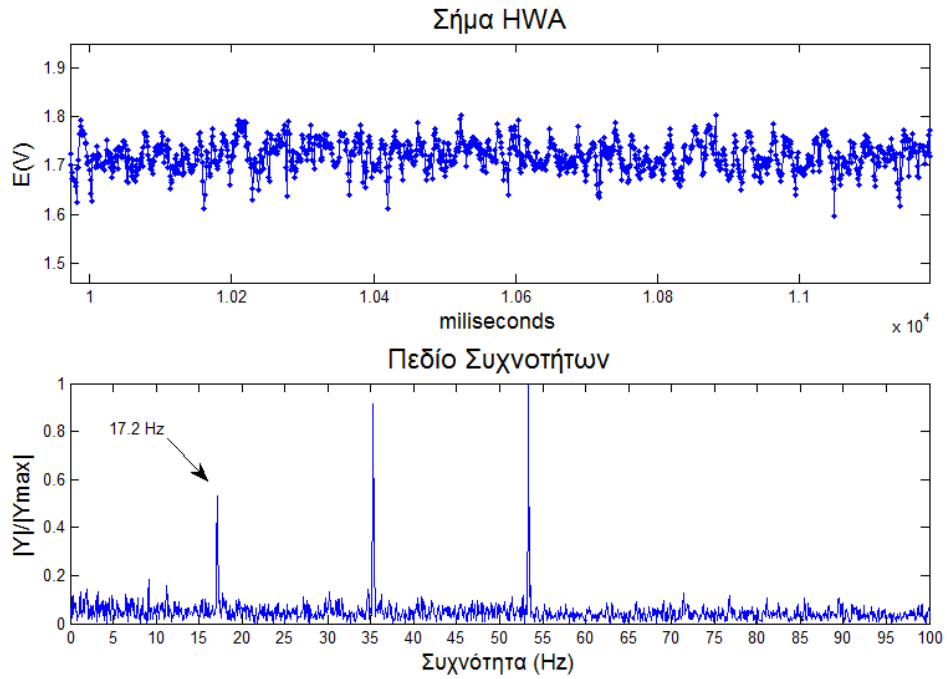
Οι αρμονικές συχνότητες είναι τρεις στις 950RPM και στις 1175RPM λειτουργίας του ανεμιστήρα, ενώ στις 1235 RPM λειτουργίας του, διακρίνονται συνολικά έξι αρμονικές.

Το πλάτος της δεύτερης και της τρίτης αρμονικής (κατά σειρά από τα 0Hz) σε όλες τις στροφές λειτουργίας του ανεμιστήρα αυξάνεται σταδιακά. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει υψηλότερη συγκέντρωση ενέργειας στις συχνότητες αυτές. Υπενθυμίζεται ότι στις μετρήσεις πλησιέστερα στον ανεμιστήρα, η τοποθέτηση του νήματος (ακτινικά) είναι πλησιέστερα στον άξονα περιστροφής, ενώ η φτερωτή διαθέτει τρία πτερύγια.

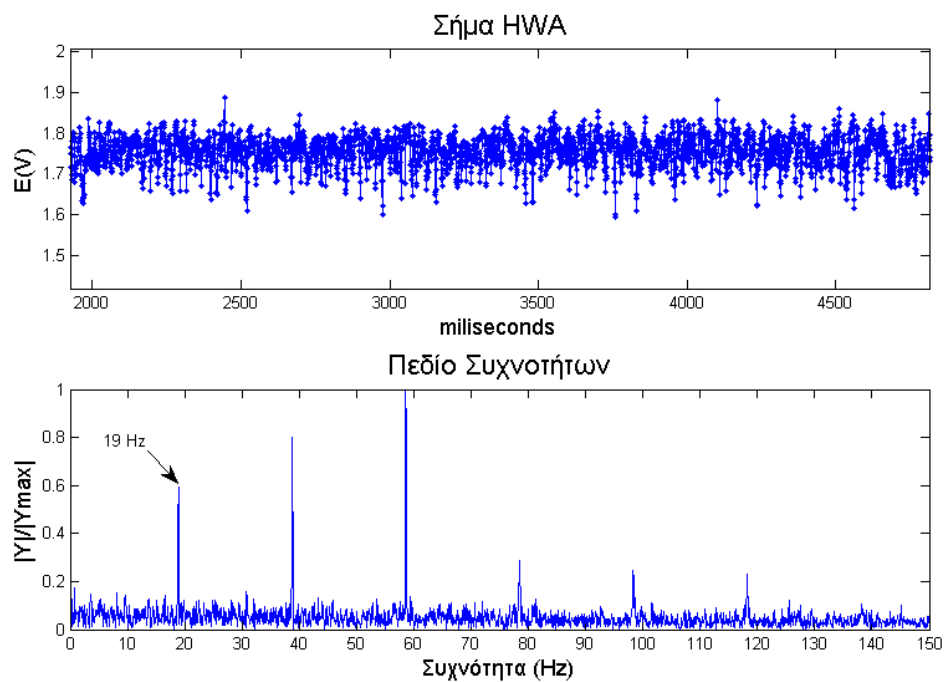


Διάγραμμα 5. 5 HWA στο πεδίο παροχής ανεμιστήρα. Ταχύτητα περιστροφής φτερωτής 850RPM

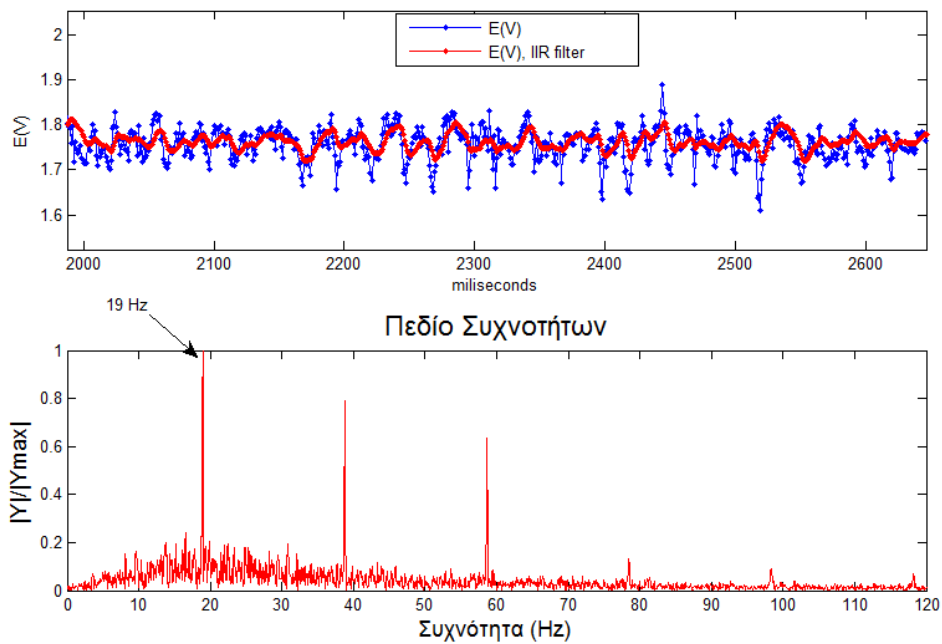
¹² Οι αποκλίσεις που παρατηρούνται οφείλονται στην μικρή διαφοροποίηση της ταχύτητας περιστροφής της φτερωτής.



Διάγραμμα 5. 6 HWA στο πεδίο παροχής ανεμιστήρα. Ταχύτητα περιστροφής φτερωτής 1075RPM



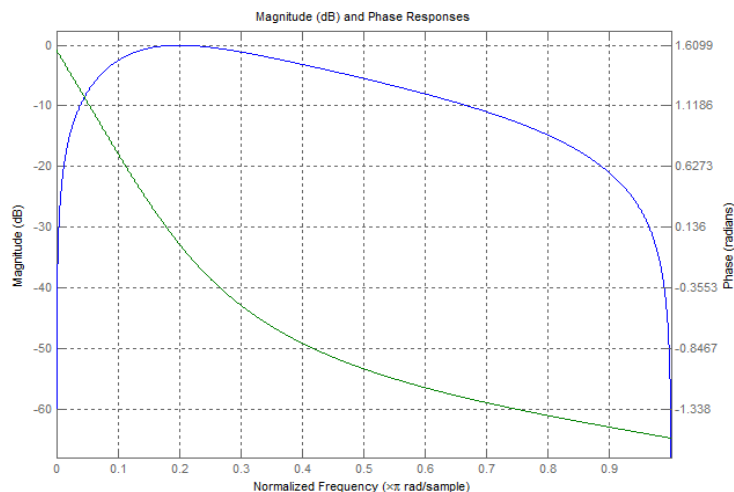
Διάγραμμα 5. 7 HWA στο πεδίο παροχής ανεμιστήρα. Ταχύτητα περιστροφής φτερωτής 1175RPM



Διάγραμμα 5. 8 Fast Fourier Transformation, IIR φίλτρο. Ταχύτητα περιστροφής φτερωτής 1175RPM

Το φίλτρο IIR (Infinite Impulse Response, διάγραμμα 5.8), που εφαρμόστηκε στα δεδομένα του διαγράμματος 5.7 είναι τύπου reaking, single peak. Το φίλτρο μπορεί να εφαρμοστεί με παρόμοια αποτελέσματα στα δεδομένα των διαγραμμάτων 5.5, 5.6.

Η εφαρμογή του συγκεκριμένου φίλτρου IRR, επιτυγχάνει την εξασθένιση του πλάτους (Y/Y_{max}) στο πεδίο των συχνοτήτων γύρω από μια συγκεκριμένη συχνότητα, εν προκειμένω 19Hz, χωρίς να μεταβάλλει τις τιμές των υπόλοιπων συχνοτήτων.



Διάγραμμα 5. 9 Φίλτρο IIR single peak

Σύνοψη αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων στο πεδίο ροής αέρα ανεμιστήρα συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα, επιβεβαιώνοντας τη δυνατότητα μέτρησης μη μόνιμων φαινομένων ροής με HWA.

Όργανο μέτρησης	Στροφόμετρο	HWA	
Απόσταση μέτρησης από φτερωτή	-	0.3 m	0.08 m
<i>Επίπεδο Ταχύτητας</i>	Στροφές (Hz)		
1	14,17	14,25	14,1
2	17,92	17,4	17,2
3	19,58	19,1	19

Πίνακας 5. 2 Σύνοψη μετρήσεων στο πεδίο ανεμιστήρα

Η έμμεση μέτρηση της ταχύτητας περιστροφής της φτερωτής (HWA), κατέστη δυνατή μέσω της συχνοτικής ανάλυσης του πεδίου ροής αέρα, δηλαδή του αποτελέσματος της περιστροφής της φτερωτής υπό συγκεκριμένη ταχύτητα. Οι αποκλίσεις που παρουσιάζονται στα παραπάνω αποτελέσματα, είναι εντός σφάλματος μέτρησης του στροφόμετρου σε όλες τις περιπτώσεις.

5.3 Στάσιμο κύμα

5.3.1 Υπέρθυση κυμάτων, στάσιμα κύματα αέρα

Τα ακουστικά κύματα διαδίδονται στον αέρα με την ταχύτητα του ήχου και ανήκουν στην κατηγορία των διαμηκών κυμάτων. Η παλλόμενη κίνηση του αέρα, εξαιτίας της διάδοσης ενός κύματος, διαταράσσει την κατάσταση ισορροπίας ενός αερίου, δημιουργώντας πυκνώματα και αραιώματα. Τα πυκνώματα και τα αραιώματα οφείλονται στις μικρές κινήσεις των μορίων αέρα κατά τη διάδοση ενός κύματος και δημιουργούνται από τις διακυμάνσεις της πυκνότητας και της πίεσης του αέρα γύρω από τη μέση τιμή τους.

Στάσιμο ακουστικό κύμα προκύπτει από την υπέρθεση δύο κυμάτων που συνυπάρχουν στον ίδιο χώρο και διαδίδονται προς αντίθετες κατευθύνσεις, έχουν ίσο μήκος κύματος και ίσο πλάτος ταλάντωσης.

$$Y = y_1 + y_2 = 2y_0 \sin kx \cos(\omega t + a) \quad (5.4)$$

Όπου $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ο κυματαριθμός, $\omega = 2\pi f$ η κυκλική συχνότητα και a η αρχική φάση ταλάντωσης. Με y_1, y_2 συμβολίζονται τα δυο κύματα, η υπέρθεση των οποίων δημιουργεί το στάσιμο κύμα Y .

Το μήκος κύματος λ είναι αντιστρόφως ανάλογο της συχνότητας, αφού σύμφωνα με τη θεμελιώδη εξίσωση της κυματικής ισχύει:

$$v = \lambda f \quad (5.5)$$

όπου v η ταχύτητα διάδοσης του κύματος, δηλαδή η ταχύτητα του ήχου.

Οι θέσεις κατά το μήκος διάδοσης του κύματος όπου η μετατόπιση των μορίων του αέρα λαμβάνει τη μέγιστη τιμή ονομάζονται κοιλίες, ενώ οι θέσεις όπου η μετατόπιση του αέρα είναι πάντα μηδενική ονομάζονται δεσμοί. Οι κοιλίες μετατόπισης αντιστοιχούν σε δεσμούς πίεσης και αντίστροφα.

5.3.2 Στάσιμα κύματα σε στήλες αέρα

Τα πλευρικά τοιχώματα ενός σωλήνα λειτουργούν ως κυματοδηγοί και δεν επιτρέπουν την διάδοση του ήχου προς όλες τις κατευθύνσεις. Ο ήχος διαδίδεται προς μια μόνο κατεύθυνση, κατά το μήκος του σωλήνα και δε διαχέεται στο χώρο.

Ένα ηχητικό κύμα ανακλάται, όταν συναντά ένα σύνορο που διαχωρίζει δύο μέσα με διαφορετικές ηχητικές σύνθετες αντιστάσεις. Η ανάκλαση αυτή έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία ενός νέου κύματος, που διαδίδεται σε αντίθετη κατεύθυνση από το πρώτο. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται ένα στάσιμο κύμα, αφού στο σύνορο ισχύουν οι δύο συνοριακές συνθήκες κατά τη θεώρηση της ανάκλασης και της μετάδοσης του κύματος. Αυτές είναι: α) η σωματιδιακή ταχύτητα και β) η ακουστική πίεση, είναι συνεχείς στο σύνορο[32].

Το ανοιχτό άκρο ενός σωλήνα αποτελεί μια σύνθετη ηχητική αντίσταση για ένα αρχικό ηχητικό κύμα που διαδίδεται κατά το μήκος του σωλήνα. Έτσι το ηχητικό κύμα ανακλάται. Συγκεκριμένα το ανοιχτό άκρο αποτελεί κοιλία μετατόπισης. Το σύνορο δημιουργείται ως αποτέλεσμα της διαφοράς πίεσης που υπάρχει μεταξύ της πίεσης εντός σωλήνα και της ατμοσφαιρικής πίεσης έξω από αυτόν.

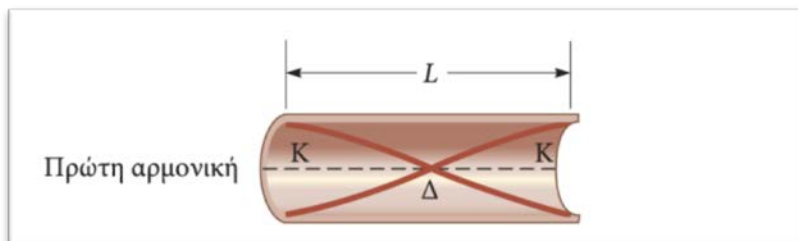
Επομένως, προκύπτει η θεμελιώδης συχνότητα στάσιμου κύματος για αγωγό με ανοικτά άκρα:

$$f_1 = \frac{v_0}{2L}$$

όπου v_0 η ταχύτητα του ήχου και L το μήκος του σωλήνα. Οι συχνότητες (f_n) των αρμονικών της θεμελιώδους συχνότητας είναι:

$$f_n = n f_1, ; \text{ όπου } n = 1, 2, 3, \dots$$

Τέλος, μια οπή κάθετη στο μήκος του σωλήνα αποτελεί κόμβο μετατόπισης.



Σχήμα 5. 2 Θεμελιώδης συχνότητα (πρώτη αρμονική) στάσιμου κύματος. Αγωγός με ανοικτά άκρα [35]

5.3.3 Μέτρηση συχνότητας στάσιμου ακουστικού κύματος

Στο τελευταίο πείραμα που παρουσιάζεται, το αισθητήριο θερμού νήματος χρησιμοποιήθηκε ως όργανο συχνοτικής ανάλυσης ταχύτητας αέρα. Το πείραμα χωρίζεται σε δύο σκέλη και πραγματοποιείται στην πρότυπη διάταξη δοκιμών του ENM.

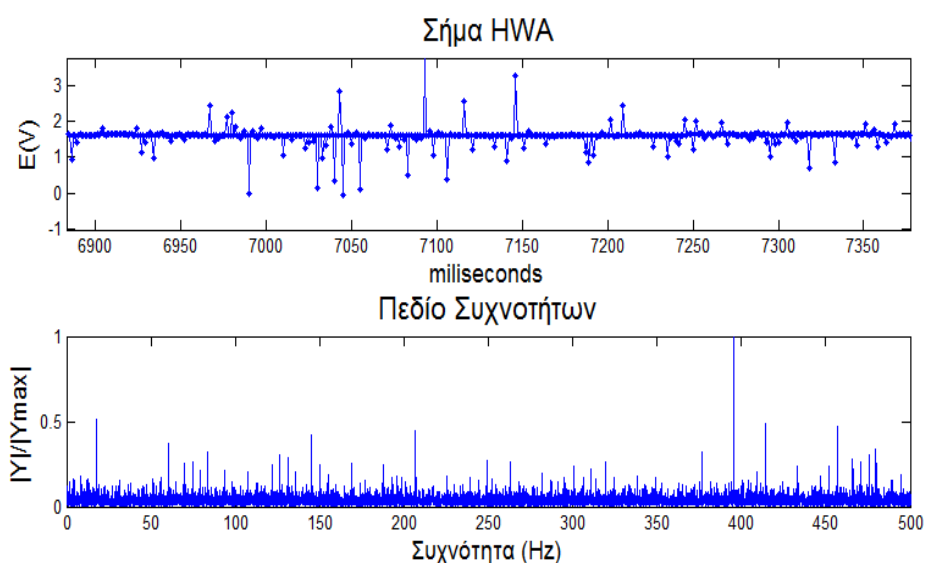
Κατά τη διάρκεια του πρώτου σκέλους εξετάστηκε η διακύμανση της ταχύτητας αέρα εντός της σωλήνωσης. Η παροχή αέρα ήταν σταθερή, αφού σε όλη τη διάρκεια του πειράματος ο φυσητήρας αναρρόφησης αέρα λειτουργούσε υπό σταθερές στροφές.

Στο δεύτερο σκέλος του πειράματος η παροχή διατηρήθηκε σταθερή και παράλληλα επιβλήθηκε διέγερση του πεδίου αέρα μέσω διάνοιξης κυκλικής οπής στον αγωγό. Με τον τρόπο δημιουργήθηκε στάσιμο ακουστικό κύμα κατά το μήκος του. Η συχνότητα του στάσιμου κύματος υπολογίστηκε έπειτα από ανάλυση του σήματος HWA στο πεδίο των συχνοτήτων.

Αγωγός σταθερής κυκλικής διατομής

Το ανεμόμετρο θερμού νήματος τοποθετήθηκε στη ροή του σωλήνα δοκιμών αέρα. Ο ρυθμός παροχής αέρα, ρυθμίστηκε μέσω φυσητήρα αναρρόφησης (Κεφάλαιο 3). Στο διάγραμμα 5.10, παρουσιάζεται η ανάλυση του σήματος HWA στο πεδίο των συχνοτήτων στις 2000RPM ονομαστικής λειτουργίας του φυσητήρα. Η συχνότητα δειγματοληψίας είχε οριστεί στο 1kHz.

Η ανάλυση στο πεδίο των συχνοτήτων δεν υποδεικνύει υψηλή συγκέντρωση ενέργειας σε συγκεκριμένη συχνότητα (υπάρχουν αρκετές κορυφές σε όλο το εύρος συχνοτήτων), ενώ το σήμα που λαμβάνεται δεν παρουσιάζει περιοδικότητα. Οι διακυμάνσεις του σήματος και οι κορυφές που εμφανίζονται στο πεδίο των συχνοτήτων, οφείλονται στις διερχόμενες τύρβες που αλληλεπιδρούν με το θερμό νήμα καθώς και στον τρόπο λειτουργίας του φυσητήρα.



Διάγραμμα 5. 10 HWA στο πεδίο παροχής του σωλήνα δοκιμών αέρα, ENM. Ονομαστικές στροφές λειτουργίας φυσητήρα αναρρόφησης αέρα: 2000RPM

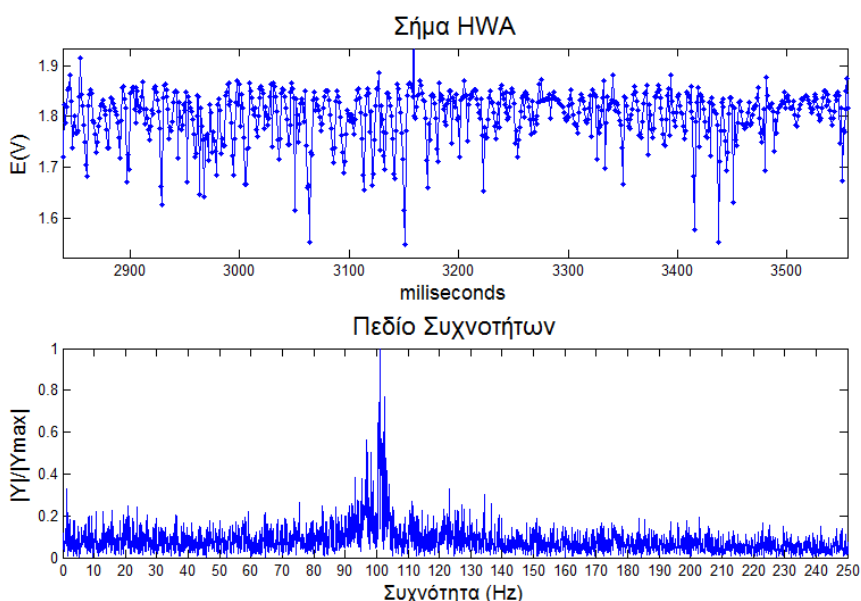
Παρουσιάζεται κορυφή μέγιστου πλάτους στα 400Hz. Το αποτέλεσμα αυτό δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην εξαγωγή περαιτέρω συμπερασμάτων, αφού για τέτοιου μεγέθους συχνότητες (κοντά στα 500Hz) ικανοποιείται οριακά το κριτήριο του Nyquist.

Αγωγός σταθερής κυκλικής διατομής με κυκλική οπή κάθετη κατά το μήκος του

Σε απόσταση 0.5m από την είσοδο του αέρα στη σωλήνωση, υπάρχει πώμα για την τοποθέτηση μετρητικών οργάνων στην ροή. Το πώμα αφαιρέθηκε. Ως αποτέλεσμα, δημιουργήθηκε οπή κυκλικής διατομής διαμέτρου 5cm στον αγωγό, ο οποίος διαρρέοταν από αέρα σταθερής ογκομετρικής παροχής.

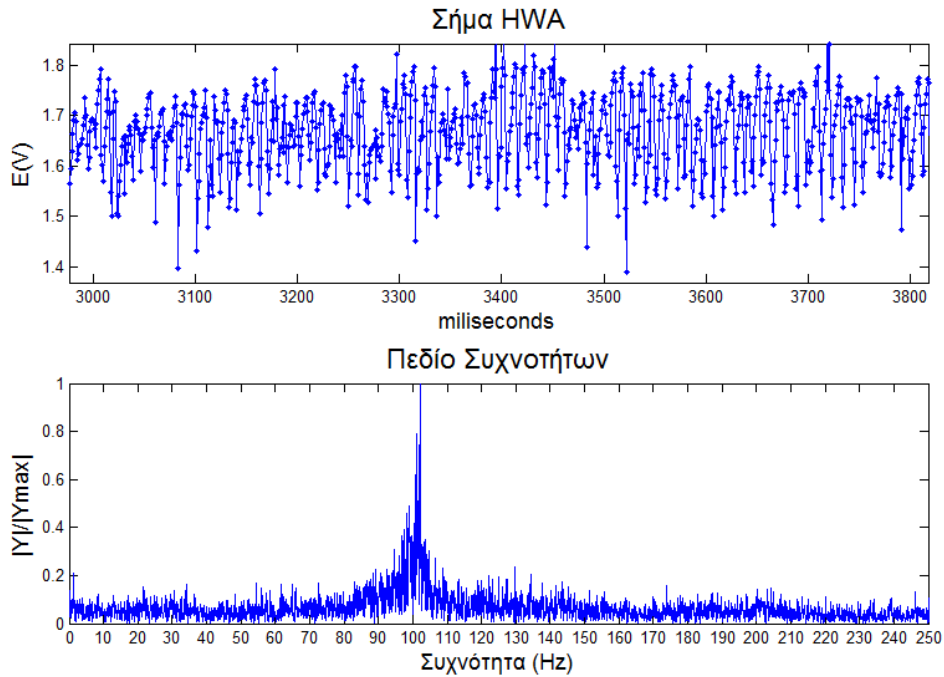
Η ύπαρξη της κυκλικής οπής και η συνεχής ροή αέρα, είχε ως συνεπακόλουθο τη διέγερση του πεδίου ροής αέρα, όπως συμβαίνει στο αντηχείο Helmholtz (Helmholtz resonator). Ως αποτέλεσμα δημιουργείται στάσιμο κύμα κατά το μήκος του αγωγού. Όπως προαναφέρθηκε, η οπή είναι κόμβος για το στάσιμο κύμα αέρα, ενώ τα άκρα του σωλήνα που είναι ανοικτά λειτουργούν ως κοιλίες μετατόπισης.

Το στιγμιαίο σήμα που δίνει το θερμό νήμα στο πεδίο του χρόνου (στον αγωγό με οπή), έχει αποκτήσει σαφή περιοδική διακύμανση (διαγράμματα 5.11, 5.12). Το γεγονός αυτό, είναι εμφανές και στο πεδίο των συχνοτήτων, όπου υπάρχει συγκέντρωση ενέργειας στα 100Hz με κορυφή στα 102Hz.



Διάγραμμα 5. 11 HWA στο πεδίο παροχής του σωλήνα δοκίμων αέρα, ENM. Ονομαστικές στροφές λειτουργίας φυσητήρα αναρρόφησης αέρα: 2400RPM (αγωγός με οπή-κόμβο). Νήμα κάθετα στη ροή.

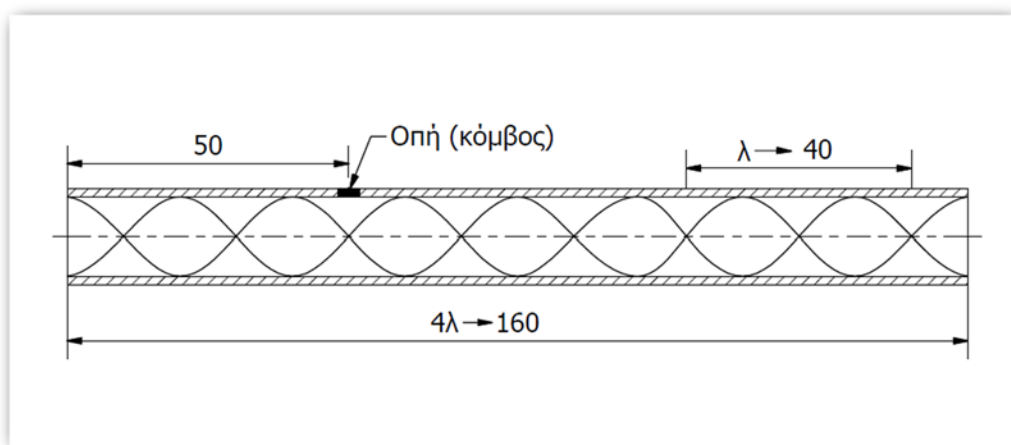
Ο προσανατολισμός του νήματος σε σχέση με τη ροή, δεν επηρεάζει την μετρούμενη αρμονική συχνότητα. Κατά τη διάρκεια του πειράματος που παρουσιάζεται στο διάγραμμα 5.11, ο άξονας του νήματος είναι κάθετος στην ροή αέρα (παράλληλη κατά το μήκος του σωλήνα), ενώ κατά τις μετρήσεις του διαγράμματος 5.12, ο άξονας του νήματος είναι παράλληλος στη ροή. Και στις δυο περιπτώσεις, η συγκέντρωση ενέργειας παρουσιάζεται γύρω από τα 100 Hz.



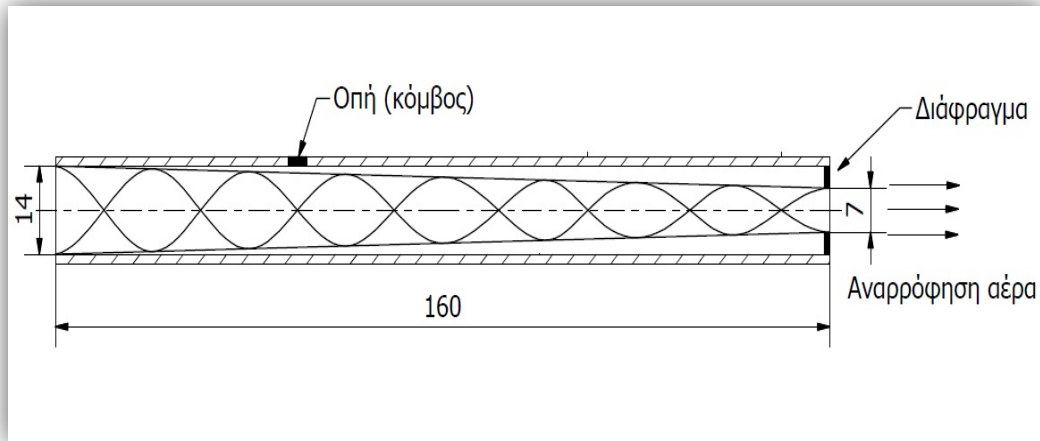
Διάγραμμα 5. 12 HWA στο πεδίο παροχής του σωλήνα δοκίμων αέρα, ENM. Ονομαστικές στροφές λειτουργίας φυσητήρα αναρρόφησης αέρα: 2400RPM. (αγωγός με οπή-κόμβο). Νήμα παράλληλα στη ροή.

Σύμφωνα με το μοντέλο του Greitzer [32] η θεμελιώδης συχνότητα για τον συγκεκριμένο αγωγό είναι $f_1=25\text{Hz}$. Αναλυτικός υπολογισμός της μπορεί να βρεθεί στο παράρτημα Γ.7 [33].

Η αύξηση του πλάτους γύρω από τη συχνότητα των 100Hz που προκύπτει από την ανάλυση στο πεδίο των συχνοτήτων, υποδεικνύει τη μέτρηση της τέταρτης αρμονικής της θεμελιώδους συχνότητας Helmholtz του σωλήνα, η οποία παρουσιάζεται στα σχήματα που ακολουθούν.



Σχήμα 5. 3 Τέταρτη αρμονική συχνότητα στάσιμου κύματος σε στήλη αέρα με κόμβο μετατόπισης. (Αποστάσεις σε cm)



Σχήμα 5. 4 Ενεργός παλλόμενος όγκος (κωνοειδής μορφή) στήλης αέρα με ύπαρξη διαφράγματος. Τέταρτη αρμονική συχνότητα στάσιμου κύματος. (Αποστάσεις σε cm)

Στο σχήμα 5.4 παρουσιάζεται ο ενεργός παλλόμενος όγκος της διαθέσιμης στήλης αέρα (πρότυπη διάταξη δοκιμών ENM) καθώς και η μετρούμενη τέταρτη αρμονική συχνότητα που σχηματίζεται σε αυτόν εξαιτίας της οπής που λειτουργεί ως κόμβος μετατόπισης.

Συμπεράσματα. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Βαθμονόμηση

Η διαδικασία βαθμονόμησης (κεφάλαιο 3) του hot wire είναι μια χρονοβόρος διαδικασία που αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι κάθε πειράματος και καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τα πειραματικά αποτελέσματα (μετρούμενα μεγέθη). Για το λόγο αυτό προτείνεται η ανάπτυξη φορητής συσκευής βαθμονόμησης. Πέραν της φορητότητας, η οποία θα εξασφαλίζει τη μικρότερη δυνατή απόκλιση μεταξύ των πειραματικών συνθηκών και των συνθηκών βαθμονόμησης, μια τέτοια διάταξη βαθμονόμησης μπορεί να εξοικονομήσει χρόνο στο μελετητή και να ελαχιστοποιήσει τα σφάλματα βαθμονόμησης.

Ογκομετρική παροχή

Όπως παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 4, η μέθοδος υπολογισμού της ογκομετρικής παροχής με χρήση HWA γίνεται μέσω των προφίλ ταχύτητας και απαιτεί την παρεμβολή των σημειακών ταχυτήτων σε σειρά σημείων μιας διατομής. Μικρότερη απόκλιση μεταξύ μετρούμενης και πραγματικής ογκομετρικής παροχής προκύπτει στην περίπτωση που η ροή είναι εξομαλυμένη. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται από τα πειραματικά αποτελέσματα στην εισαγωγή αέρα κινητήρα Diesel (H/Z), κεφάλαιο 4, όπου παρατίθενται οι τιμές της ογκομετρικής παροχής βάσει ταχύτητας και βάσει μετρητικού διαφράγματος. Στα συγκεκριμένα πειραματικά αποτελέσματα, η εξομάλυνση της ροής επιτεύχθηκε με bellmouth που σχεδιάστηκε για το σκοπό αυτό.

Αν και η HWA είναι μια επεμβατική μέθοδος, η απαίτηση τροποποιήσεων για μετρήσεις εντός δικτύων παροχής αέρα περιορίζεται σε διάνοιξη οπών, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα παρεμβολής του μετρητικού στη ροή. Η ανάπτυξη βραχίονα/οδηγού του νήματος εντός ροής, θα διευκόλυνε την τοποθέτησή των αισθητηρίων πλησίον των τοιχωμάτων ενός αγωγού, όπου μπορούν να μετρηθούν σημειακές ταχύτητες και ποσότητες τύρβης που θα συντελέσουν στον ακριβέστερο υπολογισμό των προφίλ ταχυτήτων, όπως αυτά αναπτύχθηκαν στο κεφάλαιο 4.

Σημειακές στιγμιαίες μετρήσεις

Η σημειακή στιγμιαία ταχύτητα ρευστού αποτελεί το κύριο μετρούμενο μέγεθος της ανεμομετρίας θερμού νήματος. Η υψηλή απόκριση συχνότητας και η ευαισθησία του αισθητηρίου, που επιβεβαιώνεται και από τα πειράματα του κεφαλαίου 5, μπορεί να βρει εφαρμογή σε μελλοντικές έρευνες για τη μελέτη των τυρβών που δημιουργούνται στην πλειονότητα των ροών (πειραματική τεκμηρίωση και μελέτη των μοντέλων της τύρβης), καθώς και για μεταβατικά (π.χ. compressor surge) και μόνιμα φαινόμενα που συμβαίνουν στα κυκλώματα παροχής αέρα κινητήρων. Επιπλέον το θερμό φιλμ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό τάσεων Reynolds. Τόσο το θερμό νήμα, όσο και το θερμό φιλμ δύνανται να αποτελέσουν το κύριο μετρητικό όργανο σε μελλοντικές εργασίες για μετρήσεις της ροής γύρω από πειραματικά μοντέλα και φτερωτές συμπιεστών.

Βιβλιογραφία

- [1] G. Comte-Bellot. (1977) Hot-Wire and Hot-Film Anemometers, Measurement of Unsteady Fluid Dynamic Phenomena. Hemisphere Publishing Co.
- [2] J. Boussinesq. (1905) An Equation for the Phenomena of Heat Convection and an Estimate of the Cooling Power of Fluids. Journal de Mathematiques
- [3] L. V. King. (1914) On the Convection of Heat from Small Cylinders in a Stream of Fluid. Phil. Trans. of Roy. Soc.
- [4] J.O. Hinze. (1975) Turbulence. McGraw-Hill Book Company, New York.
- [5] A.E. Perry. (1982) Hot-Wire Anemometry. Oxford science publications.
- [6] Charles G. Lomas. (1985) Fundamentals of Hot Wire Anemometry. Cambridge
- [7] H.H. Bruun. (1996) Hot-Wire Anemometry, Principles and Signal Analysis. Oxford science publications.
- [8] Peter Elgar. (2003) Αισθητήρες Μέτρησης και Ελέγχου. Μετάφραση Ιωάννης Πεταλάς. Εκδόσεις Τζιόλα.
- [9] Julian W. Gardner. Μικροαισθητήρες: Αρχές και Εφαρμογές. Μετάφραση Νατάσα Νταλαούτη. Εκδόσεις Τζιόλα.
- [10] Ν. Θ. Αλεξανδράκης. (2012) Μέτρηση φυσικών μεγεθών, Μέτρηση Θερμοκρασίας, Πίεσης, Ροής. Εργαστήριο Ναυτικής Μηχανολογίας ΕΜΠ. [Διαδίκτυο] Διαθέσιμο από: <http://www.lme.ntua.gr> [Πρόσβαση: 1 Ιουνίου 2014]
- [11] Department of Fluid Mechanics. (2012) Hot-Wire Anemometry. [Διαδίκτυο] Budapest University of Technology and Economics. Διαθέσιμο στο: <http://www.ara.bme.hu/oktatas/tantargy/NEPTUN/BMEGEATMW03/2012-2013-II/Presentation/HotWire%20Anemometr.pdf> [Πρόσβαση: 30 Σεπτεμβρίου 2014]
- [12] Thermo-Systems Inc. (Minnesota). Hot Film and Hot Wire Anemometry, Theory and Application, Bulletin TB5 [Διαδίκτυο] Διαθέσιμο από: <http://155.178.136.36/pdf/fsr-0167.pdf> [Πρόσβαση: 10 Ιουνίου 2014]
- [13] Τσαγγάρης Σωκράτης. (2005) Μηχανική των Ρευστών. Εκδόσεις Συμεών
- [14] Δημητρίου Ι.Δ. (2008) Ρευστομηχανική. Εκδόσεις Fountas
- [15] Στάμου Αναστάσιος Ι. (2009) Εφαρμοσμένη Υδραυλική, Ροή υπό Πίεση και με Ελεύθερη Επιφάνεια. Εκδόσεις Παπασωτηρίου
- [16] Jim Bowser. (2014) Thermal Mass Flow Measurement in Compressed Air Applications. [Διαδίκτυο] Innovative Control Company. Διαθέσιμο από: <http://innovativecontrols.com/blog/principles-thermal-mass-flow-measurement> [Πρόσβαση: 15 Σεπτεμβρίου 2014]
- [17] Milton Van Dyke. (1982) An Album of Fluid Motion. Stanford California. The Parabolic Press. [Διαδίκτυο] Διαθέσιμο από: http://web.mit.edu/swangroup/footer/album_fluid.pdf [Πρόσβαση 1 Οκτωβρίου 2014]
- [18] Μ. Κώστογλου. (2009) Εργαστηριακές Ασκήσεις Χημικής Τεχνολογίας. Εκδόσεις Τζιόλα

- [19] Γ. Μπεργελές, Δ. Παπαντώνης, Σ. Τσαγγάρης. (1998) Τεχνικές Μετρήσεις Ρευστομηχανικών Μεγεθών. Εκδόσεις Συμείων
- [20] Finn E. Jørgensen. (2004) How to measure turbulence with Hot-Wire Anemometers, A basic guide. Dantec Dynamics A/S
- [21] Ξ. Κακάτσιος. (2006) Αρχές Μεταφοράς Θερμότητας και Μάζης. Εκδόσεις Συμείων
- [22] L.S.G. Kovasznay. (1950) The Hot-Wire Anemometer in Supersonic Flows. [Διαδίκτυο] Journal of the Aeronautical Sciences.
- [23] P.C. Stainback, K.A. Nagabushana. (Χρονολογία μη διαθέσιμη) Review of Hot-Wire Anemometry Techniques and the Range of their Applicability for Various Flows. [Διαδίκτυο] Electronic Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME. Διαθέσιμο από: <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19950019279.pdf> [Πρόσβαση: 30 Σεπτεμβρίου 2014]
- [24] Technical Note: Constant Voltage Anemometry. [Διαδίκτυο] Διαθέσιμο από: <http://www.taosystem.com/products/HWCVA-TN.pdf> [Πρόσβαση: 6 Ιουνίου 2014]
- [25] Ron F. Blackwelder. (1981) Hot-wire and hot film anemometry, από το: Methods of Experimental Physics: Fluid Dynamics. Academic Press, New York
- [26] International Standard. (2003) ISO5167 Second edition 2003-03-01. Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full. Part 1: General principles and requirements. Part 2: Orifice plates
- [27] Ν.Π. Κυρτάτος, Ι. Π. Ιωαννίδης. (1996) Συστήματα και βοηθητικά μηχανήματα πλοίου. Εκδόσεις ΕΜΠ
- [28] William K. George, Paul D. Beuther, Aamir Shabbir. Polynomial Calibrations for Hot Wires in Thermally Varying Flows. [Διαδίκτυο] Department of Mechanical and Aerospace Engineering, University at Buffalo. Διαθέσιμο από: http://www.turbulence-online.com/Publications/Journal_Papers/Papers/GBS89.pdf [Πρόσβαση: 15 Σεπτεμβρίου 2014]
- [29] Fernholz H, Janke G, Schober M, Wagner P, Warnak D. (1996) New developments and applications of skin-friction measuring techniques
- [30] Σ.Ε. Σιμόπουλος. (1989) Μετρήσεις Τεχνικών Μεγεθών. Εκδόσεις ΕΜΠ
- [31] Cleve B. Moler. (2004) Numerical Computing with Matlab. [Διαδίκτυο] Διαθέσιμο από: <http://www.mathworks.com/moler/chapters.html> [Πρόσβαση: 20 Σεπτεμβρίου 2014]
- [32] Η.Ι. Ράιν. (1991) Φυσική των ταλαντώσεων και των κυμάτων. Εκδόσεις συμμετρία
- [33] E. M. Greitzer, C. S. Tan, M. B. Graf. (2004) Internal flow, Concepts and Applications. Cambridge University Press
- [34] Ν. Θ. Αλεξανδράκης. Χειρόγραφες σημειώσεις. Unsteady flow in a channel, (An extract from Greitzer, Tan, Graf, Internal flow)
- [35] R.A. Serway, J.W. Hewett. (2008) Physics for Scientists and Engineers. [Διαδίκτυο] Διαθέσιμο από http://finedrafts.com/files/CUNY/Physics/Physics_for_Scientists_Engineers_Modern%20Physics_9th%20Ed_Serway_Jewett.pdf.

Παράρτημα Α

Σύνοψη παραρτήματος

Στο παράρτημα Α γίνεται μια σύντομη παρουσίαση αντιπροσωπευτικών μετρητικών οργάνων ροών, καθώς και των βασικότερων εφαρμογών της ανεμομετρίας θερμού νήματος. Το παράρτημα ολοκληρώνεται με παράθεση βασικών στοιχείων μηχανικής των ρευστών και μεταφοράς θερμότητας.

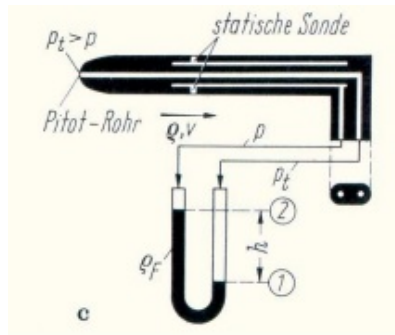
A.1 Χαρακτηριστικά μετρητικά όργανα ροών

Υπάρχουν εν γένει δυο διαφορετικές περιοχές όπου χρησιμοποιείται η τεχνολογία αισθητήρων: η συλλογή πληροφοριών και ο έλεγχος συστημάτων. Στα πλαίσια αυτής της εργασίας, η ανεμομετρία θερμού νήματος χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση φυσικών μεγεθών που χαρακτηρίζουν τη ροή του αέρα (συλλογή πληροφοριών).

Πληθώρα συμβατικών αισθητηρίων μεθόδων χρησιμοποιούνται στη μέτρηση της ροής. Αυτές περιλαμβάνουν την ανίχνευση της ροής μέσω διαφορικής πίεσης (π.χ. μετρητές διαφράγματος, σωλήνας Venturi, σωλήνας Pitot ή Pitot-Static), τη μηχανική ανίχνευση της ροής (π.χ. περιστροφικά πτερύγια ή πτερύγια με ελατήρια), τη θερμική ανίχνευση ροής (π.χ. ροόμετρο Tomas, ανεμόμετρο θερμαινόμενου νήματος), τους αισθητήρες διάδοσης υπερήχων (π.χ. μετατόπιση Doppler ή χρόνου μετάβασης) και τους μαγνητικούς αισθητήρες ροής [9]. Ακολουθεί μια συνοπτική παρουσίαση χαρακτηριστικών επεμβατικών και μη επεμβατικών τεχνικών μέτρησης ταχυτήτων ρευστού.

Ο σωλήνας Pitot χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά το 1732. Αποτελείται από έναν απλό σωλήνα, του οποίου το ένα άκρο είναι ανοικτό προς το ρευστό ενώ το άλλο συνδέεται σε μανόμετρο. Η τοποθέτηση του σωλήνα στο ρεύμα του ρευστού επιτρέπει τη μέτρηση της ολικής πίεσης και εάν η στατική πίεση είναι γνωστή και δε μεταβάλλεται, μέσω της εξίσωσης Bernoulli γίνεται ο υπολογισμός της ταχύτητας του ρευστού. Χρησιμοποιείται ευρέως για τον προσδιορισμό της ταχύτητας αέρα σε αεροσκάφη καθώς και σε βιομηχανικές εφαρμογές.

Παρεμφερές μετρητικό όργανο είναι ο σωλήνας Prandtl ή Pitot-Static (Σχήμα A.1), μετρητικό το οποίο χρησιμοποιήθηκε κατά την πειραματική διαδικασία και περιγράφεται αναλυτικότερα στο Κεφάλαιο 3. Και οι δύο μέθοδοι, σωλήνας Prandtl και Pitot, είναι επεμβατικές καθώς απαιτείται η τοποθέτηση του οργάνου εντός της ροής του ρευστού.



Σχήμα Α. 1 Σωλήνας Pitot στο κέντρο του οργάνου με συνδυασμό δεύτερου σωλήνα που περιβάλλει τον πρώτο. Το σύστημα ονομάζεται «Σωλήνας Prandtl» [10]

Ένα ακόμα μετρητικό όργανο που χρησιμοποιήθηκε σε τμήμα της πειραματικής διαδικασίας, είναι η συσκευή διαφράγματος ή μετρητής με κάθετο στόμιο εκροής (orifice plate meter). Το συγκεκριμένο μετρητικό επιτρέπει τον υπολογισμό της παροχής και περισσότερο για αυτό μπορούν να βρεθούν στο Κεφάλαιο 4.

Στις κυριότερες μη επεμβατικές μεθόδους μέτρησης ταχύτητας ρευστού συγκαταλέγονται η Laser Doppler Anemometry (LDA) και η Particle Image Velocimetry (PIV). Στην πρώτη χρησιμοποιείται μια φωτεινή πηγή laser, μονοχρωματικού φωτός, το οποίο αλλάζει συχνότητα όταν προσπίπτει σε κινούμενα σωματίδια, ενώ στην PIV δίνεται η δυνατότητα ταυτόχρονης μέτρησης της ταχύτητας του ρευστού σε μεγάλο πλήθος σημείων ενός φύλλου φωτός.

A.2 Εφαρμογές της ανεμομετρίας θερμού νήματος

Οι εφαρμογές της ανεμομετρίας θερμού νήματος δεν περιορίζονται σε έναν κλάδο, είναι πολυάριθμες και συχνά διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους.

Τοπικές μετρήσεις μέσης ταχύτητας

Για οποιαδήποτε μέτρηση μέσης ταχύτητας με HWA, αρχικά απαιτείται σωστή βαθμονόμηση του οργάνου. Αυτό προϋποθέτει τη βαθμονόμηση ανάλογα με το είδος του αισθητήρα (απλό νήμα, διπλό νήμα τύπου X, τριπλό νήμα), καθώς και ανάλογα με το είδος της ροής που μελετάται. Η ακρίβεια που λαμβάνεται είναι μια συνάρτηση τόσο των οργάνων που χρησιμοποιούνται στον καθορισμό της καμπύλης βαθμονόμησης όσο και των συνθηκών της ροής αλλά και του ίδιου του HWA. Για παράδειγμα, στα αέρια και για ταχύτητες μεγαλύτερες των 10 m/s η βαθμονόμηση μπορεί να γίνει με όργανο αναφοράς ένα σωλήνα Pitot, ενώ για πολύ υψηλές ταχύτητες θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και η συμπίεστικότητα του αερίου ή να χρησιμοποιηθεί κάποιο άλλο όργανο αναφοράς. Περισσότερα για τη διαδικασία μέτρησης μέσης ταχύτητας με HWA παρουσιάζονται στα Κεφάλαια 3 και 4.

Ολικές μετρήσεις ροής

Δύο είναι οι προσεγγίσεις που έχουν αναπτυχθεί για τη λήψη χαρακτηριστικών ολικών μεγεθών της ροής (π.χ. ογκομετρική παροχή) με HWA. Σύμφωνα με την πρώτη, η διατομή πραγματοποίησης των μετρήσεων μπορεί να χωριστεί σε ίσες περιοχές από τις οποίες λαμβάνονται μετρήσεις ταχύτητας και από αυτές με κατάλληλη επεξεργασία προκύπτουν τα υπό μελέτη μεγέθη. Σύμφωνα με τη δεύτερη, αν το προφίλ της ταχύτητας είναι γνωστό για μια συγκεκριμένη ροή, μπορεί να γίνει μόνο μια σημειακή μέτρηση (συνήθως στο κέντρο της διατομής) από την οποία να προκύψουν τα ζητούμενα μεγέθη. Κατά την πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκε μόνο η πρώτη μέθοδος, αφού τα προφίλ ταχύτητας δεν ήταν διαθέσιμα εκ των προτέρων και υπολογίστηκαν αναλυτικά.

Μετρήσεις μη μόνιμων ροών

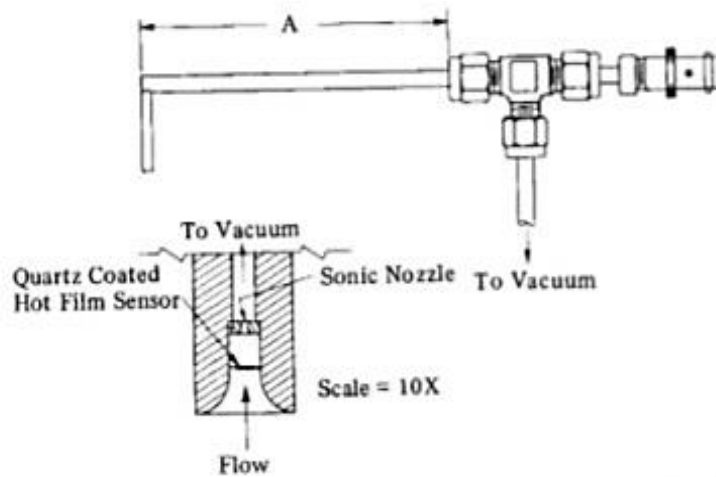
Η πλειοψηφία στιγμιαίων μετρήσεων με HWA χρησιμοποιείται για τη συλλογή δεδομένων τύρβης και συσχετισμών αυτής με την ταχύτητα καθώς από την ανεμομετρία θερμού νήματος προκύπτουν τιμές σχετικές με: τη στιγμιαία ταχύτητα, την τύρβη και την ένταση αυτής (turbulence intensity) στη διεύθυνση της μέσης ροής, το φάσμα της τύρβης (spectrum of turbulence) και τους συσχετισμούς πίεσης ταχύτητας. Επιπλέον, με θερμό νήμα υπολογίζονται συσχετίσεις ταχύτητας δεύτερης τάξης που χρησιμοποιούνται στις εξισώσεις Navier - Stokes, ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τον υπολογισμό τάσεων Reynolds¹³. Αποτελέσματα μετρήσεων στιγμιαίας ταχύτητας παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 5, που αναφέρεται σε μετρήσεις στο πεδίο συχνοτήτων.

Μετρήσεις θερμοκρασίας και σύστασης του ρευστού

Στην πλειονότητα των ροών, η ταχύτητα του ρευστού δεν παραμένει σταθερή. Για να γίνει ο διαχωρισμός θερμοκρασίας και ταχύτητας χρησιμοποιούνται δύο αισθητήρες που λειτουργούν σε διαφορετική θερμοκρασία. Σε άλλες εφαρμογές, ο αισθητήρας του HWA (CCA) μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως απλό θερμόμετρο αντίστασης, με την προϋπόθεση μικρών λόγων υπερθέρμανσης (Παράρτημα Β).

Στο Σχήμα Α.2 παρουσιάζεται μια χαρακτηριστική διάταξη που επιλέγεται για την εύρεση της σύστασης ενός αερίου. Το αέριο που συναντά ο αισθητήρας, αφαιρείται από τη ροή και μέσω κατάλληλου στομίου διατηρείται στην ταχύτητα του ήχου. Με τον τρόπο αυτό η ταχύτητα στον αισθητήρα γίνεται σχεδόν ανεξάρτητη της ταχύτητας της ροής και εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία και τη σύσταση στο σημείο μέτρησης. Διατηρώντας σταθερή την σύσταση της ροής, το HWA μετατρέπεται σε ένα πολύ υψηλής απόκρισης θερμόμετρο, ενώ όταν η θερμοκρασία παραμένει σταθερή, το αισθητήριο μετατρέπεται σε όργανο μελέτης της σύστασης.

¹³ $-\overline{ru^2}$, $-\overline{ru^2}$, $-\overline{ruv}$, όπου u, v οι δύο συνιστώσες της ταχύτητας σε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων



Σχήμα Α. 2 Aspirating type probe [12]

A.3 Στοιχεία Μηχανικής των Ρευστών

A.3.1 Βασικοί ορισμοί

Μηχανική των Ρευστών, ή Ρευστομηχανική, ονομάζεται ο κλάδος εκείνος της Μηχανικής που εξετάζει τις διάφορες ιδιότητες των ρευστών. Αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της σύγχρονης Ναυπηγικής. Η ανεμομετρία θερμού νήματος, με τη δυνατότητα που προσφέρει για πολύ ακριβείς μετρήσεις σε τυρβώδεις ροές, μπορεί να συμβάλει στις σύγχρονες εξελίξεις της Μηχανικής των Ρευστών καθώς και στις εξελίξεις στη Φυσική της ροής, προσφέροντας πειραματική τεκμηρίωση και δεδομένα για την ανάλυση των ροών.

Ρευστά (κοινή ονομασία για υγρά και αέρια) ονομάζονται τα συνεχή σώματα που χαρακτηρίζονται από εύκολη μεταφορά των στοιχείων τους. Σε αντίθεση με τα στερεά σώματα ασκούν μικρή αντίσταση στην αλλαγή της μορφής τους [13]. Οι φυσικές ιδιότητες των υγρών διαφέρουν από αυτές των αερίων, καθώς τα μόρια των αερίων δε δεσμεύονται μεταξύ τους, δηλαδή δεν διατηρούν δεδομένο σχήμα ή όγκο αλλά πληρούν το χώρο στον οποίο περιέχονται.

Ως ιδανικά ή τέλεια ρευστά χαρακτηρίζονται αυτά που είναι τελείως ασυμπίεστα και καμία εσωτερική τριβή των μορίων τους δεν αναπτύσσεται κατά τη ροή τους. Αποτελούν μια υποθετική θεωρητική κατάσταση, με εξαίρεση ορισμένα ρευστά πολύ χαμηλού ιξώδους και μικρής θερμικής αγωγιμότητας που είναι δυνατόν να θεωρηθούν κατά προσέγγιση ιδανικά. Επιπλέον στα ιδανικά ρευστά δεν αναπτύσσεται καμία δύναμη συνάφειας μεταξύ αυτών και των τοιχωμάτων των δοχείων ή αγωγών που περιέχονται. Όσα ρευστά εμφανίζουν τις αποτρεπτικές ιδιότητες των προηγούμενων π.χ. το νερό και τα αέρια, ονομάζονται φυσικά ρευστά ή Νευτώνεια ρευστά.

Η ροή ενός ρευστού χαρακτηρίζεται ασυμπίεστη και η πυκνότητα του ρευστού μπορεί να θεωρηθεί σταθερή στο πεδίο ροής όταν: το ρευστό είναι ασυμπίεστο (π.χ. υγρά) ή όταν το ρευστό είναι συμπίεστο (π.χ. αέρια) αλλά οι διαφορές πίεσης που οφείλονται στην ροή είναι αμελητέες σε σχέση με την πίεση του ρευστού. Αυτό ισχύει για τα αέρια σε ταχύτητες

μέχρι και το 30% της ταχύτητας του ήχου. Έτσι για μια σειρά πρακτικών εφαρμογών, η ροή των αερίων μπορεί να θεωρηθεί ασυμπίεστη, παρόλο που αυτά είναι συμπιεστά.

A.3.2 Ταχύτητα και ροή

Η ταχύτητα είναι ο ρυθμός μεταβολής της μετατόπισης x με το χρόνο t και είναι διανυσματική ποσότητα. Η ταχύτητα ενός αντικειμένου μπορεί να υπολογιστεί από την πρώτη παράγωγο της μετατόπισής του με το χρόνο ή αλλιώς με ολοκλήρωση της επιτάχυνσής του.

$$v = \frac{\delta x}{\delta t} \quad \text{ή} \quad v = \int_0^t a \, dt \quad (\text{A. 1}\alpha) \quad (\text{A. 1}\beta)$$

Επομένως, οι μέθοδοι που ανιχνεύουν την ταχύτητα περιλαμβάνουν εκείνες που αφορούν τη μέτρηση της μετατόπισης καθώς και τους μετρητές επιτάχυνσης.

Ενώ η κίνηση ενός στερεού σώματος περιγράφεται από την ταχύτητά του, η κίνηση ενός ρευστού (υγρό ή αέριο) περιγράφεται κυρίως από τη ροή του. Ροή ονομάζεται η συνεχής κίνηση ενός ρευστού και συναντάται σε πολλές μορφές, από το νερό ή το πετρέλαιο που ρέει σε σωληνώσεις έως τον αέρα κατά την αναπνοή.

Η κίνηση στο χώρο ενός ρευστού, ερευνάται συχνά από την άποψη της διαστατικότητας, δηλαδή της εξάρτησης των ιδιοτήτων της από μια, δυο ή τρεις συντεταγμένες του χώρου, βάσει των οποίων προκύπτουν η μονοδιάστατη, η δισδιάστατη και η τρισδιάστατη ροή. Μονοδιάστατη ροή λαμβάνει χώρα σε γραμμικό ή μονοδιάστατο αγωγό, όπως η ροή ιδεατού ρευστού κατά μήκος κλειστού αγωγού υπό πίεση, όταν σε μια διατομή η ταχύτητα, η πίεση ή άλλες ιδιότητες θεωρούνται γενικότερα σταθερές, μεταβαλλόμενες μόνο κατά την κατά μήκος έννοια (του άξονα) [14]. Αντίστοιχα ορίζονται η δισδιάστατη και η τρισδιάστατη ροή στις οποίες οι ιδιότητες εξαρτώνται από δύο ή τρεις μεταβλητές του χώρου.

Μια ακόμα κατηγοριοποίηση των ροών μπορεί να γίνει με βάση την κατευθυντικότητα τους, έννοια που αναφέρεται μόνο στην ταχύτητα και στις συνιστώσες αυτής στο χώρο, χαρακτηρίζοντας τις ροές ως μίας κατεύθυνσης ή παράλληλη ροή, δύο κατευθύνσεων ή τριών. Τέλος αξονοσυμμετρική είναι η ροή όταν υπάρχει άξονας συμμετρίας αυτής (π.χ. ροή μέσα σε ευθύγραμμο σωλήνα), αξονική είναι η κίνηση παράλληλα προς άξονα, ενώ αδιατάρακτη είναι η ροή μακριά από στερεά σώματα και διαταραγμένη είναι η ροή κοντά και ιδίως πίσω από στερεά σώματα. [14]

Για τη μελέτη της φύσης της ροής είναι αναγκαία η ποσοτικοποίηση και η κατάλληλη μέτρησή της. Οι κύριοι τομείς της μέτρησής της είναι η μέτρηση του όγκου, η μέτρηση της μάζας ή του βάρους και η μέτρηση της ταχύτητας. Ο ρυθμός ροής ενός ρευστού είναι ο ρυθμός της κίνησης του ρευστού με το χρόνο, ενώ είναι συνηθισμένο να ορίζεται ο μαζικός ρυθμός ροής q_m και ο ογκομετρικός ρυθμός ροής q_v , όταν εξετάζεται η μάζα του ρευστού (m) ή ο όγκος (V) που διέρχεται από ένα σημείο (ή διατομή) στο χώρο.

$$q_m = \frac{dm}{dt} \quad \text{και} \quad q_v = \frac{dV}{dt} \quad (\text{A. 2}\alpha) \quad (\text{A. 2}\beta)$$

Οι δύο αυτοί ρυθμοί ροής σχετίζονται με την ταχύτητα του ρευστού. Συγκεκριμένα ο μαζικός ρυθμός ροής ενός ρευστού πυκνότητας ρ_m συνδέεται με τον όγκο του V με τη σχέση:

$$q_m = \frac{dm}{dt} = \frac{d(\rho_m V)}{dt} = \rho_m \frac{dV}{dt} + V \frac{d\rho_m}{dt} \quad (\text{A. 3})$$

Ο πρώτος όρος συνδέεται με τον ογκομετρικό ρυθμό ροής, ενώ ο δεύτερος παρουσιάζει τη μεταβολή της πυκνότητας με το χρόνο. Για ασυμπίεστα ρευστά η σχέση απλοποιείται και γίνεται

$$q_m = \rho_m \frac{dV}{dt} = \rho_m q_V = \rho_m A v \quad (\text{A. 4})$$

όπου A είναι το εμβαδό διατομής και v η ταχύτητα.

Το φυσικό μέγεθος πυκνότητα που χρησιμοποιείται στους παραπάνω τύπους, αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό της ύλης και μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{A. 5})$$

ενώ για τα τέλεια αέρια, μπορεί να υπολογιστεί από την καταστατική εξίσωση των τελείων αερίων (νόμος των Boyle και Charles):

$$R = \frac{p u_s}{T} \quad (\text{A. 6})$$

όπου R : η παγκόσμια σταθερά των αερίων σε J/kgK

p : η απόλυτη πίεση σε Pascal

u_s : ο ειδικός όγκος σε m^3/kg

T : η απόλυτη θερμοκρασία σε βαθμούς Kelvin

Επιπλέον επειδή ισχύει $p=1/u_s$ η παραπάνω εξίσωση μπορεί να γραφεί:

$$p = \frac{\rho}{RT} \quad (\text{A. 7})$$

A.3.3 Η εξίσωση Bernoulli

Το 1738 ο Ελβετός Daniel Bernoulli διατύπωσε μια σχέση που συνδέει την πίεση με την ταχύτητα και με το ύψος των ρευστών. Η εξίσωση Bernoulli σε διαφορική έκφραση για συμπίεστο, μη συνεκτικό ρευστό, χρονικά αμετάβλητη και μονοδιάστατη ροή είναι:

$$\frac{dP}{\rho} + v dv = 0 \quad (\text{A. 8})$$

όπου P είναι η πίεση, ρ η πυκνότητα, v η ταχύτητα του ρευστού.

Στα αέρια, οι μεταβολές του ρευστού στο πεδίο ροής μπορούν να θεωρηθούν ισεντροπικές, επομένως ισχύει:

$$\frac{P}{\rho^\gamma} = \text{σταθερό} \quad (\text{A. 9})$$

όπου γ ισούται με 1,4.

Δεδομένου ότι η ταχύτητα του ήχου α εκφράζεται από τη σχέση:

$$\alpha^2 = \gamma \frac{P}{\rho} \quad (\text{A. 10})$$

και ο τοπικός αριθμός Mach της ροής M , ισούται με $M=u/\alpha$, προκύπτει η παρακάτω σχέση:

$$\frac{P_0 - P}{\frac{1}{2} \rho v^2} = 1 + 0,25M^2 + 0,025M^4 + \dots \quad (\text{A. 11})$$

Για $M \rightarrow 0$ (ασυμπίεστο ρευστό) παίρνουμε τη γνωστότερη μορφή της εξίσωσης Bernoulli για ασυμπίεστο ρευστό

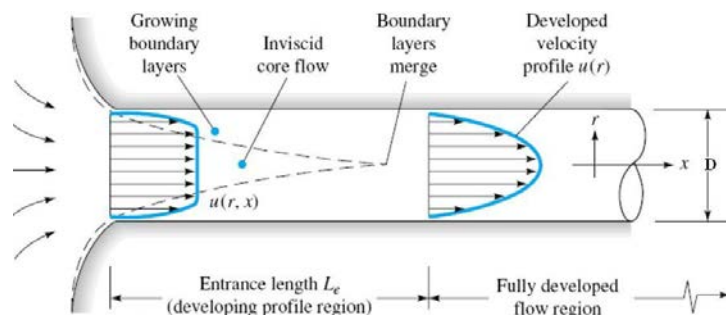
$$P_0 - P = \frac{\rho}{2} v^2 \quad (\text{A. 12})$$

Από την τελευταία σχέση εξάγεται το συμπέρασμα ότι ακόμα και για τιμές $Mach \cong 0.4$, η διαφορά $P_0 - P$ από την τιμή $1/2 \rho v^2$ είναι μόλις 1%, άρα η ροή για $M < 0,4$ μπορεί να θεωρηθεί ασυμπίεστη και ως τέτοια να μελετηθεί.

A.4 Ροή αέρα σε σωληνώσεις

A.4.1 Μήκος ανάπτυξης της ροής

Όταν η ροή εισέρχεται σε ένα σωλήνα, στα στερεά όριά του αναπτύσσεται ένα οριακό στρώμα. Στην περιοχή του οριακού στρώματος παρατηρείται σημαντική πτώση πίεσης και κατά συνέπεια απώλεια ενέργειας. Ως αποτέλεσμα η ροή δεν είναι ομοιόμορφη στην αρχή του σωλήνα και γίνεται ομοιόμορφη μετά από ένα μήκος L_e , που καλείται μήκος ανάπτυξης της ροής ή μήκος εισόδου. [15]



Σχήμα A. 3 Μήκος ανάπτυξης της ροής σε σωλήνες [16]

Με εφαρμογή της μεθόδου της διαστατικής ανάλυσης, προκύπτει ότι το μήκος εισόδου εξαρτάται μόνο από τον αριθμό Reynolds, ενώ έπειτα από πειραματική διερεύνηση έχουν προκύψει οι εξής προσεγγιστικές εξισώσεις:

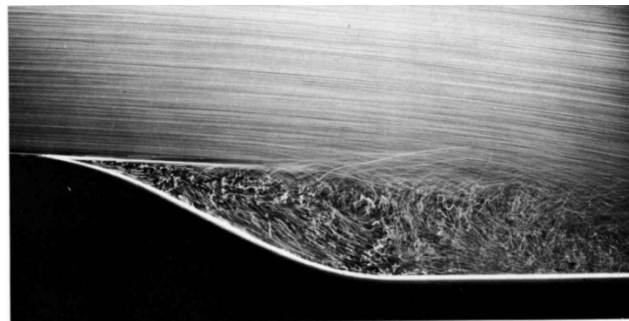
$$\frac{L_e}{D} = 0.06Re \quad (\text{A. 13}\alpha)$$

$$\frac{L_e}{D} = 4.4Re^{1/6} \quad (\text{A. 13}\beta)$$

Η εξίσωση (A.13α) ισχύει για στρωτή ροή, ενώ η (A.13β) για τυρβώδη - έννοιες που αναπτύσσονται ακολούθως - ενώ το μήκος εισόδου στην τυρβώδη ροή είναι μικρότερο από αυτό που παρατηρείται στη στρωτή ροή, εξαιτίας του μικρότερου μήκους του τυρβώδους οριακού στρώματος.

A.4.2 Στρωτή και τυρβώδης ροή

Οι τύποι των ροών μπορούν να χωριστούν σε δυο ευρύτερες κατηγορίες, τη στρωτή και την τυρβώδη. Στρωτή είναι εκείνη που πραγματοποιείται με λείες γραμμές ροής (ευθείες ή καμπύλες) και χωρίς μακροσκοπική ανάμειξη μεταξύ δύο γειτονικών στρώσεων, ή αλλιώς παρουσιάζεται μια μακροσκοπική ευστάθεια στη ροή λόγω των σχετικά μεγάλων δυνάμεων συνεκτικότητας. Αντίθετα όταν τα ρευστά σωματίδια έχουν ακανόνιστη κίνηση χωρίς καμία περιοδικότητα, δηλαδή η κίνηση είναι σχεδόν τυχαία και η ταχύτητα σε ένα σημείο μεταβάλλεται ταχέως με τον χρόνο-τόσο από άποψη μεγέθους όσο και διεύθυνσης-τότε η ροή χαρακτηρίζεται ως τυρβώδης [14]. Παρουσιάζεται δηλαδή μια μακροσκοπική ανάμειξη καθώς και αστάθεια στη ροή, η οποία οφείλεται στην κυριαρχία δυνάμεων αδράνειας έναντι των δυνάμεων συνεκτικότητας. Στο φυσικό περιβάλλον, η πλειοψηφία των ροών είναι τυρβώδεις.



Σχήμα A. 4 Στρωτή και Τυρβώδης Ροή [17]

Ο Reynolds διατύπωσε στα πειράματά του ότι η μετάβαση από στρωτή σε τυρβώδη ροή επέρχεται για δεδομένη γεωμετρία σε ένα σαφώς πειραματικά καθορισμένο αριθμό, που ονομάζεται κρίσιμος αριθμός Reynolds. Ο κρίσιμος αυτός αριθμός Reynolds στην περίπτωση του σωλήνα κυκλικής διατομής με είσοδο απότομα διαμορφωμένη είναι:

$$Re_{crit} = \left(\frac{v_m d}{\nu} \right) \cong 2300 \quad (\text{A. 14})$$

v_m : μέση ταχύτητα του ρευστού στον αγωγό

d : εσωτερική διάμετρος του αγωγού

ν : κινηματικό ιξώδες του ρευστού

Ο αριθμός Reynolds 2300 θεωρείται ο μικρότερος κάτω από τον οποίο οποιεσδήποτε τοπικές διαταραχές της ροής ακόμα και μεγάλες δεν ενισχύονται και επομένως δεν μεταβάλλουν το χαρακτήρα της ροής σε τυρβώδη.

Η αλλαγή της υφής της ροής από στρωτή σε τυρβώδη συνεπάγεται δραστικές αλλαγές στα διάφορα χαρακτηριστικά της ροής. Η πτώση της πίεσης ΔP κατά μήκος του ευθύγραμμου σωλήνα μεταβάλλεται από γραμμική συνάρτηση της μέσης ταχύτητας u_m σε τετραγωνική. Δηλαδή απαιτείται πολλαπλάσια πίεση για να περάσει μια συγκεκριμένη ποσότητα από τον σωλήνα. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι το φαινόμενο της τυρβώδους ανάμειξης καταστρέφει ένα μεγάλο ποσό ενέργειας και αυξάνει την αντίσταση της ροής.



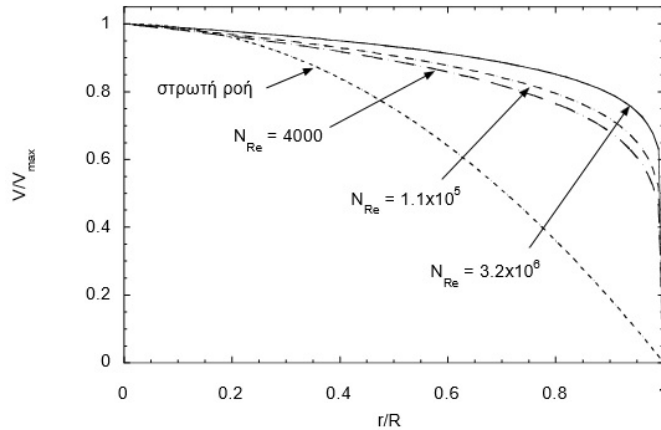
Σχήμα Α. 5 Κατανομή της ταχύτητας σε σωλήνα (στρωτή και τυρβώδης ροή) [13]

Επίσης η κατανομή της ταχύτητας αλλάζει ριζικά μορφή σε πεπλατυσμένη (Σχήμα Α.5). Αυτό εξηγείται με τη θεωρία της τυρβώδους ανάμειξης που προκαλεί εναλλαγή της ορμής κοντά στο τοίχωμα και τον άξονα του σωλήνα.

A.4.3 Προφίλ ταχύτητας σε αγωγό κυκλικής διατομής

Η διάκριση της ροής σε τυρβώδη ή στρωτή καθορίζει το προφίλ ταχυτήτων που αναπτύσσεται σε μια διατομή και τα μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί διαχωρίζονται με βάση τις δύο αυτές κατηγορίες.

Στη στρωτή ροή το προφίλ της ταχύτητας του ρευστού δεν αλλάζει με το χρόνο, ενώ στην τυρβώδη το προφίλ μεταβάλλεται από στιγμή σε στιγμή, αφού η ταχύτητα του ρευστού σε κάθε σημείο δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται χρονικά με πολύ μεγάλη συχνότητα. Στην περίπτωση αυτή, ο ορισμός της τοπικής ταχύτητας που χρησιμοποιείται για την κατασκευή του προφίλ είναι ο μέσος χρονικά όρος της ταχύτητας για χρονικό διάστημα αρκετά μεγαλύτερο από την περίοδο των διαταραχών της.



Σχήμα Α. 6 Κατανομή Ταχύτητας σε σωλήνα για διάφορους αριθμούς Reynolds [18]

Στο Σχήμα Α.6 παρουσιάζονται τα ακτινικά προφίλ της ταχύτητας σε έναν κυλινδρικό αγωγό ακτίνας R για στρωτή και τυρβώδη ροή για διάφορους αριθμούς Reynolds (N_{Re}). Η μέγιστη ταχύτητα (V_{max}) επιτυγχάνεται στον άξονα συμμετρίας ($r=0$) του αγωγού. Όπως παρατηρείται, η τυρβώδης ροή δημιουργεί πιο ομοιόμορφα προφίλ ταχύτητας από αυτά της στρωτής ροής, τάση που εντείνεται όσο αυξάνει ο αριθμός Reynolds.

Στρωτή ροή

Στη στρωτή ροή, οι εξισώσεις που προκύπτουν για τα προφίλ ταχύτητας της προέρχονται από την επίλυση των εξισώσεων Navier - Stokes, με ορισμένες παραδοχές. Για ασυμπίεστο ρευστό με σταθερό ιξώδες οι εξισώσεις γίνονται:

$$\rho \frac{D \vec{v}}{Dt} = -gradp + \mu \Delta \vec{v} \quad (\text{A. 15}\alpha)$$

$$div \vec{v} = 0 \quad (\text{A. 15}\beta)$$

Η επίλυση των εξισώσεων (A.15α), (A.15β) σε κυλινδρικές συντεταγμένες (r, ϕ, z), γίνεται με τις εξής παραδοχές: α) η ροή είναι παράλληλη προς τον άξονα z , β) η ροή είναι μόνιμη, γ) η ροή είναι αξονικά συμμετρική.

Η λύση των παραπάνω εξισώσεων με την χρήση των συνοριακών συνθηκών του προβλήματος, δίνει τη μέση ταχύτητα:

$$v_m = \frac{q_v}{A} = \frac{v_{max}}{2} \quad (\text{A. 16})$$

όπου q_v η παροχή όγκου στον αγωγό διατομής A , ενώ η σύνδεση της κατανομής ταχύτητας, σε απόσταση r από το μέσο της διατομής με τη μέση ταχύτητα, υπολογίζεται από τον εξής τύπο:

$$v(r) = 2 \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) v_m \quad (\text{A. 17})$$

Η τελευταία εξίσωση δείχνει ότι η κατανομή της ταχύτητας είναι παραβολοειδής ή ακριβέστερα είναι ένα παραβολοειδές εκ περιστροφής.

Για τον υπολογισμό της παροχής ισχύει:

$$Q = \int v dA = \int_0^R v_{max} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) 2\pi r dr = \frac{v_{max}}{2} \pi R^2 \quad (\text{A. 18}) [12]$$

Τυρβώδης ροή

Οι εξισώσεις που περιγράφουν τα μοντέλα κατανομής ταχυτήτων ροής σε αγωγούς στην τυρβώδη ροή, βασίζονται στη θεωρία που έχει αναπτυχθεί για κατανομές ταχύτητας ροής κοντά σε στερεό όριο, όπου ισχύει η λογαριθμική κατανομή ταχυτήτων. Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή που αναπτύχθηκε από τους Prandtl, Von Karman και Millikan και επιβεβαιώθηκε ότι ισχύει για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών με πειράματα των Hinze (1975), Schlichting (1979) και White (1991), διακρίνονται τρεις περιοχές ροής:

- Το στρωτό οριακό υπόστρωμα που είναι μια περιοχή πολύ κοντά στο στερεό όριο, όπου οι στρωτές τάσεις είναι πολύ μεγαλύτερες των τυρβωδών
- Την εξωτερική περιοχή, δηλαδή την περιοχή μακριά από το όριο όπου επικρατούν οι δυνάμεις αδράνειας και η ροή είναι τυρβώδης
- Μια ενδιάμεση ζώνη, όπου οι τυρβώδεις τάσεις είναι της ίδιας τάξης με τις στρωτές [15]

Εφαρμόζοντας τους τύπους που έχουν αναπτυχθεί για την παραπάνω θεωρία σε σωλήνες και ορίζοντας την απόσταση από το εσωτερικό τοίχωμα του σωλήνα ως $R-r$ προκύπτει:

$$\frac{v(r)}{v_*} = 2,44 \ln \left(\frac{(R-r)v_*}{\nu} \right) + 5,0 \quad (\text{A. 19})$$

ενώ η μέγιστη ταχύτητα ροής v_{max} που αναπτύσσεται στον άξονα του σωλήνα προσδιορίζεται από την εξίσωση (A.18) θέτοντας $r=0$. Τέλος η μέση ταχύτητα v_{max} προκύπτει όπως και στην περίπτωση της στρωτής ροής από τον τύπο $V=Q/A$ και η επίλυσή του δίνει :

$$\frac{v_{max}}{v_*} = 2,44 \ln \left(\frac{Rv_*}{\nu} \right) + 1,34 \quad (\text{A. 20})$$

Στις παραπάνω εξισώσεις η παράμετρος v_* ονομάζεται ταχύτητα τριβής, γιατί έχει μονάδες ταχύτητας και ορίζεται ως εξής:

$$v_* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (\text{A. 21})$$

όπου τ_w η διατμητική τάση του ορίου. Τέλος ν είναι η κινηματική συνεκτικότητα ενός ρευστού που ορίζεται ως $\nu=\mu/\rho$ και έχει μονάδες m^2/s , όπου μ είναι ο συντελεστής δυναμικής μοριακής συνεκτικότητας ή απλά μοριακή συνεκτικότητα του ρευστού.

A.5 Βασικές αρχές μεταφοράς θερμότητας

Κυρίαρχο ρόλο στη λειτουργία του ανεμομέτρου έχει η μεταφορά θερμότητας μεταξύ του νήματος ή του φιλμ και του ρευστού. Οι κύριοι τρόποι μεταφοράς θερμότητας χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

- Στη μεταφορά θερμότητας με αγωγή, που οφείλεται κυρίως στη μεταφορά ενέργειας μεταξύ των ατόμων ή των μορίων ενός σώματος ανάλογα με την κατάσταση στην οποία βρίσκεται.
- Στη μεταφορά θερμότητας με συναγωγή, όπου εκτός από τις τυχαίες κινήσεις των μορίων, τη διάχυση, μεταφέρεται θερμική ενέργεια και με τη μακροσκοπική κίνηση του ρευστού, κατά την οποία μετακινείται συλλογικά μεγάλος αριθμός μορίων
- Στη μεταφορά θερμότητας μεταξύ των σωμάτων με τη βοήθεια των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, δηλαδή στη θερμική ακτινοβολία.[21]

Επιπλέον με τον όρο ελεύθερη συναγωγή (natural convection), σε αντίθεση με την εξαναγκασμένη, η κίνηση του ρευστού οφείλεται στις διαφορές πυκνότητας οι οποίες δημιουργούνται από τις θερμοκρασιακές διαφορές. Στη μεταφορά θερμότητας με εξαναγκασμένη ροή, στην εξωτερική επιφάνεια των σωμάτων, δημιουργούνται οριακά στρώματα ελεύθερα χωρίς περιορισμούς από γειτονικές επιφάνειες. [21]

Στις εφαρμογές HWA η απαγωγή θερμότητας με ακτινοβολία δε λαμβάνεται υπόψη. Σε υψηλούς αριθμούς Reynolds, η μεταφορά θερμότητας μεταξύ νήματος - ρευστού με αγωγή και με ελεύθερη συναγωγή είναι αμελητέα σε σύγκριση με αυτή της εξαναγκασμένης συναγωγής.

Αντίθετα σε πολύ χαμηλές ταχύτητες, η ελεύθερη συναγωγή αποτελεί τον κύριο τρόπο απαγωγής θερμότητας. Σε τέτοιες περιπτώσεις κυρίαρχο ρόλο παίζει το μέγεθος της ταχύτητας και ο προσανατολισμός της σε σχέση με το πεδίο βαρύτητας και απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στον προσανατολισμό του θερμού νήματος, σε σχέση με αυτόν της ταχύτητας, κατά τη βαθμονόμηση.

Παράρτημα Β

Σύνοψη παραρτήματος

Στο παρόν παράρτημα γίνεται παρουσίαση των υλικών κατασκευής των ΗWA. Παρατίθενται οι τρεις βασικές ηλεκτρικές διατάξεις της ανεμομετρίας θερμού νήματος και φιλμ και το παράρτημα ολοκληρώνεται με μια επιγραμματική περιγραφή της διαδικασίας λήψης ταχύτητας με ανεμομετρία νήματος σταθερής θερμοκρασίας (CTHWA).

B.1 Ανεμόμετρο θερμού νήματος και θερμού φιλμ

B.1.1 Υλικά κατασκευής ΗWA

Τα κριτήρια επιλογής του υλικού κατασκευής των αισθητηρίων ΗWA είναι [19]:

- η μεγάλη μηχανική αντοχή
- το υψηλό σημείο τήξης
- η δυνατότητα συγκόλλησης
- ο χαμηλός συντελεστής αγωγιμότητας
- η δυσκολία οξείδωσης
- η ευκολία κατασκευής σύρματος σε πολύ μικρές διαμέτρους.

Υλικά που πληρούν τις παραπάνω προϋποθέσεις και χρησιμοποιούνται ευρέως είναι:

- το βολφράμιο
- η πλατίνα
- τα κράματα πλατίνας-ιριδίου (σε συνήθη αναλογία 80-20 % ή 90-10%)
- τα κράματα πλατίνας-ροδίου.

Το βολφράμιο έχει υψηλό θερμικό συντελεστή ωμικής αντίστασης και υψηλή μηχανική αντοχή, παρουσιάζει όμως γρήγορη οξείδωση σε θερμοκρασίες άνω των 300°C. Η πλατίνα έχει καλό θερμικό συντελεστή ωμικής αντίστασης και δεν οξειδώνεται εύκολα. Παρουσιάζει όμως μειωμένη μηχανική αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες. Τα νήματα κράματος πλατίνας - ιριδίου αποτελούν μια μέση λύση, δεδομένου ότι δεν οξειδώνονται εύκολα -το ιρίδιο είναι το μέταλλο με τη μεγαλύτερη αντοχή σε διάβρωση- και παρουσιάζουν καλή μηχανική αντοχή. Αυτό τα καθιστά εύχρηστα σε συνθήκες απαγορευτικές για τα άλλα είδη. Τέλος ορισμένα αισθητήρια είναι συχνά επίχρυσα, ενώ άλλα έχουν επίστρωση ή βάση χαλαζία.

Υλικό	Τάση Θραύσης (N/cm ²)	Μέγιστη Θερμοκρασία (°C)	Κασσιτεροκόλληση	Συγκόλληση	Ελάχιστη Διαθέσιμη Διάμετρος (μm)	Θερμικός Συντελεστής Αντίστασης ανά °C	Αντίσταση ohm-cm στους 0°C (10 ⁻⁶)	Θερμική Αγωγιμότητα (kW/cm °C)
Βολφράμιο	250000	300 (οξειδωση)	Όχι	Ναι	2,5	0,004	4,9	1,9
Πλατίνα	30000	1200 (τήξη 1750)	Ναι	Ναι	1	0,0038	9,8	0,7
Πλατίνα-Ιρίδιο (90/10)	60000	1400 (τήξη 1600)	Ναι	Ναι	0,6	0,0016	19	0,4

Πίνακας Β.1 Ιδιότητες Υλικών Κατασκευής HWA [19]

Β.1.2 Σύγκριση θερμού φιλμ και θερμού νήματος

Ένας αισθητήρας θερμού φιλμ πλεονεκτεί σε σύγκριση με ένα θερμό νήμα αντίστοιχων διαστάσεων, αφού παρουσιάζει:

- Ευελιξία στη διαμόρφωσή του, ως αποτέλεσμα των περισσότερων διαθέσιμων γεωμετρικών επιλογών.
- Μικρότερη μεταφορά θερμότητας με αγωγή προς τα στηρίγματα¹⁴, με αποτέλεσμα τη χρήση αισθητηρίων μικρότερου μήκους.
- Μικρότερη ευαισθησία στη ρύπανση και μεγαλύτερη ευκολία στον καθαρισμό (πολλά από αυτά έχουν επίστρωση χαλαζία).
- Καλύτερη απόκριση συχνότητας σε σύγκριση με νήμα ίδιας διαμέτρου, αφού το αντίστοιχο τμήμα που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση (αγώγιμο μέρος) διανέμεται στην επιφάνεια του υλικού βάσης και δεν καταλαμβάνει ολόκληρη τη διατομή του.

Τόσο το θερμό φιλμ όσο και το θερμό νήμα δεν παρουσιάζουν ακαριαία απόκριση στις μεταβολές της ταχύτητας της ροής, εξαιτίας της πεπερασμένης θερμοχωρητικότητάς τους. Το κυριότερο συγκριτικό πλεονέκτημα των περισσότερων νημάτων σε σχέση με τα φιλμ, είναι η εξαιρετικά μικρή διάμετρος τους, που οδηγεί σε ταχύτερη απόκριση του οργάνου. Σε πληθώρα μετρήσεων μεγεθών της τυρβώδους ροής, η χρήση του νήματος αποτελεί την μοναδική επιλογή, αφού το φιλμ έχει μικρότερη ευαισθησία.

¹⁴ Το υλικό του πυρήνα που έρχεται σε επαφή με τα στηρίγματα είναι διαφορετικής θερμοχωρητικότητας

B.2 Συντελεστής υπερθέρμανσης

Ο θερμικός συντελεστής αντίστασης που ορίστηκε στο κεφάλαιο 2, είναι θετικός για τα μέταλλα και αρνητικός για τον άνθρακα και τους ημιαγωγούς. Δεν είναι σταθερός, αλλά μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία. Δίνεται συνήθως για θερμοκρασία 20°C (α_{20}). Σε περιπτώσεις όπου απαιτείται ο υπολογισμός του σε διαφορετική θερμοκρασία (α_1 σε θερμοκρασία θ_1), χρησιμοποιείται ο τύπος:

$$\alpha_1 = \frac{\alpha_{20}}{1 + \alpha_{20}(\theta_1 - 20)} \quad (\text{B.1})$$

Στην ανεμομετρία θερμού νήματος ορίζεται ο συντελεστής υπερθέρμανσης (overheating ratio[20]) που είναι ίσος με:

$$\alpha = \frac{R_w - R_0}{R_0} \quad (\text{B.2})$$

όπου R_w η αντίσταση του νήματος στη θερμοκρασία λειτουργίας και R_0 η αντίσταση στη θερμοκρασία περιβάλλοντος θ_0 . Η πρακτική εφαρμογή του συντελεστή υπερθέρμανσης επιβάλλεται σε περιπτώσεις διακύμανσης της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια: της εγκατάστασης, της βαθμονόμησης και του πειράματος. Σαν παράδειγμα μπορεί να αναφερθεί η εξής περίπτωση: εάν η θερμοκρασία έχει μεγάλη διαφορά μεταξύ πειράματος και βαθμονόμησης, ο συντελεστής υπερθέρμανσης ρυθμίζεται μια φορά, πριν από τη διαδικασία βαθμονόμησης - πειράματος. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, λαμβάνεται η τιμή της θερμοκρασίας και χρησιμοποιείται στη διόρθωση της καταγεγραμμένης τάσης πριν τη μετατροπή της σε ταχύτητα.

B.3 Ηλεκτρικές διατάξεις ανεμομετρίας θερμού νήματος

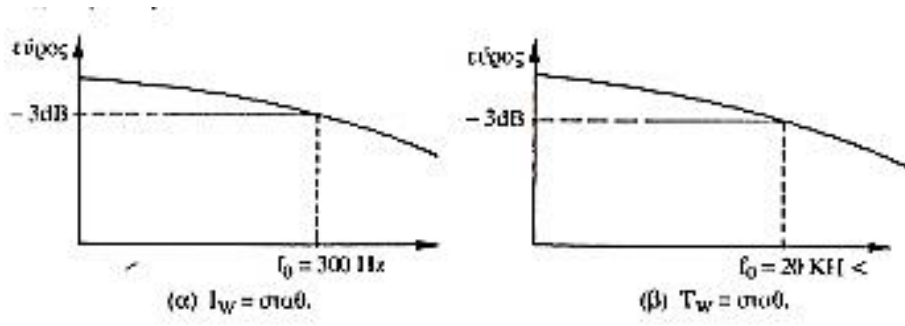
B.3.1 Ηλεκτρικές διατάξεις

Τρεις είναι οι ηλεκτρικές διατάξεις που έχουν αναπτυχθεί για την μέτρηση της ταχύτητας των ρευστών με θερμαινόμενο νήμα:

- Η μέθοδος σταθερής έντασης ηλεκτρικού ρεύματος (CC: Constant - Current): το νήμα θερμαίνεται με σταθερής έντασης ηλεκτρικό ρεύμα.
- Η μέθοδος σταθερής θερμοκρασίας (CT: Constant Temperature): η θερμοκρασία του νήματος και άρα η ηλεκτρική του αντίσταση διατηρείται σταθερή, ενώ η τάση μεταβάλλεται με την ταχύτητα.
- Η μέθοδος σταθερής τάσης (CV: Constant Voltage): κύριο χαρακτηριστικό της διάταξης είναι η διατήρηση σταθερής τιμής της τάσης στα άκρα του νήματος. Επειδή η μέθοδος αυτή είναι νέα, δεν υπάρχει εκτενής βιβλιογραφία.

Η CCA χρησιμοποιήθηκε πρώτη, κυρίως λόγω της ευκολίας κατασκευής των απαραίτητων ηλεκτρικών κυκλωμάτων. Στις μέρες μας όμως η CTA είναι η πλέον διαδεδομένη, ενώ η CCA εφαρμόζεται κυρίως σε μετρήσεις θερμοκρασίας ή σε περιοχές χαμηλής ταχύτητας (<1m/s)

και χαμηλής τύρβης. Σημαντικό μειονέκτημα της CCA είναι ο κίνδυνος υπερθέρμανσης σε απότομες μεταβολές της θερμοκρασίας, με επακόλουθο την καταστροφή του μετρητικού (risk of burnout).

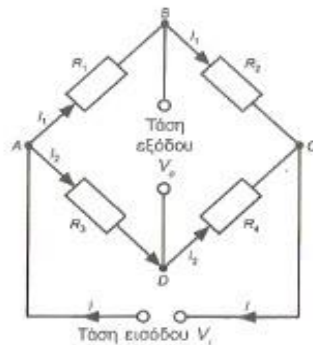


Σχήμα Β. 3 Απόκριση CCA (α) και CTA (β) [19]

Από τη σύγκριση των καμπυλών απόκρισης φαίνεται η ανωτερότητα λειτουργίας του αισθητηρίου CTA (η τύρβη καλύπτει συνήθως την περιοχή συχνότητας έως 10kHz, ενώ η απόκριση του αισθητηρίου στις συχνότητες μεταβολής ταχύτητας στην περίπτωση του CTA είναι επίπεδη χωρίς παραμόρφωση) [19]. Τέλος, η CTA έχει πολυπλοκότερη ηλεκτρική διάταξη, αλλά το νήμα διατηρείται σε σταθερή θερμοκρασία και ως εκ τούτου η επίδραση της θερμικής αδράνειας ελαχιστοποιείται.

B.3.2 Γέφυρα Wheatstone

Η γέφυρα Wheatstone αποτελεί μια διάταξη που χρησιμοποιείται πολύ συχνά για τη ρύθμιση σημάτων ως προς την τάση, το ρεύμα ή την αντίσταση και έτσι επιτρέπει τον προσδιορισμό μιας άγνωστης αντίστασης, συγκρίνοντάς τη με μια γνωστή.



Σχήμα Β. 4 Κύκλωμα γέφυρας Wheatstone

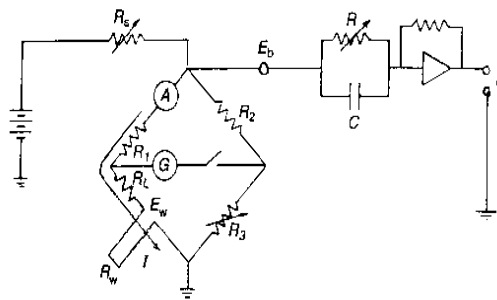
Μια από τις αντιστάσεις της είναι κάποιος αισθητήρας και στις διατάξεις που περιγράφονται στη συνέχεια ο αισθητήρας είναι το HWA. Επειδή η αντίσταση αλλάζει με τη θερμοκρασία, η τιμή της είναι άγνωστη. Όμως η γέφυρα Wheatstone παρέχει μια γραμμική σχέση ανάμεσα στην τάση εξόδου της (V_o) και την αλλαγή της αντίστασης. Συγκεκριμένα αν V_i είναι η τάση εισόδου και υποθέτοντας ότι η αντίσταση R_1 αλλάζει κατά ποσό ΔR_1 στην τιμή $R_1 + \Delta R_1$, μπορεί να εκτιμηθεί προσεγγιστικά η διαφορά ΔV_o από τη σχέση:

$$\Delta V_0 = V_i \left(\frac{\Delta R_1}{R_1 + R_2} \right) \quad (\text{B. 3})$$

που είναι γραμμική για τις μεταβολές ΔV_0 και ΔR_1 , δεδομένου ότι η ΔR_1 είναι πολύ μικρότερη της R_1 και το κύκλωμα της συσκευής καταγραφής λαμβάνει πολύ λιγότερο ρεύμα σε σύγκριση με αυτό που κυκλοφορεί στη γέφυρα. Αυτή είναι και η χαρακτηριστική ιδιότητα της συγκεκριμένης διάταξης που την καθιστά ιδανική για χρήση σε κυκλώματα ΗWA.

B.3.3 Κύκλωμα σταθερού ρεύματος (CCA)

Το κύκλωμα που χρησιμοποιείται στη μέθοδο σταθερής έντασης ηλεκτρικού ρεύματος, παρουσιάζεται ακολούθως.



Σχήμα Β. 5 Κύκλωμα CCA [7]

Στο συγκεκριμένο χρησιμοποιείται κύκλωμα αντιστάθμισης μεταβολών R-C (compensation circuit). Οι μεταβολές στη ροή του ρευστού προκαλούν μεταβολές στη θερμοκρασία του νήματος και συνεπώς μεταβολή της ηλεκτρικής του αντίστασης και της έντασης που το διαρρέει. Η τιμή της αντίστασης του νήματος R_w ¹⁵ για τη συγκεκριμένη διάταξη δίνεται από τη σχέση:

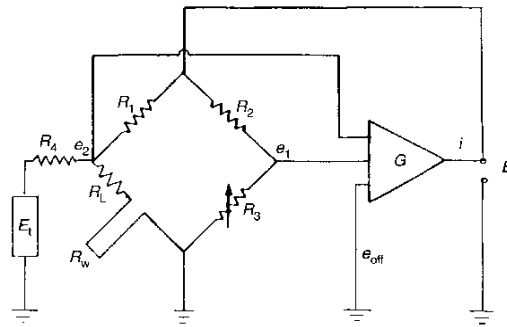
$$\frac{R_w + R_L}{R_1} = \frac{R_3}{R_2} \quad (\text{B. 4})$$

Η γέφυρα του κυκλώματος διατηρεί σταθερή την ένταση του ρεύματος I που διαρρέει το νήμα έπειτα από αλλαγή της αντίστασης R_w , ενώ μεταβάλλοντας κατάλληλα την αντίσταση R_3 μπορεί να υπολογιστεί η τιμή της R_w στις αρχικές συνθήκες.

B.3.4 Κύκλωμα σταθερής θερμοκρασίας (CTA)

Είναι η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία. Στη μέθοδο αυτή γίνεται αντιστάθμιση των μεταβολών της θερμοκρασίας του νήματος με μεταβολή της εντάσεως του ηλεκτρικού ρεύματος, με σκοπό η θερμοκρασία του να παραμένει σταθερή. Τυπικό κύκλωμα που χρησιμοποιείται παρουσιάζεται στο Σχήμα Β.4.

¹⁵ όταν η γέφυρα βρίσκεται σε ισορροπία (in balance), όπως μπορεί να παρατηρηθεί από το γαλβανόμετρο G

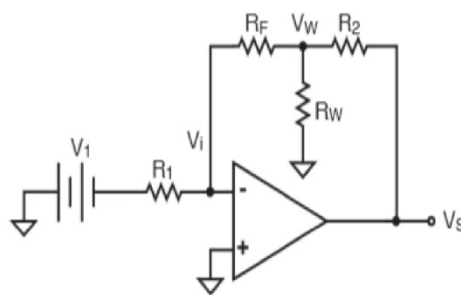


Σχήμα Β. 6 Κύκλωμα CTA [7]

Το αισθητήριο τοποθετείται στο σκέλος γέφυρας Wheatstone. Αλλαγή της ροής του ρευστού, δημιουργεί διαφορά τάσης e_2-e_1 , που αντιστοιχεί σε αλλαγή της αντίστασης του νήματος. Η διαφορά τάσης χρησιμοποιείται ως είσοδος στον υπό λειτουργία ενισχυτή, ο οποίος με τη σειρά του έχει ως έξοδο την ένταση i_s . Η συγκεκριμένη ένταση είναι αντιστρόφως ανάλογη της μεταβολής της αντίστασης του αισθητήρα του Hot-wire. Τέλος, η ανατροφοδότηση του ρεύματος στην αρχή της γέφυρας επαναφέρει την αντίσταση του αισθητήρα στην αρχική της τιμή και συνεπώς διατηρείται σταθερή η θερμοκρασία του νήματος. Αντικείμενο μέτρησης είναι η μεταβολή της τάσης η οποία μεταβάλλεται με την ταχύτητα.

Σε υψηλόσυχνες μεταβολές ταχύτητας, η σταθερότητα της μέσης θερμοκρασίας σύρματος περιορίζεται από τον ρυθμό με τον οποίο ο ενισχυτής ανιχνεύει και ανταποκρίνεται σε ταχείες διακυμάνσεις της ροής. Οι νεότεροι ενισχυτές πλεονεκτούν, καθώς παρουσιάζουν πολύ γρήγορη απόκριση (Κεφάλαιο 3) και διατηρούν το νήμα σε μια σταθερή θερμοκρασία, εκτός από περιπτώσεις πολύ υψηλής διακύμανσης της συχνότητας.

B.3.5 Κύκλωμα σταθερής τάσης (CVA)



Σχήμα Β. 7 Κύκλωμα CVA [24]

Για το κύκλωμα σταθερής τάσης συνοπτικά αναφέρεται ότι η αντίσταση του νήματος R_w συνδέεται με βρόγχο ανάδρασης, ενώ η σταθερή τιμή της τάσης του νήματος V_w δίνεται από τον τύπο:

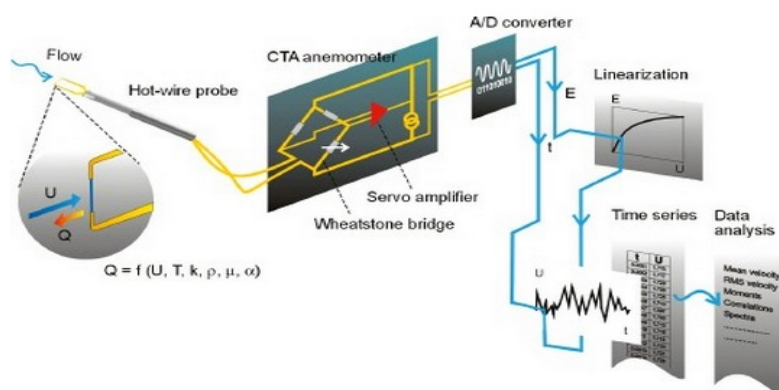
$$V_w = \frac{R_F V_1}{R_1} \quad (B.5)$$

όπου R_F και R_1 είναι σταθερές αντιστάσεις. Έτσι η τάση μπορεί να ρυθμιστεί από το χρήστη μέσω της τάσης V_1 .

B.4 Διαδικασία λήψης ταχύτητας με ανεμομετρία νήματος σταθερής θερμοκρασίας (CTHWA)

B.4.1 Λήψη μέτρησης

Η διαδικασία λήψης τιμών ταχύτητας ροής με CTHWA συνοψίζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα B. 8 Διαδικασία μετρήσεων με CTHWA [Dantec Dynamics]

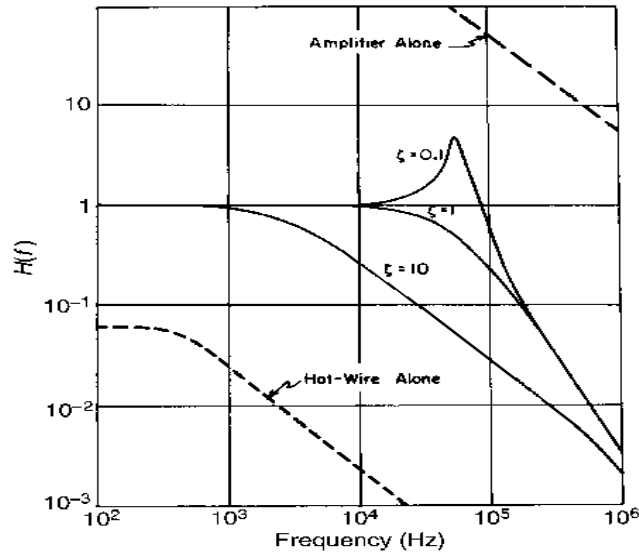
Με εφαρμογή των όσων προαναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 2, καθορίζονται οι παράγοντες που επηρεάζουν τον ρυθμό μεταφοράς θερμότητας από το νήμα στο ρευστό. Η γέφυρα Wheatstone σε συνδυασμό με τον σερβοενισχυτή (σύστημα CTA), διατηρούν την θερμοκρασία του νήματος σταθερή, όταν αυτή τείνει να μεταβληθεί λόγω διαφοροποίησης της ροής. Το αναλογικό σήμα που λαμβάνεται από το CTA, περνά από μετατροπέα αναλογικού/ψηφιακού σήματος (A/D converter) και καταλήγει σε ηλεκτρονικό υπολογιστή που διαθέτει κατάλληλο λογισμικό ή σε πολύμετρο. Μέσω αυτής της διαδικασίας λαμβάνεται η τιμή της ταχύτητας υπό μορφή ηλεκτρικής τάσης. Το τελευταίο βήμα, δηλαδή η μετατροπή της τάσης σε ταχύτητα, προαπαιτεί την βαθμονόμηση του οργάνου.

B.4.2 Απόκριση CTA

Τα ανεμόμετρα σταθερής θερμοκρασίας σχεδιάζονται με σκοπό την μείωση της επίδρασης της θερμικής αδράνειας του νήματος, ώστε το όριο συχνότητας λειτουργίας του οργάνου να καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από τα χαρακτηριστικά του ηλεκτρικού κυκλώματος γέφυρας-ενισχυτή. Το σύστημα σερβοενισχυτής - γέφυρα Wheatstone έχει πολύ μεγάλο κέρδος (gain) και έτσι μειώνεται σημαντικά η επίδραση της διαταραχής (μεταβολή τάσης λόγω αλλαγής θερμοκρασίας) που υπεισέρχεται στο κύκλωμα, με αποτέλεσμα τη μείωση της σταθεράς χρόνου (M) του νήματος που παίρνει τιμές χιλιοστών του δευτερολέπτου έως μερικών μικροδευτερολέπτων.

Η λύση της διαφορικής εξίσωσης 2.10, περιέχει εκθετικό όρο της μορφής $e^{-\frac{t}{M}}$, όπου M σταθερά με διαστάσεις χρόνου. Ημιτονοειδής μεταβολή του αριθμού Nusselt με συχνότητα

ω σταθερού πλάτους έχει ως συνέπεια το εύρος θερμοκρασίας του σύρματος να είναι ανάλογο του $\frac{1}{1+\omega^2 M^2}$. Για να γίνει γραμμική η παραπάνω σχέση που αντιπροσωπεύει την απόκριση του νήματος η σταθερά M πρέπει να είναι πολύ μικρή και αυτό επιτυγχάνεται με μικρές διαμέτρους νήματος και μικρούς λόγους υπερθέρμανσης (όμως μείωση του λόγου μειώνει την ευαισθησία του οργάνου) [19].



Σχήμα Β. 9 Απόκριση CTA [25]

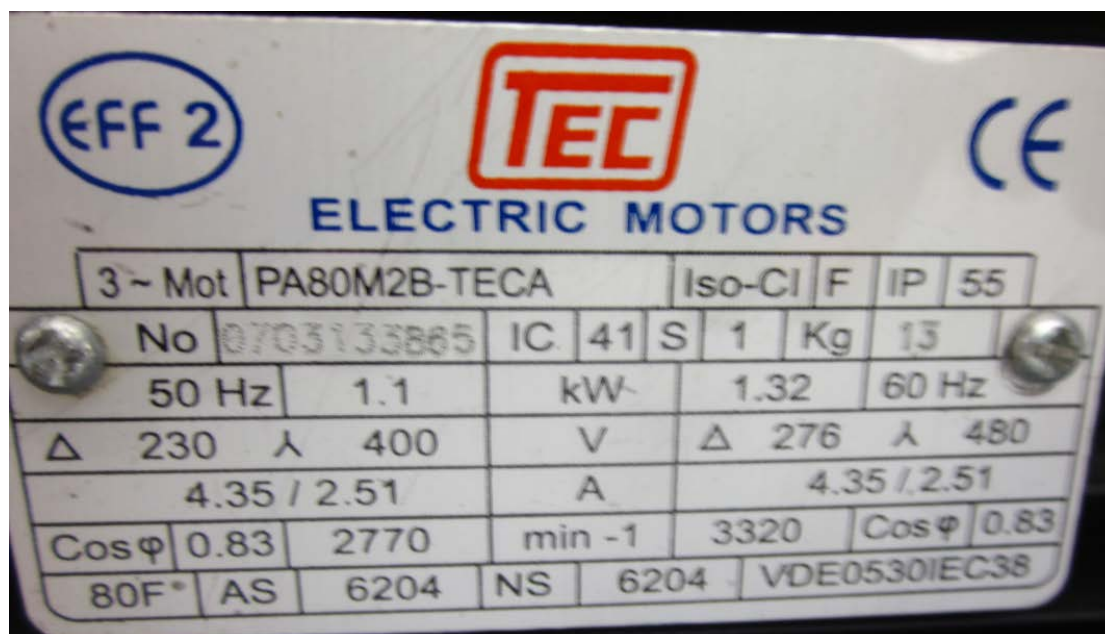
Παράρτημα Γ

Γ.1 Χαρακτηριστικά MiniCTA 54T42

Bridge ratio	1:20
Output voltage	0.05 – 7 Volts
Maximum probe current (4 Ω)	300 mA
Probe operating resistance	4-36 Ω
Equivalent decade resolution	0.07 Ω
CTA bandwidth	>= 10 kHz (55P11 and 50 m/sec in air)
DC-offset	0V or 0.9-2.2V adj.
DC-Gain	1 or 2-5 (cont. adj.)
Output low-pass filters (-3 dB)	1 kHz, 3 kHz, 10 kHz, OFF (approx. 50 kHz)
Max. Cable length	20 m
Power supply	10.5 -14 VDC (min. 0.5 A)
Output impedance	< 150 Ω
Size excl. connectors (L,W, H)	3x6x11 cm
Weight	0.25 kg

Πίνακας 1. Ιδιότητες MiniCTA 54T42

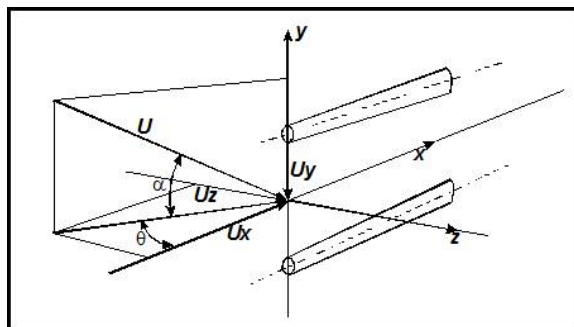
Γ.2 Χαρακτηριστικά ηλεκτροκινητήρα



EFF 2		TEC		CE	
ELECTRIC MOTORS					
3 ~ Mot	PA80M2B-TECA	Iso-Cl	F	IP	55
No	0703133865	IC	41 S	1	Kg 13
50 Hz	1.1	kW		1.32	60 Hz
Δ	230 λ	400	V	Δ	276 λ 480
4.35 / 2.51		A		4.35 / 2.51	
Cos φ	0.83	2770	min -1	3320	Cos φ 0.83
80F*	AS	6204	NS	6204	VDE0530/IEC38

Εικόνα 1 Πινακίδα ηλεκτροκινητήρα που στρέφει τον φυσητήρα αναρρόφησης αέρα

Γ.3 Απόκριση κατεύθυνσης HWA



Η γωνία πρόσπτωσης της ροής στο θερμό νήμα επηρεάζει τη μέτρηση της ταχύτητας του ρευστού. Στις περισσότερες περιπτώσεις το θερμό νήμα τοποθετείται εντός ροής με τον άξονά του (διεύθυνση y) κάθετα στη διεύθυνση της ταχύτητας (διεύθυνση x). Στο σύστημα συντεταγμένων (x,y,z) , ορίζονται οι συνιστώσες της ταχύτητας U_x, U_y, U_z . Ως U_{eff} (effective cooling velocity) ορίζεται η ταχύτητα που ανιχνεύεται από το νήμα καθώς είναι αυτή που ψύχει το αισθητήριο.

Όταν μεταξύ της διεύθυνσης της ροής και του άξονα του νήματος σχηματίζεται οριζόντια (yaw) ή κατακόρυφη ($pitch$) γωνιακή απόκλιση ισχύουν:

$$U_{eff}^2(\alpha) = U^2(\cos^2\alpha + k^2\sin^2\alpha) , \theta = 0$$

$$U_{eff}^2(\theta) = U^2(\cos^2\theta + h^2\sin^2\theta) , \alpha = 0$$

όπου k, h είναι σταθερές που συνήθως δίνονται από τον κατασκευαστή και α, θ είναι οι γωνίες που σχηματίζονται μεταξύ ροής και άξονα του νήματος.

Γ.4 Αλγόριθμος 1 σε προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab

Χρησιμοποιείται για την δημιουργία προφίλ ταχύτητας, την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων και για την εκτίμηση της ογκομετρικής παροχής. Τα δεδομένα των ταχυτήτων εισάγονται στους πίνακες y και οι αντίστοιχες θέσεις στον πίνακα x

```
% ΠΡΟΦΙΛ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ
close all;clear all;clc
% τιμές ταχύτητας, επίπεδο yz
%Οι αρνητικές τιμές του χ αντιστοιχούν σε περιοχή κοντά στην είσοδο
%του hot wire
%x η απόσταση από το κέντρο της διαμέτρου, y οι ταχύτητες σε αυτές
%τις θέσεις
%plot κάθετου προφιλ.
x = [-7 -5.25 -3.5 -1.75 0 1.75 3.5 5.25 7];
y = [0 6.691 8.269 9.201 9.421 9.307 8.447 7.433 0];
t = -7:.01:7;
f = pchip(x,y,t);
s = spline(x,y,t);
subplot(1,2,1),plot(x,y,'o',t,f,'-',t,s,'-.','LineWidth',2)
legend('Τιμές hot-wire','Πολυώνυμο
Hermite','spline',4);set(legend,'FontSize',18);
```

```

title('Προφίλ ταχύτητας στο επίπεδο xz','FontSize',18)
xlabel('Απόσταση από το μέσο(cm)','FontSize',18)
ylabel('Ταχύτητα(m/s)','FontSize',18)
%plot οριζόντιου προφίλ
y = [0 6.966 8.260 9.235 9.582 9.535 8.899 7.376 0];
g = pchip(x,y,t);
s = spline(x,y,t);
subplot(1,2,2),plot(x,y,'o',t,g,'-',t,s,'-.','LineWidth',2)
legend('Τιμές hot-wire','Πολυώνυμο
Hermite','spline',4);set(legend,'FontSize',18);
title('Προφίλ ταχύτητας στο επίπεδο xy','FontSize',18)
xlabel('Απόσταση από το μέσο(cm)','FontSize',18)
ylabel('Ταχύτητα(m/s)','FontSize',18)
%plot των 2 παραπάνω ροών στο χώρο. Η κόκκινη είναι στο επίπεδο xz
thesh=1:1401;
z=zeros(1,1401);
figure
plot3(-7:0.01:7,f(thesh),z,'r','LineWidth',2)
hold on
plot3(z,g(thesh),-7:0.01:7,'LineWidth',2)
axis equal
grid on
title('Προφίλ Ταχύτητας στο χώρο','FontSize',18)
xlabel('Απόσταση από το μέσο(cm)','FontSize',18)
ylabel('Ταχύτητα(m/s)','FontSize',18)
zlabel('Απόσταση από το μέσο (cm)','FontSize',18)
%δημιουργία επιφάνειας εκ περιστροφής από τις παραπάνω ροές
%οι δυο καμπύλες έχουν περιστραφεί κατά +-45 μοίρες γύρω από τον
κεντρικό άξονα
figure
r=-7:0.1:7;
thesh=1:10:1401;
theta = -pi/4:pi/20:pi/4;
xx = bsxfun(@times,r',cos(theta));
yy = bsxfun(@times,r',sin(theta));
zz = repmat(f(thesh)',1,length(theta));
surf(xx,yy,zz)
hold on
theta = pi/4:pi/20:3*pi/4;
xx = bsxfun(@times,r',cos(theta));
yy = bsxfun(@times,r',sin(theta));
zz = repmat(g(thesh)',1,length(theta));
surf(xx,yy,zz)
axis equal
title('Επιφάνεια από περιστροφή των προφίλ ταχύτητας','FontSize',18)
xlabel('Απόσταση από το μέσο(cm)','FontSize',18)
zlabel('Ταχύτητα(m/s)','FontSize',18)

%
% Εκτίμηση παροχής: GULDIN
%Υπολογισμός παροχής από f που βρίσκεται στο θετικό ημιεπίπεδο
sum=0;
epif=0;
for i=0:0.01:6.99
l=100*i+701;
m=(f(l)+f(l+1))*0.01/2;
epif=epif+m;
if (f(l)<f(l+1))
k=i+((f(l)+2*f(l+1))/(f(l)+f(l+1)))*(0.01/3);
else
k=i+((2*f(l)+f(l+1))/(f(l)+f(l+1)))*(0.01/3);
end

```

```

e=m*k;
sum=sum+e;
end
cr=sum/epif
par1=epif*2*pi*cr
%Υπολογισμός παροχής από f που βρίσκεται στο αρνητικό ημιεπίπεδο
sum=0;
epif=0;
for i=-7:0.01:-0.01
l=round(100*i+701);
m=(f(l)+f(l+1))*0.01/2;
epif=epif+m;
    if (f(l)<f(l+1))
        k=i+((f(l)+2*f(l+1))/(f(l)+f(l+1)))*(0.01/3);
    else
        k=i+((2*f(l)+f(l+1))/(f(l)+f(l+1)))*(0.01/3);
    end
e=m*k;
sum=sum+e;
end
cr=abs(sum)/epif
par2=epif*2*pi*cr
%Υπολογισμός παροχής από g που βρίσκεται στο θετικό ημιεπίπεδο
sum=0;
epif=0;
for i=0:0.01:6.99
l=100*i+701;
m=(g(l)+g(l+1))*0.01/2;
epif=epif+m;
    if (g(l)<g(l+1))
        k=i+((g(l)+2*g(l+1))/(g(l)+g(l+1)))*(0.01/3);
    else
        k=i+((2*g(l)+g(l+1))/(g(l)+g(l+1)))*(0.01/3);
    end
e=m*k;
sum=sum+e;
end
cr=sum/epif
par3=epif*2*pi*cr
%Υπολογισμός παροχής από g που βρίσκεται στο αρνητικό ημιεπίπεδο
sum=0;
epif=0;
for i=-7:0.01:-0.01
l=round(100*i+701);
m=(g(l)+g(l+1))*0.01/2;
epif=epif+m;
    if (g(l)<g(l+1))
        k=i+((g(l)+2*g(l+1))/(g(l)+g(l+1)))*(0.01/3);
    else
        k=i+((2*g(l)+g(l+1))/(g(l)+g(l+1)))*(0.01/3);
    end
e=m*k;
sum=sum+e;
end
cr=abs(sum)/epif
par4=epif*2*pi*cr
%Εκτίμηση συνολικής παροχής (m3/s)
Vs=10^(-4)*((par1+par2+par3+par4)/4)

```

Γ.5 Αλγόριθμος υπολογισμού παροχής ENM

Ο αλγόριθμος αυτός χρησιμοποιείται στο μάθημα Εργαστήριο Ναυτικής Μηχανολογίας. Υπολογίζει την ογκομετρική παροχή εισάγοντας (σε ξεχωριστό αρχείο .txt) τις τιμές ταχύτητας για μια σειρά σημείων της διατομής υπολογισμού.

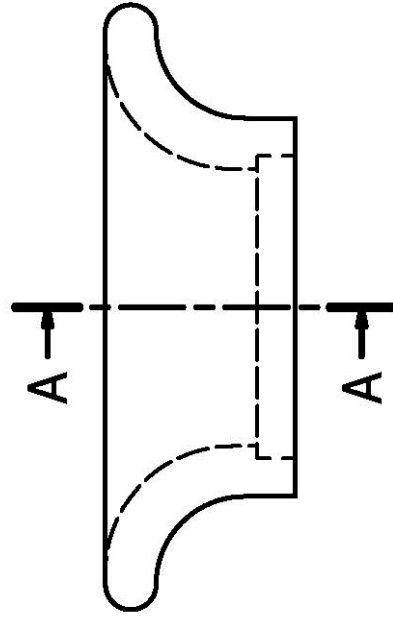
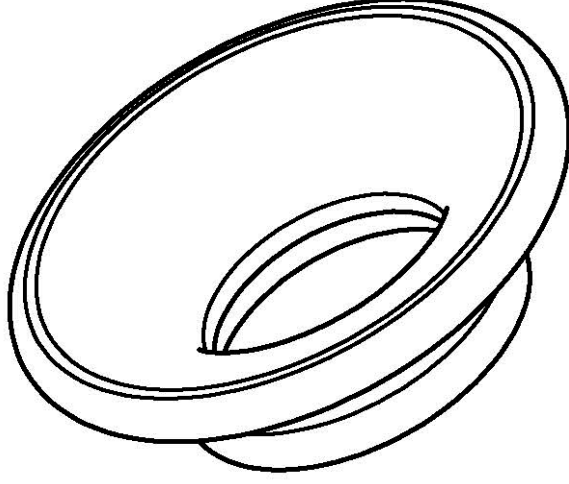
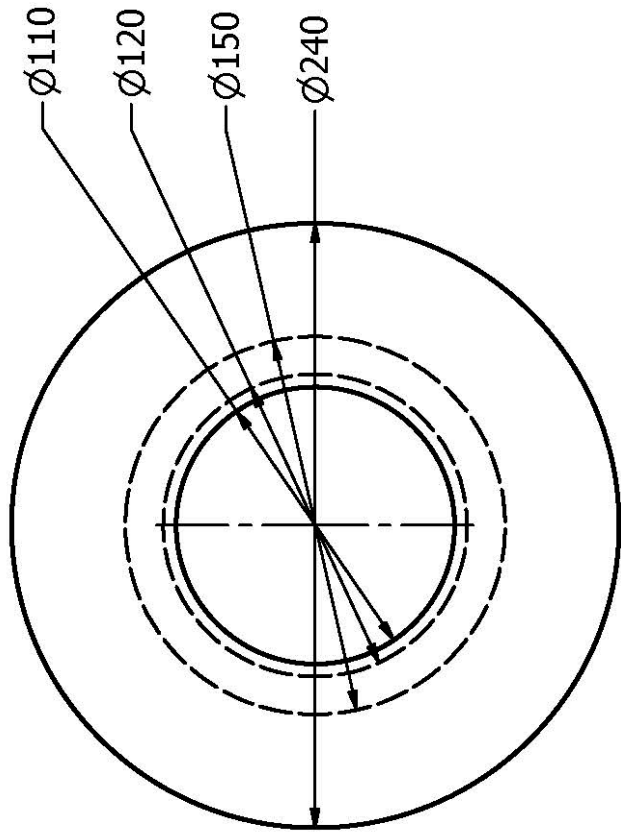
```
% Measurement data across the
% two rectangular planes x1-x2 and x1-x3
%
% CSectionData=zeros(9,4);
CSectionData=dlmread('input_data1.txt',' ',0,0);
%
%
Pm4=[ CSectionData(1,1) CSectionData(1,2) ];
Pm3=[ CSectionData(2,1) CSectionData(2,2) ];
Pm2=[ CSectionData(3,1) CSectionData(3,2) ];
Pm1=[ CSectionData(4,1) CSectionData(4,2) ];
P0 =[ CSectionData(5,1) CSectionData(5,2) ];
P1 =[ CSectionData(6,1) CSectionData(6,2) ];
P2 =[ CSectionData(7,1) CSectionData(7,2) ];
P3 =[ CSectionData(8,1) CSectionData(8,2) ];
P4 =[ CSectionData(9,1) CSectionData(9,2) ];
%
Qm4=[ CSectionData(1,3) CSectionData(1,4) ];
Qm3=[ CSectionData(2,3) CSectionData(2,4) ];
Qm2=[ CSectionData(3,3) CSectionData(3,4) ];
Qm1=[ CSectionData(4,3) CSectionData(4,4) ];
Q0 =[ CSectionData(5,3) CSectionData(5,4) ];
Q1 =[ CSectionData(6,3) CSectionData(6,4) ];
Q2 =[ CSectionData(7,3) CSectionData(7,4) ];
Q3 =[ CSectionData(8,3) CSectionData(8,4) ];
Q4 =[ CSectionData(9,3) CSectionData(9,4) ];
%
% declaration of arrays
sectionlx1=zeros(9,1);          sectionly1=zeros(11,1);
prodS11=zeros(5,1);           prodS12=zeros(5,1);
sectionYS1=zeros(81,1);       var1=zeros(81,1);
%
% Cylinder 1 least squares fit
lsqx1=[0;pi/2;pi;3*pi/2;2*pi];
lsqy1=[P1(1,2);Q1(1,2);Pm1(1,2);Pm1(1,2);Qm1(1,2)];
foptmethod1=fitoptions(...
    'Method','LinearLeastSquares',...
    'Robust','on',...
    'Normalize','on');
[cfun1,gof1]=fit(lsqx1,lsqy1,'poly3');
%
% Cylinder 2 least squares fit
lsqx2=[0;pi/2;pi;3*pi/2;2*pi];
lsqy2=[ P2(1,2);Q2(1,2);Pm2(1,2);Pm2(1,2);Qm2(1,2) ];
foptmethod2=fitoptions(...
    'Method','LinearLeastSquares',...
    'Robust','on',...
    'Normalize','on');
[cfun2,gof2]=fit(lsqx2,lsqy2,'poly3');
%
% Cylinder 3 least squares fit
%
lsqx3=[0;pi/2;pi;3*pi/2;2*pi];
lsqy3=[ P3(1,2);Q3(1,2);Pm3(1,2);Pm3(1,2);Qm3(1,2) ];
```

```

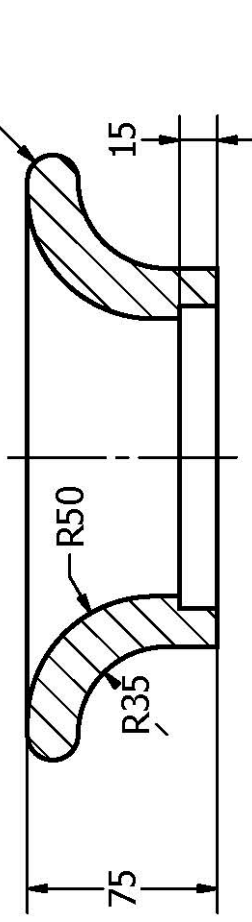
foptmethod3=fitoptions(...
    'Method','LinearLeastSquares',...
    'Robust','on',...
    'Normalize','on');
[cfun3,gof3]=fit(lsqx3,lsqy3,'poly3');
%
% Sections
%
% declaration of boundary slopes
yphi0=1/1.20;    yphi10=-1/1.20;
%
xphi1=Pm4(1,1);xphi2=Pm3(1,1);xphi3=Pm2(1,1);
xphi4=Pm1(1,1);xphi5=P0(1,1) ;xphi6=P1(1,1) ;
xphi7=P2(1,1) ;xphi8=P3(1,1) ;xphi9=P4(1,1) ;
section1xl=[xphi1;xphi2;xphi3;xphi4;xphi5;...
    xphi6;xphi7;xphi8;xphi9];
%
% x values for second spline
incr=70/80;
section1Sx1T=Pm4(1,1):incr:P4(1,1);
section1Sx1 =section1Sx1T';
%
divisions=36;
dangle=pi/divisions;
Vsum=0;
%
for i=1:divisions;
phi=(i-1)*dangle;
yphi1=0;                yphi2=feval(cfun3,pi+phi);
yphi3=feval(cfun2,pi+phi);  yphi4=feval(cfun1,pi+phi);
yphi5=P0(1,2);          yphi6=feval(cfun1,phi);
yphi7=feval(cfun2,phi);  yphi8=feval(cfun3,phi);
yphi9=0;
section1yl=[yphi0;yphi1;yphi2;yphi3;yphi4;yphi5;...
    yphi6;yphi7;yphi8;yphi9;yphi10];
% declaration of 1st spline with 9 points
sectionS1=spline(section1xl,section1yl);
% declaration of 2nd spline with 80 points
section1Sy1 =ppval(sectionS1,section1Sx1);
%
% Volume of section 1 rotated by phi
% according to the 2nd Guldin's rule
% Left quadrant
prodS11=section1Sx1.*section1Sy1;
funGuldin1=spline(section1Sx1,prodS11);
hGuldinS1=@(x)ppval(funGuldin1,x);
YS11=-quad(hGuldinS1,Pm4(1,1),0);
% Right quadrant
YS12= quad(hGuldinS1,0,P4(1,1));
% Volume of rotated section 1 by phi
V1=(YS11+YS12)*dangle;
Vsum=Vsum+V1;
end

```

Γ.6 Σχέδιο Bellmouth



A-A (1 : 3)



Designed by
Νικολάου Αντώνιος

Checked by

Approved by

Date

1/7/2013

Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο,
Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων
Μηχανικών

ΒΕΛΛΜΟΥΤΗ για την εισαγωγή αέρα του Η/Ζ

Edition

Sheet
2 / 2

Κλίμακα(1:3)

Γ.7 Υπολογισμός θεμελιώδους συχνότητας Helmholtz σωλήνα δοκιμών αέρα ENM

Ο υπολογισμός που ακολουθεί [34], έγινε με βάση το μοντέλο του Greitzer [33]. Ο ενεργός παλλόμενος όγκος σωλήνα μήκους 1.6m (L_0), σταθερής κυκλικής διατομής ακτίνας 0,07m, έχει σχήμα κωνοειδές. Η θεώρηση κωνοειδούς σχήματος προκύπτει εξαιτίας της ύπαρξης διαφράγματος στη ροή.

Η συχνότητα Helmholtz για τον ενεργό όγκο δίνεται από τη σχέση:

$$\omega_H = v_0 \sqrt{\frac{A_i}{V_0 L}} = 157 s^{-1}$$

όπου v_0 η ταχύτητα του ήχου, A_i η επιφάνεια της κυκλικής διατομής του αγωγού και V_0 ο όγκος του αέρα που περικλείεται από τον αγωγό. Ο συντελεστής L δίνεται από τη σχέση:

$$L = \frac{L_0}{\varepsilon - 1} \ln(\varepsilon)$$

όπου $\varepsilon = \frac{A_e}{A_i} = 4$ για τον κωνικό παλλόμενο όγκο (Greitzer model) της συγκεκριμένης διάταξης.

Επομένως η θεμελιώδης συχνότητα είναι: $f_1 = \frac{\omega_H}{2\pi} = 25 Hz$

Παράρτημα Δ

Σύνοψη παραρτήματος

Στο παράρτημα Δ συγκεντρώνονται οι πίνακες που περιλαμβάνουν τις τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση των μετρητικών, και τις συγκρίσεις των καμπυλών βαθμονόμησης του κεφαλαίου 3.

Δ.1 Μετρήσεις ταχύτητας με σωλήνα Prandtl

Δεδομένα από το μέσο κυκλικής διατομής

Οι διαφορές ΔP και ΔP_2 υπό μορφή Volts, λαμβάνονται μέσω του πολυμέτρου, που είναι συνδεδεμένο με μανόμετρο (Κεφάλαιο 3). Στο εξής, με ΔP (Pa) συμβολίζεται η διαφορά ολικής - στατικής πίεσης, ενώ ΔP_2 (Pa) είναι η ένδειξη του μανομέτρου για τη διαφορά ατμοσφαιρικής - στατικής πίεσης.

Συνυπολογίζοντας την θερμοκρασία και την ατμοσφαιρική πίεση, από την καταστατική εξίσωση των τελείων αερίων υπολογίστηκε η πυκνότητα ρ . Οι σημειακές ταχύτητες του αέρα προκύπτουν από την εξίσωση 3.4.

Ο πίνακας Δ.1 περιλαμβάνει τις σημειακές μετρήσεις ταχύτητας που πραγματοποιήθηκαν στο μέσο διαμέτρου της διάταξης δοκιμών αέρα, για σειρά παροχών που καλύπτουν το εύρος λειτουργίας του ηλεκτρικού κινητήρα. Η διάμετρος βρίσκεται σε διατομή κοντά στο μέσο του μήκους του σωλήνα, όπου και πραγματοποιήθηκε το σύνολο των βαθμονομήσεων των HWA.

Ατμοσφαιρική πίεση: 984,05mbar, θερμοκρασία περιβάλλοντος: 21,7°C							
Inverter (Hz)	n_{ov} (RPM)	ΔP (V)	ΔP_2 (V)	ΔP (Pa)	P_s (Pa)	ρ (Kg/m ³)	u (m/s)
50	3000	0,304	1,056	48,56	97836	1,156	9,17
49	2940	0,294	1,016	46,96	97843	1,156	9,01
48	2880	0,285	0,976	45,52	97849	1,156	8,87
47	2820	0,274	0,946	43,76	97854	1,156	8,70
46	2760	0,264	0,926	42,16	97857	1,156	8,54
45	2700	0,253	0,896	40,40	97862	1,156	8,36
44	2640	0,245	0,856	39,12	97868	1,156	8,23
43	2580	0,234	0,826	37,36	97873	1,156	8,04
42	2520	0,227	0,796	36,24	97878	1,156	7,92
41	2460	0,216	0,766	34,48	97883	1,156	7,72
40	2400	0,208	0,736	33,20	97887	1,157	7,58
38	2280	0,189	0,666	30,16	97899	1,157	7,22
36	2160	0,172	0,606	27,44	97908	1,157	6,89
34	2040	0,156	0,551	24,88	97917	1,157	6,56

32	1920	0,140	0,496	22,32	97926	1,157	6,21
30	1800	0,127	0,446	20,24	97934	1,157	5,91
28	1680	0,113	0,396	18,00	97942	1,158	5,58
26	1560	0,101	0,346	16,08	97950	1,158	5,27
24	1440	0,086	0,306	13,68	97956	1,158	4,86
22	1320	0,074	0,266	11,76	97963	1,158	4,51
20	1200	0,064	0,226	10,16	97969	1,158	4,19
18	1080	0,055	0,192	8,72	97974	1,158	3,88
16	960	0,046	0,161	7,28	97979	1,158	3,55
14	840	0,038	0,131	6,00	97984	1,158	3,22
12	720	0,031	0,104	4,88	97988	1,158	2,90
10	600	0,024	0,080	3,76	97992	1,158	2,55
8	480	0,012	0,051	1,92	97997	1,161	1,82
7	420	0,010	0,042	1,63	97998	1,161	1,68
6	360	0,009	0,034	1,39	98000	1,161	1,55
5	300	0,006	0,024	0,90	98001	1,161	1,24

Πίνακας Δ. 1 Υπολογισμός ταχυτήτων με σωλήνα Prandtl στο μέσο διατομής

Στον παραπάνω πίνακα, καθώς και σε όλες τις μετρήσεις που ακολουθούν, οι στρογγυλοποιήσεις πραγματοποιήθηκαν στο τέλος των υπολογισμών για αποφυγή συσσώρευσης σφαλμάτων.

Δεδομένα κατά το μήκος διαμέτρου της κυκλικής διατομής

Το πείραμα που παρουσιάζεται ακολούθως, πραγματοποιήθηκε στον πρότυπο σωλήνα δοκιμών αέρα. Τα σημεία μέτρησης για κάθε παροχή ήταν πέντε, ισοκατανεμημένα κατά το μήκος της διαμέτρου (14cm). Οι θέσεις των σημείων μέτρησης παρουσιάζονται στην πρώτη στήλη του πίνακα. Οι αποστάσεις μετρώνται από το μέσο της διατομής. Αρνητικές αποστάσεις αντιστοιχούν σε σημεία πλησιέστερα στην είσοδο του σωλήνα Prandtl ενώ οι μηδενικές τιμές απόστασης αντιστοιχούν στο μέσο της κυκλικής διατομής.

Ατμοσφαιρική πίεση 974.16mbar, θερμοκρασία περιβάλλοντος 21.9°C								
Απόσταση από το μέσο (cm)	Inverter (Hz)	n_{ov} (RPM)	ΔP (V)	ΔP_2 (V)	ΔP (Pa)	P_s (Pa)	ρ (kg/m ³)	u (m/s)
4,66	50	3000	0,191	1,115	30,48	97299	1,149	7,28
2,33	50	3000	0,258	1,113	41,20	97299	1,149	8,47
0	50	3000	0,293	1,112	46,80	97300	1,149	9,02
-2,33	50	3000	0,274	1,115	43,76	97299	1,149	8,73
-4,66	50	3000	0,206	1,118	32,96	97299	1,149	7,57

4,66	40	2400	0,131	0,802	20,88	97349	1,150	6,03
2,33	40	2400	0,175	0,800	27,92	97350	1,150	6,97
0	40	2400	0,202	0,803	32,24	97349	1,150	7,49
-2,33	40	2400	0,189	0,802	30,16	97349	1,150	7,24
-4,66	40	2400	0,139	0,803	22,16	97349	1,150	6,21

4,66	30	1800	0,078	0,519	12,40	97394	1,150	4,64
2,33	30	1800	0,104	0,519	16,56	97394	1,150	5,37
0	30	1800	0,121	0,521	19,28	97394	1,150	5,79
-2,33	30	1800	0,113	0,518	18,00	97395	1,150	5,59
-4,66	30	1800	0,082	0,520	13,04	97394	1,150	4,76

4,66	20	1200	0,040	0,306	6,32	97429	1,151	3,31
2,33	20	1200	0,051	0,305	8,08	97429	1,151	3,75
0	20	1200	0,060	0,306	9,52	97429	1,151	4,07
-2,33	20	1200	0,055	0,304	8,72	97429	1,151	3,89
-4,66	20	1200	0,040	0,302	6,32	97429	1,151	3,31

4,66	10	600	0,016	0,158	2,48	97452	1,151	2,08
2,33	10	600	0,017	0,162	2,64	97452	1,151	2,14
0	10	600	0,021	0,160	3,28	97452	1,151	2,39
-2,33	10	600	0,016	0,158	2,48	97452	1,151	2,08
-4,66	10	600	0,014	0,159	2,18	97452	1,151	1,94

Πίνακας Δ. 2 Μετρήσεις με σωλήνα Prandtl κατά το μήκος διαμέτρου

Δ.2 Βαθμονόμηση θερμού νήματος

Ο πίνακας Δ.3 αποτελείται από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση του θερμού νήματος. Το διάφραγμα (orifice plate) είχε αφαιρεθεί από τη διάταξη και για αυτό, οι ταχύτητες που ελήφθησαν είναι μεγαλύτερες από αυτές που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 3.2 (Πίνακες Δ.2, Δ.3). Η στήλη u_r (reference) αποτελείται από τις σημειακές ταχύτητες του ρευστού που ελήφθησαν μέσω του σωλήνα Prandtl. E είναι η στιγμιαία τάση στο νήμα. Οι στήλες u_r^n και E^2 χρησιμοποιούνται στην εξαγωγή της καμπύλης βαθμονόμησης σύμφωνα με το νόμο του King.

Στη συγκεκριμένη βαθμονόμηση, η διαφορά στατικής-ολικής πίεσης (ΔP) προκύπτει ως ο μέσος όρος δυο τιμών (ΔP_α , ΔP_β). Η πρώτη λαμβάνεται με τον σωλήνα Prandtl σε οριζόντια θέση (άξονας y), ενώ η δεύτερη με το σωλήνα σε κατακόρυφη θέση (άξονας z). Το σημείο μέτρησης παραμένει το ίδιο όπως και η διεύθυνση της κατάληξης του σωλήνα εντός ροής (άξονας x , κατά το μήκος του σωλήνα). Η επανάληψη των μετρήσεων (ΔP_β) έγινε μετά από

τη λήψη των τάσεων του νήματος, δηλαδή μετά από την πάροδο σημαντικού χρονικού διαστήματος. Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε με σκοπό την επαλήθευση των μετρήσεων και οι αποκλίσεις που παρατηρούνται είναι μικρές. Ο εκθέτης n έχει οριστεί ίσος με 0,45.

<i>Σημείο λήψης δεδομένων: μέσο διαμέτρου.</i>											
<i>Ατμοσφαιρική πίεση: 983,18mbar, θερμοκρασία περιβάλλοντος: 19,12°C.</i>											
n_{ov} (RPM)	ΔP_α (V)	ΔP_β (V)	ΔP (V)	ΔP_2 (V)	ΔP (Pa)	P_s (Pa)	ρ (m ³ /s)	u_r (m/s)	Τάση Hot Wire E (V)	E^2	u_r^n
2520	1,50	1,50	1,50	4,84	239,85	97543	1,16	20,34	2,21	4,88	3,88
2400	1,37	1,37	1,37	4,46	219,37	97604	1,16	19,45	2,20	4,82	3,80
2280	1,23	1,24	1,24	4,03	197,77	97673	1,16	18,46	2,18	4,73	3,71
2160	1,11	1,11	1,11	3,67	178,17	97730	1,16	17,51	2,16	4,68	3,63
2040	0,99	1,00	0,99	3,29	159,13	97791	1,16	16,55	2,15	4,60	3,54
1920	0,88	0,89	0,88	2,94	141,53	97847	1,16	15,60	2,13	4,52	3,44
1800	0,78	0,79	0,78	2,62	125,29	97898	1,16	14,67	2,11	4,45	3,35
1680	0,68	0,68	0,68	2,29	108,41	97952	1,16	13,65	2,09	4,37	3,24
1560	0,58	0,59	0,58	1,99	93,53	97999	1,16	12,67	2,07	4,26	3,14
1440	0,49	0,50	0,50	1,70	79,29	98045	1,17	11,66	2,05	4,18	3,02
1320	0,41	0,42	0,42	1,44	66,41	98087	1,17	10,67	2,02	4,08	2,90
1200	0,34	0,35	0,35	1,21	55,29	98124	1,17	9,74	2,00	3,98	2,78
1080	0,27	0,28	0,28	0,98	44,09	98161	1,17	8,69	1,97	3,86	2,65
960	0,21	0,22	0,21	0,77	34,33	98194	1,17	7,67	1,94	3,74	2,50
840	0,16	0,17	0,17	0,60	26,41	98221	1,17	6,73	1,90	3,61	2,36
720	0,12	0,12	0,12	0,44	19,21	98247	1,17	5,74	1,87	3,48	2,19
600	0,08	0,08	0,08	0,31	13,05	98268	1,17	4,73	1,82	3,31	2,01

Πίνακας Δ. 3 Τιμές βαθμονόμησης θερμού νήματος

Ο πίνακας Δ.4 προκύπτει από την εφαρμογή των καμπυλών βαθμονόμησης στα δεδομένα που δίνει το HWA, όπως αυτά παρουσιάζονται στον Πίνακα Δ.3. Η γραμμή του πίνακα Δ.4, μέσος όρος, αντιστοιχεί στον μέσο όρο των απολύτων τιμών των διαφορών κάθε στήλης.

Prandtl u_r (m/s)	Πολυών. 3ου Βαθμού u_{p3} (m/s)	Πολυών. 4ου Βαθμού u_{p4} (m/s)	Πολυών. 5ου Βαθμού u_{p5} (m/s)	Νόμος King u_k (m/s)	% Διαφορά $u_{p3}-u_r$	% Διαφορά $u_{p4}-u_r$	% Διαφορά $u_{p5}-u_r$	% Διαφορά u_k-u_r
20,34	20,38	20,39	20,35	20,35	0,22	0,23	0,06	0,05
19,45	19,45	19,60	19,47	19,44	0,01	0,78	0,15	-0,04
18,46	18,25	18,41	18,31	18,27	-1,14	-0,27	-0,81	-1,03
17,51	17,55	17,72	17,62	17,59	0,22	1,15	0,59	0,43
16,55	16,55	16,71	16,60	16,60	0,01	0,97	0,33	0,35
15,6	15,48	15,63	15,51	15,56	-0,77	0,18	-0,56	-0,28
14,67	14,71	14,85	14,73	14,80	0,26	1,21	0,38	0,87
13,65	13,73	13,86	13,73	13,83	0,62	1,55	0,63	1,38
12,67	12,57	12,68	12,56	12,69	-0,78	0,09	-0,84	0,12
11,66	11,70	11,80	11,69	11,82	0,30	1,16	0,25	1,32
10,67	10,67	10,76	10,68	10,79	0,00	0,86	0,05	1,10
9,74	9,71	9,80	9,74	9,83	-0,23	0,69	0,01	0,92
8,69	8,65	8,75	8,69	8,75	-0,49	0,60	0,01	0,63
7,67	7,68	7,78	7,73	7,75	0,12	1,48	0,78	1,10
6,73	6,65	6,77	6,69	6,69	-1,06	0,62	-0,53	-0,48
5,74	5,74	5,85	5,75	5,73	0,11	1,99	0,23	-0,01
4,73	4,72	4,77	4,73	4,64	-0,10	0,96	0,17	-1,75
Μέσος όρος					0,38	0,87	0,37	0,7

Πίνακας Δ. 4 Διαφορά % καμπυλών βαθμονόμησης, ταχυτήτων αναφοράς

Δ.3 Βαθμονόμηση θερμού φιλμ

Για την βαθμονόμηση του θερμού φιλμ στην πρότυπη διάταξη δοκιμών αέρα του ENM αναπτύχθηκαν οι πίνακες Δ.5 και Δ.6. Ο πίνακας Δ.6 χρησιμοποιήθηκε ως μέτρο σύγκρισης των καμπυλών βαθμονόμησης, σε συνδυασμό με δύο νέες καμπύλες βαθμονόμησης που υπολογίστηκαν λαμβάνοντας υπόψη τμήμα του εύρους ταχυτήτων αναφοράς. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι αντίστοιχη με αυτή της βαθμονόμησης του θερμού νήματος και περιγράφεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 3.

Ατμοσφαιρική πίεση 990mbar, θερμοκρασία 19.5⁰C σταθερή.
Σημείο λήψης δεδομένων: μέσο της διαμέτρου. Τιμή εκθέτη n :0.5

n_{ov} (RPM)	ΔP (V)	ΔP_2 (V)	ΔP (Pa)	P_s (Pa)	ρ (m ³ /s)	u_r (m/s)	Τάση φιλμ E (V)	u^n	E^2
3000	2,086	6,90	347,20	97894	1,17	23,93	3,45	4,89	11,90
2700	1,716	5,72	274,48	98086	1,17	21,68	3,39	4,66	11,49
2400	1,381	4,49	220,88	98283	1,17	19,43	3,32	4,41	11,02
2100	1,061	3,52	169,68	98438	1,17	17,02	3,23	4,13	10,43
1800	0,787	2,65	125,84	98577	1,17	14,65	3,14	3,83	9,85
1500	0,550	1,90	87,92	98697	1,17	12,23	3,05	3,50	9,27
1200	0,346	1,22	55,28	98806	1,18	9,70	2,95	3,11	8,67
900	0,191	0,70	30,48	98888	1,18	7,20	2,81	2,68	7,90
600	0,084	0,33	13,36	98948	1,18	4,76	2,63	2,18	6,91
540	0,065	0,26	10,32	98959	1,18	4,19	2,58	2,05	6,66
480	0,049	0,20	7,76	98968	1,18	3,63	2,54	1,91	6,45
420	0,036	0,14	5,68	98977	1,18	3,11	2,48	1,76	6,15
360	0,022	0,10	3,44	98984	1,18	2,42	2,40	1,55	5,76
300	0,011	0,06	1,68	98990	1,18	1,69	2,30	1,30	5,27
240	0,004	0,04	0,72	98994	1,18	1,11	2,18	1,05	4,75

Πίνακας Δ. 5 Τιμές βαθμονόμησης θερμού φιλμ

u_r (m/s)	Πολυών. 4ου Βαθμού u_{P4} (m/s)	Νόμος King u_K (m/s)	Πολυών. 4ου Βαθμού u_{P4B} (m/s)	Νόμος King u_{KB} (m/s)	% Διαφορά $u_{P4}-u_r$	% Διαφορά u_K-u_r	% Διαφορά $u_{P4B}-u_r$	% Διαφορά $u_{KB}-u_r$
23,93	23,84	23,95	24,11	23,98	-0,39	0,07	0,76	0,20
21,68	21,85	21,82	21,83	21,86	0,79	0,65	0,67	0,82
19,43	19,64	19,51	19,61	19,55	1,08	0,42	0,91	0,63
17,02	16,97	16,80	17,13	16,84	-0,29	-1,30	0,66	-1,03
14,65	14,48	14,32	14,77	14,37	-1,14	-2,19	0,86	-1,85
12,23	12,14	12,04	12,33	12,09	-0,78	-1,56	0,82	-1,15
9,70	9,92	9,90	9,78	9,95	2,28	2,09	0,91	2,63
7,20	7,36	7,43	6,96	7,48	2,24	3,24	-3,35	3,96
4,76	4,68	4,80	6,83	4,85	-1,75	0,71	43,48	1,72
4,19	4,11	4,22	8,14	4,27	-1,78	0,87	94,43	2,00
3,63	3,68	3,78	9,84	3,82	1,36	4,13	171,16	5,38
3,11	3,10	3,17	13,66	3,22	-0,29	2,16	339,77	3,56

Πίνακας Δ. 6 Διαφορά % καμπυλών βαθμονόμησης, ταχυτήτων αναφοράς

Παράρτημα Ε

Σύνοψη παραρτήματος

Στο παράρτημα Ε συγκεντρώνονται πίνακες μετρήσεων που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή των προφίλ ταχύτητας, καθώς και για τον υπολογισμό των ογκομετρικών παροχών που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 4.

Ε.1 Μετρήσεις ταχύτητας αέρα στην πρότυπη διάταξη δοκιμών

Ε.1.1 Βαθμονόμηση θερμού νήματος

Ατμοσφαιρική πίεση 994.5mbar, θερμοκρασία 21°C									
n_{ov} (RPM)	Hot Wire E(V)	ΔP (V)	ΔP_2 (V)	ΔP (Pa)	P_s (Pa)	ρ (Kg/m ³)	u (m/s)	E^2	u^n
480	1,75	0,05	0,20	7,92	99419	1,18	3,67	3,06	1,79
600	1,81	0,08	0,32	13,00	99400	1,18	4,70	3,27	2,01
720	1,85	0,12	0,46	19,52	99377	1,18	5,76	3,42	2,20
840	1,88	0,17	0,61	26,40	99353	1,18	6,70	3,53	2,35
960	1,91	0,22	0,79	34,72	99324	1,18	7,68	3,65	2,50
1080	1,95	0,28	0,99	44,32	99292	1,18	8,68	3,80	2,64
1200	1,98	0,35	1,21	55,36	99257	1,18	9,71	3,92	2,78
1320	2,01	0,42	1,46	67,20	99217	1,18	10,69	4,04	2,90
1440	2,04	0,50	1,73	80,64	99174	1,17	11,72	4,16	3,03
1560	2,06	0,58	1,99	93,28	99132	1,17	12,61	4,22	3,13
1680	2,08	0,68	2,29	108,48	99084	1,17	13,60	4,31	3,24
1800	2,10	0,79	2,60	126,88	99035	1,17	14,71	4,41	3,35
1920	2,12	0,90	2,96	143,36	98977	1,17	15,64	4,49	3,45
2040	2,14	1,00	3,29	160,48	98924	1,17	16,55	4,56	3,54
2160	2,16	1,12	3,67	179,84	98864	1,17	17,53	4,65	3,63
2280	2,18	1,25	4,06	199,68	98801	1,17	18,47	4,74	3,71
2400	2,19	1,37	4,46	219,68	98737	1,17	19,38	4,80	3,80
2520	2,20	1,51	4,85	240,80	98675	1,17	20,30	4,86	3,88
2640	2,22	1,63	5,20	261,44	98619	1,17	21,16	4,93	3,95
2760	2,24	1,77	5,60	283,68	98555	1,17	22,05	5,02	4,02
2880	2,26	1,93	6,10	308,80	98475	1,17	23,01	5,11	4,10

Πίνακας Ε. 1 Τιμές βαθμονόμησης θερμού νήματος

Ε.1.2 Δεδομένα ταχύτητας για δημιουργία προφίλ στην πρότυπη διάταξη δοκιμών αέρα

Το τυπικό σφάλμα σε όλες τις τιμές των πινάκων έχει υπολογιστεί για πλήθος σημείων μέτρησης ίσο με 500. Η τελική τιμή της ταχύτητας έχει τη μορφή $v = \bar{v} \pm \sigma_{\bar{v}}$.

Η πρώτη στήλη των δύο πινάκων αποτελείται από τις ονομαστικές στροφές λειτουργίας του ηλεκτροκινητήρα που κινεί το φουσητήρα αναρρόφησης αέρα.

Μετρήσεις ταχύτητας στον άξονα γ

Από τον ακόλουθο πίνακα προκύπτουν τα προφίλ ταχύτητας στο επίπεδο xy

n_{ov} (RPM)	Θέση	Απόσταση από το κέντρο (cm)	Hot Wire \bar{E} (V)	Ταχύτητα \bar{v} (m/s)	$\sigma_{\bar{v}}$	Αδιάστατες Ταχύτητες u/u_{max}
1200	r=R	7	-	0	-	0
1200	1	5,25	1,895	6,966	0,020	0,727
1200	2	3,5	1,940	8,260	0,017	0,862
1200	3	1,75	1,970	9,235	0,014	0,964
1200	4	0	1,980	9,582	0,012	1,000
1200	5	1,75	1,970	9,235	0,014	0,964
1200	6	3,5	1,960	8,899	0,017	0,929
1200	7	5,25	1,910	7,376	0,022	0,770
1200	r=R	7	-	0	-	0

1500	r=R	7	-	0	-	0
1500	1	5,25	1,959	8,866	0,027	0,745
1500	2	3,5	2,005	10,499	0,022	0,882
1500	3	1,75	2,033	11,611	0,016	0,975
1500	4	0	2,040	11,903	0,013	1,000
1500	5	1,75	2,035	11,694	0,013	0,982
1500	6	3,5	2,028	11,406	0,019	0,958
1500	7	5,25	1,988	9,868	0,024	0,829
1500	r=R	7	-	0	-	0

1800	r=R	7	-	0	-	0
1800	1	5,25	2,010	10,691	0,029	0,731
1800	2	3,5	2,056	12,591	0,025	0,861
1800	3	1,75	2,089	14,096	0,017	0,964
1800	4	0	2,100	14,622	0,013	1,000
1800	5	1,75	2,095	14,382	0,013	0,984
1800	6	3,5	2,080	13,675	0,017	0,935
1800	7	5,25	2,043	12,030	0,026	0,823
1800	r=R	7	-	0	-	0

2100	r=R	7	-	0	-	0
2100	1	5,25	2,054	12,504	0,031	0,741
2100	2	3,5	2,101	14,670	0,025	0,869
2100	3	1,75	2,135	16,345	0,020	0,968
2100	4	0	2,145	16,881	0,012	1,000
2100	5	1,75	2,140	16,622	0,013	0,985
2100	6	3,5	2,129	16,060	0,020	0,951
2100	7	5,25	2,088	14,049	0,029	0,832
2100	r=R	7	-	0	-	0

2400	r=R	7	-	0	-	0
2400	1	5,25	2,094	14,334	0,035	0,750
2400	2	3,5	2,145	16,881	0,027	0,884
2400	3	1,75	2,175	18,462	0,019	0,966
2400	4	0	2,187	19,106	0,012	1,000
2400	5	1,75	2,185	18,998	0,012	0,994
2400	6	3,5	2,170	18,196	0,021	0,952
2400	7	5,25	2,129	16,060	0,030	0,841
2400	r=R	7	-	0	-	0

2700	r=R	7	-	0	-	0
2700	1	5,25	2,130	16,085	0,037	0,760
2700	2	3,5	2,179	18,676	0,026	0,883
2700	3	1,75	2,212	20,431	0,019	0,965
2700	4	0	2,225	21,162	0,016	1,000
2700	5	1,75	2,218	20,783	0,014	0,982
2700	6	3,5	2,205	20,078	0,021	0,949
2700	7	5,25	2,167	18,020	0,032	0,852
2700	r=R	7	-	0	-	0

Πίνακας Ε. 2 Μετρήσεις ταχύτητας αέρα με HWA στον άξονα γ

Μετρήσεις ταχύτητας στον άξονα z

Από το ακόλουθο πίνακα προκύπτουν τα προφίλ ταχύτητας στο επίπεδο xz

n_{ov} (RPM)	Θέση	Απόσταση από το κέντρο (cm)	Hot Wire \bar{E} (V)	Ταχύτητα \bar{u} (m/s)	$\sigma_{\bar{u}}$	Αδιάστατες Ταχύτητες u/u_{max}
1200	r=R	7	-	0	-	0
1200	1	5,25	1,893	6,912	0,0207	0,734
1200	2	3,5	1,940	8,269	0,0187	0,878
1200	3	1,75	1,969	9,201	0,0143	0,977
1200	4	0	1,975	9,421	0,0117	1,000
1200	5	1,75	1,975	9,407	0,0120	0,999
1200	6	3,5	1,946	8,447	0,0181	0,897
1200	7	5,25	1,912	7,433	0,0187	0,789
1200	r=R	7	-	0	-	0

1500	r=R	7	-	0	-	0
1500	1	5,25	1,950	8,574	0,0229	0,723
1500	2	3,5	2,010	10,691	0,0225	0,902
1500	3	1,75	2,033	11,599	0,0179	0,979
1500	4	0	2,039	11,853	0,0132	1,000
1500	5	1,75	2,037	11,777	0,0134	0,994
1500	6	3,5	2,009	10,653	0,0227	0,899
1500	7	5,25	1,971	9,269	0,0213	0,782
1500	r=R	7	-	0	-	0

1800	r=R	7	-	0	-	0
1800	1	5,25	2,006	10,537	0,0275	0,731
1800	2	3,5	2,058	12,679	0,0257	0,880
1800	3	1,75	2,088	14,049	0,0196	0,975
1800	4	0	2,096	14,410	0,0128	1,000
1800	5	1,75	2,095	14,382	0,0155	0,998
1800	6	3,5	2,063	12,896	0,0236	0,895
1800	7	5,25	2,023	11,204	0,0246	0,777
1800	r=R	7	-	0	-	0

2100	r=R	7	-	0	-	0
2100	1	5,25	2,052	12,417	0,0309	0,738
2100	2	3,5	2,104	14,816	0,0262	0,881
2100	3	1,75	2,134	16,314	0,0181	0,970
2100	4	0	2,144	16,814	0,0123	1,000
2100	5	1,75	2,140	16,622	0,0140	0,989
2100	6	3,5	2,107	14,962	0,0246	0,890
2100	7	5,25	2,069	13,171	0,0273	0,783
2100	r=R	7	-	0	-	0

2400	r=R	7	-	0	-	0
2400	1	5,25	2,093	14,272	0,0353	0,751
2400	2	3,5	2,145	16,881	0,0265	0,889
2400	3	1,75	2,177	18,574	0,0193	0,978
2400	4	0	2,185	18,998	0,0124	1,000
2400	5	1,75	2,183	18,891	0,0154	0,994
2400	6	3,5	2,149	17,089	0,0253	0,899
2400	7	5,25	2,108	15,011	0,0300	0,790
2400	r=R	7	-	0	-	0

2700	r=R	7	-	0	-	0
2700	1	5,25	2,127	15,958	0,0355	0,756
2700	2	3,5	2,179	18,698	0,0278	0,886

2700	3	1,75	2,213	20,512	0,0192	0,972
2700	4	0	2,224	21,108	0,0162	1,000
2700	5	1,75	2,222	21,000	0,0179	0,995
2700	6	3,5	2,184	18,944	0,0259	0,897
2700	7	5,25	2,141	16,674	0,0298	0,790
2700	r=R	7		0	-	0

Πίνακας Ε. 3 Μετρήσεις ταχύτητας αέρα με HWA στον άξονα z

Πέραν του τυπικού σφάλματος που παρουσιάζεται στους πίνακες, οι παραπάνω υπολογισμοί ταχύτητας περιέχουν σφάλμα βαθμονόμησης. Η πλειονότητα των σφαλμάτων κυμαίνεται κάτω του 1% (διάγραμμα 4.3). Όμως το μέγιστο σφάλμα είναι 3.3%. Επομένως, η τιμή της ταχύτητας υπολογίζεται με ακρίβεια $\pm 3,3\%$.

Ε.1.3 Βαθμονόμηση HWA με το διάφραγμα στην διάταξη δοκιμών αέρα

Ατμοσφαιρική πίεση 1003,5mbar, θερμοκρασία 21,7°C									
n_{ov} (RPM)	Hot Wire E(V)	ΔP (Pa)	P_s (Pa)	ρ (Kg/m ³)	u (m/s)	E^2	u^n	u_k (m/s)	Διαφορά % $u_k - u_r$
2700	1,928	38,8	100202	1,187	8,087	3,717	2,561	8,155	0,845
2400	1,892	31,44	100229	1,187	7,278	3,580	2,443	7,054	-3,082
2100	1,867	24,48	100252	1,187	6,422	3,486	2,309	6,352	-1,086
1800	1,837	18,448	100275	1,188	5,574	3,375	2,167	5,574	-0,006
1500	1,802	12,976	100293	1,188	4,674	3,247	2,002	4,750	1,615
1200	1,759	8,352	100310	1,188	3,750	3,094	1,813	3,854	2,791
900	1,707	4,96	100323	1,188	2,890	2,914	1,612	2,931	1,424
600	1,635	2	100334	1,188	1,835	2,673	1,314	1,910	4,112
450	1,581	1,04	100338	1,188	1,323	2,500	1,134	1,320	-0,252

Πίνακας Ε. 4 Τιμές βαθμονόμησης θερμού νήματος

Ε.1.4 Μετρήσεις ταχύτητας αέρα στην πρότυπη διάταξη, με το διάφραγμα στη διάταξη δοκιμών

			Μετρήσεις ταχύτητας στον άξονα γ			Μετρήσεις ταχύτητας στον άξονα z		
n_{ov} (RPM)	Θέση	Απόσταση από το κέντρο (cm)	Hot Wire E(V)	\bar{v} (m/s)	$\sigma_{\bar{v}}$	Hot Wire E(V)	\bar{v} (m/s)	$\sigma_{\bar{v}}$
2400	r=R	7	-	0	-	-	0	-
2400	1	5,25	1,843	5,724	0,017	1,827	5,329	0,018
2400	2	3,5	1,872	6,488	0,015	1,870	6,434	0,017
2400	3	1,75	1,898	7,230	0,011	1,898	7,230	0,011
2400	4	0	1,901	7,319	0,007	1,902	7,349	0,007
2400	5	1,75	1,898	7,230	0,007	1,900	7,289	0,008
2400	6	3,5	1,874	6,543	0,011	1,871	6,461	0,014
2400	7	5,25	1,846	5,800	0,022	1,830	5,402	0,015
2400	r=R	7	-	0	-	-	0	-

1800	r=R	7	-	0	-	-	0	-
1800	1	5,25	1,781	4,297	0,014	1,766	3,992	0,014
1800	2	3,5	1,815	5,046	0,012	1,810	4,930	0,013
1800	3	1,75	1,833	5,475	0,008	1,832	5,450	0,010
1800	4	0	1,839	5,623	0,006	1,839	5,623	0,006
1800	5	1,75	1,832	5,450	0,007	1,833	5,475	0,014
1800	6	3,5	1,816	5,069	0,010	1,812	4,976	0,011
1800	7	5,25	1,782	4,318	0,013	1,770	4,072	0,013
1800	r=R	7	-	0	-	-	0	-

Πίνακας Ε. 5 Ταχύτητες σε σημεία του άξονα γ και z σε δυο παροχές

Ε.2 Μετρήσεις στην εισαγωγή κινητήρα

Ε.2.1 Βαθμονόμηση θερμού νήματος για μετρήσεις ταχύτητας αέρα στο Η/Ζ

Ατμοσφαιρική πίεση 978.72mbar, θερμοκρασία 21.1°C

n_{ov} (RPM)	Hot Wire (V)	ΔP (V)	ΔP_2 (V)	ΔP (Pa)	P_s (Pa)	ρ (Kg/m ³)	u_r (m/s)	E^2	u^n	u_k (m/s)	% u_k-u_r
2700	2,225	1,695	5,285	271,200	97026	1,149	21,730	4,951	3,996	21,690	-0,18
2520	2,200	1,485	4,685	237,600	97122	1,150	20,329	4,840	3,878	20,137	-0,95
2340	2,180	1,295	4,185	207,200	97202	1,151	18,976	4,752	3,760	18,952	-0,13
2160	2,155	1,110	3,585	177,600	97298	1,152	17,560	4,644	3,631	17,541	-0,11
1980	2,130	0,943	3,085	150,880	97378	1,153	16,179	4,537	3,500	16,205	0,16
1800	2,100	0,776	2,595	124,160	97457	1,154	14,670	4,410	3,349	14,697	0,18
1620	2,065	0,627	2,085	100,320	97538	1,155	13,181	4,264	3,191	13,064	-0,89
1440	2,035	0,495	1,705	79,200	97599	1,155	11,708	4,141	3,026	11,768	0,51
1260	2,000	0,374	1,310	59,840	97662	1,156	10,174	4,000	2,840	10,372	1,95
1080	1,955	0,276	0,980	44,160	97715	1,157	8,738	3,822	2,652	8,749	0,13
900	1,910	0,187	0,685	29,920	97762	1,157	7,190	3,648	2,430	7,308	1,64
720	1,855	0,119	0,443	18,992	97801	1,158	5,728	3,441	2,193	5,777	0,87
540	1,785	0,063	0,253	10,144	97832	1,158	4,185	3,186	1,904	4,161	-0,59
480	1,755	0,047	0,192	7,552	97841	1,158	3,611	3,080	1,782	3,572	-1,09
420	1,725	0,034	0,143	5,440	97849	1,158	3,065	2,976	1,655	3,041	-0,78
360	1,685	0,021	0,086	3,360	97858	1,159	2,408	2,839	1,485	2,417	0,37

Πίνακας Ε. 6 Τιμές βαθμονόμησης θερμού νήματος

		Μετρήσεις στον άξονα γ			Μετρήσεις στον άξονα z		
Θέση	Απόσταση από το κέντρο (cm)	Hot Wire E(V)	Ταχύτητα u (m/s)	$\sigma_{\bar{u}}$	Hot Wire E(V)	Ταχύτητα \bar{u} (m/s)	$\sigma_{\bar{u}}$
r=R	5,93	-	0	-	-	0	-
1	4,45	2,127	16,040	0,018	2,113	15,352	0,025
2	2,97	2,155	17,542	0,014	2,142	16,826	0,019
3	1,48	2,153	17,412	0,022	2,147	17,131	0,021
4	0,00	2,059	12,834	0,039	2,035	11,795	0,056
5	1,48	2,158	17,718	0,022	2,061	12,899	0,032
6	2,97	2,123	15,846	0,017	2,108	15,115	0,021
7	4,45	2,149	17,234	0,020	2,108	15,080	0,029
r=R	5,93	-	0	-	-	0	-

Πίνακας Ε. 7 Μετρήσεις ταχύτητας αέρα στο πεδίο παροχής αέρα του Η/Ζ

		Φίλτρο αέρα στην εισαγωγή			Bellmouth στη εισαγωγή αέρα		
Μετρήσεις στον άξονα z							
Θέση	Απόσταση από το κέντρο (cm)	Hot Wire E(V)	Ταχύτητα \bar{v} (m/s)	$\sigma_{\bar{v}}$	Hot Wire E(V)	Ταχύτητα \bar{v} (m/s)	$\sigma_{\bar{v}}$
r=R ⁻	5,93	-	0	-	-	0	-
1	4,45	2,130	16,221	0,020	2,1334	16,383	0,019
2	2,97	2,130	16,223	0,019	2,1281	16,107	0,023
3	1,48	2,091	14,286	0,038	2,1289	16,147	0,023
4	0,00	2,030	11,607	0,050	2,1457	17,036	0,026
5	1,48	2,122	15,798	0,022	2,1187	15,623	0,029
6	2,97	2,130	16,200	0,023	2,1226	15,826	0,031
7	4,45	2,115	15,462	0,034	2,1114	15,256	0,060
r=R ⁻	5,93	-	0,000	-	-	0,000	-
Μετρήσεις στον άξονα γ							
r=R ⁻	5,93	-	0	-	-	0,000	-
1	4,45	2,130	16,191	0,021	2,1206	15,720	0,024
2	2,97	2,131	16,251	0,017	2,1305	16,233	0,025
3	1,48	2,098	14,632	0,037	2,1300	16,205	0,025
4	0,00	2,042	12,083	0,047	2,1505	17,295	0,024
5	1,48	2,119	15,622	0,019	2,1401	16,737	0,026
6	2,97	2,126	16,000	0,023	2,1301	16,211	0,028
7	4,45	2,094	14,475	0,060	2,1280	16,103	0,061
r=R ⁻	5,93	-	0	-	-	0	-

Πίνακας Ε. 8 Μετρήσεις ταχύτητας αέρα στον αγωγό παροχής αέρα του Η/Ζ με το φίλτρο αέρα στην εισαγωγή και στη συνέχεια με το Bellmouth στην θέση του φίλτρου

