

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Μεταπτυχιακή Εργασία

**ΜΕΛΕΤΗ ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ
ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΦΥΓΟΚΕΝΤΡΙΚΟΥ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ ΣΕ
ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ**

υπό

ΑΘΑΝΑΣΙΟΥ ΓΑΝΩΤΟΠΟΥΛΟΥ

Διπλωματούχου Μηχανικού Αεροσκαφών Σχολής Ικάρων, 2014

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των
απαιτήσεων για την απόκτηση του
Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης

2017

© 2017 Αθανάσιος Γανωτόπουλος

Η έγκριση της μεταπτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων) Δρ. Ερρίκος Σταπουντζής
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Νίκος Πελεκάσης
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Τάσος Σταματέλλος
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Η Διπλωματική αυτή εργασία εκπονήθηκε στο εργαστήριο Ρευστομηχανικής και Στροβιλομηχανών, του τομέα Ενέργειας Βιομηχανικών Διεργασιών και Αντιρρυπαντικής Τεχνολογίας, του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Από τη θέση αυτή αισθάνομαι την υποχρέωση να ευχαριστήσω:

Τον κ. Ερρίκο Σταπουντζή, καθηγητή του τμήματος, επιβλέποντα της παρούσας εργασίας, για την καθοδήγηση, τις πολύτιμες επιστημονικές συμβουλές και την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα ιδιαίτερα ενδιαφέρον θέμα.

Τους καθηγητές κ. Πελεκάση Νίκο και κ. Σταματέλλο Τάσο, ως μέλη της εξεταστικής επιτροπής.

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία γίνεται η μελέτη ενός φυγοκεντρικού συμπιεστή της ρευστομηχανικής του συμπεριφοράς αλλά και της δυναμικής του συμπεριφοράς. Επιλέγεται ο συμπιεστής SIEMENS AG D-97615 Bad Neustadt του εργαστηρίου προς μελέτη. Στη συνέχεια για την μελέτη της ρευστομηχανικής του συμπεριφοράς γίνονται μετρήσεις διαφορικής πίεσης για διάφορες στροφές λειτουργίας και για διάφορες ογκομετρικές παροχές. Η μεταβολή των στροφών λειτουργίας πραγματοποιήθηκε με τη μεταβολή της συχνότητας της εισερχόμενης ηλεκτρικής ισχύος στο συμπιεστή, όπου και υπολογίζεται η συσχέτιση μεταξύ τους με δύο διαφορετικούς τρόπους, ενώ η μεταβολή της ογκομετρικής παροχής στην έξοδο του πραγματοποιήθηκε με την κατασκευή ακροφυσίων με διαφορετικές διατομές εξόδου.

Κατά τη ρευστομηχανική μελέτη, αρχικά, σχεδιάζονται τα προφίλ των ταχυτήτων κατά την έξοδο του ρευστού από το συμπιεστή (ακροφύσιο), από μετρήσεις που λαμβάνονται κατά διεύθυνση κάθετη της διεύθυνσης της ροής. Έπειτα υπολογίζονται οι ογκομετρικές παροχές ρευστού και η μέση ταχύτητα του. Στη συνέχεια, καταγράφονται οι μεταβολές της στατικής πίεσης μεταξύ εισόδου και εξόδου του συμπιεστή. Από αυτές και με γνωστές τις ταχύτητες εξόδου γίνεται ο υπολογισμός της διαφορικής ολικής πίεσης, όποτε και έπειτα είναι δυνατός ο σχεδιασμός του χάρτη λειτουργίας του φυγοκεντρικού συμπιεστή.

Ακόμη, πραγματοποιούνται μετρήσεις της έντασης θορύβου λειτουργίας, αλλά και της έντασης της τύρβης στη ροή εξόδου για να βρεθεί ένας συσχετισμός μεταξύ τους. Τέλος, μετρώντας την εισερχόμενη ηλεκτρική ισχύ και έχοντας την δυνατότητα υπολογισμού της εξερχόμενης ισχύος γίνεται υπολογισμός του βαθμού απόδοσης του συμπιεστή για τις διαφορετικές ογκομετρικές παροχές.

Έπειτα, προχωρώντας στο κομμάτι της μελέτης της δυναμικής συμπεριφοράς γίνονται μετρήσεις στις δονήσεις που έχει ο συμπιεστής κατά τη λειτουργία του στην έξοδο του αλλά και στη βάση του. Αυτές αποθηκεύονται και με φασματική ανάλυση συχνοτήτων γίνονται πλέον γνωστά τα μέτρα των ταλαντώσεων, οι οποίες λαμβάνουν χώρα στο συμπιεστή, αλλά και η συχνότητα της κάθε μίας.

Αυτά είναι τα κύρια μέρη που μελετά η παρούσα εργασία, και κλείνει με τα συμπεράσματα, όπου αναφέρονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα όλων των επιμέρους αναλύσεων και μελετών για το σχηματισμό καλύτερης εικόνας της ρευστομηχανικής και δυναμικής συμπεριφοράς του συμπιεστή.

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη	5
Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή	17
Κεφάλαιο 2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	19
2.1 Η χρήση των συμπιεστών και τα είδη του	19
2.2 Εξέλιξη των φυγοκεντρικών συμπιεστών	26
2.2.1 Εξέλιξη στις μεθόδους παραγωγής	26
2.2.2 Αεροδυναμική εξέλιξη	27
2.3 Προβλήματα που αντιμετωπίζουν οι φυγοκεντρικοί συμπιεστές	30
2.4 Μελέτη ενός φυγοκεντρικού συμπιεστή	31
2.4.1 Αρχή λειτουργίας φυγοκεντρικού συμπιεστή	31
2.4.2 Θεωρία περί ήχου και θορύβου	33
2.4.3 Θεωρία περί τύρβης	37
2.4.4 Βασικές αρχές θεωρίας ταλαντώσεων	43
Κεφάλαιο 3 Μεθοδολογία Πειράματος	47
3.1 Εργαστηριακή διάταξη	47
3.2. Μεθοδολογία διεξαγωγής πειράματος και όργανα μετρήσεως	49
3.2.1 Μεταβολή στροφών συμπιεστή	49
3.2.2 Μέτρηση διαφορικής πίεσης	50
3.2.3 Μέτρηση παροχής και ταχύτητας εξόδου του συμπιεστή	51
3.2.4 Μέτρηση θορύβου λειτουργίας	52
3.2.5 Μέτρηση τυρβώδους ροής	53
3.2.6 Μέτρηση δονήσεων κατά τη λειτουργία του συμπιεστή	59
3.2.7 Μέτρηση στροφών συμπιεστή	61
3.2.7 Μέτρηση ισχύς εισόδου του συμπιεστή	64
Κεφάλαιο 4 Μέτρηση στροφών συμπιεστή	65
4.1 Μέτρηση στροφών με οπτικό μέσο	65

4.2 Μέτρηση στροφών με επαγωγικό αισθητήρα.....	67
Κεφάλαιο 5 Εύρεση παροχής και ταχυτήτων εξόδου του συμπιεστή	70
5.1 Προφίλ ταχυτήτων στην έξοδο του συμπιεστή.....	71
5.2 Εύρεση παροχής και μέσης ταχύτητας στην έξοδο του συμπιεστή.....	75
Κεφάλαιο 6 Εύρεση διαφορικής πίεσης και χάρτης λειτουργίας συμπιεστή	78
6.1 Διαφορική πίεση εισόδου – εξόδου	79
6.2 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή.....	80
Κεφάλαιο 7 Μέτρηση και ανάλυση δονήσεων κατά τη λειτουργία του συμπιεστή....	83
7.1 Αποτελέσματα δονήσεων για λειτουργία στις 3.000 RPM	85
7.2 Αποτελέσματα δονήσεων για λειτουργία στις 2400 RPM.....	89
7.3 Αποτελέσματα δονήσεων για λειτουργία στις 1800 RPM.....	93
7.4 Αποτελέσματα δονήσεων για λειτουργία στις 1200 RPM.....	97
7.5 Αποτελέσματα δονήσεων για λειτουργία στις 600 RPM.....	101
Κεφάλαιο 8 Συσχέτιση θορύβου και έντασης της τύρβης.....	106
8.1 Αποτελέσματα μετρήσεων θορύβου	106
8.2 Αποτελέσματα μετρήσεων τύρβης και συσχέτιση με θόρυβο.....	109
Κεφάλαιο 9 Εύρεση βαθμού απόδοσης συμπιεστή	112
Κεφάλαιο 10 Συμπεράσματα	115
Βιβλιογραφία	117
Παράρτημα.....	118

Πίνακας Εικόνων

Κεφάλαιο 2

Εικόνα 2.1 : Παλινδρομικός συμπίεστης σε ΚΝΣ και ΑΝΣ.

Εικόνα 2.2 : Τρίγωνα ταχυτήτων εισόδου και εξόδου φυγοκεντρικού συμπίεστη.

Εικόνα 2.3 : Ανατομία ενός τυπικού φυγοκεντρικού συμπίεστη.

Εικόνα 2.4 : Ανατομία ενός συμπίεστη αξονικής ροής.

Εικόνα 2.5 : Ανατομία ενός κοχλιωτού συμπίεστη.

Εικόνα 2.6 : Διαχύτης με πτερύγια χαμηλής στερεότητας (LSVD).

Κεφάλαιο 3

Εικόνα 3.1 : Φυγοκεντρικός συμπίεστης SIEMENS AG D-97615 Bad Neustadt.

Εικόνα 3.2 : Τα 10 ακροφύσια για την αλλαγή της διατομής εξόδου του συμπίεστη.

Εικόνα 3.3 : Ο τρόπος με τον οποίο εξασφαλίστηκε η ασφάλεια και η στεγανότητα των ακροφυσίων κατά την τοποθέτηση.

Εικόνα 3.4 : Ο Inverter Siemens Micromaster420 που χρησιμοποιήθηκε.

Εικόνα 3.5 : Η συσκευή FCO510 Micromanometer για τη μέτρηση της διαφορικής πίεσης.

Εικόνα 3.6 : TSI VelociCalc 8350.

Εικόνα 3.7 : Η διάταξη για κίνηση του ανεμόμετρου κατά μήκος της διαμέτρου του ακροφυσίου.

Εικόνα 3.8 : Ηχώμετρο Lutron sl-4011.

Εικόνα 3.9 : Σύστημα θερμικής αναιμετρίας AN-1005.

Εικόνα 3.10 : Hot-Wire.

Εικόνα 3.11 : Ενισχυτής σήματος KISTLER 5134.

Εικόνα 3.12 : Ψηφιακό παλμογράφος LEADER LBO-523.

Εικόνα 3.13 : Ψηφιακός μετατροπέας της NATIONAL INSTRUMENTS.

Εικόνα 3.14 : Αρχική οθόνη 'Parameters' του LabView.

Εικόνα 3.15 : Δεύτερη οθόνη 'Raw Data' του LabView.

Εικόνα 3.16 : Τρίτη οθόνη 'Channel 0' του LabView.

Εικόνα 3.17 : Συνδεσμολογία για ψηφιοποίηση της μέτρησης με Hot-Wire.

Εικόνα 3.18 : Αμφίπακτη στήριξη ακροφυσίου για μέτρηση δονήσεων στα ακροφύσια.

Εικόνα 3.19 : Τοποθέτηση επιταχυνσιόμετρου στη βάση του συμπιεστή.

Εικόνα 3.20 : Βιντεοκάμερα υψηλής ακρίβειας Sony 50 fps.

Εικόνα 3.21 : Διάταξη μέτρησης στροφών με χρήση επαγωγικού αισθητήρα.

Εικόνα 3.22 : Μία συσκευή μέτρησης κατανάλωσης ηλεκτρικής ισχύος.

Κεφάλαιο 4

Εικόνα 4.1 : Ανάλυση βίντεο καρέ-καρέ στο πρόγραμμα Free Studio v.6.

Κεφάλαιο 6

Εικόνα 6.1 : Χάρτης λειτουργίας φυγοκεντρικού συμπιεστή της Ziehl Abegg.

Κεφάλαιο 7

Εικόνα 7.1 : Γραμμική και λογαριθμική κλίμακα συχνοτήτων.

Πίνακας Σχημάτων

Κεφάλαιο 2

Σχήμα 2.1 : Αναπαράσταση δύο σπειρών σπειροειδούς συμπιεστή.

Σχήμα 2.2 : Περιστροφικός συμπιεστής.

Σχήμα 2.3 : Αύξηση πίεσης και ταχύτητας στο ρότορα και διαχύτη.

Σχήμα 2.4 : Απεικόνιση σχέσης συχνότητας-μήκους κύματος για την ταχύτητα του ήχου.

Σχήμα 2.5 : Μετάβαση από στρωτή σε τυρβώδη ροή.

Σχήμα 2.6 : Διαφορά απόκλισης της ταχύτητας για ίδια μέση τιμή υποδηλώνοντας μεγαλύτερη ένταση στροβιλισμού.

Κεφάλαιο 3

Σχήμα 3.1 : Διαστάσεις του επιταχυνσιόμετρου KISTLER 8632C10T.

Σχήμα 3.2 : Διαστάσεις επαγωγικού αισθητήρα PEPPERL & FUCHS NBB5-18GM50-E0 σε mm.

Κεφάλαιο 5

Σχήμα 5.1 : Εξέλιξη του οριακού στρώματος και του προφίλ ταχύτητας του ρευστού εντός του σωλήνα.

Σχήμα 5.2 : Προφίλ πλήρως ανεπτυγμένης ροής σε στρωτή ροή (πάνω) και σε τυρβώδη ροή(κάτω).

Κεφάλαιο 8

Σχήμα 8.1 : Επέκταση στροβίλων με τη μεταβολής της ταχύτητας εξόδου.

Πίνακας Διαγραμμάτων

Κεφάλαιο 3

Διάγραμμα 3.1 : Εύρεση συνάρτησης για βαθμονόμηση του Hot Wire.

Διάγραμμα 3.2 : Μετασχηματισμός Fourier στις μετρήσεις του επαγωγικού αισθητήρα για εύρεση στροφών συμπίεστη.

Κεφάλαιο 4

Διάγραμμα 4.1 : Μεταβολή τάσης επαγωγικού αισθητήρα συναρτήσει του χρόνου κατά τη λειτουργία του συμπιεστή σε f Inverter 30Hz.

Διάγραμμα 4.2 : Μετασχηματισμός Fourier για την εύρεση συχνότητας μεταβολής της τάσης του αισθητήρα - περιστροφής του συμπιεστή.

Κεφάλαιο 5

Διάγραμμα 5.1 – 5.9 : Προφίλ ταχυτήτων στην έξοδο του συμπιεστή κάθε ακροφυσίου.

Διάγραμμα 5.10 : Μεταβολή της παροχής συναρτήσει των στροφών λειτουργίας για κάθε ακροφύσιο.

Διάγραμμα 5.11 : Γραμμική μεταβολή της ταχύτητας εξόδου συναρτήσει των στροφών λειτουργίας.

Κεφάλαιο 6

Διάγραμμα 6.1 : Μεταβολής της διαφορικής πίεσης συναρτήσει της μεταβολής της διατομής εξόδου..

Διάγραμμα 6.2 : Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή του πειράματος.

Κεφάλαιο 7

Διάγραμμα 7.1 : Αποτελέσματα FFT για 3.000 RPM στην έξοδο της ροής.

Διάγραμμα 7.2 : Αποτελέσματα FFT βάσης συμπιεστή για 3.000 RPM.

Διάγραμμα 7.3 : Αποτελέσματα FFT ακροφυσίων για 2.400 RPM.

Διάγραμμα 7.4 : Αποτελέσματα FFT βάσης συμπιεστή για 2.400 RPM.

Διάγραμμα 7.5 : Αποτελέσματα FFT ακροφυσίων για 1.800 RPM.

Διάγραμμα 7.6 : Αποτελέσματα FFT βάσης συμπιεστή για 1.800 RPM.

Διάγραμμα 7.7 : Αποτελέσματα FFT ακροφυσίων για 1.200 RPM.

Διάγραμμα 7.8 : Αποτελέσματα FFT βάσης συμπίεστη για 1.200 RPM.

Διάγραμμα 7.9 : Αποτελέσματα FFT ακροφυσίων για 600 RPM.

Διάγραμμα 7.10 : Αποτελέσματα FFT βάσης συμπίεστη για 600 RPM.

Κεφάλαιο 8

Διάγραμμα 8.1 : Θόρυβος στην έξοδο της ροής.

Διάγραμμα 8.2 : Θόρυβος στην είσοδο του συμπίεστη.

Διάγραμμα 8.3 : Συσχέτιση θορύβου με την τύρβη στη ροή του ακροφυσίου 3.

Πίνακας Πινάκων

Κεφάλαιο 4

Πίνακας 4.1 : Αποτελέσματα μέτρησης στροφών μετά την ανάλυση των βίντεο.

Πίνακας 4.2 : Στροφές συμπίεστη συναρτήσει της συχνότητας του Inverter όπως αυτές εξήχθησαν με τον οπτικό τρόπο.

Πίνακα 4.3 : Αποτελέσματα στροφών λειτουργίας συμπίεστη μετά από ανάλυση μετρήσεων και μετασχηματισμό Fourier.

Κεφάλαιο 5

Πίνακας 5.1 : Μέση τιμή ταχύτητας εξόδου για κάθε ακροφύσιο για κάθε RPM.

Κεφάλαιο 6

Πίνακα 6.1 : Αποτελέσματα διαφορικής πίεσης για κάθε ακροφύσιο και στροφές λειτουργίας συμπίεστη.

Πίνακας 6.2 : Συσχέτιση παροχής εξόδου με διαφορά πίεσης για κάθε ταχύτητα στροφών λειτουργίας.

Κεφάλαιο 8

Πίνακας 8.1 : Θόρυβος στην είσοδο και έξοδο του συμπιεστή για όλες τις στροφές λειτουργίας.

Πίνακας 8.2 : Αποτελέσματα τύρβης για το ακροφύσιο 3 στη θέση του ηχομέτρου και στο κέντρο της ροής.

Κεφάλαιο 9

Πίνακας 9.1 : Υπολογισμός εισερχόμενης ισχύος του συμπιεστή.

Πίνακας 9.2 : Ισχύς εξόδου συμπιεστή κάθε περίπτωσης λειτουργίας.

Πίνακας 9.3 : Βαθμοί απόδοσης συμπιεστή και κάθε ακροφύσιο σε κάθε τιμή στροφών λειτουργίας.

Παράρτημα

Πίνακας Π.1 : Τιμές των μετρήσεων των δονήσεων συνολικού επιπέδου στην άκρη των ακροφυσίων.

Πίνακας Π.2 Τιμές των μετρήσεων των δονήσεων συνολικού επιπέδου στην βάση του συμπιεστή για κάθε ακροφύσιο.

Πίνακας Συμβόλων

ρ : πυκνότητα (kg/ m^3)

V : ταχύτητα μέσου (m/s)

μ : δυναμικό ιξώδες ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)

Re : αριθμός Reynolds

Ns : ειδική ταχύτητα

N : ταχύτητα περιστροφής (RPM),

αριθμός επαναλήψεων

Q : παροχή στο σημείο καλύτερης απόδοσης (m^3/s)

H : διάμετρος κεφαλής (m)

Ds : ειδική διάμετρος

D : διάμετρος (m)

Φ : συντελεστής ροής

Ψ : συντελεστής κεφαλής

f : συχνότητα (Hz)

λ : μήκος κύματος (m)

SPL : ηχητική στάθμη πίεσης (db)

P : πραγματική ηχητική πίεση (Pa)

P_0 : μια RMS ηχητική πίεση αναφοράς (συνήθως $2 \cdot 10^{-5}$ Pa)

ν : κινηματικό ιξώδες (m^2/s)

L : χαρακτηριστικό μήκος (m)

Rh : υδραυλική ακτίνα (m)

Pw : βρεχόμενη περίμετρος (m)

I : ένταση της τύρβης

\bar{V} ή V_{avg} : μέση τιμή της ταχύτητας (m/s)

$V_{st.dev.}$: τυπική απόκλιση της ταχύτητας (m/s)

t : χρόνος (sec)

T : περίοδος (sec)

ω : γωνιακή συχνότητα (rad/s)

A : πλάτος ταλάντωσης (m)

A_C : διατομή σωλήνα (m)

\dot{m} : παροχή μάζας ρευστού (kg/s)

\dot{V} : παροχή όγκου ρευστού (m³/s)

R : ακτίνα σωλήνα (m)

η : βαθμός απόδοσης

P_{OUT} : ισχύς εξόδου (Watt)

P_{IN} : ισχύς εισόδου (Watt)

w : ειδικό έργο (J/kg)

g : επιτάχυνση της βαρύτητας (m²/s)

h : ύψος στάθμης για υγρά ρευστά (m)

γ : ειδικό βάρος (N/m³)

P_1, P_2 : ολική πίεση εισόδου και εξόδου, αντίστοιχα (Pa)

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

Αντικείμενο της παρούσης εργασίας είναι η μελέτη ρευστομηχανικής αλλά και δυναμικής συμπεριφοράς ενός φυγοκεντρικού συμπιεστή με αέριο ρευστό λειτουργίας, οι οποίοι έχουν εδραιωθεί σε αρκετούς χώρους, όπως στην αυτοκινητοβιομηχανία, στον εξαερισμό χώρων, στην απομάκρυνση καυσαερίων σε εργοστάσια, σε επεξεργασία φυσικού αερίου, κ.α. Η διαδικασία της μελέτης πραγματοποιείται με τη λήψη αρκετών μετρήσεων όσον αφορά τα χαρακτηριστικά της ροής του, όσο και της δυναμικής συμπεριφοράς του, δηλαδή των ταλαντώσεων που κάνει κατά τη διάρκεια λειτουργίας του.

Οι φυγοκεντρικοί συμπιεστές έχουν εξελιχθεί αρκετά τα τελευταία χρόνια χάρη και της ανάπτυξης της τεχνολογίας των υλικών, των τρόπων κατεργασιών τους, την μείωση των ελατωμάτων τους, τις μικρότερες επιτρεπτές ανοχές και τον λεπτομερέστερο σχεδιασμό με τη βοήθεια ηλεκτρονικών λογισμικών σχεδίασης. Όλα τα προηγούμενα με τον τρόπο τους βοηθούν στην βελτίωση απόδοσης και επίδοσης ενός φυγοκεντρικού συμπιεστή.

Ωστόσο, όσο καλά και χρήσιμα και αν είναι τα προαναφερθέντα, πριν τη στιγμή της τελικής παραγωγής ενός φυγοκεντρικού συμπιεστή δεν μπορούν τα αποτελέσματα να βασιστούν μόνο στους θεωρητικούς υπολογισμούς που έγιναν με τη χρήση ηλεκτρονικού λογισμικού, αν και αξίζει να σημειωθεί ότι δίνουν αρκετά ακριβή αποτελέσματα. Πρέπει να κατασκευαστεί, όπως σχεδιάστηκε, ένα ή πολλά ακριβή πρωτότυπα και να εξάγουν τα αποτελέσματα απόδοσης και επίδοσης με πειραματικό τρόπο, υπό διάφορες συνθήκες λειτουργίας στις οποίες προορίζεται και μπορεί να έχει να αντιμετωπίσει.

Με τον πειραματικό τρόπο, δηλαδή, εξάγονται αποτελέσματα ρευστομηχανικής συμπεριφοράς, όπως λόγοι συμπίεσης, ογκομετρικές παροχές, χάρτης λειτουργίας, βαθμός απόδοσης, επίπεδα θορύβου και όλα αυτά συναρτήσει των στροφών λειτουργίας του συμπιεστή. Επίσης, πολλοί συμπιεστές θα χρειαστεί να εγκατασταθούν σε κάποιες βάσεις ή να συνδεθούν με διάφορα μηχανολογικά κυκλώματα (π.χ. εξαερισμός), αλλά κατά τη λειτουργία τους υπόκεινται σε φορτίσεις από πλήθος δονήσεων (ταλαντώσεων). Αυτή η κατάσταση χρειάζεται προσοχή και μελέτη ως προς την δυναμική συμπεριφορά, καθώς αποκόλληση από την βάση

εγκατάστασης ή φθορά (ή αστοχία) στα παρακείμενα μηχανολογικά μέρη που συνδέονται μαζί του λόγω δονήσεων δεν θα ήταν κάτι θεμιτό ως προς κανέναν χρήστη, και θα μπορούσε να επιφέρει μεγάλα κόστη ζημιών σε μεγάλες βιομηχανίες (αναστολή λειτουργίας, κτλ) .

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, η εργασία αυτή έχει ως σκοπό ακριβώς αυτή τη μελέτη μέσω πειραματικών μετρήσεων τόσο της ρευστομηχανικής συμπεριφοράς (επίδοση, απόδοση), όσο και της δυναμικής συμπεριφοράς, τόσο στη βάση του συμπίεστη όσο και στην έξοδο του όπου θα συνδεόταν με άλλα εξαρτήματα κατά τη χρήση του, για να καλυφθούν σημαντικές περιπτώσεις πιθανής αστοχίας κατά τη λειτουργία του.

Τα αποτελέσματα που θα προκύψουν είναι για συνθήκες λειτουργίας σε συνθήκες πανεπιστημιακού εργαστηρίου. Όπως προαναφέρθηκε, εάν γινόταν από την εταιρία παραγωγής του τότε η ίδια διαδικασία θα επαναλαμβανόταν αρκετές φορές σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας.

Κεφάλαιο 2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

2.1 Η χρήση των συμπίεστων και τα είδη του

Με τον όρο συμπίεστη εννοούμε γενικά εκείνη την διάταξη που αυξάνει την πίεση ενός ρευστού μέσω διάφορων μηχανισμών. Είναι λοιπόν εμφανές ότι η χρήση των συμπίεστων είναι ευρεία στις σύγχρονες εφαρμογές, όπως επίσης και το γεγονός ότι αυτή η αύξηση της πίεσης μπορεί να προέλθει από μία πληθώρα διαφορετικών μηχανισμών. Θα ήταν λοιπόν αναγκαίο σε αυτό το σημείο να γίνει μια προσπάθεια κατηγοριοποίησης αυτών των διατάξεων.

Οι κατηγοριοποίηση των συμπίεστων διαφοροποιείται ανάλογα με το πεδίο εφαρμογής τους, π.χ. ψυκτική βιομηχανία, αεριώθηση, κτλ. Γενικά μπορούμε να διακρίνουμε τα παρακάτω είδη συμπίεστων που βρίσκουν εφαρμογή σε σχεδόν όλα τα επιστημονικά και βιομηχανικά πεδία. Οι τύποι, λοιπόν, των συμπίεστων ανάλογα με την αρχή λειτουργίας τους είναι:

- Παλινδρομικοί συμπίεστες
- Φυγοκεντρικοί συμπίεστες
- Συμπίεστες αξονικής ροής
- Σπειροειδείς συμπίεστες
- Κοχλιωτοί συμπίεστες
- Περιτροφικοί συμπίεστες

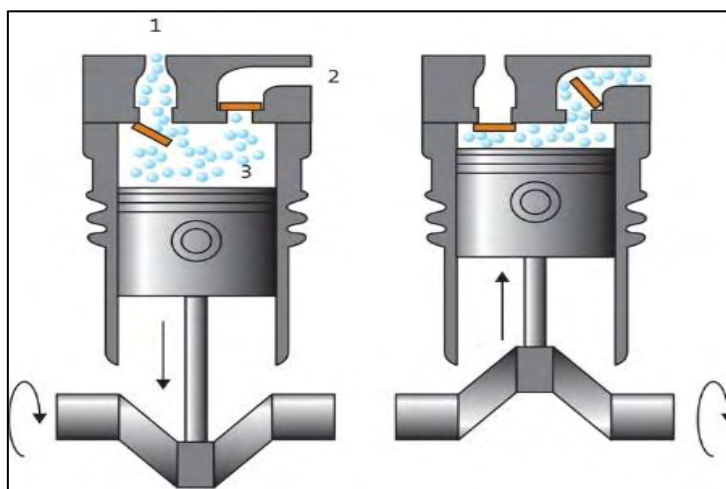
Στην επόμενη παράγραφο γίνεται μια σύντομη περιγραφή της αρχής λειτουργίας αυτών των ειδών συμπίεστων.

2.1.1 Παλινδρομικός συμπίεστής

Κατά τη λειτουργία ενός παλινδρομικού συμπίεστη, το έμβολό του παλινδρομεί ανάμεσα σε δύο ακραία σημεία που ονομάζονται ΑΝΣ (Άνω Νεκρό Σημείο) και ΚΝΣ

(Κάτω Νεκρό Σημείο). Η απόστασή τους ονομάζεται διαδρομή του εμβόλου και αποτελεί το εύρος κίνησης του εμβόλου. Κατά την καθοδική κίνηση (φάση αναρρόφησης) ο συμπιεστής αναρροφά το ρευστό από το περιβάλλον του και κατά την ανοδική κίνηση (φάση κατάθλιψης) το έμβολο μειώνει τον όγκο του ρευστού με αποτέλεσμα την ταυτόχρονη αύξηση της πίεσής του. [1]

Η χρήση των παλινδρομικών εμβολοφόρων συμπιεστών μπορεί να ποικίλει ανάλογα με τον αριθμό των εμβόλων, την διάταξή τους στο χώρο και τη χωρητικότητα του καθενός από τα έμβολα. Οι μικροί συμπιεστές ισχύος περίπου από 5 έως 30 ίππους (horsepower/hr) συναντώνται κυρίως σε αυτοκινητιστικές εφαρμογές και η λειτουργία τους είναι διακοπτόμενη. Οι μεγάλοι παλινδρομικοί συμπιεστές (άνω των 1000hp/750kW) εμφανίζονται σε μεγάλες εργοστασιακές εφαρμογές και στη βιομηχανία πετρελαίου. Επίσης μπορούμε να συναντήσουμε τέτοιου είδους συμπιεστές σε οικιακές εφαρμογές, σε οικιακά εργαστήρια, και σε άλλες μικροεργασίες. Οι συγκεκριμένοι παράγουν ισχύ της τάξεως του 1 ½ hp.

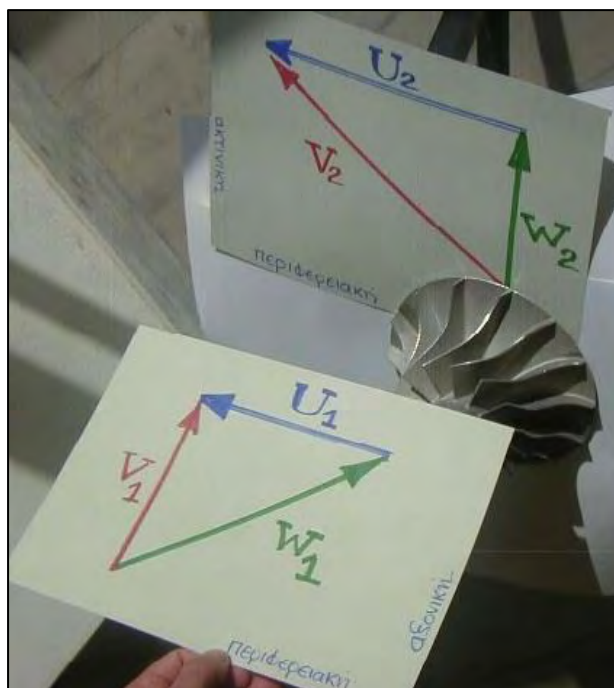


Εικόνα 2.1 : Παλινδρομικός συμπιεστής σε ΚΝΣ και ΑΝΣ.

2.1.2 Φυγοκεντρικός συμπιεστής

Η συμπίεση στο φυγοκεντρικό συμπιεστή επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός περιστρεφόμενου δίσκου, που ονομάζεται στροφέιο (impeller), και ενός συστήματος αποκλινόντων αγωγών, που ονομάζεται διαχύτης (diffuser). Στο φυγοκεντρικό συμπιεστή η κατεύθυνση της ταχύτητας μεταβάλλεται από αξονική (είσοδος

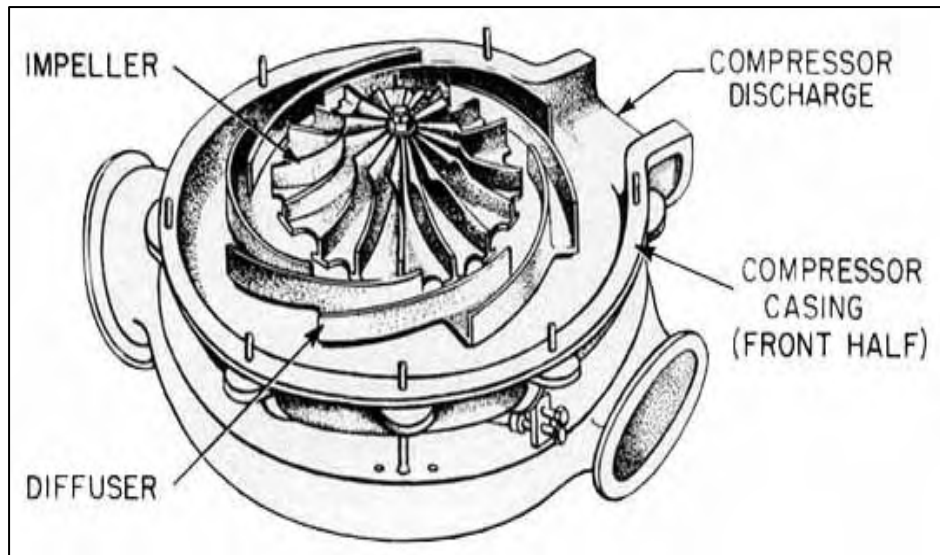
στροφείου) σε ακτινική (έξοδος στροφείου) (Εικόνα 2.2). Το στροφείο περιβάλλεται από ένα κάλυμμα ειδικά σχεδιασμένο έτσι ώστε να στεγάζει το στροφείο και να αποτρέπει την διαρροή αέρα διαμέσου των πτερυγίων (blades) από την είσοδο έως την έξοδο του στροφείου. Σε αυτό τον περιστρεφόμενο δίσκο, παρέχεται ενέργεια στο ρευστό με τη μορφή της κινητικής ενέργειας, η οποία προέρχεται από την περιστροφική κίνηση του άξονα με τον οποίο είναι συνδεδεμένος ο συμπιεστής, αυξάνοντας έτσι την ταχύτητα του ρευστού. Αυτή η κινητική ενέργεια του ρευστού μετατρέπεται στη συνέχεια σε δυναμική ενέργεια πίεσης, στο διαχύτη. Ο διαχύτης αποτελείται από αποκλίνοντες αγωγούς, οι οποίοι λαμβάνουν στην είσοδό τους τον αέρα αυξημένης



ταχύτητας και λόγω της αποκλίνουσας μορφής που διαθέτουν, συμπιέζουν το ρευστό μέχρι την έξοδό του από το διαχύτη, σύμφωνα με τον νόμο του Bernoulli.

Εικόνα 2.2 : Τρίγωνα ταχυτήτων εισόδου και εξόδου φυγοκεντρικού συμπιεστή.

Οι φυγοκεντρικοί συμπιεστές χρησιμοποιούνται κυρίως για συνεχή, στατική λειτουργία σε βιομηχανίες όπως διυλιστήρια, χημικά εργαστήρια και εργοστάσια επεξεργασίας φυσικού αερίου. Επίσης χρησιμοποιούνται σε κινητήρες εσωτερικής καύσης, ως υπερσυμπιεστές (superchargers) ή στροβιλοσυμπιεστές (turbochargers). Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν σε μικρούς στροβιλοκινητήρες (gas turbine engines) ή ως η τελευταία βαθμίδα συμπίεσης σε μεσαίου μεγέθους στροβιλοκινητήρες. [2]



Εικόνα 2.3 : Ανατομία ενός τυπικού φυγοκεντρικού συμπιεστή.

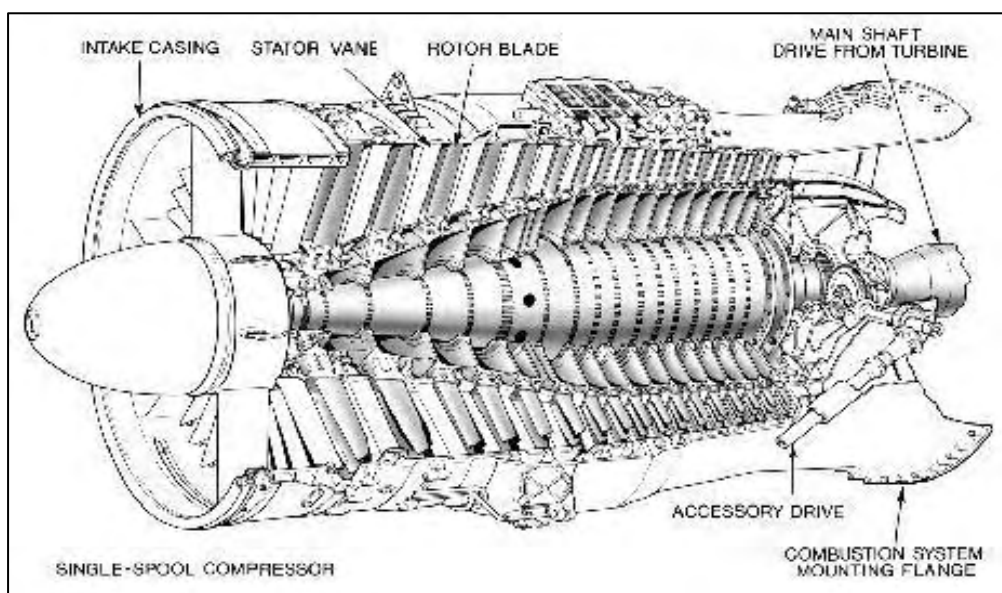
2.1.3 Συμπιεστής αξονικής ροής

Στους αξονικούς συμπιεστές η κατεύθυνση της μέσης ταχύτητας του εργαζόμενου μέσου παραμένει περίπου σταθερή στην είσοδο και στην έξοδο του συμπιεστή. Ο αξονικός συμπιεστής αποτελείται από βαθμίδες συμπίεσης, η οποίες βρίσκονται σε σειρά η μία μετά την άλλη. Με τον όρο βαθμίδα συμπίεσης εννοούμε ένα σύστημα κινητών και σταθερών πτερυγώσεων που αυξάνουν σταδιακά την πίεση του εργαζόμενου μέσου.

Πιο αναλυτικά, κάθε βαθμίδα αποτελείται από δύο σύνολα πτερυγίων που το καθένα σχηματίζει ένα νοητό δίσκο. Ο πρώτος δίσκος είναι περιστρεφόμενος και ονομάζεται ρότορας (rotor). Τα πτερύγιά του (rotor blades) έχουν ως κύριο ρόλο την επιτάχυνση του ρευστού. Αυτή επιτυγχάνεται με την μεταφορά κινητικής ενέργειας από τα πτερύγια του περιστρεφόμενου αυτού δίσκου στο ρευστό. Τον ρότορα ακολουθεί ο δεύτερος δίσκος που ονομάζεται στάτορας (stator). Ο στάτορας αποτελείται από σταθερά πτερύγια (stator vanes), τα οποία επαναπροσδιορίζουν την κατεύθυνση κίνησης του ρευστού και σχηματίζουν μεταξύ τους αποκλίνοντες αγωγούς με αποτέλεσμα την επιβράδυνση του αερίου, και κατά συνέπεια την συμπίεσή του. Το ρευστό αμέσως μετά την έξοδό του από τον στάτορα εισέρχεται στον ρότορα της επόμενης βαθμίδας όπου θα ακολουθήσει την ίδια διαδικασία συμπίεσης.

Οι συμπιεστές αξονικής ροής διαθέτουν σχεδόν πάντα περισσότερες από μία βαθμίδες, με τη διατομή κάθετη στη διέλευση του αερίου να βαίνει μειούμενη καθώς το αέριο εξέρχεται από αυτούς με σκοπό τη διατήρηση ενός βέλτιστου αριθμού Mach της αξονικής ταχύτητας. Για μεγάλους βαθμούς συμπίεσης είναι απαραίτητη η τοποθέτηση σταθερών οδηγών πτερυγίων στην είσοδο του συμπιεστή (Inlet Guide Vanes-IGVs), η δυνατότητα διαφυγής του αέρα κατά μήκος του συμπιεστή (interstage bleed) και η διάσπαση του συμπιεστή σε περισσότερες από μια περιστρεφόμενες διατάξεις (π.χ. twin spools).

Η χρήση τους συναντάται κυρίως σε μεσαίου και μεγάλου μεγέθους στροβιλοκινητήρες (gas turbine engines), σταθμούς άντλησης φυσικού αερίου και σε μερικά χημικά εργαστήρια.

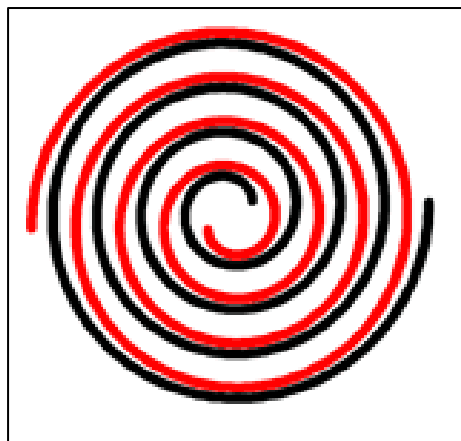


Εικόνα 2.4 : Ανατομία ενός συμπιεστή αξονικής ροής.

2.1.4 Σπειροειδής συμπιεστής

Ο σπειροειδής συμπιεστής λειτουργεί με τη βοήθεια δύο διασταυρούμενων πτερυγώσεων με τη μορφή σπείρας έτσι ώστε να συμπιέσει ρευστά, όπως υγρά και αέρια. Η γεωμετρία των πτερυγώσεων μπορεί να είναι ενειλιγμένη αρχιμήδεια σπείρα ή υβριδική καμπύλη. Η λειτουργία τους είναι περισσότερο ομαλή και αξιόπιστη, και λιγότερο θορυβώδης συγκριτικά με άλλους τύπους συμπιεστών χαμηλών ποσοτήτων όγκων. Συχνότερα, η μία εκ των δύο σπειρών είναι ακίνητη, ενώ η άλλη κινείται

έκκεντρα σε σχέση με την πρώτη χωρίς να περιστρέφεται, παγιδεύοντας έτσι και συμπιέζοντας το ρευστό ανάμεσά τους (Σχήμα 2.1). Χάρη στη μικρό άνοιγμα μεταξύ των δύο σπειρών (κινούμενη και μη) αυτός ο τύπος συμπιεστών έχει πολύ μεγάλη ογκομετρική απόδοση (volumetric efficiency).



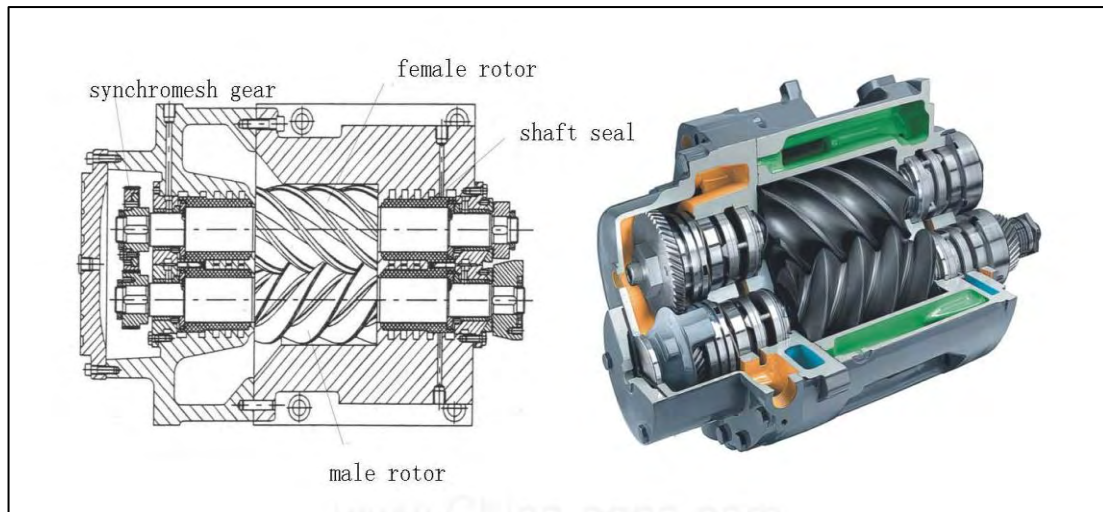
Η χρήση τους εμφανίστηκε σε υπερπληρωτές των κινητήρων της Volkswagen G40 και G60, στις αρχές του 1990. [3]

Σχήμα 2.1 : Αναπαράσταση δύο σπειρών σπειροειδούς συμπιεστή.

2.1.5 Κοχλιωτοί συμπιεστές

Οι κοχλιωτοί συμπιεστές χρησιμοποιούν δυο πεπλεγμένους ελικοειδείς κοχλίες θετικής μετατόπισης με σκοπό να εγκλωβίζουν το ρευστό σε ένα μικρό χώρο (Εικόνα 2.5). Η απόδοση του συστήματος αυτού εξαρτάται από την ακρίβεια των διάκενων μεταξύ των κοχλιών και μεταξύ των κοχλιών και του περιβλήματός τους. Ωστόσο μια μικρή διαρροή αέρα πρακτικά θα υφίσταται πάντα και συνεπώς χρησιμοποιούνται μεγάλες ταχύτητες για να ελαχιστοποιήσουν τον λόγο της ροής απωλειών ως προς την αποτελεσματική ροή.

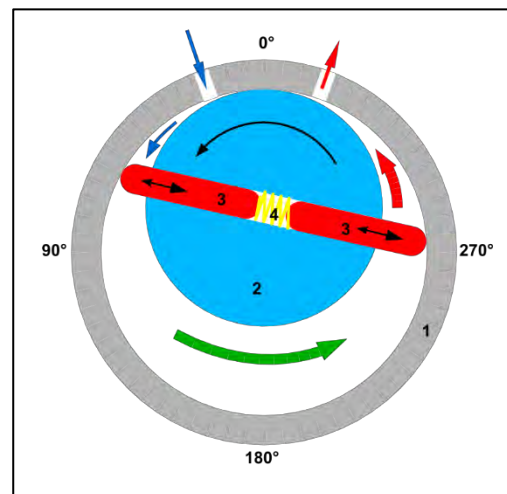
Χρησιμοποιούνται κυρίως ως προς την αντικατάσταση των εμβολοφόρων παλινδρομικών συμπιεστών σε εφαρμογές που απαιτείται μεγάλη ποσότητα συμπιεσμένου αέρα είτε σε βιομηχανικές εφαρμογές, είτε για τη λειτουργία εργαλείων αέριου μεγάλης ισχύος, όπως τα σφυροδράπανα.



Εικόνα 2.5 : Ανατομία ενός κοχλιωτού συμπιεστή.

2.1.6 Περιστροφικός συμπιεστής

Οι περιστροφικοί συμπιεστές αποτελούνται από ένα ρότορα με συγκεκριμένο αριθμό περυγίων που είναι τοποθετημένα σε θέσεις περιμετρικά του ρότορα. Τον ρότορα περιβάλλει ένα κάλυμμα, μεγαλύτερο από αυτόν, του οποίου το σχήμα μπορεί να είναι είτε κυκλικό είτε κάτι πιο περίπλοκο. Με την περιστροφή του ρότορα άλλα περύγια εισχωρούν μέσα στις εγκοπές του καλύμματος και άλλα εξέρχονται από αυτό, διατηρώντας πάντα την επαφή του ρότορα με το κάλυμά του. Έτσι δημιουργούνται αυξομειώσεις στον όγκο του αερίου και ταυτόχρονα οι επικείμενες αυξομειώσεις στην πίεσή του. Στο σχήμα 2.2 φαίνεται αυτό το είδος συμπιεστή, όπου οι αριθμοί υποδηλώνουν : 1) το κάλυμμα, 2) το ρότορα, 3) τα περύγια, και 4) το ελατήριο. Αυτό το είδος συμπιεστή μαζί με τον παλινδρομικό είναι από τα παλαιότερα είδη στην τεχνολογία των συμπιεστών.



Σχήμα 2.2 : Περιστροφικός συμπιεστής

Αυτό το είδος συμπιεστών χρησιμοποιείται για σχετικά χαμηλές πιέσεις (περίπου 2 bar) για τη μετακίνηση πρώτης ύλης σε γραμμές παραγωγής.

2.2 Εξέλιξη των φυγοκεντρικών συμπιεστών

Οι πρώτοι βιομηχανικοί φυγοκεντρικοί συμπιεστές συνδέονται με την κατασκευή των πρώτων στροβιλομηχανών στις αρχές του 20ου αιώνα. Η αρχή έγινε από τον Elling ο οποίος κατασκεύασε την πρώτη στροβιλομηχανή παραγωγής ενέργειας το 1903. Τέτοιου είδους συμπιεστές χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία μεταποίησης από την αρχή του 19^{ου} αιώνα. Μία από τις παλαιότερες εφαρμογές ήταν ως ανεμιστήρες υψικαμίνου σε ατσάλινους μύλους. Ήταν μεγάλες και βαριές κατασκευές ακόμη και για τα σημερινά δεδομένα. Παρόλο που διέθεταν τα ίδια κύρια μηχανικά μέρη (στροφείο, τριβείς, διαχύτη, κτλ), τα τελευταία διαφέρουν σημαντικά από τους περίπλοκους απογόνους τους στην σημερινή εποχή.

2.2.1 Εξέλιξη στις μεθόδους παραγωγής

Μεγάλο ρόλο στην εξέλιξη των φυγοκεντρικών συμπιεστών έπαιξε η τεχνολογική ανάπτυξη στις μεθόδους παραγωγής τους. Αν οι μέθοδοι αυτοί βρισκόταν ακόμη σε πρώιμο στάδιο, δεν θα είχε καμία σημασία όλη εκείνη η ανάπτυξη στις τεχνικές σχεδιασμού και θεωρητικές αναλύσεις, διότι δεν θα ήταν εφικτή η κατασκευή εξαρτημάτων με τόση μεγάλη ακρίβεια και περιπλοκότητα. Οι πρώτοι κατασκευαστές φυγοκεντρικών συμπιεστών ήταν περιορισμένοι στη χρήση μερικών και μόνο κατασκευαστικών μεθόδων, όπως η απλή μορφοποίηση, σύνδεση και χύτευση. Όμως, με αυτές τις μεθόδους και κυρίως με τη χύτευση, τα τελικά προϊόντα που κατασκευάζονταν, χαρακτηρίζονταν από μεγάλη τραχύτητα επιφανείας και συνεπώς μειωμένη αεροδυναμική απόδοση. Παράλληλα, ο ρόλος αυτών των συμπιεστών ήταν απλώς να συμπιέσουν αέρα, χωρίς να υπάρχει ιδιαίτερη ανησυχία για την κατανάλωση ενέργειας, γι' αυτό και οι συμπιεστές εκείνης της χρονολογικής περιόδου είχαν χαμηλές αποδόσεις (70%). Όμως η ενεργειακή κρίση (ή πιο σωστά εξεργειακή κρίση) στα μέσα του 1970 οδήγησε τις κατασκευαστικές εταιρίες και στους τελικούς χρήστες να δώσουν μεγαλύτερη σημασία στην εξοικονόμηση ενέργειας, αυξάνοντας έτσι τις αποδόσεις των συμπιεστών (80-85%) φτάνοντας σήμερα σε αποδόσεις κοντά στο 90%. Σύμφωνα με τους Sorokes J., και Kuzdzal M., η περεταίρω τεχνολογική ανάπτυξη των φυγοκεντρικών συμπιεστών έγκειται σε παραμέτρους που έως σήμερα θεωρούνταν

δευτερεύουσας και τριτεύουσας σημασίας όπως τα μονοπάτια διαρροών (leakage paths), όπως επίσης στην ανάπτυξη περισσότερο εκλεπτυσμένων αεροδυναμικών εξαρτημάτων και στην συγχώνευση των αξονικών και ακτινικών τεχνολογιών.

2.2.2 Αεροδυναμική εξέλιξη

Τα κύρια αεροδυναμικά συστατικά εξαρτήματα ενός φυγοκεντρικού συμπιεστή είναι η εισαγωγή (inlet), τα σταθερά οδηγία πτερύγια (inlet guide vanes–IGVs), το στροφέιο (impeller), ο διαχύτης (diffuser), το κανάλι επιστροφής (return channel), η σπείρα (volute) και η πλευρική ροή (side stream). Καθένα από αυτά θα αναλυθούν παρακάτω με φθίνουσα σειρά σημασίας.

2.2.2.1 Στροφέιο

Είναι προφανές πως για να επιτευχθούν μεγάλες επιδόσεις σε ένα φυγοκεντρικό συμπιεστή πρέπει να αποτελείται από στροφέιο(-α) που να χαρακτηρίζεται από εξαιρετική αεροδυναμική σχεδίαση. Αυτό εξάλλου είναι το εξάρτημα που προσδίδει κινητική ενέργεια στο ρευστό, και μια κακή σχεδίασή του δεν μπορεί να καλυφθεί ούτε από τα πιο αποδοτικά σταθερά μέρη. Ένας από τους κύριους λόγους της εξέλιξης των φυγοκεντρικών συμπιεστών τις τελευταίες δεκαετίες είναι οι όλο και πιο εκλεπτυσμένες γεωμετρίες στροφείων που πηγάζουν τόσο από την πρόοδο στις μεθόδους παραγωγής όσο και από την πρόοδο στην θεωρητική ανάλυση. Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα τα πρώτα στροφεία κατασκευαζόταν με τη χρήση συγκολλήσεων, πριτσινιών, ή χύτευσης. Καθεμία από τις μεθόδους αυτές, όμως, συνοδευόταν από περιορισμούς στην επιτεύξιμη γεωμετρία του στροφείου, και κατά συνέπεια στην προσδοκώμενη λειτουργία.

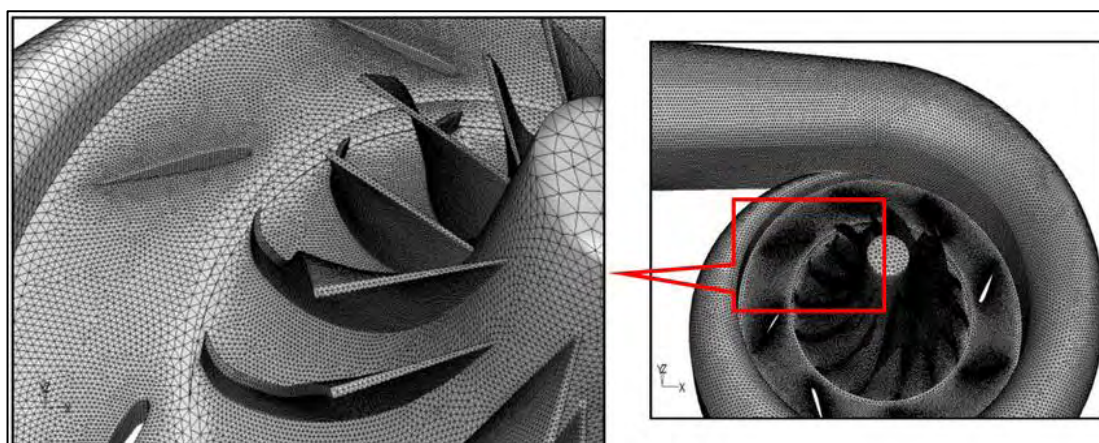
Τις δεκαετίες του 1950 και του 1960, οι κατασκευάστριες εταιρίες εισήγαγαν στην αγορά τα συγκολλημένα στροφεία, των δύο η τριών συγκολλημένων κομματιών. Όμως λόγω της περιορισμένης ικανότητας φρεζαρίσματος (3 αξόνων), τα πτερύγια των στροφείων μπορούσαν να επεξεργαστούν μόνο στις δύο διαστάσεις. Αυτό ήταν σοβαρό

ελάττωμα των στροφείων, καθώς λόγω των διαφορετικών προσπίπτουσών γωνιών της ροής του αέρα στο περύγιο, το τελευταίο θα έπρεπε να έχει τέτοια γεωμετρία ώστε να μπορεί να διαχειριστεί βέλτιστα όλο το εύρος γωνιών της προσπίπτουσας ροής κατά την ακτινική του διεύθυνση. Έτσι θα χρειαζόταν ένα τρισδιάστατο περύγιο για να μπορεί να αντιμετωπίσει το πρόβλημα αυτό, πράγμα που ώθησε τις εταιρίες να εισάγουν μεθόδους παραγωγής τέτοιου είδους περυγίων. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργήθηκαν και τα πακέτα λογισμικών παραγωγής γεωμετρίας που χρησιμοποιούνται έως και σήμερα. Με την ανάπτυξη του φρεζαρίσματος 5 αξόνων το περύγιο έφτασε το επιθυμητό αεροδυναμικό σχήμα του, ενώ παράλληλα η απόσταση του διακένου μεταξύ των περυγίων βελτιστοποιήθηκε με συνέπεια την μεγαλύτερη αεροδυναμική απόδοση ολόκληρου του στροφείου.

2.2.2.2 Διαχύτης

Ο διαχύτης είναι το δεύτερο πιο σημαντικό μέρος ενός φυγοκεντρικού συμπιεστή. Έτσι η εξέλιξή του δεν είναι παράξενο ότι ξεκινά με την εμφάνιση αυτού του είδους συμπιεστή. Οι διαχύτες χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: εκείνους που διαθέτουν σταθερά περύγια και εκείνους που δε διαθέτουν. Οι τελευταίοι προσφέρουν το μεγαλύτερο φάσμα διαχείρισης ροής διότι δεν έχουν τα περύγια ως εμπόδια στη ροή του αερίου δια μέσω του διαχύτη. Ωστόσο, η ανάκτηση στατικής πίεσης είναι μικρότερη συγκριτικά με εκείνη των περυγωτών διαχυτών. Οι διαχύτες χωρίς περύγια ήταν η κυρίαρχη μορφή σε φυγοκεντρικούς συμπιεστές λόγω της απλότητάς τους, και χαρακτηριζόταν από ευκολία στην κατασκευή. Όμως το μειονέκτημα της μικρότερης ανάκτησης πίεσης (λιγότερο του 50%) περιορίζει την ευκαταία απόδοσή τους. Συνεπώς, κάποιες κατασκευαστικές εταιρίες συμπιεστών προσπάθησαν να δημιουργήσουν διαχύτες με κανάλια (το όνομά τους προέρχεται από το γεγονός ότι δύο διαδοχικά περύγια δημιουργούν μεταξύ τους ένα κανάλι ροής). Αυτό το είδος διαχυτών προσφέρει μεγαλύτερα ποσοστά ανάκτησης πίεσης (περί το 75 με 80%), αλλά παράλληλα το μειονέκτημά τους είναι μια ουσιώδης μείωση στο εύρος της ροής του αέρα, πράγμα που τους καθιστά ακατάλληλους για εφαρμογές όπου το εύρος των συνθηκών ροής είναι μεγάλο. Οι τελευταίοι βρίσκουν εφαρμογή σε αεροπορικούς κινητήρες, ή υπερπληρωτές.

Οι διαχύτες χωρίς πτερύγια είχαν ευρεία χρήση μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του 1980, όπου έγινε μια προσπάθεια εισαγωγής ενός νέου τύπου γνωστού ως διαχύτη με πτερύγια χαμηλής στερεότητας (Low Solidity Vane Diffuser-LSVD) (Εικόνα 2.6). Σε αυτό τον τύπο τα πτερύγια δεν δημιουργούν μεταξύ τους κανάλια και δεν έχουν πραγματική γεωμετρική στένωση. Στις αρχές του 1990 πραγματοποιήθηκαν ποικίλες δημοσιεύσεις με τα πλεονεκτήματα των LSVD. Όπως είναι προφανές μπορούν να διαχειριστούν μεγαλύτερο εύρος ροής και πραγματοποιούν μεγαλύτερα ποσοστά ανάκτησης πίεσης από τους προγόνους τους.



Εικόνα 2.6 : Διαχύτης με πτερύγια χαμηλής στερεότητας (LSVD)

2.2.2.3 Άλλα εξαρτήματα

Σε αυτή την ενότητα θα αναφερθεί περιληπτικά η εξέλιξη των IGVs, των καναλιών επιστροφής, των σπειρών, των περιβλημάτων και των πλευρικών ροών. Τα σταθερά κομμάτια στους πρώτους φυγοκεντρικούς συμπιεστές κατασκευαζόταν με χύτευση. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα κάποιες ατέλειες, όπως μετατοπίσεις του πυρήνα, ποικιλία στο πάχος των πτερυγίων και μεγάλη τραχύτητα επιφανείας. Όλες αυτές οι ατέλειες οδηγούσαν σε αυξημένες απώλειες και μεγαλύτερη αβεβαιότητα για τις προβλέψεις αποδοτικότητας.

Για να αντιμετωπίσουν αυτό και άλλα παρόμοια προβλήματα οι εταιρίες παραγωγής συμπιεστών άρχισαν να κατεργάζονται τα σταθερά τμήματα της διαδρομής ροής (flow path). Έτσι περί το 2000 οι εταιρίες κατασκεύαζαν συμπιεστές με σχεδόν 100% κατεργασμένα εσωτερικά τμήματα σε αντίθεση με το 1950 που τα τμήματα ήταν

100% χυτευτά. Σίγουρα τα χυτευτά τμήματα παραμένουν μία βιώσιμη επιλογή για την κατασκευή τμημάτων, όπου χρειάζεται να ληφθούν μέτρα για την καλύτερη ακρίβεια της γεωμετρίας της διαδρομής της ροής και καλύτερη ποιότητα τελικής επιφάνειας.

2.3 Προβλήματα που αντιμετωπίζουν οι φυγοκεντρικοί συμπιεστές

Οι φυγοκεντρικοί συμπιεστές χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία καθώς έχουν λιγότερα τμήματα που τρίβονται μεταξύ τους συγκριτικά με τους παλινδρομικούς συμπιεστές, όπως επίσης είναι ενεργειακά αποδοτικότεροι και διαχειρίζονται μεγαλύτερες παροχές μάζας σε σχέση με τους τελευταίους. Παράλληλα, η εφαρμογή τους είναι προτιμητέα σε μικρούς κινητήρες έναντι των συμπιεστών αξονικής ροής, επειδή ναι μεν χαρακτηρίζονται από μικρότερες απώλειες στο διάκενο μεταξύ ρότορα και στάτορα, αλλά και επειδή είναι απλοί στην κατασκευή και έχουν χαμηλό κόστος.

Παρολ' αυτά οι φυγοκεντρικοί συμπιεστές χαρακτηρίζονται από κάποια πολύ σοβαρά μειονεκτήματα. Το κύριο τους μειονέκτημα είναι ότι δεν είναι εύκολο να επιτύχουν μεγάλους λόγους συμπίεσης, όπως οι παλινδρομικοί, χωρίς τη χρήση περισσότερων από μίας βαθμίδας. Αυτό το φαινόμενο συμβαίνει διότι κατά το σχεδιασμό τους πρέπει να ληφθούν υπόψιν οι περιορισμοί λόγω τάσεων που πρόκειται να αναπτυχθούν κατά τη λειτουργία τους. Για μεγάλους λόγους συμπίεσης δημιουργούνται ισχυρές τάσεις, οι οποίες περιορίζουν την ασφάλεια του συμπιεστή, την διάρκεια ζωής του, την αντοχή του και την αξιοπιστία του. Παράλληλα οι φυγοκεντρικοί συμπιεστές υστερούν σε πρακτικότητα, έναντι των αξονικών συμπιεστών, για χρήση σε μεγάλες στροβιλομηχανές ή ελικοστροβιλομηχανές, επειδή έχουν σχετικά μεγάλο βάρος, μεγαλύτερες αναπτυσσόμενες τάσεις και μεγαλύτερη μετωπική επιφάνεια λόγω του διαχύτη. Όλα τα παραπάνω αποτελούν μειονεκτήματα των φυγοκεντρικών συμπιεστών και θέτουν ένα ισχυρό αντίβαρο σε περίπτωση που κάποιος επιθυμεί να τους επιλέξει για μια εφαρμογή, έναντι των παλινδρομικών και των αξονικών συμπιεστών.

2.4 Μελέτη ενός φυγοκεντρικού συμπιεστή

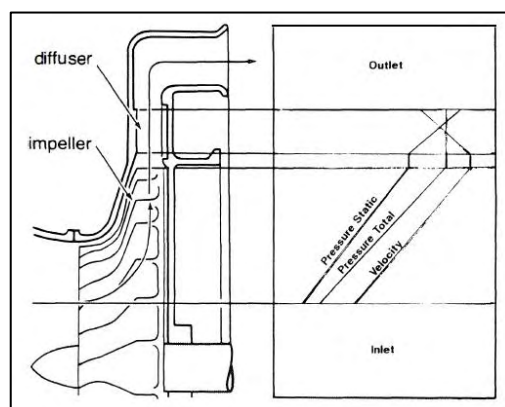
Στην παρούσα εργασία γίνεται μελέτη ενός φυγοκεντρικού συμπιεστή τόσο στη ρευστομηχανική του συμπεριφορά όσο και στη δυναμική του συμπεριφορά. Η μελέτη του συμπιεστή της εργασίας περιλαμβάνει μέσα από πειραματικές μετρήσεις την εξαγωγή των εξής αποτελεσμάτων :

- Λόγο συμπίεσης
- Ογκομετρική παροχή
- Προφίλ ταχυτήτων εξερχόμενης ροής
- Μέτρηση θορύβου λειτουργίας
- Μέτρηση τύρβης εξερχόμενης ροής και συσχέτιση με το θόρυβο
- Ανάλυση δονήσεων κατά τη λειτουργία

Η μεθοδολογία της διαδικασίας λήψης αυτών των πειραματικών μετρήσεων περιγράφεται στο επόμενο κεφάλαιο. Σκοπός όμως αυτής της παραγράφου είναι να παρατεθεί η βιβλιογραφική θεωρία στην οποία στηρίχτηκαν οι μετρήσεις και η ανάλυσή τους για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Αρχικά, θα γίνει αναφορά στην αρχή λειτουργίας του συμπιεστή και έπειτα στη θεωρία περί θορύβου, τυρβωδών ροών και ταλαντώσεων.

2.4.1 Αρχή λειτουργίας φυγοκεντρικού συμπιεστή

Τα σταθερά περύγια οδηγού εισόδου (IGVs) κατευθύνουν τη ροή στον επαγωγέα στη σωστή γωνία εισόδου του ρότορα (περωτή). Η περωτή αυξάνει την κινητική ενέργεια του ρευστού, καθώς και τη στατική και ολική πίεση του (Σχήμα 2.3). Οι συνολικές συνθήκες ποικίλλουν μόνο όταν τίθεται ενέργεια στο σύστημα, δηλαδή μόνο στην περωτή. Το αέριο φεύγει από την



Σχήμα 2.3 : Αύξηση πίεσης και ταχυτητας στο ροτορα και διαχύτη.

περωτή και εισέρχεται στο διαχύτη υπό γωνία που καθορίζεται από τη γωνία εξόδου της περωτής και την ταχύτητα περιστροφής της. Ο πρωταρχικός σκοπός του διαχύτη είναι η μείωση της ταχύτητας του αερίου και η αποτελεσματική αύξηση της στατικής πίεσης, σύμφωνα με την αρχή του Bernoulli. Στην περίπτωση του φυγοκεντρικού συμπιεστή, δεδομένου ότι η διεύθυνση ροής είναι στην ακτινική προς τα έξω κατεύθυνση, η αύξηση της περιοχής ροής κατά την κατάντη κατεύθυνση φυσικά διαχέει τη ροή. Το συμπιεσμένο αέριο από το διαχύτη εκκενώνεται στον στροφέα προς τα κάτω μέσω του καναλιού επιστροφής. Ο τελευταίος διαχύτης εκκενώνει το αέριο σε κύλινδρο ή σπείρα. Η διατομή του κυλίνδρου μεταβάλλεται περιφερειακά. Δεδομένου ότι όλοι οι δρόμοι των περιστρεφόμενων πτερυγίων εκκενώνουν το συμπιεσμένο αέριο στο κύλινδρο, η διατομή του κυλίνδρου αυξάνεται κατά τη διεύθυνση περιστροφής της περωτής. Η αύξηση της διατομής του κυλίνδρου έχει σχεδιαστεί, επίσης, για να δώσει επιπρόσθετη αύξηση της πίεσης. Εφόσον το αέριο μέσο περνάει από ένα λαβύρινθο κινούμενων και στατικών διαδρόμων ροής, ολόκληρη η διαδρομή του αερίου πρέπει να σχεδιάζεται αεροδυναμικά για να συμπιέζει αποτελεσματικά το αέριο και να ελαχιστοποιεί τις απώλειες.

Οι στροβιλομηχανές μπορούν να συγκριθούν μεταξύ τους με τη χρήση ανάλυσης διαστάσεων (dimensional analysis). Αυτός ο τύπος ανάλυσης παράγει διάφορους τύπους γεωμετρικά παρόμοιων παραμέτρων. Η ανάλυση διαστάσεων είναι μια διαδικασία όπου οι μεταβλητές που αντιπροσωπεύουν μια φυσική κατάσταση μειώνονται σε ομάδες χωρίς διαστάσεις. Αυτές οι αδιάστατες ομάδες μπορούν στη συνέχεια να χρησιμοποιηθούν για να συγκρίνουν μεταξύ τους τις επιδόσεις διαφόρων τύπων μηχανών. Η ανάλυση διαστάσεων, όπως χρησιμοποιείται σε στροβιλομηχανές, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τα ακόλουθα: (1) σύγκριση δεδομένων από διάφορους τύπους μηχανών, (2) μια πολύ χρήσιμη τεχνική στην ανάπτυξη διόδων των πτερυγίων, προφίλ πτερυγίων και διαχυτών για την επιλογή διαφόρων τύπων μονάδων που βασίζονται στη μέγιστη απόδοση και την απαιτούμενη πίεση κεφαλής και 3) πρόβλεψη των επιδόσεων των μονάδων πρωτότυπου από τη δοκιμή που διεξάγεται σε μοντέλο μικρότερης κλίμακας ή σε χαμηλότερες ταχύτητες και ροές [4]. Μερικές από τις σημαντικότερες αδιάστατες παραμέτρους είναι :

- Αριθμός Reynolds $Re = \frac{\rho \cdot V}{\mu}$ (Σχ. 2.1)

- Ειδική ταχύτητα $N_s = \frac{N \cdot \sqrt{Q}}{H^{\frac{3}{4}}}$ (Σχ. 2.2)

- Ειδική διάμετρος $D_s = \frac{D \cdot H^{\frac{3}{4}}}{\sqrt{Q}}$ (Σχ. 2.3)

- Συντελεστής ροής $\Phi = \frac{H}{N \cdot D^3}$ (Σχ. 2.4)

- Συντελεστής κεφαλής $\Psi = \frac{H}{N^2 \cdot D^2}$ (Σχ. 2.5)

όπου, D η διάμετρος της πτερωτής (m)

H η διάμετρος της κεφαλής (m)

V η ταχύτητα του ρευστού (m/s)

N η ταχύτητα της πτερωτής (RPM)

Q η παροχή στο σημείο της καλύτερης απόδοσης (lt / s)

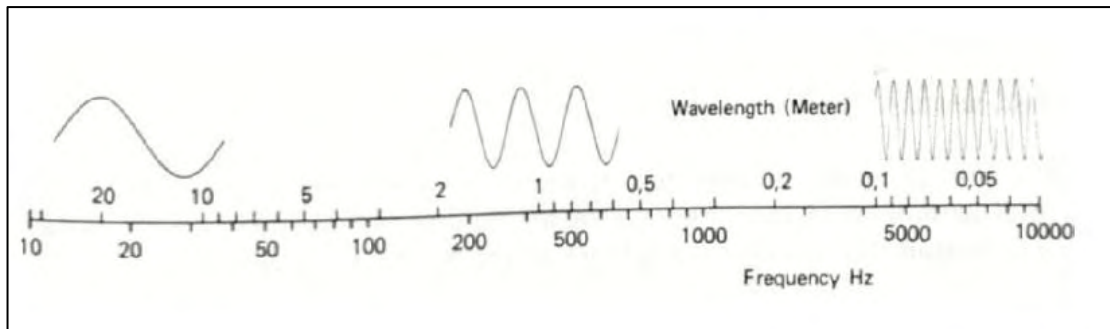
2.4.2 Θεωρία περί ήχου και θορύβου

Οι ήχοι χαρακτηρίζονται από το μέγεθος (ένταση) και τη συχνότητα. Μπορεί να υπάρχουν δυνατοί ήχοι χαμηλής συχνότητας, ήχοι υψηλής συχνότητας και δυνατοί ήχοι που περιλαμβάνουν μια σειρά από συχνότητες. Το ανθρώπινο αυτί μπορεί να ανιχνεύσει ένα πολύ ευρύ φάσμα τόσο των ηχητικών επιπέδων όσο και των συχνοτήτων, αλλά είναι πιο ευαίσθητο σε ορισμένες συχνότητες από άλλα.

Ο ήχος δημιουργείται από πολλούς μηχανισμούς και συνδέεται πάντοτε με ταχείες διακυμάνσεις πίεσης μικρής κλίμακας, οι οποίες προκαλούν αισθήσεις στο ανθρώπινο αυτί. Τα ηχητικά κύματα χαρακτηρίζονται από το εύρος ή την έντασή τους, το μήκος κύματος (λ), η συχνότητα (f) και η ταχύτητα (V), όπου V βρίσκεται από:

$$V = f \cdot \lambda \quad (\text{Σχ. 2.6})$$

Η ταχύτητα του ήχου είναι συνάρτηση του μέσου μέσω του οποίου ταξιδεύει, και γενικά ταξιδεύει πιο γρήγορα σε πιο πυκνά μέσα. Η ταχύτητα του ήχου είναι περίπου 340 m/s στον αέρα σε τυπικές πιέσεις. Ένα μονόγραμμα αναφοράς που σχετίζεται με το μήκος κύματος με τη συχνότητα για την ταχύτητα του ήχου υπό κανονικές συνθήκες απεικονίζεται στο σχήμα 2.4.



Σχήμα 2.4 : Απεικόνιση σχέσης συχνότητας-μήκους κύματος για την ταχύτητα του ήχου.

Αυτό είναι το απλούστερο από όλα τα ακτινοβολούμενα κύματα, το λεγόμενο επίπεδο, προοδευτικό κύμα επειδή μεταδίδεται μακριά από την πηγή προς μία μόνο κατεύθυνση, ενώ τα μέτωπα των κυμάτων παραμένουν παράλληλα το ένα με το άλλο. Επειδή δεν μπορεί να εξαπλωθεί στο μέσο, η μόνη εξασθένιση που παρατηρείται οφείλεται σε απώλειες μετάδοσης και διασπορά που προκαλούνται από τύρβη και θερμοκρασιακές κλίσεις μέσα στο ίδιο το μέσο. Αν και το μέγεθος ενός ηχητικού κύματος μπορεί να προσδιοριστεί με διάφορους τρόπους, είναι συνήθως πιο βολικό να μετρηθεί η ακουστική πίεση, παρά παράμετροι όπως η μετατόπιση ή η ταχύτητα των σωματιδίων που είναι εξαιρετικά διαφορετικές στην πράξη όταν μετριοούνται. Αυτές οι παράμετροι απαιτούνται συνήθως μόνο όταν μετρήσεις πρέπει να γίνουν πολύ κοντά στην πηγή στο κοντινό της πεδίο.

Η ταχύτητα σωματιδίων εδώ δεν είναι απαραίτητα προς την κατεύθυνση της κίνησης του κύματος και η ηχητική πίεση μπορεί να μεταβάλλεται αισθητά σε σύντομα διαστήματα κατά μήκος της κατεύθυνσης της διάδοσης. Υπό αυτές τις συνθήκες, η ακουστική ένταση δεν συνδέεται απλώς με το μέσο τετράγωνο της ηχητικής πίεσης. Στο μακρινό πεδίο, όμως, αυτή η σχέση είναι αληθής και, επειδή στη πράξη η στάθμη της ηχητικής πίεσης είναι μια εύκολη παράμετρος μέτρησης, αυτή έχει γίνει ο πιο συνηθισμένος τρόπος έκφρασης για την έκφραση ενός ακουστικού πεδίου.

2.4.2.1 Ισχύς θορύβου και διάδοση

Οποιαδήποτε πηγή θορύβου έχει μια χαρακτηριστική ηχητική ισχύ, μια βασική μέτρηση της ακουστικής της ισχύος. Αλλά, τα επίπεδα ηχητικής πίεσης που δημιουργεί

εξαρτώνται από πολλούς εξωτερικούς παράγοντες, που περιλαμβάνουν την απόσταση και τον προσανατολισμό του δέκτη, τις θερμοκρασιακές κλίσεις και ταχύτητας του μέσου και του περιβάλλοντος. Από την άλλη πλευρά, η ηχητική ισχύς είναι θεμελιώδης φυσική ιδιότητα μόνο της πηγής και ως εκ τούτου αποτελεί σημαντική απόλυτη παράμετρο, η οποία χρησιμοποιείται ευρέως για την αξιολόγηση και τη σύγκριση πηγών ήχου.

Η ένταση, η ακουστική ενέργεια που ρέει μέσω της περιοχής της μονάδας (κάθετη προς την κατεύθυνση της διάδοσης του κύματος), σε μονάδα χρόνου, είναι διαφορετική για διάφορους τύπους ακουστικού πεδίου. Οι ακουστικές πηγές μπορεί να είναι :

- Επίπεδη πηγή
- Σημειακή πηγή
- Γραμμική πηγή

Ανάλογα με το είδος της πηγής, η ένταση του ήχου μειώνεται με διαφορετικά db με διπλασιασμό της απόστασης από την πηγή. Εκτός από τη μείωση της έντασης με την απόσταση, υπάρχουν πολλοί άλλοι παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τη διάδοση του ήχου σε ένα πραγματικό μέσο, όπως η ατμόσφαιρα. Οι κλίσεις ταχύτητας και θερμοκρασίας μεταβάλλουν την κατεύθυνση του κύματος, οι στροβιλισμοί το παραμορφώνουν και το ιξώδες προκαλεί απορρόφηση. Αυτή η μεταγενέστερη επίδραση είναι πολύ μεγαλύτερη για υψηλές σε σχέση με τις χαμηλές συχνότητες, οπότε η ατμόσφαιρα τείνει να λειτουργεί ως φίλτρο χαμηλής διέλευσης, εξασθενίζοντας τις υψηλές συχνότητες και έτσι στρεβλώνοντας το φάσμα συχνοτήτων ενός θορύβου, μειώνοντας τη δύναμή του και μεταβάλλοντας τη διαδρομή διάδοσης. Επιπλέον, οι περισσότερες μετρήσεις πραγματοποιούνται κοντά στο επίπεδο του εδάφους, όπου οι άνθρωποι ζουν και εργάζονται και όπου παράγεται ο θόρυβος και με την αξιοσημείωτη εξαίρεση του θορύβου των αεροσκαφών. Για το λόγο αυτό, η αντανάκλαση και η απορρόφηση του εδάφους κάτω από το μονοπάτι μεταξύ πηγή και δέκτη είναι πολύ σημαντική και πρέπει να λαμβάνεται υπόψη, φυσικά, κάθε φορά που μελετάμε τη μετάδοση εξωτερικού θορύβου.

Η συχνότητα του ήχου υποδηλώνει το "βήμα" του ήχου και, σε πολλές περιπτώσεις, αντιστοιχεί σε σημειώσεις για τη μουσική κλίμακα (Μέση C είναι 262 Hz). Μια οκτάβα είναι ένα εύρος συχνοτήτων μεταξύ ενός ήχου με μία συχνότητα και

μιας με δύο φορές αυτής της συχνότητας, μια έννοια που συχνά χρησιμοποιείται για τον καθορισμό των τιμών των τιμών συχνότητας ήχου. Η περιοχή συχνοτήτων της ανθρώπινης ακοής είναι αρκετά μεγάλη, κυμαινόμενη γενικά από περίπου 20 έως 20 kHz (περίπου 10 οκτάβες). Τέλος, οι ήχοι που βιώνουν στην καθημερινή ζωή δεν είναι συνήθως μία συχνότητα, αλλά σχηματίζονται από ένα μείγμα πολυάριθμων συχνοτήτων, από πολλές πηγές.

2.4.2.2 Κλίμακα μέτρησης

Είναι σημαντικό να γίνει διάκριση μεταξύ των διαφορών στα μέτρα μεγέθους του ήχου: επίπεδο ηχητικής ισχύος και επίπεδο ηχητικής πίεσης. Η στάθμη ηχητικής ισχύος είναι η ισχύς ανά μονάδα επιφανείας του κύματος ηχητικής πίεσης. Είναι ιδιότητα της πηγής του ήχου και δίνει την συνολική ακουστική ισχύ που εκπέμπεται από την πηγή. Η ηχητική πίεση είναι ιδιότητα του ήχου και σε δεδομένη τοποθεσία παρατηρητή μπορεί να μετρηθεί εκεί με μόνο ένα μικρόφωνο.

Λόγω της μεγάλου εύρους των πιέσεων του ήχου στις οποίες ανταποκρίνεται το αυτί (λόγος 105 ή περισσότερων για ένα φυσιολογικό άτομο), η ηχητική πίεση είναι μια ανεπιθύμητη ποσότητα για χρήση σε γραφικές παραστάσεις και πίνακες. Επιπλέον, το ανθρώπινο αυτί δεν ανταποκρίνεται γραμμικά στο πλάτος της ηχητικής πίεσης και για να το προσεγγίσει, η κλίμακα που χρησιμοποιείται για να χαρακτηρίσει την ηχητική ισχύ ή το πλάτος πίεσης του ήχου είναι λογαριθμική. Όποτε το μέγεθος μιας ακουστικής ποσότητας δίνεται σε λογαριθμική μορφή, λέγεται ότι είναι ένα επίπεδο σε ντεσιμπέλ (dB) πάνω ή κάτω από ένα μηδενικό επίπεδο αναφοράς. [5]

Η στάθμη ηχητικής πίεσης (SPL) ενός ήχου, L_p , σε μονάδες ντεσιμπέλ (dB), δίνεται από τη σχέση :

$$L_p = 20 \cdot \log_{10}\left(\frac{P}{P_0}\right) \quad (\text{Σχ. 2.7})$$

όπου, P ίσο με την πραγματική ηχητική πίεση (ή ρίζα μέσης τετραγωνικής, RMS)

P_0 μια RMS ηχητική πίεση αναφοράς (συνήθως 2×10^{-5} Pa).

2.4.2.3 Μέτρηση του θορύβου

Τα επίπεδα ηχητικής πίεσης μετρώνται με τη χρήση μετρητών στάθμης ήχου. Αυτές οι συσκευές χρησιμοποιούν ένα μικρόφωνο που μετατρέπει τις μεταβολές πίεσης σε ένα σήμα τάσης το οποίο στη συνέχεια καταγράφεται σε ένα μετρητή (βαθμονομημένο σε ντεσιμπέλ). Όπως περιγράφηκε παραπάνω, η κλίμακα decibel είναι λογαριθμική. Μια μέτρηση στάθμης ήχου που συνδυάζει όλες τις συχνότητες σε μία μοναδική σταθμική μέτρηση ορίζεται ως στάθμη ήχου στο εξωτερικό. Για τον προσδιορισμό της απόκρισης του ανθρώπινου αυτιού στις αλλαγές του ήχου, οι μετρητές στάθμης ήχου είναι γενικά εξοπλισμένοι με φίλτρα που δίνουν μικρότερο βάρος στις χαμηλότερες συχνότητες. Ορισμένα φίλτρα που το επιτυγχάνουν είναι:

- A-Weighting: Αυτή είναι η πιο συνηθισμένη κλίμακα για την μέτρηση του περιβαλλοντικού και επαγγελματικού θορύβου. Προσδιορίζει την απόκριση του ανθρώπινου αυτιού σε ήχους μεσαίας έντασης.
- B-Weighting: αυτή η στάθμιση δεν χρησιμοποιείται συνήθως. Προσέγγιση του αυτιού για μεσαίου ήχους, περίπου 70 dB.
- C-Weighting: Προσέγγιση απόκρισης του ανθρώπινου αυτιού σε δυνατούς ήχους. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ήχο χαμηλής συχνότητας.
- G-Weighting: Σχεδιασμένο για Infrasound.

2.4.3 Θεωρία περί τύρβης

Η καθημερινή ζωή μας δίνει μια διαισθητική γνώση της τύρβης των ρευστών, για παράδειγμα πάνω από μια φωτιά ή ο καπνός ενός τσιγάρου παρουσιάζει μια διαταραγμένη συμπεριφορά, χαρακτηριστική του αέρα κίνησης που το μεταφέρει. Η τύρβη είναι μάλλον μια γνωστή αντίληψη, αλλά δεν είναι εύκολο να οριστεί με τέτοιο τρόπο που να καλύπτει τα λεπτομερή χαρακτηριστικά που συμπεριλαμβάνονται σε αυτήν και να κάνει τον ορισμό της να συμφωνεί με τη σύγχρονη αντίληψη που κατέχουν οι επαγγελματίες στον τομέα αυτό της εφαρμοσμένης επιστήμης.

Το 1937 ο Taylor και ο Von Karman έδωσαν τον ακόλουθο ορισμό: «Ο στροβιλισμός είναι μια ακανόνιστη κίνηση η οποία γενικά εμφανίζεται σε ρευστά,

αέρια ή υγρά, όταν ρέει πέρα από στερεές επιφάνειες ή ακόμα και όταν γειτονικά ρεύματα της ίδιας ροής του ρευστού περνούν ή το ένα πάει πάνω από το άλλο» [Turbulence J.O. Hinze]. Σύμφωνα με αυτόν τον ορισμό, η ροή πρέπει να ικανοποιεί την κατάσταση της αταξίας.

Πράγματι, αυτή η αταξία είναι ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό. Λόγω αταξίας, είναι αδύνατο να περιγράψουμε την κίνηση με κάθε λεπτομέρεια ως συνάρτηση των συντεταγμένων του χρόνου και του χώρου. Αλλά, ευτυχώς, η ταραχώδης κίνηση είναι ακανόνιστη υπό την έννοια ότι είναι δυνατόν να την περιγράψουμε με τους νόμους των πιθανοτήτων. Είναι δυνατόν να σημειωθούν σαφής μέσες τιμές διαφόρων ποσοτήτων, όπως η ταχύτητα, η πίεση, η θερμοκρασία κ.λπ., και αυτό είναι πολύ σημαντικό καθώς εάν η τύρβης ήταν εντελώς ακανόνιστη, θα ήταν απρόσιτη σε οποιαδήποτε μαθηματική επεξεργασία.

Ο στροβιλισμός μπορεί να δημιουργηθεί είτε με δυνάμεις τριβής σε σταθερά τοιχώματα (ροή μέσω αγωγών, ροή σε προηγούμενα σώματα) είτε με τη ροή στρώσεων ρευστών διαφορετικών ταχυτήτων που περνούν ή υπερπηδούν η μία την άλλη. Υπάρχει μια σαφής διαφορά μεταξύ των τύπων αναταράξεων που παράγονται με τους δύο τρόπους.

Στην περίπτωση πραγματικών ρευστών με ιξώδες, τα αποτελέσματα ιξώδους θα έχουν ως αποτέλεσμα τη μετατροπή της κινητικής ενέργειας της ροής σε θερμότητα. Έτσι η τυρβώδης ροή, όπως όλη η ροή τέτοιων ρευστών, είναι διαλυτική στη φύση. Εάν δεν υπάρχει συνεχής εξωτερική πηγή ενέργειας για τη συνεχή παραγωγή της τυρβώδους κίνησης, η κίνηση θα εξασθενίσει. Άλλες επιδράσεις του ιξώδους είναι να κάνει τον στροβιλισμό πιο ομοιογενές και να τον κάνει λιγότερο εξαρτώμενο από την κατεύθυνση. Στην ακραία περίπτωση, όπου η αναταραχή έχει ποσοτικά την ίδια δομή σε όλα τα μέρη του πεδίου ροής, τότε η αναταραχή λέγεται ομοιογενής. Η αναταραχή ονομάζεται ισότροπη αν τα στατιστικά χαρακτηριστικά της δεν έχουν καμία προτίμηση για οποιαδήποτε κατεύθυνση, έτσι ώστε να βασισθεί η τέλεια διαταραχή. Σε αυτή την περίπτωση, δεν μπορεί να υπάρξει μέση διαμητική τάση και, κατά συνέπεια, καμία βαθμίδα ταχύτητας για τη μέση ταχύτητα. Αυτή η μέση ταχύτητα, αν συμβεί, είναι σταθερή σε όλο το πεδίο. Σε όλες τις άλλες περιπτώσεις όπου η μέση ταχύτητα παρουσιάζει κάποια κλίση, η αναταραχή θα είναι μη ιστροπική ή ανισότροπη.

Περαιτέρω, εάν συγκριθούν διαφορετικές ταλαντούμενες κινήσεις σε κάθε μία από τις οποίες μπορεί να διακριθεί ένα ξεχωριστό πρότυπο, είναι δυνατόν να παρατηρηθούν διαφορές, για παράδειγμα, στο μέγεθος των μοτίβων. Αυτό σημαίνει ότι για να περιγραφεί ποσοτικά μια ταραχώδης κίνηση, είναι απαραίτητο να εισαχθεί η έννοια της κλίμακας της αναταραχής: μια ορισμένη κλίμακα στο χρόνο και μια ορισμένη κλίμακα στο διάστημα. Το μέγεθος αυτών των κλιμάκων προσδιορίζεται από τις διαστάσεις και τις ταχύτητες εντός της περιοχής στην οποία λαμβάνει χώρα η τυρβώδης ροή. Για παράδειγμα, για τυρβώδη ροή διαμέσου ενός σωλήνα, μπορεί κανείς να αναμένει μία χρονική κλίμακα της τάξης μεγέθους της σχέσης μεταξύ της διαμέτρου του σωλήνα και της ταχύτητας ροής και μιας κλίμακας χώρου της τάξης μεγέθους της διαμέτρου του σωλήνα.

Είναι προφανές ότι δεν επαρκεί μόνο η κλίμακα για να χαρακτηρίσει μια ταραχώδη κίνηση, διότι δεν αναφέρει κάτι για τη βιαιότητα της κίνησης. Δεν μπορεί κανείς να πάρει τη μέση τιμή της ταχύτητας ως μέτρο αυτής της βιαιότητας, επειδή η βιαιότητα των διακυμάνσεων σε σχέση με αυτή τη μέση ταχύτητα είναι ακριβώς αυτό που κάποιος θέλει να γνωρίζει. Το αν μια ροή είναι στρωτή ή τυρβώδης εξαρτάται από τη σχετική σημασία της τριβής του ρευστού (ιξώδες) και της αδράνειας ροής. Ο λόγος αδράνειας προς ιξώδεις δυνάμεις είναι ο αριθμός Reynolds. Δεδομένης της χαρακτηριστικής κλίμακας της ταχύτητας, V και της κλίμακας του μήκους, L , για ένα σύστημα, ο αριθμός Reynolds είναι :

$$Re = \frac{V \cdot L}{\nu} \quad (\text{Σχ. 2.8})$$

όπου, ν το κινηματικό ιξώδες του ρευστού (m^2/s)

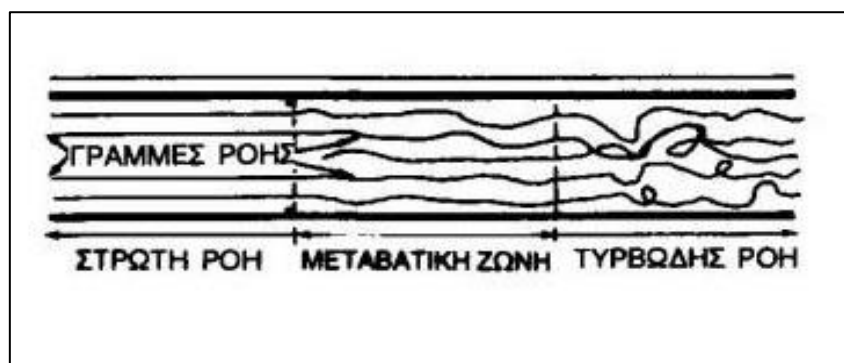
Η χαρακτηριστική κλίμακα μήκους για ένα κανάλι πλάτους w και βάθους h είναι η υδραυλική ακτίνα R_h :

$$R_h = \frac{w \cdot h}{P_w} \quad (\text{Σχ. 2.9})$$

όπου, P_w η βρεχόμενη περίμετρος. Για ανοικτό κανάλι $P = (2h + w)$ και για κλειστό αγωγό $P = 2(h + w)$. Κατά γενικό κανόνα, η ροή ανοικτού διαύλου είναι στρωτή εάν ο αριθμός Reynolds ορίζεται από την υδραυλική ακτίνα είναι μικρότερος του 500 :

$$Re = \frac{V \cdot R_h}{\nu} \quad (\text{Σχ. 2.10})$$

Καθώς ο αριθμός Reynolds αυξάνεται πάνω από αυτό το όριο εμφανίζεται απότομα στροβιλισμός στη ροή. Εάν το τοίχωμα του αγωγού είναι τραχύ, η μετάβαση σε πλήρως τυρβώδη ροή μπορεί να συμβεί σε χαμηλότερους αριθμούς Reynolds. Εναλλακτικά, οι συνθήκες στρωτής ροής μπορούν να διατηρηθούν σε υψηλότερους αριθμούς Reynolds εάν ο αγωγός είναι λείος και οι συνθήκες εισόδου σχεδιάζονται προσεκτικά.



Σχήμα 2.5 : Μετάβαση από στρωτή σε τυρβώδη ροή.

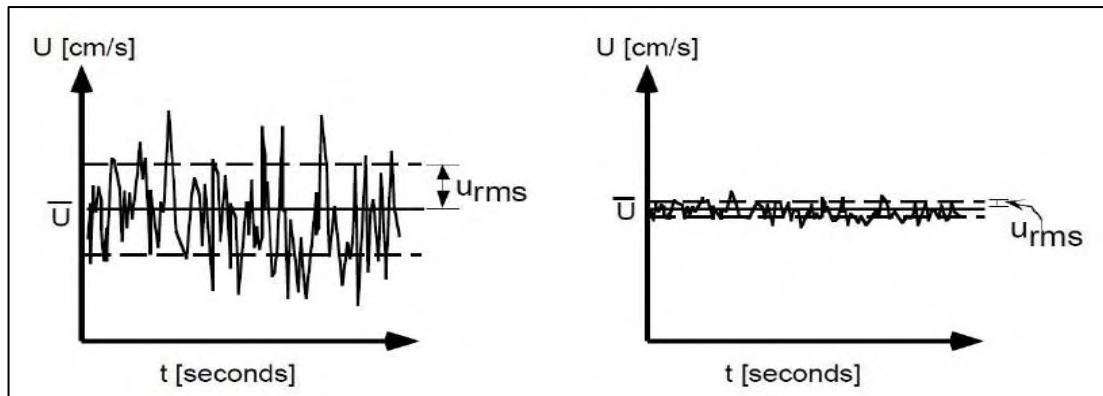
Τα δινορεύματα της τύρβης δημιουργούν διακυμάνσεις της ταχύτητας. Επειδή οι τυρβώδεις κινήσεις που σχετίζονται με τους στροβιλισμούς είναι κατά προσέγγιση τυχαίες, μπορούν να προσδιοριστούν χρησιμοποιώντας στατιστικές έννοιες. Θεωρητικά, η καμπύλη από τις μετρήσεις της ταχύτητας είναι συνεχής, άρα η μέση τιμή μπορεί να υπολογισθεί μέσω ολοκλήρωσης. Η ένταση της τύρβης I υπολογίζεται από τη σχέση :

$$I = \frac{V_{St.Dev}}{\bar{V}} \quad (\text{Σχ. 2.11})$$

όπου, $V_{St.Dev}$ η τυπική απόκλιση της ταχύτητας

\bar{V} η μέση τιμή της ταχύτητας

Μία μεγαλύτερη τιμή της $V_{St.Dev}$ υποδηλώνει μεγαλύτερη ένταση στροβιλισμού. Στο παρακάτω σχήμα, και οι δύο καταγραφές ταχυτήτων έχουν την ίδια μέση ταχύτητα, αλλά η καταγραφή στα αριστερά έχει υψηλότερη ένταση στροβιλισμού.



Σχήμα 2.6 : Διαφορά απόκλισης της ταχύτητας για ίδια μέση τιμή υποδηλώνοντας μεγαλύτερη ένταση στροβιλισμού

2.4.3.1 Μέτρηση της τύρβης

Κατά τη διάρκεια πειραματικών ερευνών της ροής των ρευστών αναπτύχθηκε και χρησιμοποιήθηκε μεγάλος αριθμός μεθόδων, τεχνικών και οργάνων. Έτσι σήμερα, υπάρχει διαθέσιμη η επιλογή ανάμεσά τους, όπου η μία να είναι πιο κατάλληλη για ένα συγκεκριμένο είδος μετρήσεων από ότι για άλλο είδος μετρήσεων. Οι περισσότερες από αυτές τις μεθόδους και τα όργανα έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση των ταχυτήτων σε ροές που είτε δεν είναι στροβιλώδεις είτε υποτίθεται ότι δεν είναι στροβιλώδεις. Στην πραγματικότητα μόνο λίγα είναι κατάλληλα για την πραγματοποίηση αξιόπιστων μετρήσεων σε τυρβώδεις ροές ή, ειδικότερα, για τη μέτρηση της ίδιας της τύρβης.

Οι κύριες δυσκολίες στη μέτρηση της τύρβης οφείλονται στο γεγονός ότι αυτή η τύρβης είναι μια τυχαία, κυμαινόμενη και τρισδιάστατη ροή. Επιπλέον, οι υψηλές συχνότητες των διακυμάνσεων που συμβαίνουν στις τυρβώδεις ροές κάνουν πολύ δύσκολο για ένα όργανο μετρήσεων να ικανοποιήσει από κάθε άποψη τη βασική απαίτηση που συνίσταται για μια τέτοια διάταξη, δηλαδή ότι οι εγγραφές της ποσότητας πρέπει να είναι όσο το δυνατόν ανεπηρέαστες από τις διαταραχές.

Κατά τη μέτρηση των στροβιλοδών ροών πρέπει να γίνει διάκριση μεταξύ των μετρήσεων της μέσης ροής και της μέτρησης της αναταραχής της ροής. Τα προβλήματα που συνδέονται με αυτούς τους δύο τύπους μέτρησης σχετίζονται σε κάποιο βαθμό, όμως οι απαιτήσεις που πρέπει να πληρούν οι μέθοδοι και τα μέσα που

χρησιμοποιούνται είναι διαφορετικές. Για παράδειγμα, το αποτέλεσμα μιας μέτρησης της μέσης ταχύτητας σε ένα δεδομένο σημείο επηρεάζεται περισσότερο ή λιγότερο από την τύρβη που υπάρχει στη ροή και είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε ποια διόρθωση πρέπει να γίνει στις μετρήσεις του οργάνου μέτρησης. Όμως, μετρώντας την ίδια την τύρβη δεν μπορεί να γίνει ανεκτή οποιαδήποτε επίδραση της μέσης ταχύτητας η οποία παράγει σφάλμα στις καταγραφόμενες ταχύτητες στροβιλισμού.

Επιπλέον, οι περισσότερες από τις τρέχουσες μεθόδους μέτρησης των μέσων τιμών επηρεάζονται από την αναταραχή. Έτσι πρέπει να εφαρμοστούν διορθώσεις στα πειραματικά δεδομένα. Αυτές οι διορθώσεις μπορούν να γίνουν μόνο αν είναι γνωστές οι τιμές της τύρβης. Οπότε είναι απαραίτητο να μετρηθούν αυτές οι αναταράξεις εκτός από τις μέσες τιμές.

Είναι δυνατόν να χωρίσουμε τις διάφορες μεθόδους, τεχνικές και όργανα σε δύο ομάδες. Στην πρώτη ομάδα γίνεται χρήση ενός ιχνογράφου ή άλλου δείκτη ο οποίος εισάγεται στο ρευστό για να γίνει ορατό το σχέδιο ροής (φωτογραφική εγγραφή) ή να παρατηρηθεί από μια κατάλληλη συσκευή ανίχνευσης έξω από το πεδίο ροής. Στη δεύτερη ομάδα εισάγεται ένα στοιχείο ανίχνευσης στο ρευστό που ρέει και οι ποσότητες στροβιλισμού μετρώνται με τις μεταβολές μηχανικής, φυσικής ή χημικής φύσης που συμβαίνουν σε αυτό το στοιχείο.

Όταν εφαρμόζονται οι μέθοδοι της πρώτης ομάδας για τη μέτρηση ποσοτήτων στροβιλισμού, εμφανίζονται αμέσως δυσκολίες που σχετίζονται με πολύ ταχείες αλλαγές ανάλογα με το χρόνο και τον τόπο, έτσι ώστε πρακτικά στιγμιαίες εγγραφές είναι απαραίτητες. Επιπλέον, η τρισδιάστατη κίνηση των ταραχών δεν κάνει την ερμηνεία τέτοιων εγγραφών απλούστερη, το αντίθετο μάλλον. Όσον αφορά τη δεύτερη ομάδα, υπάρχουν ορισμένες απαιτήσεις που πρέπει να πληρούνται από το στοιχείο ανίχνευσης και το υπόλοιπο στέλεχος το οποίο βρίσκεται πριν από την διαταραγμένη περιοχή, αυτές είναι:

- Το στοιχείο ανίχνευσης που εισάγεται στο ρέον πεδίο πρέπει να είναι τόσο μικρό που να προκαλεί μόνο την ελάχιστη παραδεκτή διαταραχή του μοτίβου ροής.
- Η στιγμιαία κατανομή ταχύτητας πρέπει να είναι ομοιόμορφη στην περιοχή που καταλαμβάνεται από το στοιχείο. Αυτό σημαίνει ότι το στοιχείο ανίχνευσης πρέπει να είναι μικρότερο από τις διαστάσεις της μικροκλίμακας του

στροβιλισμού. Εάν περιοριστούν οι μετρήσεις σε ροές χαμηλών ή μέτριων ταχυτήτων, το μέγεθος του στοιχείου ανίχνευσης δεν πρέπει να υπερβαίνει το 1 mm.

- Η αδράνεια του οργάνου πρέπει να είναι χαμηλή, έτσι ώστε η απόκριση ακόμη και στις πιο ραγδαίες διακυμάνσεις να είναι πρακτικά στιγμιαία. Για ταχύτητες ροής που δεν είναι πολύ υψηλές, μπορεί να αναμένονται συχνότητες μέχρι 5000 Hz.
- Το όργανο πρέπει να είναι αρκετά ευαίσθητο για να καταγράφει μικρές διαφορές στις διακυμάνσεις. Αυτές οι διαφορές είναι συχνά μόνο μερικές εκατοστιαίες μονάδες της μέσης τιμής.
- Το όργανο πρέπει να είναι σταθερό, έτσι ώστε να μην παρατηρείται αισθητή αλλαγή στις παραμέτρους βαθμονόμησης κατά τη διάρκεια τουλάχιστον μιας δοκιμαστικής λειτουργίας.
- Το όργανο πρέπει να έχει επαρκή δομική αντοχή και να είναι επαρκώς άκαμπτο για να αποκλείει τους κραδασμούς ή τις κινήσεις που προκαλούνται από την τυρβώδη ροή.

Υπάρχει ένα όργανο του οποίου η ανάπτυξη και η εφαρμογή για τη μέτρηση της τύρβης έχουν ξεπεράσει πολύ των άλλων οργάνων μέχρι τώρα, αυτό είναι το σύρμα θερμής αναιμετρίας (Hot-Wire Anemometry). Η δημοτικότητά που έχει για την πραγματοποίηση μετρήσεων τύρβης γίνεται εύκολα κατανοητή αν γίνει αντιληπτό ότι αυτό είναι το μόνο μέσο που ικανοποιεί ευλόγως όλες τις παραπάνω απαιτήσεις, αν και, φυσικά, έχει τους περιορισμούς του.

2.4.4 Βασικές αρχές θεωρίας ταλαντώσεων

Ταλάντωση λέγεται κάθε περιοδική κίνηση ενός σώματος κατά την οποία το σώμα κινείται παλινδρομικά μεταξύ δύο ακραίων θέσεων (π.χ. εκκρεμές, σώμα κρεμασμένο από ελατήριο). Μεταξύ των δύο αυτών ακραίων θέσεων υπάρχει μια θέση στην οποία αν σταματήσουμε το σώμα, αυτό θα ακινητοποιηθεί μόνιμα. Η θέση αυτή

λέγεται θέση ισορροπίας του ταλαντωτή και στη θέση αυτή η συνισταμένη των δυνάμεων θα είναι ίση με μηδέν. Μία ταλάντωση χαρακτηρίζεται ως γραμμική όταν η κίνηση του ταλαντωτή είναι ευθύγραμμη (π.χ. ένα σώμα στην ελεύθερη άκρη ενός ελατηρίου).

Ένα σώμα λέγεται ότι δονείται όταν περιγράφει μια ταλαντευόμενη κίνηση γύρω από μια θέση αναφοράς. Η κίνηση μπορεί να συνίσταται από ένα μόνο εξάρτημα που συμβαίνει σε μία μόνο συχνότητα, όπως με ένα πιρούνι συντονισμού, ή μερικά συστατικά που συμβαίνουν σε διαφορετικές συχνότητες ταυτόχρονα, όπως για παράδειγμα με την κίνηση εμβόλου μίας μηχανής εσωτερικής καύσης. Τα σήματα των κραδασμών στην πράξη συνήθως αποτελούνται από πολλές συχνότητες που συμβαίνουν ταυτόχρονα, έτσι ώστε να μην μπορούμε να δούμε αμέσως μόνο με την εξέταση του προτύπου πλάτους-χρόνου, πόσες συνιστώσες υπάρχουν και σε ποιες συχνότητες συμβαίνουν. Αυτά τα στοιχεία μπορούν να αποκαλυφθούν με σχεδίαση πλάτους κραδασμών έναντι συχνότητας.

Η διάσπαση των σημάτων δόνησης σε μεμονωμένα στοιχεία συχνότητας ονομάζεται ανάλυση συχνότητας, μια τεχνική που μπορεί να θεωρηθεί ο ακρογωνιαίος λίθος των διαγνωστικών μετρήσεων των κραδασμών. Το γράφημα που δείχνει το επίπεδο κραδασμών ως συνάρτηση της συχνότητας ονομάζεται φασματογράφημα συχνότητας. Όταν αναλύονται συχνότητες των κραδασμών του μηχανήματος, βρίσκουμε κανονικά έναν αριθμό προεξεχόντων συστατικών περιοδικής συχνότητας τα οποία σχετίζονται άμεσα με τις θεμελιώδεις κινήσεις διαφόρων τμημάτων της μηχανής. Με την ανάλυση συχνότητας μπορούμε επομένως να εντοπίσουμε την πηγή των ανεπιθύμητων κραδασμών. [6]

Τα σημαντικότερα μεγέθη που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή μίας ταλάντωσης είναι :

- Συχνότητα

Συχνότητα (f) ενός περιοδικού φαινομένου είναι το πηλίκο του αριθμού N των επαναλήψεων του φαινομένου σε ορισμένο χρόνο t , προς το χρόνο t . Δηλαδή:

$$f = \frac{N}{t} \quad (\text{Σχ. 2.12})$$

και μονάδα μέτρησης της συχνότητας είναι τα 1 Hz ή 1 s⁻¹.

- Περίοδος

Περίοδος (T) ενός περιοδικού φαινομένου είναι ο χρόνος που απαιτείται για μια πλήρη επανάληψη του φαινομένου. Αν σε χρόνο t γίνονται N επαναλήψεις του φαινομένου, τότε η περίοδος είναι ίση με το πηλίκο :

$$T = \frac{t}{N} \quad (\text{Σχ. 2.13})$$

και μονάδα μέτρησης της περιόδου είναι το 1 sec. Από τον ορισμό τους, τα μεγέθη της συχνότητας και της περιόδου είναι αντίστροφα και συνδέονται με τη σχέση :

$$f = \frac{1}{T} \quad (\text{Σχ. 2.14})$$

- Γωνιακή συχνότητα

Η γωνιακή (ή κυκλική) συχνότητα (ω) είναι ένα μέγεθος που αναφέρεται σε όλα τα περιοδικά φαινόμενα και δίνεται από την σχέση :

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad (\text{Σχ. 2.15})$$

Η γωνιακή συχνότητα είναι ίση με το μέτρο της γωνιακής ταχύτητας στην ομαλή κυκλική κίνηση και εκφράζει τον αριθμό των επαναλήψεων ενός φαινομένου σε χρόνο 2π sec. Μονάδα μέτρησης της συχνότητας είναι το 1 rad/sec.

- Απομάκρυνση

Απομάκρυνση (x) ονομάζουμε την αλγεβρική τιμή της μετατόπισης του σώματος από τη θέση ισορροπίας του.

- Πλάτος

Πλάτος (A) ονομάζουμε τη μέγιστη τιμή της απομάκρυνσης του σώματος.

Τόσο κατά τον αναλυτικό, όσο και κατά τον πειραματικό προσδιορισμό της απόκρισης δυναμικών συστημάτων, είναι συχνά χρήσιμη η εφαρμογή κατάλληλων ολοκληρωτικών μετασχηματισμών. Οι μετασχηματισμοί αυτοί έχουν τη γενική μορφή:

$$F(\omega) = \int_a^b f(\omega) \cdot w(\omega, t) dt \quad (\text{Σχ. 2.16})$$

και με δεδομένη την συνάρτηση f(t) προσδιορίζουν μία νέα συνάρτηση F(ω). Τέτοιοι μετασχηματισμοί είναι χρήσιμοι στην επίλυση μαθηματικών προβλημάτων που περιγράφονται από γραμμικές διαφορικές εξισώσεις με σταθερούς συντελεστές.

Συγκεκριμένα, η εφαρμογή τέτοιων μετασχηματισμών σε μερικές διαφορικές εξισώσεις μειώνει κατά μία τις ανεξάρτητες μεταβλητές του προβλήματος. Παρόμοια, μετατρέπει την επίλυση προβλημάτων που περιγράφονται με κανονικές διαφορικές εξισώσεις σε επίλυση αλγεβρικών εξισώσεων. Μεταξύ όλων των ολοκληρωτικών μετασχηματισμών κεντρικό ρόλο στη θεωρία των ταλαντώσεων κατέχει ο μετασχηματισμός Fourier, ο οποίος ορίζεται από τη σχέση :

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot e^{-i\omega t} dt \quad (\text{Σχ. 2.17})$$

Επειδή ο αναλυτικός υπολογισμός του μετασχηματισμού Fourier μιας συνάρτησης είναι συχνά δύσκολος, χρησιμοποιούμε αριθμητικές μεθόδους. Αρκετά χρήσιμο εργαλείο είναι ο διακριτός μετασχηματισμός Fourier, όπου η τιμή της εξεταζόμενης συνάρτησης, έστω $f(t)$, υπολογίζεται σε ένα πεπερασμένο αριθμό τιμών N , με χρονικό διάστημα Δt . Έτσι αν οριστεί ο χρόνος t_m :

$$t_r = r \cdot \Delta t \quad , \quad 0 \leq r \leq (N \cdot \Delta t) \quad (\text{Σχ. 2.18})$$

η αντίστοιχη τιμή της συνάρτησης συμβολίζεται με :

$$f_r = f(t_r) \quad (\text{Σχ. 2.19})$$

Η συνολική διάρκεια της μέτρησης είναι :

$$T = N \cdot \Delta t \quad (\text{Σχ. 2.20})$$

Αν οριστεί η συχνότητα :

$$\Omega = \frac{2\pi}{T} \quad (\text{Σχ. 2.21})$$

Τότε ο ορισμός οδηγεί στην προσεγγιστική σχέση :

$$F_n = \Delta t \cdot \sum_{r=1}^N f_r \cdot e^{-\frac{2\pi i r n}{N}} \quad (\text{Σχ. 2.22})$$

Οι παραπάνω μετασχηματισμοί εκτελούνται με τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή και κατάλληλων λογισμικών.

Κεφάλαιο 3 Μεθοδολογία Πειράματος

3.1 Εργαστηριακή διάταξη

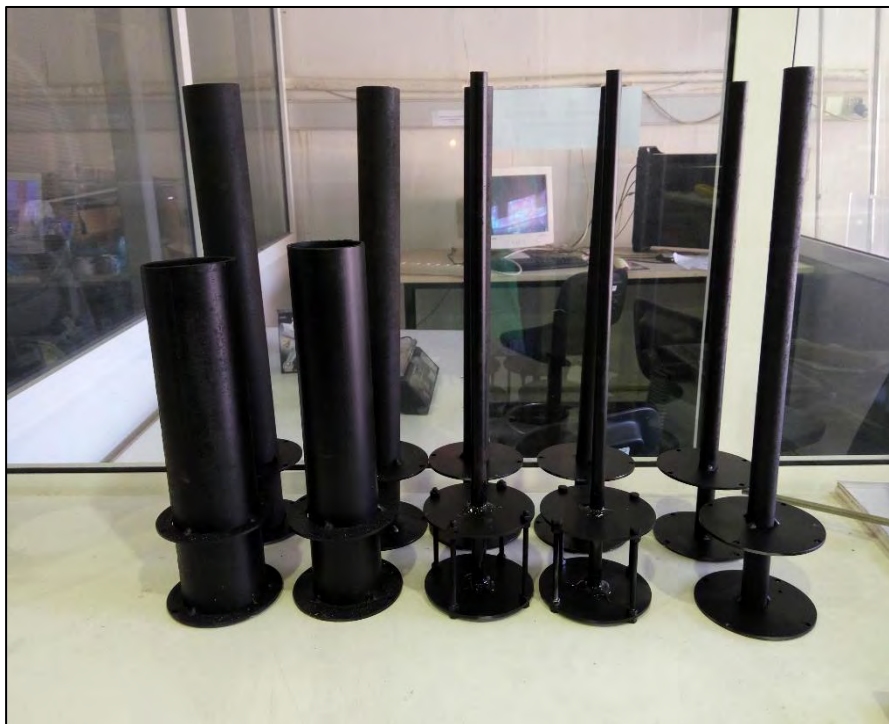
Αρχικά, έπρεπε να επιλεγθεί, να στηθεί και να τροποποιηθεί, όπου χρειαζόταν, ο πειραματικός εξοπλισμός που ήταν απαραίτητος για την διεξαγωγή του πειράματος. Ο φυγοκεντρικός συμπιεστής που επιλέχθηκε για μελέτη είναι ο SIEMENS AG D-97615 Bad Neustadt (Εικόνα 3.1). Αυτός τοποθετήθηκε σε μία σταθερή επιφάνεια του εργαστηρίου και εδραζόταν στις τέσσερις εργοστασιακές βάσεις του, οι οποίες επαρκούσαν για την καλή έδρασή του στην επιφάνεια χωρίς να απαιτούν επιπλέον στερέωμα στην επιφάνεια κατά την λειτουργία.



Εικόνα 3.1 : Φυγοκεντρικός συμπιεστής SIEMENS AG D-97615 Bad Neustadt.

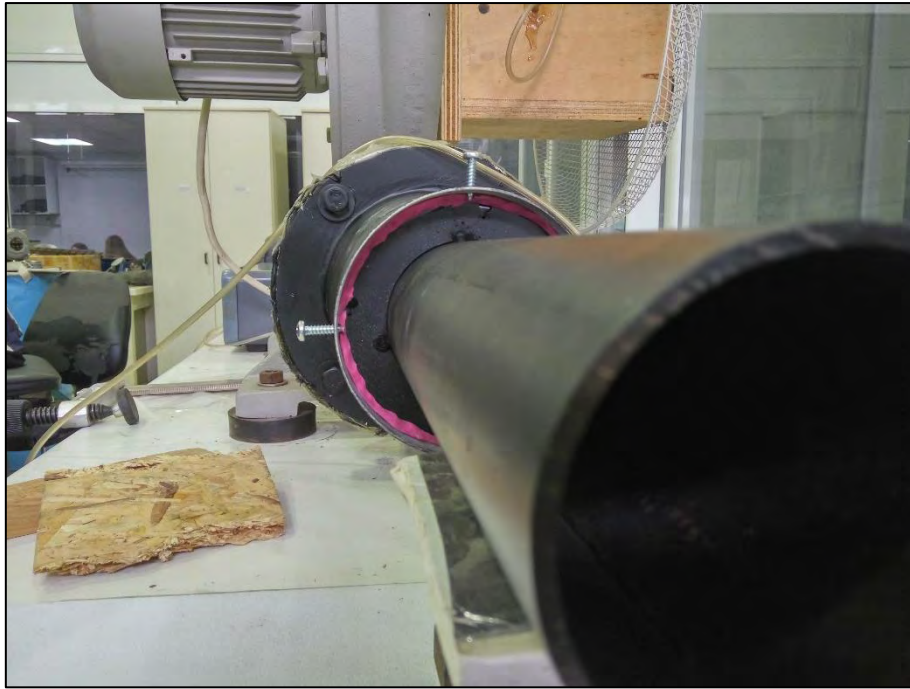
Κατά την μελέτη του συμπιεστή έπρεπε να αλλάζει η παροχή του αέρα στην έξοδό του και για τον λόγο αυτό έπρεπε η διατομή εξόδου να μπορεί να μεταβάλλεται. Έτσι, στο χώρο του μηχανουργείου του Πανεπιστημίου κατασκευάστηκαν 10

ακροφύσια (Εικόνα 3.2) διαφορετικής διαμέτρου, τα οποία τοποθετούμενα στην έξοδο του συμπιεστή θα πετύχαιναν την μεταβολή της διατομής του.



Εικόνα 3.2 : Τα 10 ακροφύσια για την αλλαγή της διατομής εξόδου του συμπιεστή.

Επειδή τα ακροφύσια είναι 10 δεν υπήρχε η δυνατότητα μόνιμης τοποθέτησης τους στην έξοδο του συμπιεστή. Γι' αυτό το λόγο θα πρέπει να υπάρχει η δυνατότητα εύκολης αντικατάστασης και προσαρμογής καθενός εξ αυτών, όποτε απο το πείραμα απαιτούνταν. Κατά την εφαρμογή τους έπρεπε να εξασφαλιστούν τόσο η ασφαλής στερέωσή τους, ώστε να μην πεταχτούν προς τα έξω κατά τη λειτουργία του συμπιεστή, όσο και η στεγανότητα τους ώστε να μην υπάρχει ροή και συνεπώς απώλειες πίεσης και αέρα οπουδήποτε αλλού πλην της περιοχής της εξόδου του ακροφυσίου. Η ασφαλής στερέωση επιτεύχθηκε με το άνοιγμα τεσσάρων διαμπερών οπών περιμετρικά της εξόδου του συμπιεστή και την προσθήκη τεσσάρων βιδών εντός αυτών. Με τον τρόπο αυτό θα συγκρατούνταν η βάση του ακροφυσίου σε περίπτωση που θα πήγαινε να εκτοξευθεί προς τα έξω. Η στεγανότητα επιτεύχθηκε με ηλεκτρολογική ταινία περιμετρικά της βάσης του ακροφυσίου και πλαστελίνη (Εικόνα 3.3).



Εικόνα 3.3 : Ο τρόπος με τον οποίο εξασφαλίστηκε η ασφάλεια και η στεγανότητα των ακροφυσίων κατά την τοποθέτηση.

3.2. Μεθοδολογία διεξαγωγής πειράματος και όργανα μετρήσεως

Η μελέτη του φυγοκεντρικού συμπιεστή έγινε για τη ρευστομηχανική του συμπεριφορά αλλά και για τη δυναμική του συμπεριφορά κατά τη λειτουργία του. Η μελέτη αυτή απαιτήσε διαφόρων ειδών όργανα τα οποία θα περιγραφούν παρακάτω ανάλογα με το είδος μέτρησης που έκανε το καθένα. Κατά την περιγραφή του οργάνου θα εξηγείται και ο τρόπος χρησιμοποίησής του κατά τη διάρκεια του πειράματος.

3.2.1 Μεταβολή στροφών συμπιεστή

Η μεταβολή των στροφών λειτουργίας του συμπιεστή του πειράματος πραγματοποιήθηκε με την αλλαγή της τροφοδοτούμενης για τη λειτουργία του ηλεκτρικής ισχύος. Αυτό επιτεύχθηκε με την αλλαγή της συχνότητας του ρεύματος



τροφοδοσίας του συμπιεστή με τη χρήση Inverter, και συγκεκριμένα τον Siemens Micromaster420 που φαίνεται και στην εικόνα 3.4.

Εικόνα 3.4 : Ο Inverter Siemens Micromaster420 που χρησιμοποιήθηκε.

3.2.2 Μέτρηση διαφορικής πίεσης

Για την μέτρηση της διαφορικής πίεσης του συμπιεστή χρησιμοποιήθηκε η συσκευή FCO510 Micromanometer (Εικόνα 3.5) η οποία αποτελεί ένα όργανο μέτρησης ακρίβειας με μικροεπεξεργαστή για διαφορικές πιέσεις εξαιρετικά χαμηλού εύρους. Η συσκευή αυτή διαθέτει δύο εισόδους μέτρησης πίεσης στις οποίες προσαρμόστηκαν οι άκρες από δύο πλαστικά σωληνάκια των οποίων η άλλη άκρη ήταν στην είσοδο του συμπιεστή (για το -) και στην έξοδο του συμπιεστή (για το +). Με αυτό το τρόπο ήταν δυνατή η μέτρηση της διαφοράς πίεσης μεταξύ εισόδου και εξόδου του συμπιεστή κατά τη λειτουργία του.



Εικόνα 3.5 : Η συσκευή FCO510 Micromanometer για τη μέτρηση της διαφορικής πίεσης.

Χαρακτηριστικά FCO510 Micromanometer [3.2.1]:

- Ακρίβεια : 0,25% για >10% της κλίμακας, ± 1 ψηφίο για <10%
- Θερμοκρασία λειτουργίας : 0 °C έως 45 °C
- Κύρια παροχή : 90 με 250 VAC 50 – 60 Hz
- DC παροχή : 12 VDC min 350 mA
- Έξοδος (DC) : 18 VDC 25 mA για 4 έως 20 αισθητήρες
- D. P. : 0,01 έως 9999,99 Pa
- Εύρος θερμοκρασίας : -100 °C έως 800 °C
- Μέσος χρόνος απεικόνισης : 0,3 έως 20 sec
- Βάρος : 6 kg

3.2.3 Μέτρηση παροχής και ταχύτητας εξόδου του συμπιεστή

Στην έξοδο του συμπιεστή και των ακροφυσίων η ροή δεν έχει προλάβει να γίνει στρωτή και το προφίλ ταχυτήτων δεν είναι αυτό μια στρωτής ροής αλλά μίας τυρβώδους. Σε κάθε ακροφύσιο έγινε μέτρηση της ταχύτητας εξόδου, ανά καθορισμένα σημεία, κατά μήκος της διαμέτρου της διατομής, ώστε να μπορέσουν αργότερα να σχεδιαστούν τα προφίλ των ταχυτήτων και να βρεθεί η παροχή και η μέση ταχύτητα.

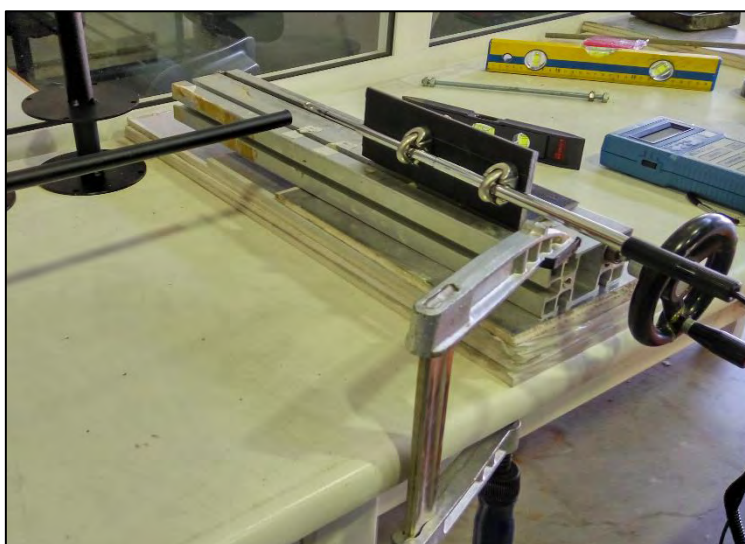


Η μέτρηση της ταχύτητας έγινε με το ανεμόμετρο TSI VelociCalc 8350 (Εικόνα 3.6). Για την μετακίνηση κατά μήκος της διαμέτρου του ακροφυσίου χρησιμοποιήθηκε η διάταξη της Εικόνας 3.7 στην οποία κάθε περιστροφή της λαβής του ατέρμονα κοχλίου αντιστοιχούσε 1mm μετατόπιση κατά μήκος της διαμέτρου.

Εικόνα 3.6 : TSI VelociCalc 8350

Χαρακτηριστικά TSI VelociCalc 8350 [3.2.2]:

- Θερμοκρασία λειτουργίας : 5 °C έως 52 °C το όργανο, -32 °C έως 93 °C ο καθετήρας
- Εύρος ταχυτήτων : 0,08 έως 50 m/s
- Ακρίβεια μέτρησης ταχύτητας : 2,5 % της απεικόνισης
- Εύρος μέτρησης θερμοκρασίας : -17,8 °C έως 93,3 °C
- Ακρίβεια μέτρησης θερμοκρασίας : $\pm 0,28$ °C
- AC παροχή : 6Vdc, 0,3A
- Βάρος : 0,5 kg



Εικόνα 3.7 : Η διάταξη για κίνηση του ανεμόμετρου κατά μήκος της διαμέτρου του ακροφυσίου.

3.2.4 Μέτρηση θορύβου λειτουργίας

Κατά τη λειτουργία του συμπιεστή έγινε η μέτρηση του θορύβου στην είσοδο του συμπιεστή και στην έξοδο του ακροφυσίου. Στην έξοδο του ακροφυσίου η μέτρηση έγινε σε απόσταση ίση με τέσσερις διαμέτρους κατά τη φορά της ροής εξόδου και ίση

με δύο διαμέτρους κάθετα στη ροή. Για τη μέτρηση χρησιμοποιήθηκε η συσκευή Lutron sl-4011 (Εικόνα 3.8) της οποίας τα χαρακτηριστικά περιγράφονται παρακάτω.

Χαρακτηριστικά Lutron sl-4011 [3.2.3B]:

- Θερμοκρασία λειτουργίας : 0 °C έως 50 °C
- Εύρος μετρήσεων: 3 εύρη, 30 έως 130 dB
- Ακρίβεια μέτρησης (23 ± 5 °C) : 31.5 Hz - ± 3 dB, 63 Hz - ± 2 dB, 125 Hz - \pm



1.5 dB, 250 Hz - ± 1.5 dB, 500 Hz - ± 1.5 dB, 1 kHz - ± 1.5 dB, 2 kHz - ± 2 dB, 4 kHz - ± 3 dB, 8 kHz - ± 5 dB

- Ευαισθησία ανάλυσης : -0.1 dB
- Συχνότητες : 31.5 Hz to 8,000 Hz
- DC παροχή : μπαταρία 9V (heavy duty type)
- Βάρος : 0,28 kg

Εικόνα 3.8 : Ηχόμετρο Lutron sl-4011.

3.2.5 Μέτρηση τυρβώδους ροής

Όπως ήδη αναφέρθηκε, στην παράγραφο μέτρησης των ταχυτήτων, κατά την έξοδο του ρευστού από το ακροφύσιο η ροή δεν έχει προλάβει να γίνει στρωτή. Πρόκειται για τυρβώδη ροή της οποίας την ένταση θέλουμε να μελετήσουμε και να την καταγράψουμε. Οι μετρήσεις αυτές έγιναν με την βοήθεια του συστήματος θερμικής αναιμετρίας AN-1005 Anemometry System της Lab Systems L.T.D. (Εικόνα 3.9). Το AN-1005 είναι ένα φορητό συμπαγές σύστημα θερμικής αναιμετρίας (ανεμόμετρο Hot-Wire και ανεμόμετρο Hot-Film), με βάση τα κανάλια του συστήματος AN-1003 Hot Wire Anemometry. Τα κανάλια ανεμομέτρου Hot-Wire μπορούν να λειτουργούν σε

λειτουργία CTA (σταθερής θερμοκρασίας ανεμόμετρο) καθώς και CCA (σταθερού ρεύματος ανεμόμετρο). Το σύστημα διαθέτει ενσωματωμένο μικροεπεξεργαστή με δυνατότητες παράλληλης επικοινωνίας και απόκτησης δεδομένων [2.2.4B]. Περισσότερα χαρακτηριστικά αναγράφονται παρακάτω :

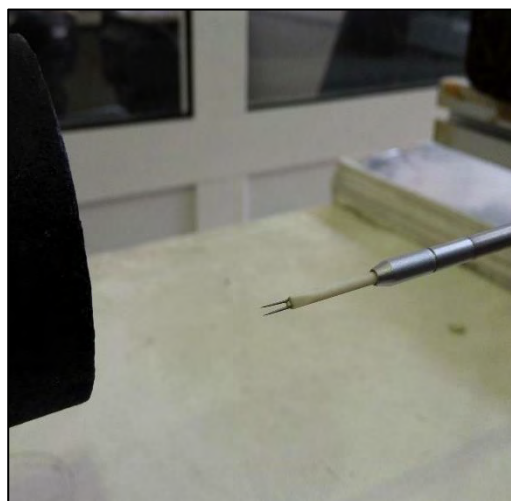
Χαρακτηριστικά AN-1005 Anemometry System :



- Ακρίβεια : 0,1%
- Συχνότητες παραγωγής σήματος : 0,5-20KHz
- Sampling Rate : 800 kHz
- Low-Pass Filter: Triple pole Butterworth Type
- Data transfer rate: up to 700 Kbps

Εικόνα 3.9 : Σύστημα θερμικής αναιμετρίας AN-1005.

Στη συσκευή AN-1005 στη θέση της Bridge 1 συνδεόταν το Hot-Wire, της Dantec Dynamics με κωδικό 55 p11 (Εικόνα 3.10), με το οποίο πάρθηκαν μετρήσεις στη θέση που είχε τοποθετηθεί και το ηχώμετρο για τη μέτρηση του θορύβου, αλλά και στο κέντρο της ροής κατά την έξοδο της από το συμπιεστή. Το σήμα εξόδου από τις μετρήσεις ενισχυόταν στον ενισχυτή σήματος KISTLER 5134 (Εικόνα 3.11) και στη συνέχεια μεταφερόταν στον ψηφιακό παλμογράφο LEADER LBO-523 (Εικόνα 3.12).



Εικόνα 3.10 : Hot-Wire

Από εκεί η έξοδος του ψηφιακού παλμογράφου συνδεόταν με τον μετατροπέα αναλογικού σε ψηφιακό σήμα της NATIONAL INSTRUMENTS (Εικόνα 3.13). ώστε να ψηφιοποιηθεί και να εισαχθεί

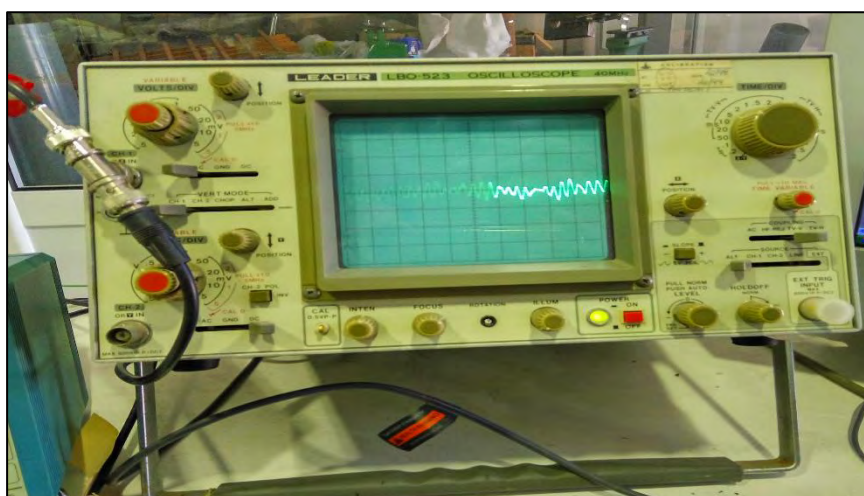
στον υπολογιστή του εργαστηρίου στο λογισμικό LabView της NATIONAL INSTRUMENTS για να αναλυθεί και να αποθηκευτεί για μετέπειτα επεξεργασία.



Χαρακτηριστικά του ενισχυτή σήματος KISTLER 5134 :

- Ρεύμα διέγερσης αισθητήρα : 0-15 mA
- Διέγερση αισθητήρα : 24 VDC
- Απόκριση συχνότητας : 0,1 -68000 \pm 5% Hz
- Έξοδος : \pm 5 / \pm 10 V
- Τροφοδοσία : 115/230 VAC
- Ενίσχυση σήματος (Gain) : 0,5 -150
- Θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας : 0-50 °C
- Βάρος : 1,8 kg

Εικόνα 3.11 : Ενισχυτής σήματος KISTLER 5134.



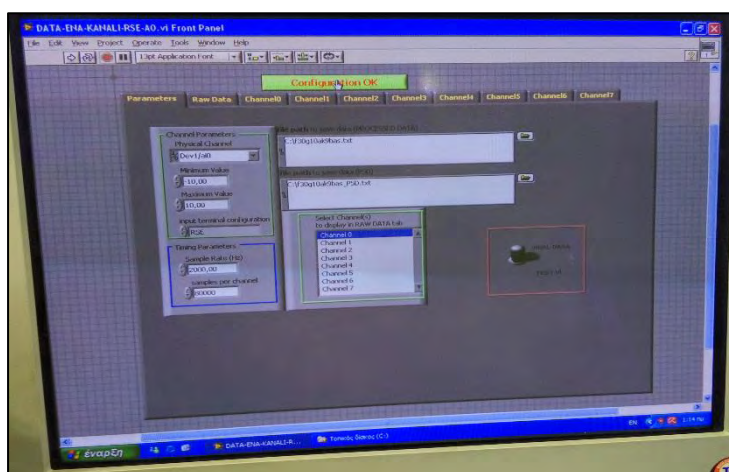
Εικόνα 3.12 : Ψηφιακό παλμογράφος LEADER LBO-523.

Παρακάτω, απεικονίζεται ο ψηφιακός μετατροπέας αναλογικού σήματος χάρη του οποίου ήταν δυνατή η εισαγωγή των μετρήσεων σε λογισμικό για περαιτέρω ανάλυση, μελέτη και επεξεργασία των σημάτων. Στο λογισμικό LabView επιλέγουμε



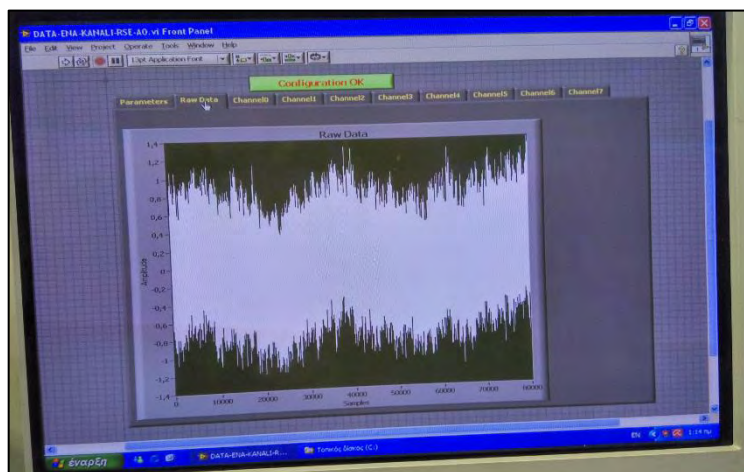
στην αρχική οθόνη 'Parameters' (Εικόνα 3.14) την συχνότητα δειγματοληψίας μετρήσεων (Sampling Rate – Hz), το πλήθος των μετρήσεων (Samples) και δίνουμε διεύθυνση αποθήκευσης του αρχείου, καθώς και όνομα σ' αυτό. Αφού όλα είναι έτοιμα επιλέγεται το 'Run' και το 'Configuration Ok' και η δειγματοληψία ξεκινά.

Εικόνα 3.13 : Ψηφιακός μετατροπέας της NATIONAL INSTRUMENTS.



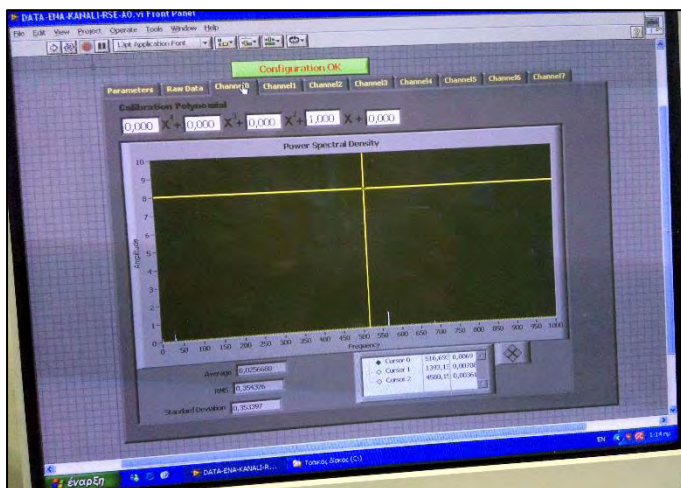
Εικόνα 3.14 : Αρχική οθόνη 'Parameters' του LabView.

Εικόνα 3.15 : Δεύτερη οθόνη 'Raw Data' του LabView.



Στο πείραμα αυτό επιλέχθηκε ρυθμός δειγματοληψίας 2.000 Hz και δείγμα 200.000 μετρήσεων. Όταν τελειώσει η δειγματοληψία, πάμε στη δεύτερη οθόνη 'Raw Data' (Εικόνα 3.15) όπου φαίνεται διαγραμματικά το πλάτος κάθε μέτρησης που έγινε.

Και τέλος, στη τρίτη οθόνη 'Channel 0' (Εικόνα 3.16) αναγράφονται η μέση τιμή των μετρήσεων και η τυπική απόκλιση. Ακόμη παρέχεται η δυνατότητα επεξεργασίας του εισερχόμενου σήματος με πολυώνυμο που φαίνεται στην πρώτη σειρά. Εδώ επιλέχθηκε η αποθήκευση του σήματος των μετρήσεων χωρίς κάποια επεξεργασία με το πολυώνυμο για αποφυγή σφάλματος. Έτσι η επεξεργασία για



εξαγωγή αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε εκ των υστέρων σε άλλο λογισμικό που θα αναλυθεί στη συνέχεια.

Εικόνα 3.16 : Τρίτη οθόνη 'Channel 0' του LabView.

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων γίνεται με το λογισμικό Origin Pro 9.0, όπου εισάγονται όλες οι δειγματοληψίες από κάθε μέτρηση και μέσω αυτού βρίσκεται η σωστή μέση τιμή και τυπική απόκλιση για κάθε μέτρηση. Το λογισμικό αυτό παρέχει τη δυνατότητα μετασχηματισμού Fourier (FFT) μέσω του οποίου γίνεται η ανάλυση των συχνοτήτων και των μέτρων αυτών.

Επειδή η έξοδος του Hot-Wire είναι Volts και εμείς θέλουμε να μετρήσουμε ταχύτητα, θα πρέπει πρώτα να γίνει μία βαθμονόμηση ώστε στη συνέχεια να μπορούν να αντιστοιχούνται τα αποτελέσματα των μετρήσεων σε αληθινές ταχύτητες. Για την βαθμονόμηση τοποθετήθηκε το Hot Wire, αρχικά, σε θέσεις των οποίων η ταχύτητα ήταν ήδη γνωστή από τις μετρήσεις με το ανεμόμετρο. Παρατηρήθηκε ότι δεν ίσχυε ο νόμος του King από την ανεμομετρία, ο οποίος είναι :

$$V^2 = A + B \cdot U^n \quad (\Sigma\chi. 3.1)$$

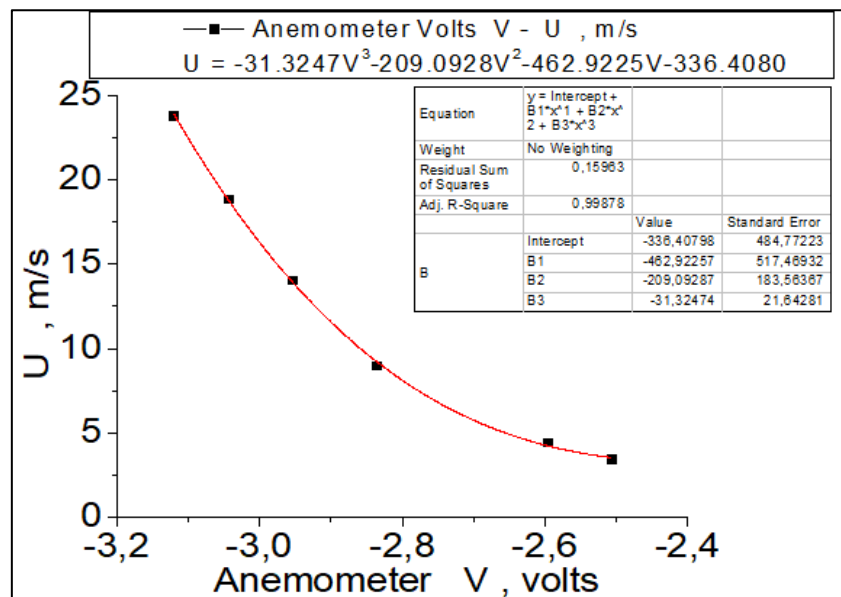
όπου, V : Volts

U : ταχύτητες

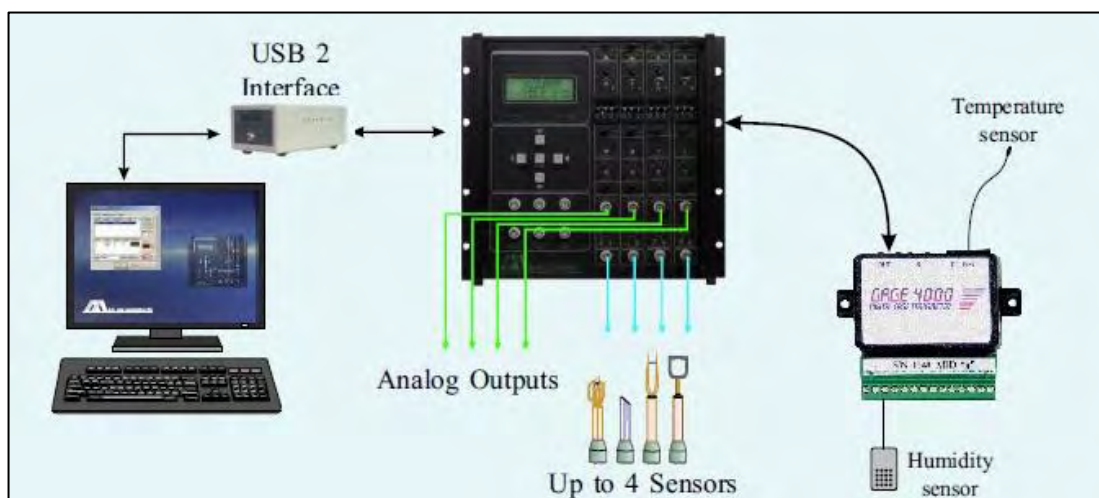
A, B : προσδιοριστέες σταθερές

n : ένας εκθέτης της τάξεως του 0,45

Για τον λόγο αυτό δημιουργήθηκε ένα διάγραμμα στην οριζόντια στήλη του οποίου ήταν τα μετρούμενα κάθε θέσης Volts, και στην κάθετη στήλη τα μέτρα των, ήδη γνωστών για τις θέσεις αυτές, ταχυτήτων. Στη συνέχεια, επιλέχθηκε από το λογισμικό OriginPro 9 η εύρεση συνάρτησης καμπύλης τρίτου βαθμού η οποία θα περνούσε από τα σημεία του διαγράμματος. Το λογισμικό έδωσε μία συνάρτηση (Διάγραμμα 3.1) της οποίας η καμπύλη κάλυπτε τα σημεία κατά 99,88%, συνεπώς θεωρήθηκε αποδεκτή. Με βάση αυτή τη συνάρτηση έγιναν οι μετατροπές των Volts του Hot Wire σε αληθινές ταχύτητες.



Διάγραμμα 3.1 : Εύρεση συνάρτησης για βαθμονόμηση του Hot Wire.

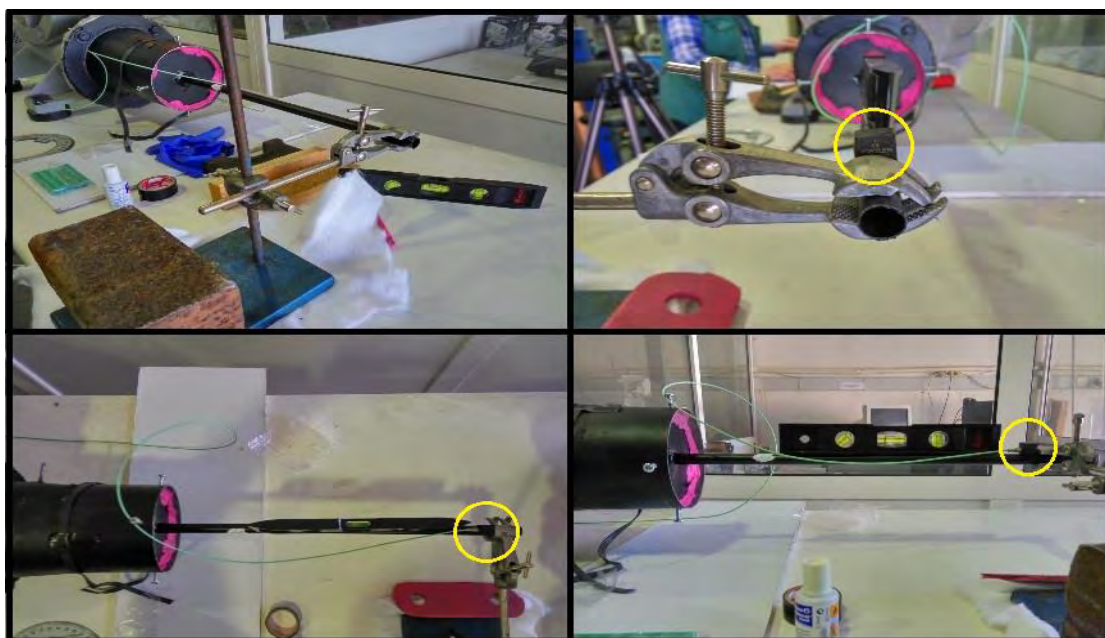


Εικόνα 3.17 : Συνδεσμολογία για ψηφιοποίηση της μέτρησης με Hot-Wire.

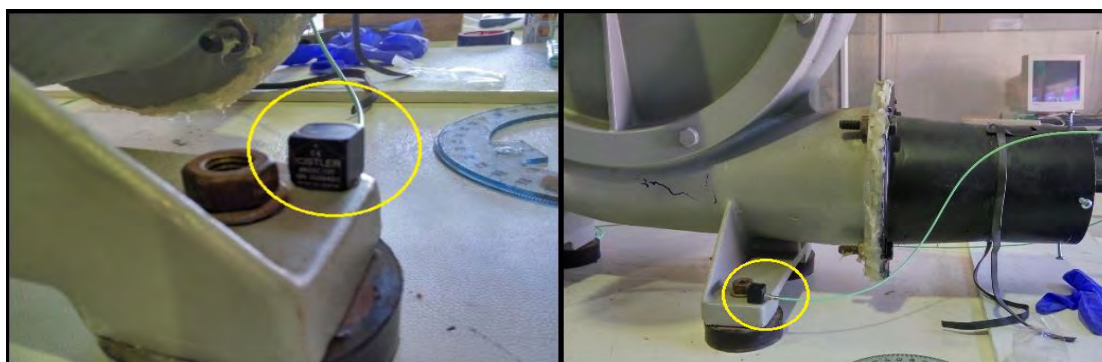
3.2.6 Μέτρηση δονήσεων κατά τη λειτουργία του συμπιεστή

Η μέτρηση των δονήσεων κατ'σ τη διάρκεια λειτουργίας του συμπιεστή έγινε σε δύο σημεία. Το ένα είναι το άκρο του εκάστοτε ακροφυσίου το οποίο ήταν αμφίπακτωμένο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.18, εφόσον είχε τοποθετηθεί ακροφύσιο, και το άλλο σημείο είναι η βάση στήριξης του συμπιεστή (Εικόνα 3.19).

Για την καταγραφή των δονήσεων χρησιμοποιήθηκε πιεζοηλεκτρικό επιταχυνσιόμετρο της εταιρίας KISTLER και συγκεκριμένα το 8632C10T (εντός των κίτρινων κύκλων Εικόνες 3.18 και 3.19), τα χαρακτηριστικά του οποίου αναφέρονται παρακάτω.



Εικόνα 3.18 : Αμφίπακτη στήριξη ακροφυσίου για μέτρηση δονήσεων στα ακροφύσια.

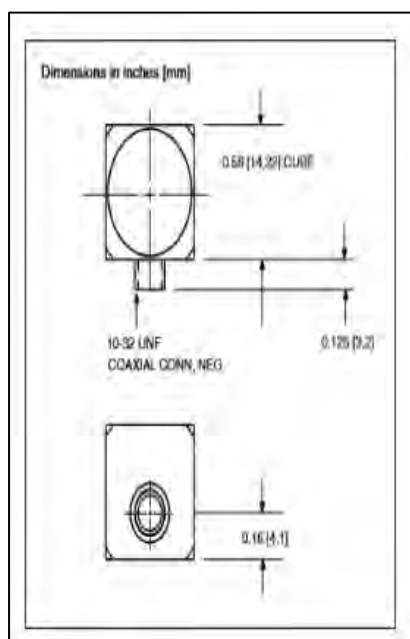


Εικόνα 3.19 : Τοποθέτηση επιταχυνσιόμετρου στη βάση του συμπιεστή.

Χαρακτηριστικά επιταχυνσιόμετρου μιας διεύθυνσης KISTLER 8632C10T :

- Εύρος τιμών : ± 10 g
- Ευαισθησία : $498 \pm 5\%$ mV/g
- Εγκάρσια ευαισθησία (Crosstalk) : $< 1\%$
- Απόκριση συχνότητας : $1-5000$ Hz $\pm 5\%$
- Θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας : $0-65$ °C
- Κατώφλι τιμών (g_{rms}): 0,00028
- Μη γραμμικότητα (FSO): ± 1
- Εσωτερική αντίσταση : < 500 Ω
- Τροφοδοσία : 2-18/20-30 mA / VDC
- Γείωση: Ναι
- Συνδεσμολογία : Καλώδιο τύπου 1631C, διαμέτρου 2mm, κατάλληλο για χρήση σε επιταχυνσιόμετρα υψηλής εσωτερικής αντίστασης
- Υλικό αισθητήρα: Δίμορφο κεραμικό/ καμπτικού τύπου
- Υλικό εξωτερικού καλύμματος: Σκληρά ανοδιωμένο αλουμίνιο
- Μάζα : 6 gr

Το συγκεκριμένο επιταχυνσιόμετρο είναι μίας διεύθυνσης, έτσι τοποθετήθηκε με φορά καταγραφής δονήσεων συμπιεστή κατά διεύθυνση κάθετη της επιφάνειας έδρασης του τόσο στις μετρήσεις της βάσης όσο και των ακροφυσίων. Η διαδικασία είναι ανάλογη



με της παραγράφου 3.2.4, καθώς το αναλογικό σήμα από το επιταχυνσιόμετρο μεταφερόταν στον ενισχυτή σήματος, από εκεί στον ψηφιακό παλμογράφο και μετά μέσω του ψηφιακού μετατροπέα το αναλογικό σήμα μετατρέπεται σε ψηφιακό και καταγράφεται από το λογισμικό LabView που περιγράφηκε προηγουμένως.

Σχήμα 3.1 : Διαστάσεις του επιταχυνσιόμετρου KISTLER 8632C10T.

Για τις μετρήσεις των δονήσεων επιλέχθηκε συχνότητα δειγματοληψίας 2.000 Hz και πλήθος μετρήσεων 80.000. Αυτές στη συνέχεια αποθηκεύτηκαν σε ξεχωριστό αρχείο μορφής .txt για την κάθε περίπτωση μελέτης και αναλύθηκαν με το πρόγραμμα OriginPro 9. Κατά την ανάλυσή τους μετατράπηκαν τα mV που καταγράφηκαν σε επιτάχυνση g (m/s^2), με την σχέση mV-g που δίνεται από τον κατασκευαστή του επιταχυνσιόμετρου, και βρέθηκε η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση της επιτάχυνσης της δόνησης κατά τη λειτουργία του συμπιεστή σε ακροφύσιο και βάση και για τα δέκα ακροφύσια. Ακόμη, μελετήθηκε και η περίπτωση χωρίς ακροφύσιο, αλλά και μπλοκαρισμένης εξόδου συμπιεστή.

Στη συνέχεια έγινε μετασχηματισμός Fourier και τα σχετικά διαγράμματα f (Hz) – Amplitude (m/s^2), όπου φαίνονται πλέον χαρακτηριστικά οι κύριες ταλαντώσεις που επικρατούν κατά τη λειτουργία του συμπιεστή, σε κάθε περίπτωση. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης εξετάζονται στο Κεφάλαιο 7.

3.2.7 Μέτρηση στροφών συμπιεστή

Ο συμπιεστής άλλαζε τις στροφές λειτουργίας του αλλάζοντας την συχνότητα του Inverter, και ενώ η συχνότητα του Inverter ήταν γνωστή κάθε φορά, οι στροφές λειτουργίας ήταν άγνωστες. Γι' αυτό το λόγο έγινε συσχετισμός της συχνότητας του Inverter με τις στροφές του συμπιεστή με δύο τρόπους.



Εικόνα 3.20 : Βιντεοκάμερα υψηλής ακρίβειας Sony 50 fps.

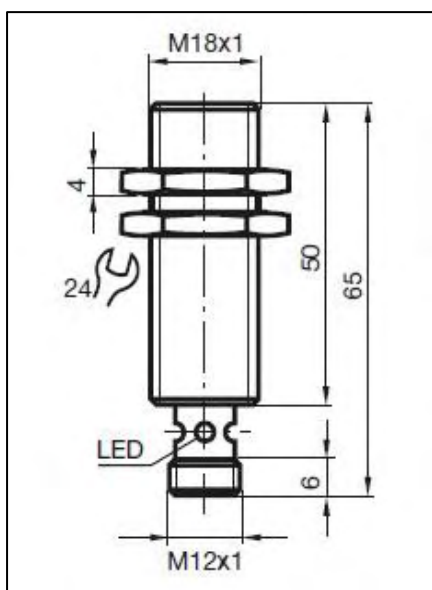
Στη πρώτη περίπτωση έγινε μέτρηση των στροφών του συμπιεστή με οπτικό τρόπο. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε βιντεοκάμερα υψηλής ανάλυσης της εταιρίας Sony με ταχύτητα καταγραφής 50 fps (Εικόνα 3.20). Στη συνέχεια, αναλύθηκε το βίντεο, που καταγράφηκε για κάθε συχνότητα, με το πρόγραμμα FreeStudio (www.dvdvideosoft.com) σε frames, όπου και βρέθηκαν οι στροφές του συμπιεστή για κάθε συχνότητα του Inverter..

Ο δεύτερος τρόπος εύρεσης στροφών του συμπιεστή πραγματοποιήθηκε με τη χρήση επαγωγικού αισθητήρα της εταιρίας PEPPERL & FUCHS με κωδικό NBB5-18GM50-E0. Για το συγκεκριμένο τρόπο μέτρησης αφαιρέθηκε το κάλυμμα του συμπιεστή που βρίσκεται ο ανεμιστήρας ψύξης και στερεώσαμε μια μικρή και ελαφριά μεταλλική πλάκα κατά τη διεύθυνση της ακτίνας του ανεμιστήρα. Στη συνέχεια, σε πολύ κοντινή απόσταση από την πλάκα αυτή (<3 mm) στερεώθηκε ο επαγωγικός αισθητήρας ο οποίος κάθε φορά που διερχόταν η μεταλλική πλάκα άλλαζε χαρακτηριστικά την τάση εξόδου του από 2,04 Volts σε 0,42 Volts, ενώ και μία κίτρινη φωτεινή ένδειξη του αισθητήρα υποδήλωνε αυτή την αλλαγή της κατάστασης. Η διάταξη φαίνεται στην Εικόνα 3.21.



Εικόνα 3.21 : Διάταξη μέτρησης στροφών με χρήση επαγωγικού αισθητήρα.

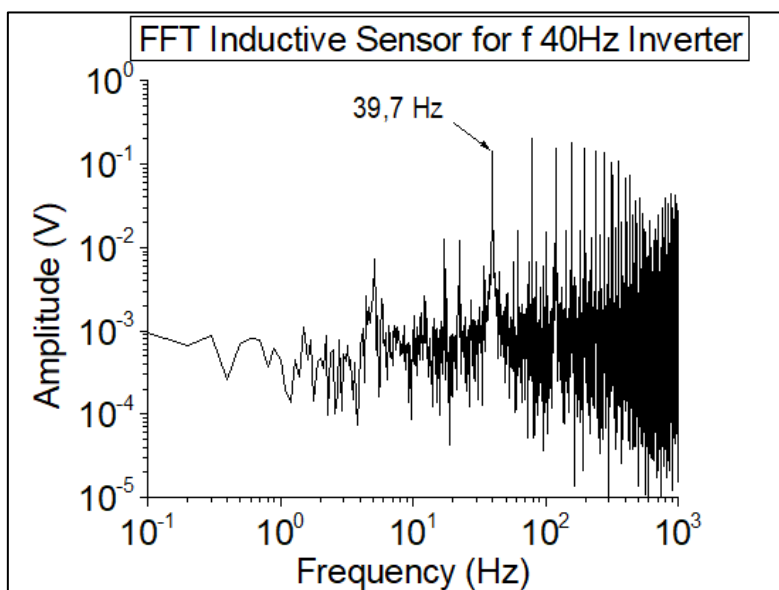
Χαρακτηριστικά επαγωγικού αισθητήρα PEPPERL & FUCHS NBB5-18GM50-E0 [3.2.6]:



- Απόσταση λειτουργίας : 5 mm
- Πτώση τάσης : <3 V
- Τάση λειτουργίας : 10...30 V
- Ρεύμα λειτουργίας : 0...200 mA
- Ένδειξη αλλαγής κατάστασης : κίτρινο LED
- Θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας : -25 - 70 °C
- Βαθμός προστασίας : IP67

Σχήμα 3.2 : Διαστάσεις επαγωγικού αισθητήρα PEPPERL & FUCHS NBB5-18GM50-E0 σε mm.

Ο αισθητήρας συνδέθηκε με τον τρόπο των παραγράφων 3.2.5 και 3.2.6 με το πρόγραμμα LabView, όπου και αποθηκεύτηκαν οι μετρήσεις και στη συνέχεια με το πρόγραμμα OriginPro9 έγινε μετασχηματισμός Fourier με τον οποίο βρέθηκε η συχνότητα μεταβολής της τάσης του αισθητήρα και συνεπώς η περίοδος μεταβολής και οι στροφές του συμπιεστή (Διάγραμμα 3.2).



Διάγραμμα 3.2 : Μετασχηματισμός Fourier στις μετρήσεις του επαγωγικού αισθητήρα για εύρεση στροφών συμπιεστή.

3.2.7 Μέτρηση ισχύς εισόδου του συμπιεστή



Η μέτρηση ισχύς εισόδου του συμπιεστή έγινε για όλες τις συχνότητες του inverter με τη χρήση Watt meter. Η σύνδεση του γινόταν μεταξύ του δικτύου της Δ.Ε.Η. και του inverter και στην οθόνη απεικόνισής του έδειχνε την τάση, την ένταση του ρεύματος, το συντελεστή ισχύος και την ισχύ που έδινε το δίκτυο στον Inverter.

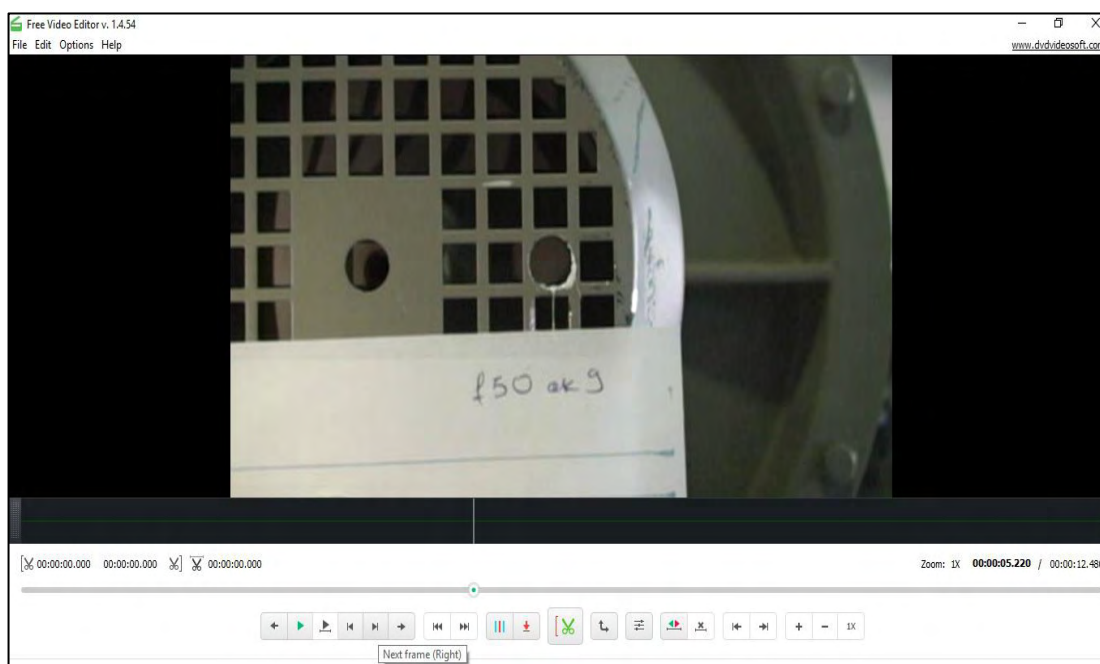
Εικόνα 3.22 : Μία συσκευή μέτρησης κατανάλωσης ηλεκτρικής ισχύος.

Κεφάλαιο 4 Μέτρηση στροφών συμπιεστή

Ο φυγοκεντρικός συμπιεστής του πειράματος αλλάζει τις στροφές του με την μεταβολή της συχνότητας του Inverter, αλλά η σχέση μεταξύ συχνότητας Inverter και στροφών λειτουργίας του συμπιεστή είναι άγνωστη. Συνεπώς, πρέπει να βρεθεί αυτή η σχέση μεταξύ τους, ώστε να γίνουν γνωστές οι στροφές λειτουργίας κατά τις οποίες θα λαμβάνονται τα αποτελέσματα όλων των άλλων μετρήσεων των επόμενων κεφαλαίων.

4.1 Μέτρηση στροφών με οπτικό μέσο

Ο τρόπος με τον οποίο έγινε η μέτρηση των στροφών του συμπιεστή με οπτικό μέσο ήδη έχει περιγραφεί στη παράγραφο 3.2.7. Χρησιμοποιήθηκε βιντεοκάμερα ακριβείας καταγράφοντας σε ανάλυση 50 fps για 3 δευτερόλεπτα τον ανεμιστήρα ψύξης του συμπιεστή που εδράζεται στον ίδιο άξονα με τα πτερύγια του, και συνεπώς έχουν τις ίδιες στροφές. Βάφτηκε μία λευκή τελεία σε ένα απ' τα πτερύγια του ανεμιστήρα ψύξεως ώστε να μετρηθεί πόσες φορές θα περιστραφεί σε χρόνο 3 δευτερολέπτων και κατ' επέκταση σε χρόνο ενός λεπτού (RPM).



Εικόνα 4.1 : Ανάλυση βίντεο καρέ-καρέ στο πρόγραμμα Free Studio v.6.

Το βίντεο αναλύθηκε και εξετάστηκε καρέ – καρέ για να διαπιστωθεί πόσες φορές διήλθε η λευκή τελεία από το σημείο που βιντεοσκοπούνταν σε χρόνο 3 δευτερολέπτων. Κατά την εγγραφή σε αργή κίνηση απευθείας μετέτρεπε η κάμερα τον χρόνο των 3 δευτερολέπτων σε 12 δευτερόλεπτα για αργή κίνηση. Η καταμέτρηση έγινε με το πρόγραμμα Free Studio v.6 (Εικόνα 4.1) και τα αποτελέσματα των μετρήσεων φαίνονται στον Πίνακα 4.1 .

Μέτρηση στροφών συμπιεστή με οπτικό μέσο			
f Inverter (Hz)	Έξοδος συμπιεστή	Φορές περάσματος (Hz)	Στροφές Συμπιεστή (RPM)
50	AK 3	49,33	2960
	AK 9	50	3000
40	AK 3	39,66	2380
	AK 9	40	2400
30	AK 3	30	1800
	AK 9	30	1800
20	AK 3	20	1200
	AK 9	20	1200
10	AK 3	10	600
	AK 9	10	600
50	Open	49	2940
	Blocked	50	3000

Πίνακας 4.1 : Αποτελέσματα μέτρησης στροφών μετά την ανάλυση των βίντεο.

Παρατηρείται ότι τόσο όταν είναι ανοιχτή η έξοδος του συμπιεστή όσο και για το ακροφύσιο 3, το οποίο έχει τέσσερις φορές μεγαλύτερη διάμετρο από το ακροφύσιο 9, οι στροφές του συμπιεστή είναι μικρότερες απ' ότι σε μικρότερης διαμέτρου ακροφύσια, αλλά και όταν είναι τελείως μπλοκαρισμένη η έξοδος του συμπιεστή. Αυτό μπορεί να ερμηνευτεί ως ότι όταν μπλοκάρεται η έξοδος του συμπιεστή, είτε τελείως είτε με ακροφύσιο μικρής διαμέτρου, τα πτερύγια του συμπιεστή δεν μπορούν να αποδώσουν την ισχύ με τον ίδιο ικανοποιητικό τρόπο στο ρευστό λειτουργίας τους (ατμοσφαιρικός αέρα στο πείραμα) με αποτέλεσμα η ισχύς αυτή να μένει στο ίδιο το σύστημα με τη μορφή αύξησης των στροφών του συμπιεστή.

Ωστόσο, παρά τις μικρές αποκλίσεις, θα μπορούσαν να θεωρηθούν οι στροφές σταθερές σε σχέση με την συχνότητα του Inverter, με τιμές όπως φαίνονται στον Πίνακα 4.2.

f Inverter (Hz)	Στροφές συμπιεστή (RPM)
50	3000
40	2400
30	1800
20	1200
10	600

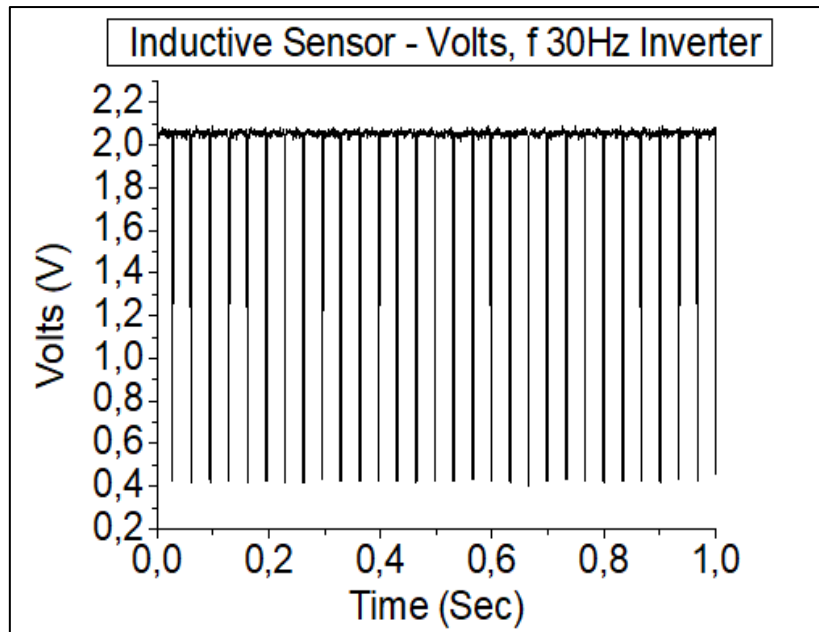
Πίνακας 4.2 : Στροφές συμπιεστή συναρτήσει της συχνότητας του Inverter όπως αυτές εξήχθησαν με τον οπτικό τρόπο.

4.2 Μέτρηση στροφών με επαγωγικό αισθητήρα

Η μέτρηση στροφών με επαγωγικό αισθητήρα θεωρείται ακριβέστερη έναντι της οπτικής παρατήρησης, καθώς τα αποτελέσματα προκύπτουν από ανάλυση μεγαλύτερου εύρους μετρήσεων (80.000 Samples) και υψηλότερης συχνότητας δειγματοληψίας 2.000 Hz έναντι των 60 Hz (60 fps της βιντεοκάμερας). Συνεπώς το σφάλμα μικρών μεταβολών, που δεν λαμβάνονταν υπόψη προηγουμένως, μειώνεται.

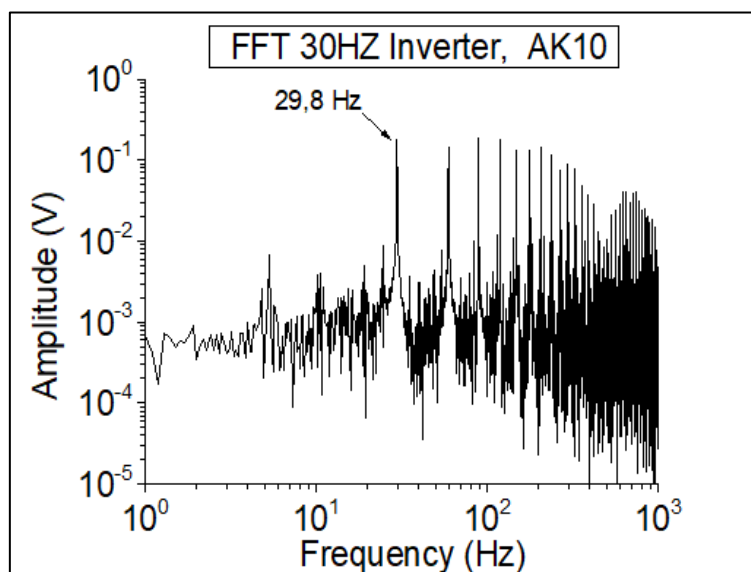
Εισάγοντας τα δεδομένα των μετρήσεων κάθε συχνότητας του Inverter στο πρόγραμμα OriginPro9 υπάρχουν δύο επιλογές. Η πρώτη είναι να γίνει το σχεδιάγραμμα τάσης του αισθητήρα συναρτήσει του χρόνου και να μετρηθούν οπτικά οι μεταβολές της τάσης σε συγκεκριμένο διάστημα του χρόνου. Ένα τέτοιο παράδειγμα φαίνεται παρακάτω στο Διάγραμμα 4.1.

Ωστόσο, ο τρόπος αυτός δε διαφέρει σε πολύ από τον οπτικό τρόπο. Το μόνο πλεονέκτημα έναντι του οπτικού τρόπου είναι ότι είναι πιο ευδιάκριτη η μέτρηση σε σχέση με μια λευκή τελεία που αχνοφαίνεται σε κάθε καρέ του βίντεο. Αλλά, με τον τρόπο αυτό δεν λαμβάνονται υπόψη όλες οι μετρήσεις του δείγματος, με αποτέλεσμα η ακρίβεια μέτρησης να μην βελτιώνεται σημαντικά.



Διάγραμμα 4.1 : Μεταβολή τάσης επαγωγικού αισθητήρα συναρτήσει του χρόνου κατά τη λειτουργία του συμπιεστή σε f Inverter 30Hz.

Για την εξαγωγή ακριβέστερων αποτελεσμάτων μέσω της ανάλυσης σε όλο το εύρος των μετρήσεων πραγματοποιείται μετασχηματισμός Fourier (FFT) δίνοντάς μας την συχνότητα με την οποία μεταβάλλεται η τάση του επαγωγικού αισθητήρα, δηλαδή τις φορές του περιστρέφεται σε ένα δευτερόλεπτο. Ένα παράδειγμα τέτοιου μετασχηματισμού φαίνεται στο Διάγραμμα 4.2.



Διάγραμμα 4.2 : Μετασχηματισμός Fourier για την εύρεση συχνότητας μεταβολής της τάσης του αισθητήρα - περιστροφής του συμπιεστή.

Τα αποτελέσματα των μετασχηματισμών Fourier για το ακροφύσιο 10, για έξοδο συμπίεστη χωρίς ακροφύσιο (Open) και για κλειστή έξοδο (Blocked) παρατίθενται στον Πίνακα 4.3.

Αποτελέσματα μετασχηματισμών Fourier			
f Inverter (Hz)	Έξοδος συμπίεστη	FFT f (Hz)	Στροφές Συμπίεστη (RPM)
50	Open	48,6	2916
	Blocked	49,4	2964
	AK 10	49,5	2970
40	AK 10	39,7	2382
30	AK 10	29,8	1788
20	AK 10	19,9	1194
10	AK 10	9,9	594
5	AK 10	4,9	294

Πίνακα 4.3 : Αποτελέσματα στροφών λειτουργίας συμπίεστη μετά απο ανάλυση μετρήσεων και μετασχηματισμό Fourier.

Από τον Πίνακα 4.3 μπορεί πάλι να γίνει αντιληπτό κάτι που αναφέρθηκε και προηγουμένως, ότι δηλαδή στην έξοδο του συμπίεστη χωρίς ακροφύσιο οι στροφές λειτουργίας του συμπίεστη είναι χαμηλότερες από κάθε άλλη περίπτωση. Θα μπορούσε να ειπωθεί ότι στην περίπτωση αυτή ο συμπίεστης δουλεύει καλύτερα από τις υπόλοιπες περιπτώσεις, καθώς η ισχύς μεταφέρεται από τα πτερύγια του συμπίεστη στο ρευστό λειτουργίας με πιο αποδοτικό τρόπο. Ενώ, όταν είναι μπλοκαρισμένη η έξοδος είτε πλήρως (blocked) , είτε μερικώς (ακροφύσια) η αποδοτικότητα με την οποία αυτή η ισχύς μεταφέρεται από τα πτερύγια στο φέρον ρευστό μειώνεται.

Τα αποτελέσματα με την ανάλυση των μετασχηματισμών Fourier στο ακροφύσιο 10 δεν έχουν σημαντικές διαφορές με τα αποτελέσματα της οπτικής μέτρησης στα ακροφύσια 3 και 9. Μάλιστα, οι διαφορές αυτές είναι τόσο μικρές που οι στροφές του συμπίεστη μπορούν να θεωρηθούν ότι επηρεάζονται μόνο από την συχνότητα του Inverter. Επομένως, για την συνέχεια του πειράματος ως συσχέτιση στροφών λειτουργίας του συμπίεστη με την συχνότητα του Inverter θα λαμβάνεται υπόψιν ο Πίνακας 4.2.

Κεφάλαιο 5 Εύρεση παροχής και ταχυτήτων εξόδου του συμπιεστή

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν οι μετρήσεις των ταχυτήτων εξόδου με τη μορφή προφίλ ταχυτήτων και για τα δέκα ακροφύσια που τοποθετήθηκαν σε κάθε περίπτωση και στη συνέχεια ο τρόπος και οι διαδικασίες μέσω των οποίων μετρήθηκε και υπολογίστηκε η παροχή του συμπιεστή για πέντε διαφορετικές στροφές λειτουργίας και για δέκα διαφορετικά ακροφύσια. Έπειτα, μέσω της, πλέον γνωστής, παροχής γίνεται ο υπολογισμός της μέσης ταχύτητας κάθε μίας από τις πενήντα περιπτώσεις. Στη αρχή κάθε υποκεφαλαίου, θα γίνεται μια θεωρητική αναφορά στο κομμάτι της κίνησης ρευστών μέσα από σωληνώσεις για να γίνουν ευκολότερα κατανοητά και τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το πείραμα.

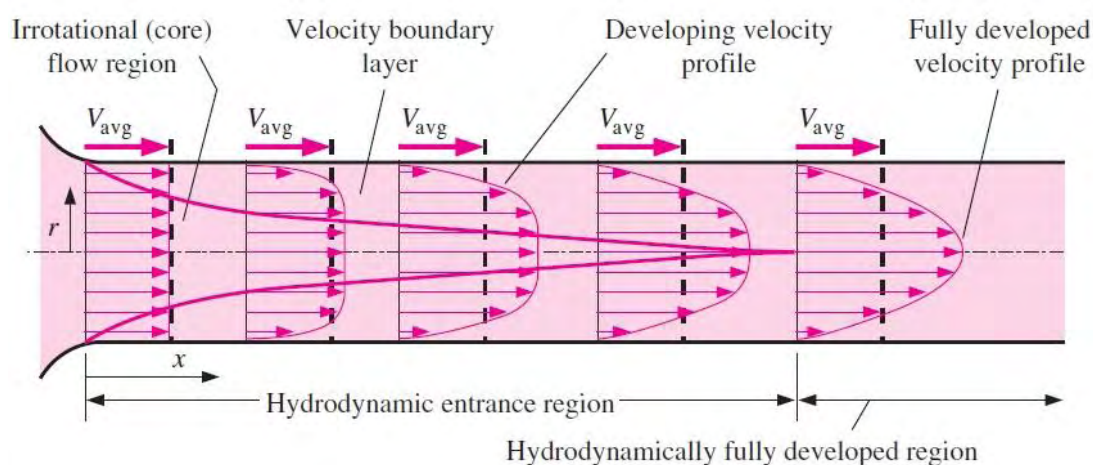
Ροές αερίων μέσω σωληνώσεων χρησιμοποιούνται συνήθως για εξαερισμό, θέρμανση, ψύξη και διανομή αερίων εντός δικτύου. Η ροή του ρευστού σε τέτοιου είδους εφαρμογές εξαναγκάζεται από φυγοκεντρικούς συμπιεστές. Η ταχύτητα του ρευστού εντός του σωλήνα μεταβάλλεται από μηδέν στο τόιχώμά του, εξαιτίας της συνθήκης μη ολίσθησης (no-slip), έως τη μέγιστη ταχύτητα στο κέντρο του σωλήνα. Σε ροές ρευστών, είναι βολικό να χρησιμοποιείται η μέση ταχύτητα V_{avg} , η οποία παραμένει σταθερή όταν διατηρείται η διατομή του σωλήνα σταθερή. Σε περιπτώσεις εφαρμογών όπως ψύξη και θέρμανση η μέση ταχύτητα V_{avg} ενδεχομένως να μεταβάλλεται εξαιτίας της αλλαγής της πυκνότητας με την θερμοκρασία. Αλλά, στη πράξη, υπολογίζονται οι ιδιότητες του ρευστού σε μία μέση θερμοκρασία και χρησιμοποιούνται αυτές ως σταθερές. Η ευκολία της χρήσης σταθερών ιδιοτήτων δικαιολογεί με το παραπάνω την μικρή απώλεια στην ακρίβεια.

Η τριβή μεταξύ των μορίων του ρευστού και του τοιχώματος του σωλήνα πράγματι προκαλεί μία μικρή αύξηση στη θερμοκρασία του ρευστού, ως αποτέλεσμα της μεταβολής της κινητικής ενέργειας σε αύξηση της εσωτερικής ενέργειας μέσω θερμότητας. Ωστόσο, αυτή η θερμοκρασιακή αύξηση είναι τόσο μικρή για να ληφθεί υπόψη στους υπολογισμούς, και κατά συνέπεια αμελείται. Άλλωστε, η κύρια επίπτωση από την τριβή μεταξύ ρευστού και τοιχώματος είναι η πτώση πίεσης και οποιαδήποτε θερμοκρασιακή αλλαγή θεωρείται ότι οφείλεται σε μεταφορές θερμότητας.

5.1 Προφίλ ταχυτήτων στην έξοδο του συμπιεστή

Όταν ένα ρευστό εισέρχεται σε έναν κυκλικό σωλήνα τότε εξαιτίας της κατάστασης μη ολίσθησης (no slip) τα σωματίδια ρευστού στο στρώμα που έρχονται σε επαφή με την επιφάνεια του σωλήνα μεταβαίνουν σε πλήρη στάση. Αυτό το στρώμα προκαλεί, επίσης, στα σωματίδια του ρευστού στα παρακείμενα στρώματα να επιβραδυνθούν βαθμιαία, ως αποτέλεσμα της τριβής. Για να διατηρηθεί ο ρυθμός ροής μάζας μέσω του σωλήνα σταθερός, από την αρχή διατήρησης της μάζας, η ταχύτητα του ρευστού στο μεσαίο τμήμα του σωλήνα πρέπει να αυξηθεί για να αντισταθμιστεί αυτή η μείωση ταχύτητας. Ως αποτέλεσμα, αναπτύσσεται ένα προφίλ ταχύτητας κατά την ακτινική κατεύθυνση και κατά μήκος του σωλήνα.

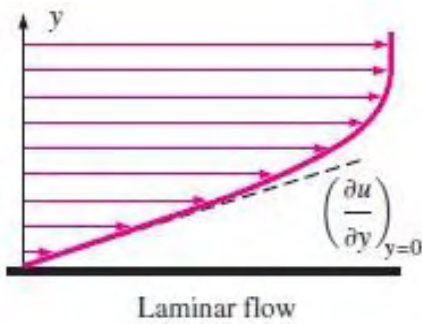
Η περιοχή της ροής στην οποία εμφανίζονται τα αποτελέσματα των ιξωδών δυνάμεων διάτμησης που προκαλούνται από το ιξώδες του ρευστού, ονομάζεται οριακό στρώμα ταχύτητας ή απλώς οριακό στρώμα. Η υποθετική οριακή επιφάνεια χωρίζει τη ροή εντός του σωλήνα σε δύο περιοχές: στην περιοχή του οριακού στρώματος, στην οποία τα ιξώδη αποτελέσματα και οι μεταβολές της ταχύτητας είναι σημαντικές, και στην ανέγγιχτη ροή (πυρήνας), στην οποία οι επιπτώσεις της τριβής είναι αμελητέες και η ταχύτητα παραμένει ουσιαστικά σταθερή στην ακτινική κατεύθυνση.



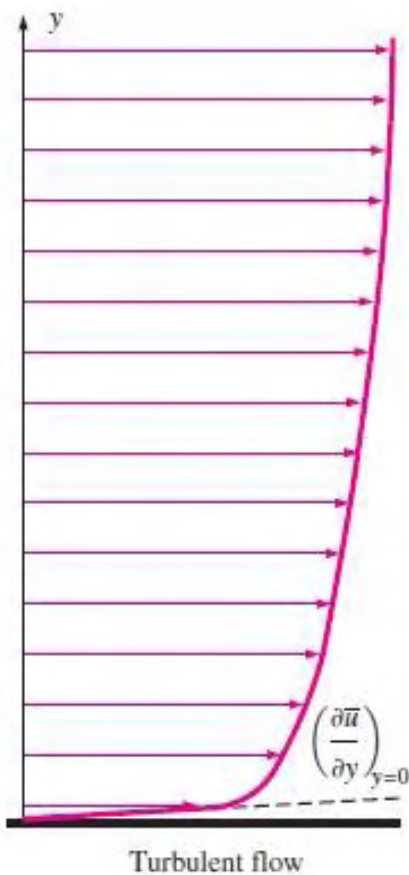
Σχήμα 5.1 : Εξέλιξη του οριακού στρώματος και του προφίλ ταχύτητας του ρευστού εντός του σωλήνα.

Το πάχος του οριακού στρώματος αυξάνεται κατά την κατεύθυνση ροής έως ότου το οριακό στρώμα φτάσει στο κέντρο του σωλήνα και έτσι γεμίσει ολόκληρο τον

σωλήνα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.1. Η περιοχή από την είσοδο του σωλήνα μέχρι το σημείο στο οποίο το οριακό στρώμα φτάνει στην κεντρική γραμμή ονομάζεται υδροδυναμική περιοχή εισόδου και το μήκος αυτής της περιοχής ονομάζεται υδροδυναμική μήκος εισόδου L_h . Η ροή στην περιοχή εισόδου ονομάζεται υδροδυναμικά αναπτυσσόμενη ροή, αφού αυτή είναι η περιοχή στην οποία



αναπτύσσεται το προφίλ ταχύτητας. Η περιοχή πέρα από την περιοχή εισόδου στην οποία το προφίλ ταχύτητας είναι πλήρως ανεπτυγμένο και παραμένει αμετάβλητο καλείται πλήρως υδροδυναμικά ανεπτυγμένη περιοχή. Η ροή καλείται πλήρως ανεπτυγμένη όταν πλέον και το προφίλ θερμοκρασιών παραμένει ανεπηρέαστο.



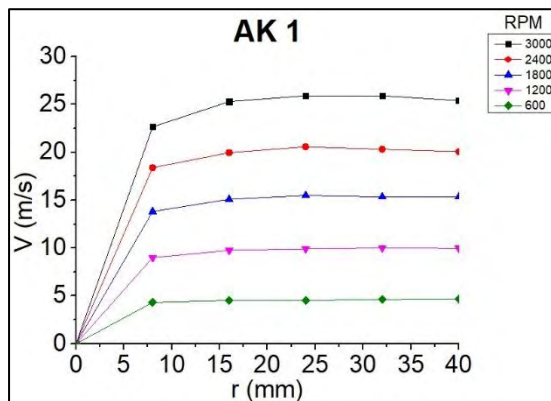
Η υδροδυναμικά ανεπτυγμένη ροή ισοδυναμεί με την πλήρως ανεπτυγμένη ροή όταν το ρευστό εντός του σωλήνα ούτε θερμαίνεται ούτε ψύχεται και συνεπώς το θερμοκρασιακό προφίλ του ρευστού παραμένει σημαντικά σταθερό. Το προφίλ ταχυτήτων σε μία πλήρως ανεπτυγμένη περιοχή είναι παραβολικής μορφής για στρωτή ροή, ενώ κάπως πιο επίπεδο για τυρβώδη ροή (Σχήμα 5.2) εξαιτίας της κίνησης των στροβίλων και την πιο έντονη ανάμειξη στην ακτινική κατεύθυνση. [7]

Σχήμα 5.2 : Προφίλ πλήρως ανεπτυγμένης ροής σε στρωτή ροή (πάνω) και σε τυρβώδη ροή(κάτω).

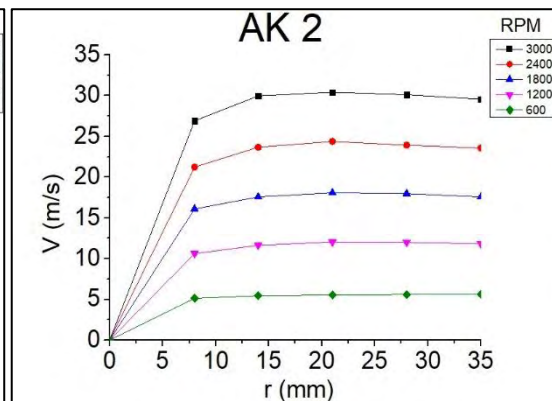
Ο σχεδιασμός των προφίλ ταχυτήτων έγινε με τη χρήση του προγράμματος OriginPro9, στο οποίο εισήχθησαν οι μετρήσεις που πάρθηκαν κατά τη διαδικασία του πειράματος, και επιλέχθηκε η απεικόνισή τους σε σχεδιαγράμματα. Το κάθε σχεδιάγραμμα αναφέρεται σε ένα ακροφύσιο, το οποίο θα αναγράφεται στο τίτλο κάθε

σχεδιαγράμματος με την συντομογραφία «ΑΚ» και τον αριθμό του ακροφυσίου, και για τις πέντε ταχύτητες λειτουργίας του συμπιεστή.

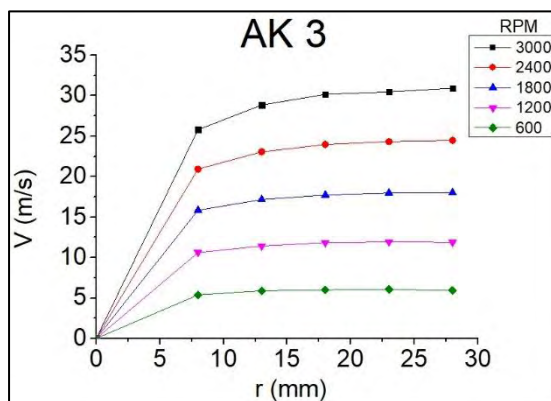
Εξαιτίας της πολύ κοντινής τιμής της διαμέτρου του ακροφυσίου 7 με το ακροφύσιο 6 (μόλις 1mm πιο μικρή η διάμετρος του ακροφυσίου 7) δεν μελετήθηκε το ακροφύσιο 7 ως προς τις ταχύτητες εξόδου καθώς θα ήταν σχεδόν ίδιες με του ακροφυσίου 6, αλλά μελετήθηκε μόνο κατά τις δονήσεις λειτουργίας. Τα προφίλ ταχυτήτων κάθε ακροφυσίου φαίνονται παρακάτω στα Διαγράμματα 5.1 έως 5.9 :



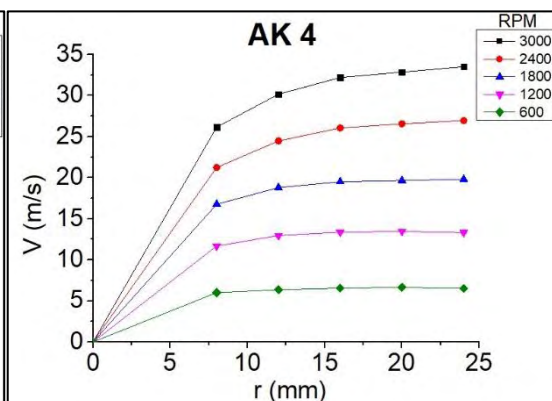
Διάγραμμα 5.1



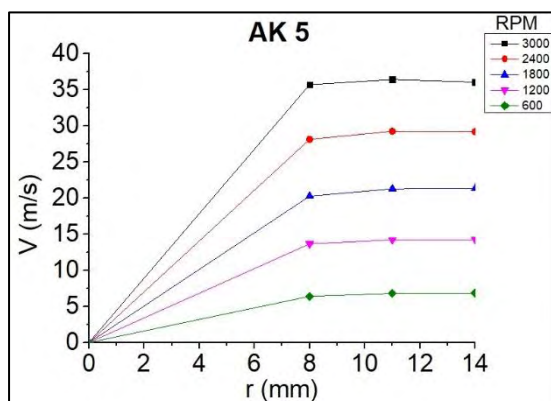
Διάγραμμα 5.2



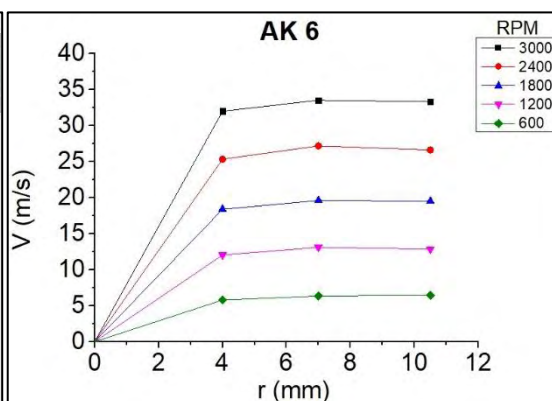
Διάγραμμα 5.3



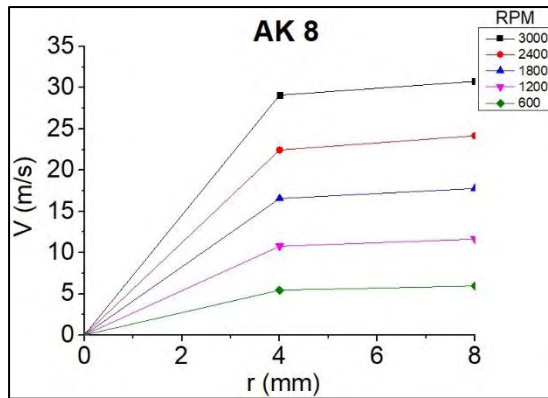
Διάγραμμα 5.4



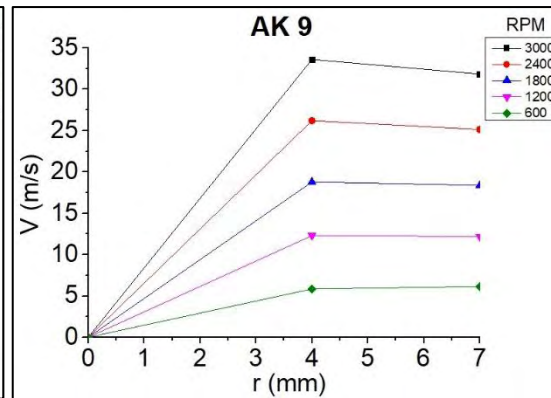
Διάγραμμα 5.5



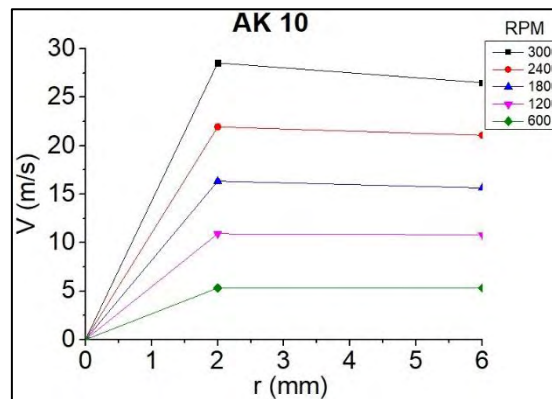
Διάγραμμα 5.6



Διάγραμμα 5.7



Διάγραμμα 5.8



Διάγραμμα 5.9

Στα διαγράμματα 5.1 έως 5.9 εμφανίζονται τα προφίλ των ταχυτήτων στην έξοδο του συμπιεστή και συγκεκριμένα κάθε ακροφυσίου. Η μορφή τους υποδεικνύει προφίλ ταχυτήτων ροής που δεν έχει προλάβει να γίνει πλήρως ανεπτυγμένη, όπως του σχήματος 5.1. Πράγματι, αυτό περιμέναμε να φανεί, καθώς το μήκος του σωλήνα ήταν τόσο που δεν θα προλάβαινε η ροή να γίνει στρωτή μέχρι το τέλος του σωλήνα. Ήταν πρακτικά δύσκολο να κατασκευαστούν τα ακροφύσια σε μεγέθη όπου η ροή κατά την έξοδό της θα είχε αναπτυχθεί πλήρως.

Κατά την παρατήρηση των διαγραμμάτων φαίνεται ότι ενώ από τη θεωρία θα έπρεπε στο κέντρο του σωλήνα η ταχύτητα της ροής να είναι η μέγιστη, εδώ πέφτει είτε ελαφρώς στις χαμηλές στροφές είτε πιο πολύ στις υψηλές στροφές. Αυτό συμβαίνει λόγω του ότι για να μετρηθούν οι ταχύτητες πιο κοντά στο κέντρο του σωλήνα έπρεπε μεγαλύτερο μέρος του στελέχους του ανεμόμετρου να εισέλθει εντός της ροής, έχοντας ως αποτέλεσμα τον επηρεασμό της ροής και την επιβράδυνσή της τοπικά εξαιτίας των σωματιδίων του ρευστού που έβρισκαν αντίσταση στη κίνηση από το στέλεχος του ανεμόμετρου, το οποίο θεωρείται ως εμπόδιο για την ροή.

5.2 Εύρεση παροχής και μέσης ταχύτητας στην έξοδο του συμπιεστή

Από τις σημαντικότερες πληροφορίες που θα ήθελε να γνωρίζει κανείς όταν εξετάζει έναν φυγοκεντρικό συμπιεστή είναι η ικανότητα παροχής ρευστού συναρτήσει των στροφών λειτουργίας του. Ο τρόπος με τον οποίο έγιναν οι μετρήσεις για τον υπολογισμό αυτό αναφέρθηκε στην παράγραφο 3.2.2 και εδώ θα παρατεθεί η διαδικασία εξαγωγής των αποτελεσμάτων από τις μετρήσεις και τα τελικά αποτελέσματα.

Αρχικά, θα πρέπει να αναφερθεί η θεωρία γύρω από τον υπολογισμό της παροχής όγκου και της μέσης ταχύτητας του ρευστού. Η τιμή της μέσης ταχύτητας V_{avg} σε κάποια διατομή ροής καθορίζεται από την απαίτηση ικανοποίησης της αρχής της διατήρησης της μάζας, η οποία είναι :

$$\dot{m} = \rho V_{avg} A_c = \int_{A_c} \rho u(r) dA_c \quad (\text{Σχ. 5.1})$$

όπου : \dot{m} η παροχή μάζας ρευστού (kg/s)

ρ η πυκνότητα του ρευστού (kg/m³)

V_{avg} η μέση ταχύτητα του ρευστού (m/s)

A_c η διατομή του σωλήνα (m²)

r η απόσταση από το κέντρο του σωλήνα (m), $0 \leq r \leq R$

$u(r)$ η ταχύτητα του ρευστού σε απόσταση r (m/s)

Η σχέση 5.1 διαιρούμενη με την πυκνότητα του ρευστού μας δίνει τη παροχή όγκου ρευστού \dot{V} , η οποία είναι :

$$\dot{V} = V_{avg} A_c = \int_{A_c} u(r) dA_c \quad (\text{Σχ. 5.2})$$

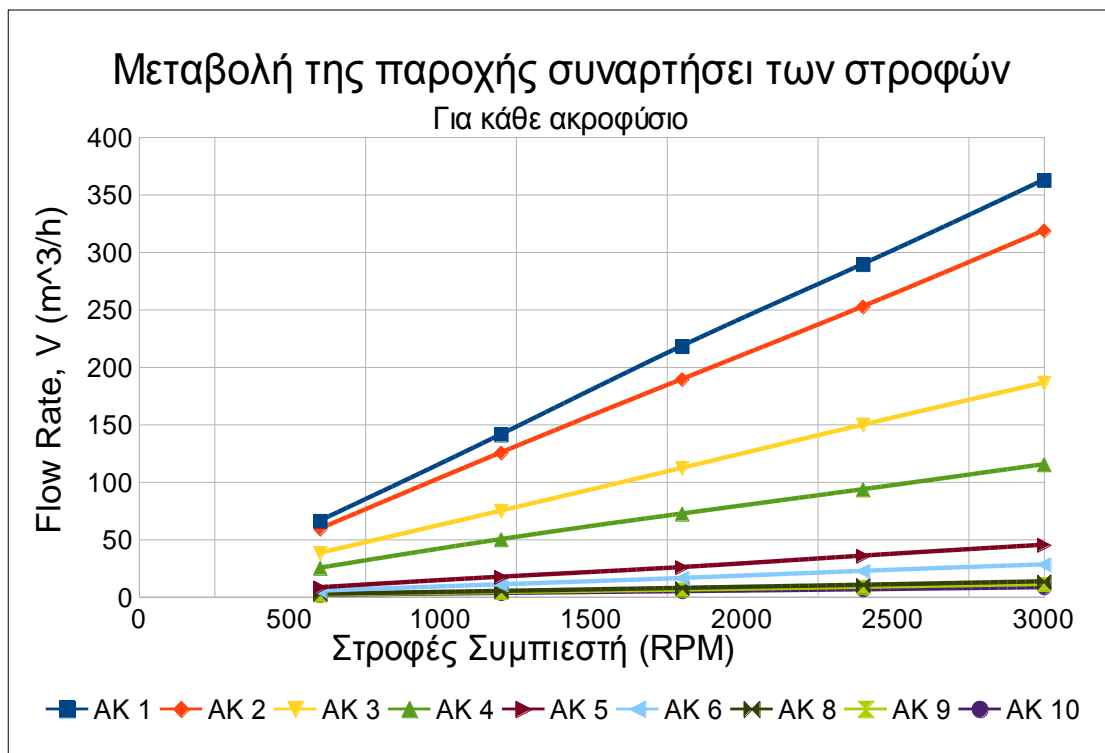
όπου : \dot{V} η παροχή όγκου ρευστού (m³/s)

Επειδή είναι γνωστές οι διάμετροι των ακροφυσίων και οι ταχύτητες που μετρήθηκαν είναι τοπικές σε συγκεκριμένα σημεία κατά μήκος της ακτίνας η σχέση 5.2 μετασχηματίζεται, ώστε η παροχή είναι συναρτήσει της ακτίνας του ακροφυσίου και όχι της διατομής του.

$$\dot{V} = \int_{A_c} u(r) dA_c = \int_0^R u(r) 2\pi r dr \quad (\text{Σχ. 5.3})$$

όπου : R η ακτίνα του σωλήνα

Έτσι, και από τα προφίλ ταχυτήτων αλλά και από τις μετρήσεις γνωρίζοντας τις ταχύτητες της ροής σε συγκεκριμένα σημεία και διαιρώντας την διατομή σε μικρότερες κυκλικές διατομές, υπολογίζεται η παροχή κάθε περίπτωσης. Στο διάγραμμα 5.10 που ακολουθεί φαίνεται η παροχή συναρτήσει της μεταβολής των στροφών λειτουργίας του συμπιεστή για κάθε ακροφύσιο που μελετήθηκε.

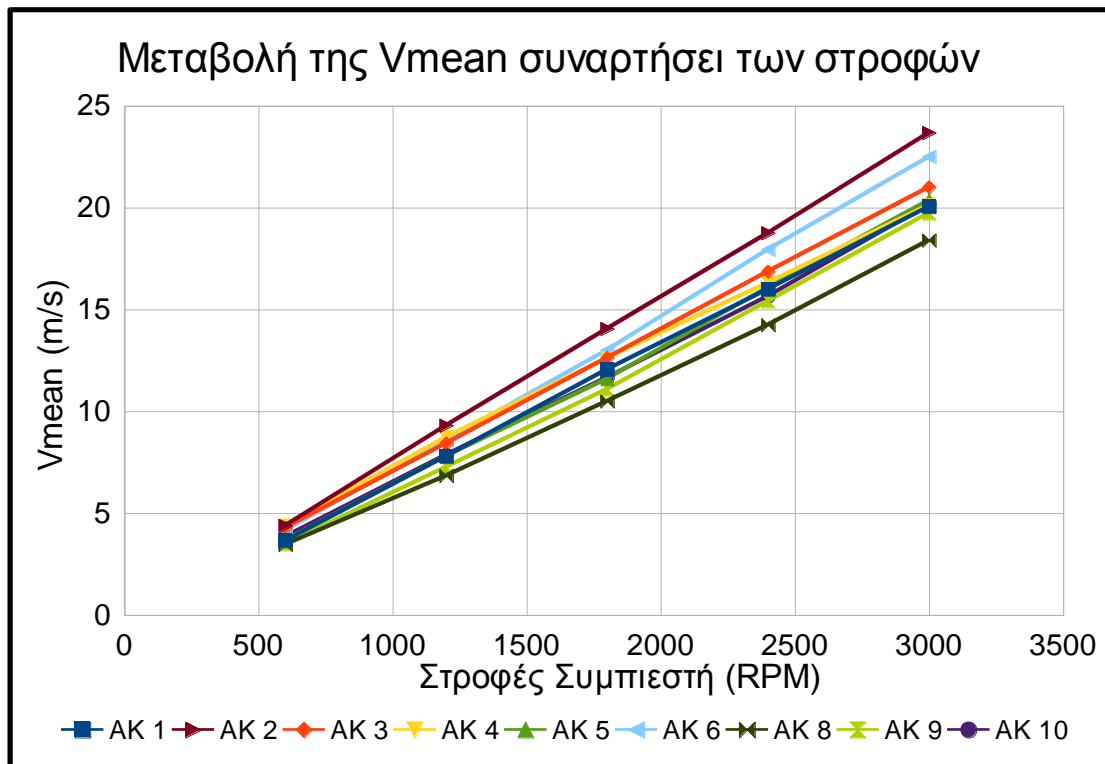


Διάγραμμα 5.10 : Μεταβολή της παροχής συναρτήσει των στροφών λειτουργίας για κάθε ακροφύσιο.

Από την σχέση 5.2, γνωρίζοντας την διατομή κάθε ακροφυσίου και την παροχή για κάθε τιμή των στροφών λειτουργίας, υπολογίζεται η V_{avg} κάθε περίπτωσης. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στον Πίνακα 5.1. Έπειτα, με τα δεδομένα του πίνακα 5.1 ελέγχεται η γραμμικότητα των τιμών της μέσης ταχύτητας V_{avg} συναρτήσει των στροφών λειτουργίας στο Διάγραμμα 5.11.

	AK 1	AK 2	AK 3	AK 4	AK 5	AK 6	AK 8	AK 9	AK 10
RPM	Vavg (m/s)	Vavg (m/s)	Vavg (m/s)	Vavg (m/s)	Vavg (m/s)	Vavg (m/s)	Vavg (m/s)	Vavg (m/s)	Vavg (m/s)
3000	20,05	23,68	21,01	20,13	20,36	22,5	18,4	19,74	20,17
2400	16	18,76	16,87	16,32	16,09	17,95	14,25	15,42	15,66
1800	12,06	14,06	12,63	12,62	11,6	13,01	10,5	11,09	11,66
1200	7,8	9,31	8,43	8,74	7,81	8,58	6,84	7,27	7,87
600	3,65	4,39	4,29	4,39	3,67	4,15	3,46	3,49	3,85

Πίνακας 5.1 : Μέση τιμή ταχύτητας εξόδου για κάθε ακροφύσιο για κάθε RPM.



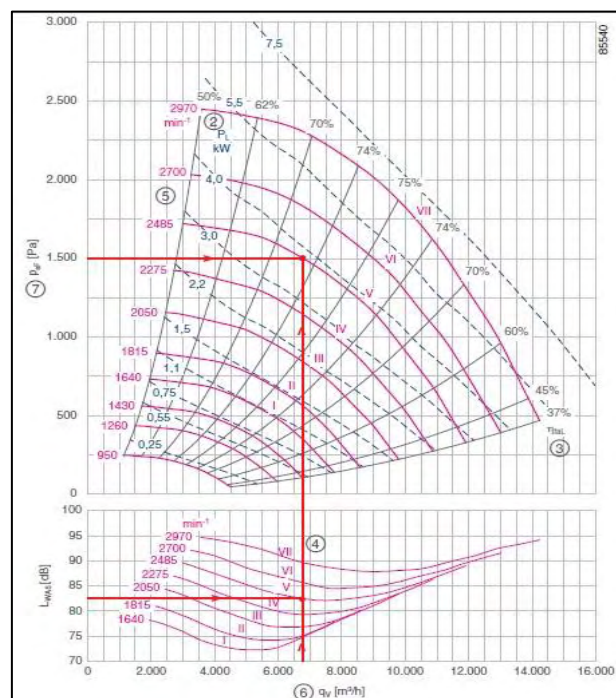
Διάγραμμα 5.11 : Γραμμική μεταβολή της ταχύτητας εξόδου συναρτήσει των στροφών λειτουργίας.

Από το διάγραμμα 5.11, γίνεται εύκολα αντιληπτή η γραμμική σχέση που υπάρχει στη μεταβολή της ταχύτητας εξόδου του συμπιεστή και των ακροφυσίων με την αλλαγή των στροφών λειτουργίας του συμπιεστή.

Κεφάλαιο 6 Εύρεση διαφορικής πίεσης και χάρτης λειτουργίας συμπιεστή

Στόχος αυτού του κεφαλαίου είναι η καταγραφή και απεικόνιση των μετρήσεων που έγιναν της διαφορικής πίεσης του συμπιεστή μεταξύ της εισόδου και εξόδου του. Εν συνεχεία, έχοντας πλέον γνωστές τις τιμές της παροχής συναρτήσει των στροφών λειτουργίας, είναι δυνατή η συσχέτιση της διαφοράς πίεσης με την παροχή στην έξοδο του συμπιεστή για όλες τις στροφές λειτουργίας. Θα κατασκευαστεί, δηλαδή, ένα είδος χαρακτηριστικής του συμπιεστή ή αλλιώς χάρτη λειτουργίας (Εικόνα 6.1).

Ο χάρτης λειτουργίας που θα κατασκευαστεί, παρόλο που θα είναι ελλειπής, καθώς θα λείπουν στοιχεία, όπως πτώση πίεσης εντός του σωλήνα εξόδου, ροπή του κινητήρα και θερμοκρασιακές μεταβολές στην είσοδο και την έξοδο του συμπιεστή, θα συγκεντρώσει σημαντικές πληροφορίες σε ένα διάγραμμα. Ο χάρτης λειτουργίας είναι ένα πολύ σημαντικό στοιχείο το οποίο πλαισιώνει κάθε συμπιεστή, αλλά και στρόβιλο. Μέσω των χαρτών λειτουργίας, μπορούν να εξαχθούν πολύτιμα δεδομένα, τα οποία μπορεί να χρησιμοποιήσει ένας μηχανικός για να επιλέξει τον σωστό συμπιεστή ανάλογα με την εφαρμογή.



Εικόνα 6.1 : Χάρτης λειτουργίας φυγοκεντρικού συμπιεστή της Ziehl Abegg.

6.1 Διαφορική πίεση εισόδου – εξόδου

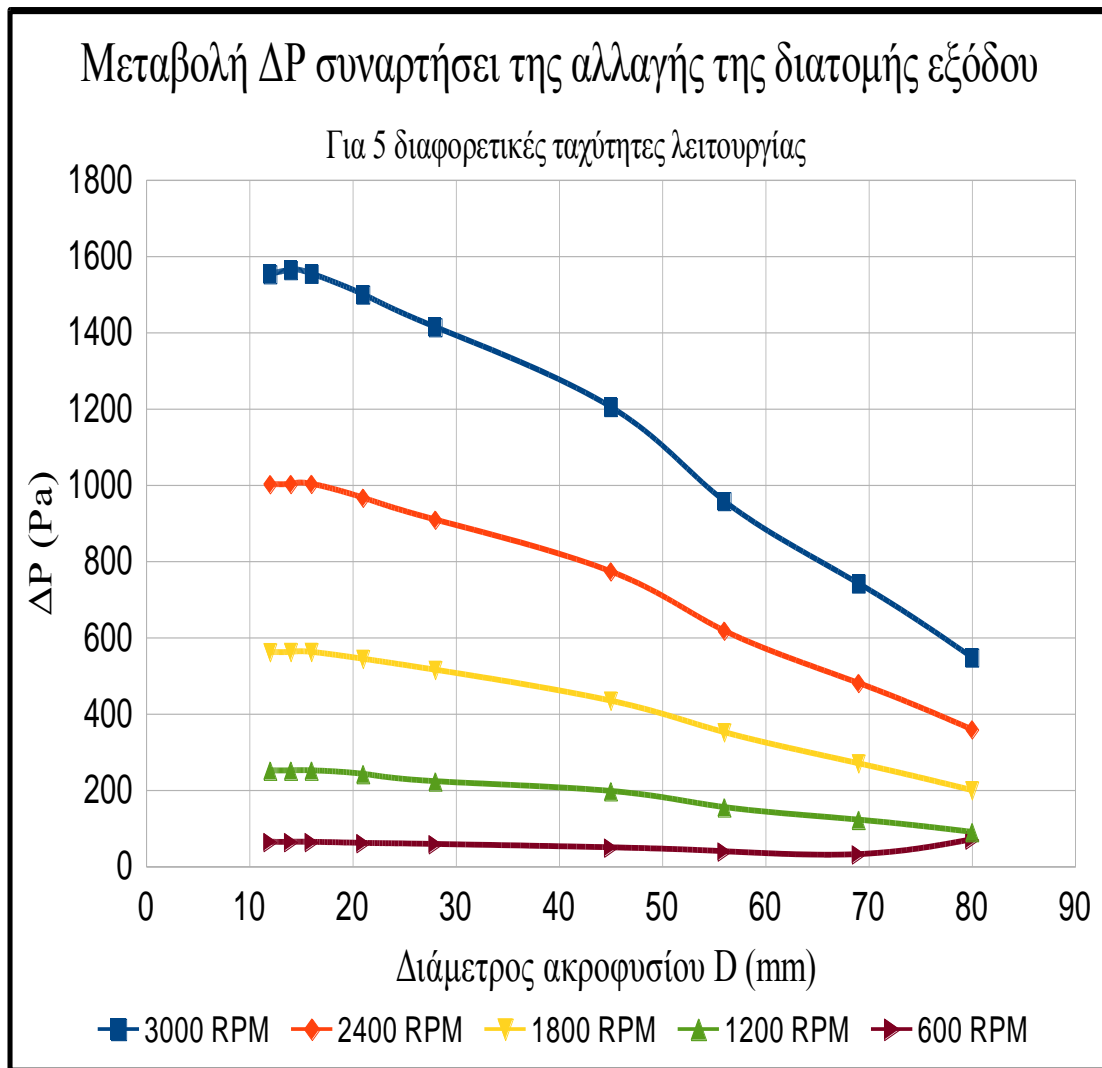
Όπως περιγράφηκε και στο κεφάλαιο 2 στην αρχή λειτουργίας του φυγοκεντρικού συμπιεστή, κατά την έξοδο της ροής από τα κινούμενα πτερύγια του συμπιεστή στα σταθερά πτερύγια-διαχύτες λαμβάνει χώρα μετατροπή της ενέργειας. Η ταχύτητα μειώνεται και η ενέργεια από τη μείωση ταχύτητας οδηγεί σε αύξηση της πίεσης του ρευστού, σύμφωνα με την αρχή του Bernoulli.

Στο πείραμα έγιναν μετρήσεις της αύξησης της στατικής πίεσης του ρευστού και στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι ολικές πιέσεις και τα αποτελέσματα των διαφορικών ολικών πιέσεων συγκεντρώνονται παρακάτω στον πίνακα 6.1.

	D (mm)	Διαφορική πίεση εισόδου- εξόδου συμπιεστή, $\Delta P_{ολ}$ (Pa)				
		3000 RPM	2400 RPM	1800 RPM	1200 RPM	600 RPM
AK 1	80	547,3	358,3	198,8	89,2	69,6
AK 2	69	741,3	479,9	269,2	121,2	30,8
AK 3	56	957,6	617,2	350,8	154,3	38,4
AK 4	45	1204,2	772,5	433,4	196,5	48,6
AK 5	28	1413,5	908,4	514,4	222	57,4
AK 6	21	1499,3	965,9	543,1	241,4	60,3
AK 8	16	1553,6	1002,2	561,2	250,5	63,1
AK 9	14	1563,2	1001,9	561	250,4	63,1
AK 10	12	1552,4	1001,5	560,8	250,4	63,1

Πίνακα 6.1 : Αποτελέσματα διαφορικής ολικής πίεσης για κάθε ακροφύσιο και στροφές λειτουργίας συμπιεστή.

Ο πίνακας δείχνει ότι όσο αυξάνονται οι στροφές λειτουργίας του συμπιεστή υπάρχει αύξηση της πίεσης στο ρευστό λειτουργίας, όπως άλλωστε ήταν αναμενόμενο. Επίσης, αύξηση της πίεσης υπάρχει και με την μείωση της διατομής της εξόδου, επίσης λογικό και αναμενόμενο. Τα αποτελέσματα του πίνακα 6.1 αναπαρίστανται και στο διάγραμμα 6.1 για καλύτερη κατανόηση.



Διάγραμμα 6.1 : Μεταβολής της διαφορικής πίεσης συναρτήσει της μεταβολής της διατομής εξόδου.

6.2 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή

Πέρα του διαγράμματος 6.1 θα ήταν πιο εύχρηστο να φαινόταν η σχέση της μεταβολής της πίεσης με την παροχή, αντί της διατομής εξόδου. Για την κάλυψη αυτής της απαίτησης κατασκευάζεται ο πίνακας 6.2, από τον οποίο αργότερα θα χρησιμοποιηθούν τα δεδομένα για την κατασκευή του διαγράμματος του χάρτη λειτουργίας που είναι και το ζητούμενο.

	AK 1		AK 2		AK 3		AK 4		AK 5	
	Flow Rate	$\Delta P_{O\Lambda}$	Flow Rate	$\Delta P_{O\Lambda}$	Flow Rate	$\Delta P_{O\Lambda}$	Flow Rate	$\Delta P_{O\Lambda}$	Flow Rate	$\Delta P_{O\Lambda}$
RPM	(m ³ /h)	(Pa)	(m ³ /h)	(Pa)	(m ³ /h)	(Pa)	(m ³ /h)	(Pa)	(m ³ /h)	(Pa)
3000	362,6	547,3	318,6	741,3	186,2	957,6	115,2	1204,2	45,1	1413,5
2400	289,3	358,3	252,5	479,9	149,5	617,2	93,4	772,5	35,6	908,4
1800	218	198,8	189,2	269,2	111,9	350,8	72,2	433,4	25,7	514,4
1200	141,1	89,2	125,3	121,2	74,7	154,3	50	196,5	17,3	222
600	66,1	69,6	59,1	30,8	38	38,4	25,1	48,6	8,1	57,4

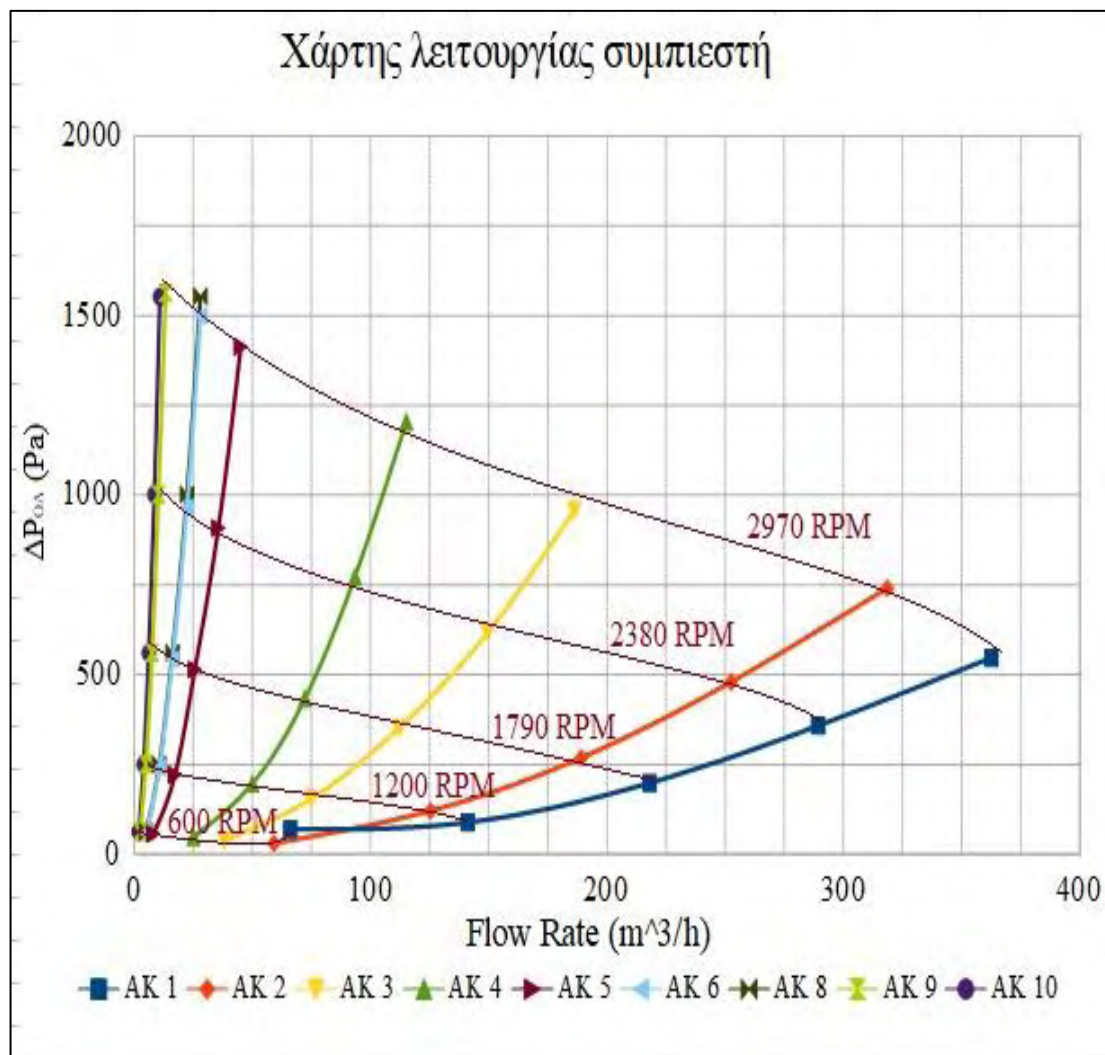
	AK 6		AK 8		AK 9		AK 10		
	Flow Rate	$\Delta P_{O\Lambda}$	Flow Rate	$\Delta P_{O\Lambda}$	Flow Rate	$\Delta P_{O\Lambda}$	Flow Rate	$\Delta P_{O\Lambda}$	
RPM	(m ³ /h)	(Pa)	(m ³ /h)	(Pa)	(m ³ /h)	(Pa)	(m ³ /h)	(Pa)	
3000	28	1499,3	13,3	1553,6	10,9	1563,2	8,2	1552,4	
2400	22,4	965,9	10,3	1002,2	8,5	1001,9	6,4	1001,5	
1800	16,2	543,1	7,6	561,2	6,1	561	4,7	560,8	
1200	10,7	241,4	4,9	250,5	4	250,4	3,2	250,4	
600	5,2	60,3	2,5	63,1	1,9	63,1	1,6	63,1	

Πίνακας 6.2 : Συσχέτιση παροχής εξόδου με διαφορά πίεσης για κάθε ταχύτητα στροφών λειτουργίας.

Ο πίνακας 6.2 για να γίνει ευκολότερα κατανοητός πρέπει να διαβαστεί για κάθε ακροφύσιο ξεχωριστά, ώστε να διαπιστωθεί ότι η παροχή ρευστού αυξάνεται με την αύξηση της διαφορά πίεσης μεταξύ εισόδου και εξόδου. Κάθε ακροφύσιο έχοντας διαφορετική διατομή αλλάζει την παροχή ρευστού στην έξοδο του συμπιεστή, συνεπώς θα μπορούσαμε να συσχετίσουμε όλες τις παροχές του πίνακα 6.2 με την διαφορά της πίεσης για όλες τις στροφές λειτουργίας του συμπιεστή, κάνοντας έτσι το διάγραμμα του χάρτη λειτουργίας του συμπιεστή. Αυτό φαίνεται στο διάγραμμα 6.2.

Στο διάγραμμα 6.2 φαίνεται η μεταβολή της παροχής με τη μεταβολή της πίεσης για κάθε ταχύτητα. Για αύξηση της χρησιμότητας του διαγράμματος αυτού σχεδιάστηκαν προσεγγιστικά και οι καμπύλες όμοιων στροφών λειτουργίας του συμπιεστή. Οι καμπύλες των ταχυτήτων μπορεί να μην διέρχονται ακριβώς από τα σημεία καθότι η σχεδιάσή τους έγινε στο πρόγραμμα της 'Ζωγραφικής', αλλά το

εγχείρημα αυτό πραγματοποιήθηκε για τον καλύτερο συσχετισμό μετρήσεων του αναγνώστη.



Διάγραμμα 6.2 : Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή του πειράματος.

Κεφάλαιο 7 Μέτρηση και ανάλυση δονήσεων κατά τη λειτουργία του συμπιεστή

Κατά την λειτουργία του συμπιεστή έγινε μέτρηση και καταγραφή των ταλαντώσεων της βάσης του συμπιεστή και της άκρης των ακροφυσίων, τα οποία είχαν αμφιπακτωθεί. Η διαδικασία λήψης και επεξεργασίας των μετρήσεων αναφέρθηκε στη παράγραφο 3.2.6. Η ανάλυση των δονήσεων αφορούσε την ανάλυση συχνοτήτων (frequency analysis) των ταλαντώσεων που μετρήθηκαν, κατά τη λειτουργία του συμπιεστή, κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας διάρκειας 40 δευτερολέπτων (Sample Rate 2kHz, Samples 80.000). Το εύρος συχνοτήτων που επιλέχθηκε ήταν τέτοιο, ώστε να καλυφθούν και χαμηλές συχνότητες μέχρι $1/40$ Hz ή 0,025 Hz.

Προτού παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των μετρήσεων θα γίνει μία αναφορά στη θεωρία των μετρήσεων των δονήσεων συσκευών, μέσω της οποίας επιλέχθηκε ο συγκεκριμένος τρόπος παρουσίασης των αποτελεσμάτων.

Αρχικά, θα ήταν χρήσιμο να αναφερθεί ο ρόλος της ανάλυσης συχνοτήτων στην μελέτη μίας μηχανικής ή μη διάταξης. Το φάσμα των συχνοτήτων (Frequency spectrum) δίνει σε πολλές περιπτώσεις λεπτομερή πληροφορία για τις πηγές των σημάτων, η οποία δεν μπορεί να εξαχθεί από το χρονικό σήμα. Το φάσμα των συχνοτήτων προκύπτει στέλνοντας ένα σήμα δια μέσω ενός φίλτρου και την ίδια στιγμή μετακινώντας το φίλτρο πάνω στο εύρος των συχνοτήτων ενδιαφέροντος (ή έχοντας πολλά φίλτρα).

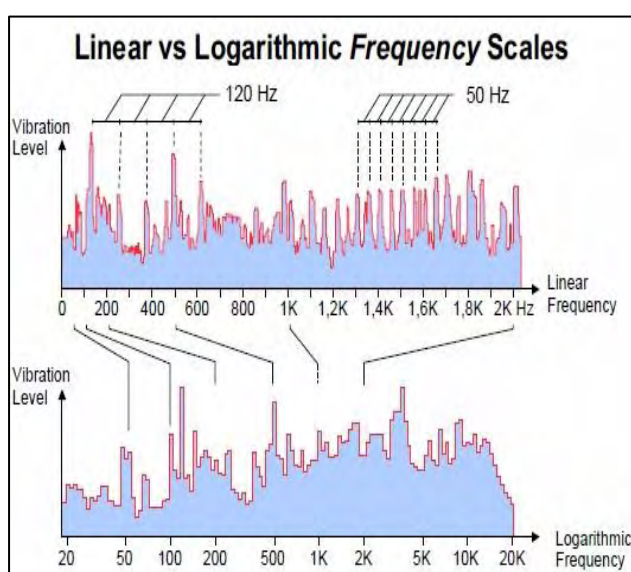
Έπειτα, πρέπει να αποφασιστεί ένα εάν είναι επιθυμητή η ανάλυση σε φάσμα συχνοτήτων ή συνολικού επιπέδου (Overall level). Ο απλούστερος τρόπος έκφρασης μίας κατάστασης οποιουδήποτε συστήματος είναι προσδίδοντας μία και μόνο τιμή σε αυτό. Αυτό, συνήθως, γίνεται χρησιμοποιώντας την μέση τιμή της εξόδου του αισθητήρα, και αυτή δίνει μία τιμή έκφρασης του επιπέδου ενέργειας της δόνησης. Ωστόσο, δεν δίνει πολλές πιθανότητες για κάποια μορφής διάγνωση, γι' αυτό το λόγο χρειάζονται περισσότερες παράμετροι. Από την άλλη το φάσμα των συχνοτήτων επιτρέπει την υλοποίηση πολλών ειδών διαγνώσεων. Το περιεχόμενο των συχνοτήτων μπορεί να βρεθεί με πολλούς διαφορετικούς τρόπους, χρησιμοποιώντας φίλτρο

σάρωσης, ποικιλία φίλτρων ή στις περισσότερες περιπτώσεις σήμερα ψηφιακή κατεργασία των μετρήσεων με τη χρήση του μετασχηματισμού Fourier.

Ο μηχανικός που εξετάζει μία συσκευή για να αποφασίσει εάν ένας έλεγχος συνολικού επιπέδου είναι αρκετός ή απαιτείται πλήρης ανάλυση συχνοτήτων, πρέπει να έχει γνώση της συσκευής και των ελαττωμάτων που είναι πιο πιθανά να εμφανιστούν ή ποια κομμάτια της συσκευής έχουν ενδιαφέρον μελέτης. Ένας γενικός κανόνας είναι ότι ο έλεγχος συνολικού επιπέδου επιτρέπεται για διατάξεις που δεν είναι κρίσιμες, ενώ πιο σύνθετες ή κρίσιμότερες διατάξεις απαιτούν φασματική ανάλυση. Στη παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε και φασματική ανάλυση αλλά και έλεγχος συνολικού επιπέδου. Τα αποτελέσματα της φασματικής ανάλυσης θα παρουσιαστούν σε αυτό το κεφάλαιο, ενώ του συνολικού επιπέδου στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1.

Άλλη επιλογή που έπρεπε να γίνει στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων φασματικής ανάλυσης ήταν η επιλογή γραμμικής ή λογαριθμικής κλίμακας. Οι κλίμακες του χρόνου και της απόστασης είναι χαρακτηριστικά παραδείγματα γραμμικής κλίμακας, όμως για τη μέτρηση ποσοτήτων των οποίων η αναλογία μεταξύ δύο μετρήσεων είναι μεγαλύτερου ενδιαφέροντος από την απόλυτη τιμή η χρήση της λογαριθμικής κλίμακας αποτελεί πλεονέκτημα.

Τόσο η γραμμική όσο και η λογαριθμική κλίμακα συχνοτήτων χρησιμοποιούνται για σύνδεση με μετρήσεις δονήσεων. Η γραμμική κλίμακα συχνοτήτων έχει το πλεονέκτημα ότι είναι εύκολη η ταύτιση των εξαρτημάτων που



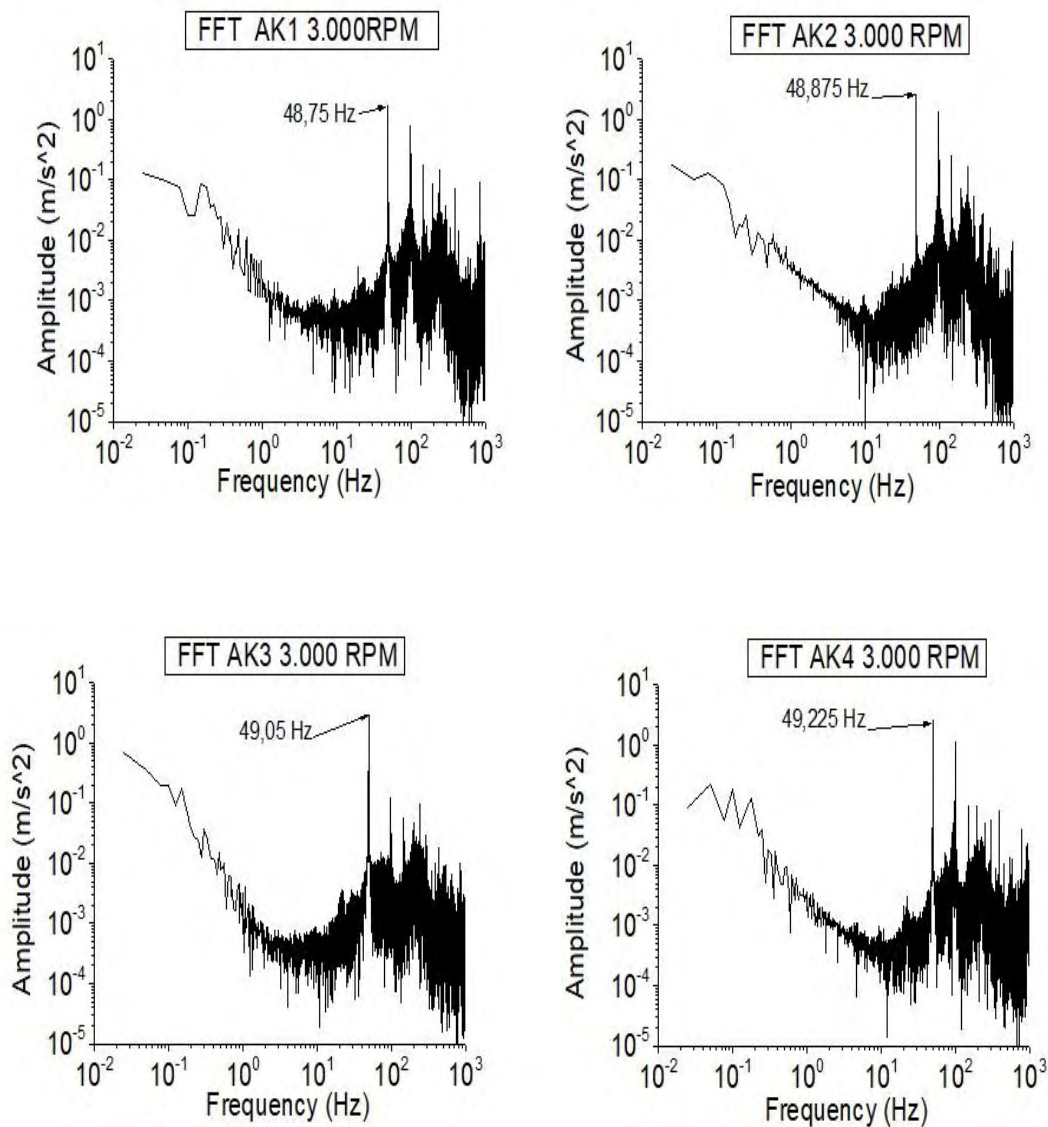
είναι αρμονικά συνδεδεμένα με το σήμα. Ωστόσο, η λογαριθμική κλίμακα έχει το πλεονέκτημα της κάλυψης μεγαλύτερου εύρους συχνοτήτων σε λογικό χώρο και σε κάθε αλλαγή δεκάδας της κλίμακας δίνεται η ίδια έμφαση.

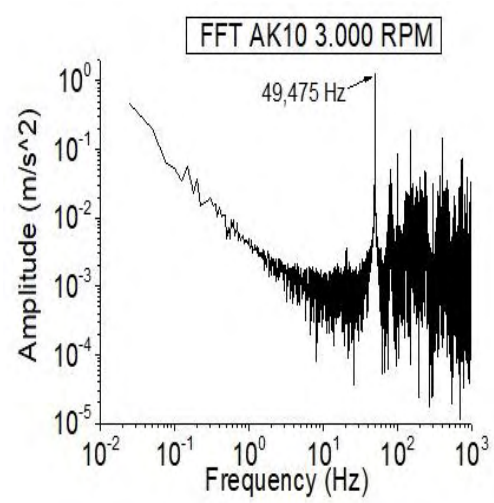
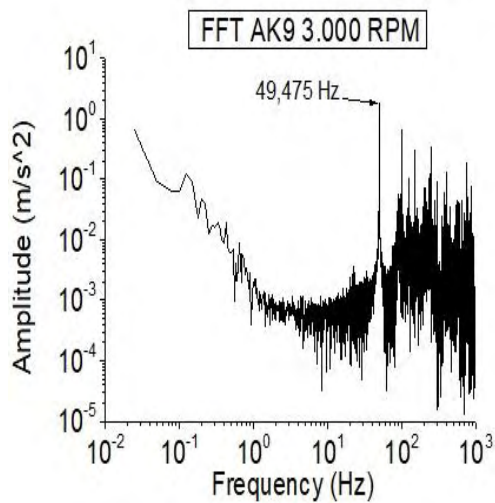
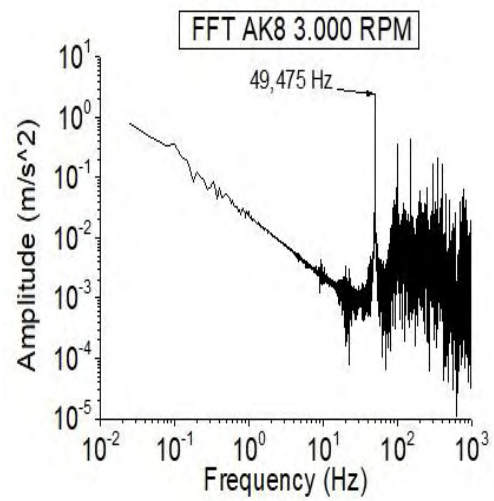
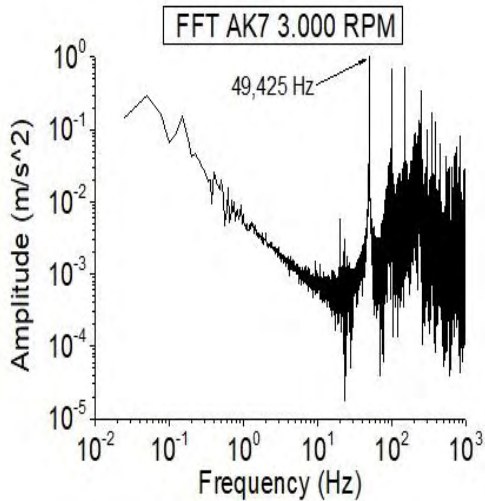
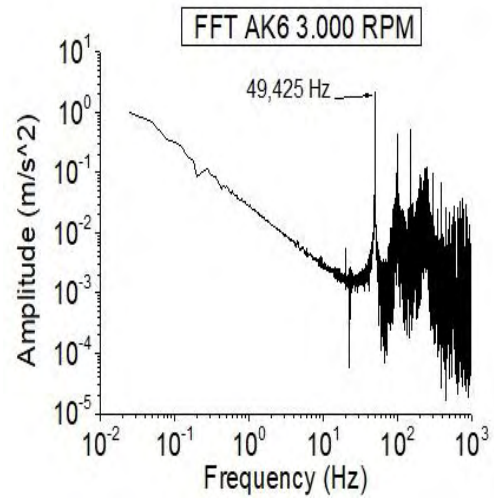
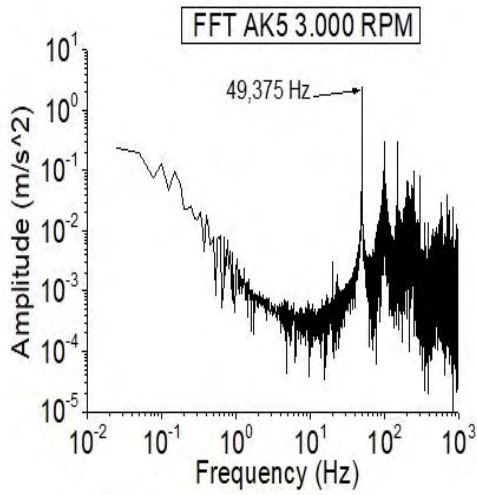
Εικόνα 7.1 : Γραμμική και λογαριθμική κλίμακα συχνοτήτων.

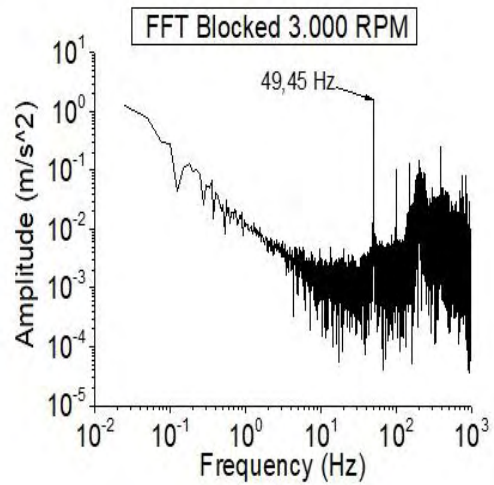
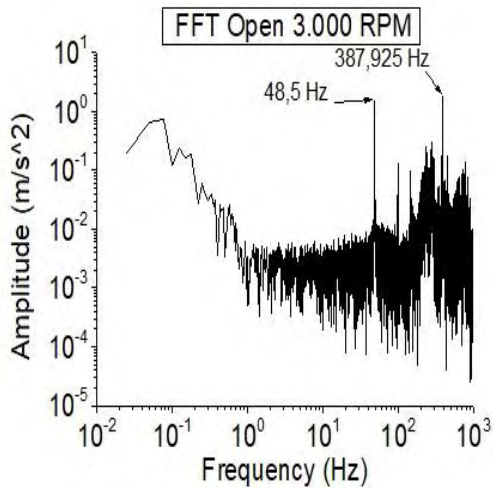
Στην παρούσα εργασία επιλέγεται η λογαριθμική κλίμακα συχνοτήτων ως καταλληλότερη για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων, για να είναι πιο εύκολα αναγνώσιμα τα αποτελέσματα. Αφού εξηγήθηκε ο τρόπος επιλογής παρουσίασης αποτελεσμάτων, παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Παρουσιάζονται για κάθε συχνότητα ξεχωριστά, πρώτα από τις μετρήσεις στην περιοχή της εξόδου της ροής και μετά από τη βάση του συμπιεστή.

7.1 Αποτελέσματα δονήσεων για λειτουργία στις 3.000 RPM

Θέση : Έξοδος ροής από ακροφύσιο.

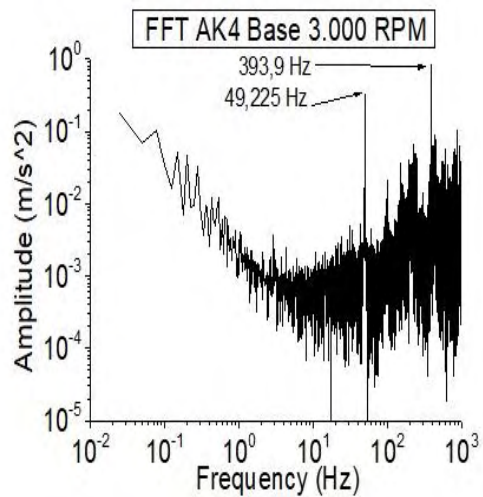
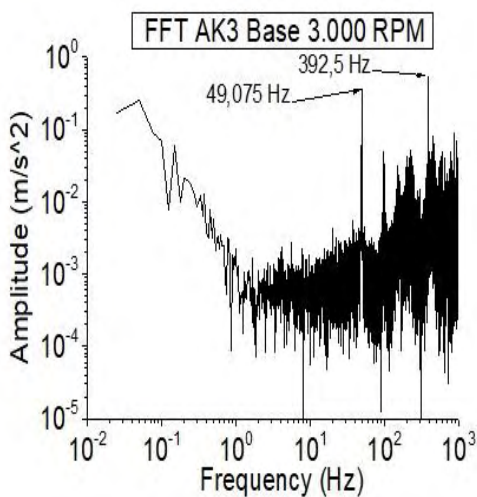
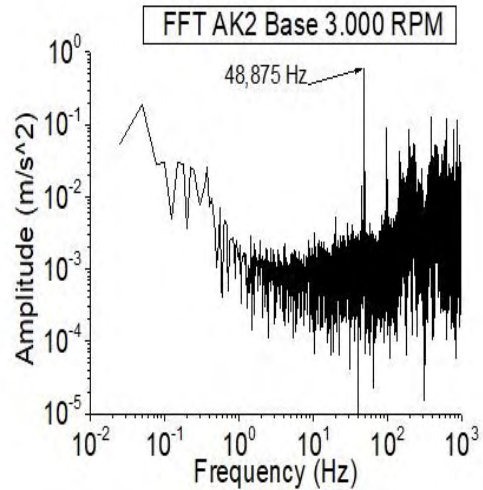
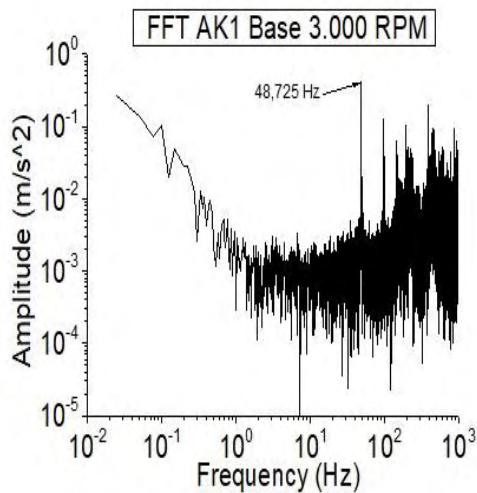


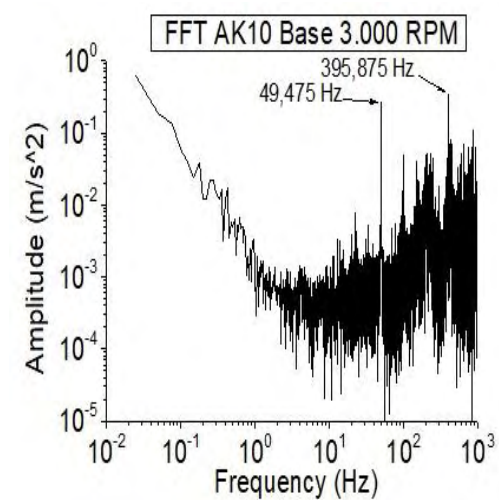
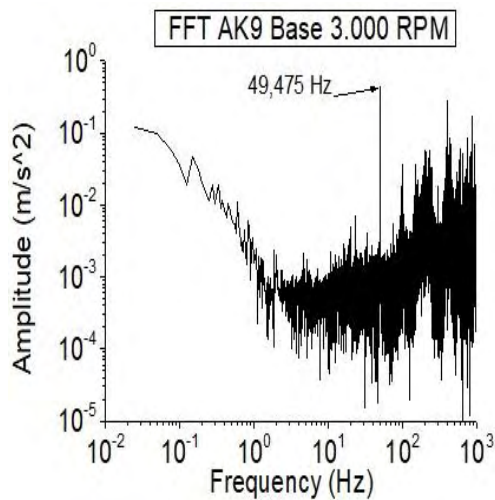
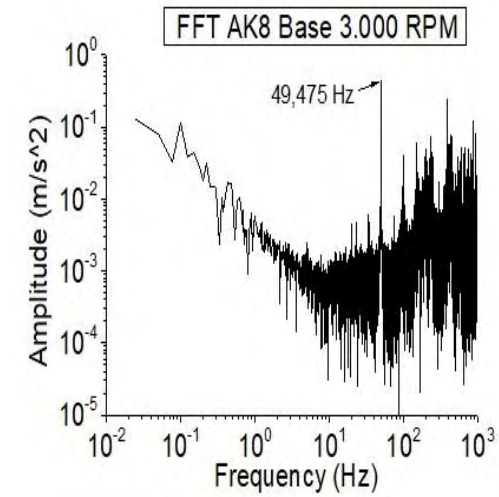
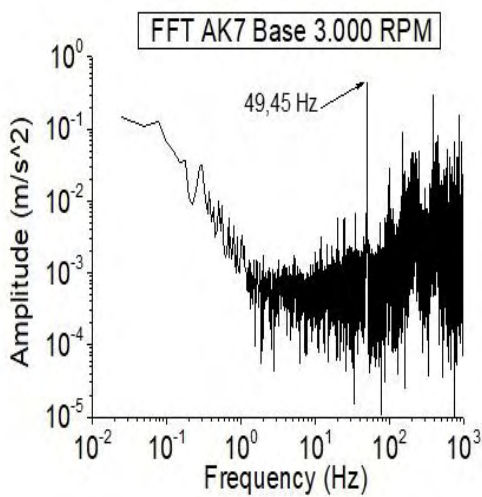
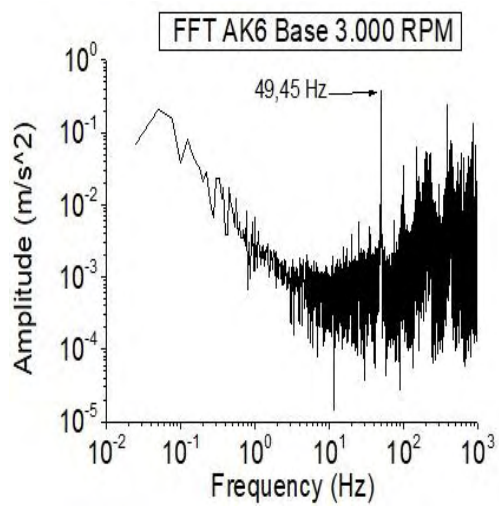
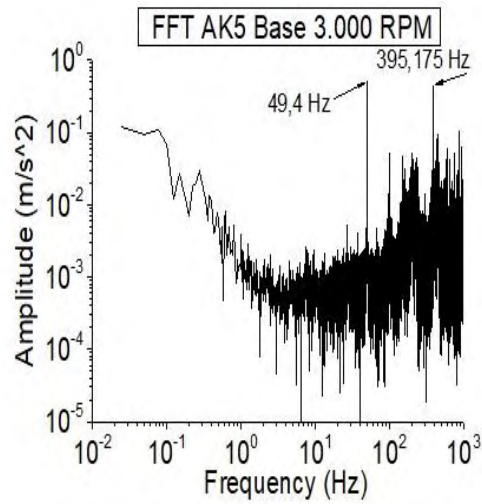




Διάγραμμα 7.1 : Αποτελέσματα FFT για 3.000 RPM στην έξοδο της ροής.

Θέση : Βάση του συμπιεστή

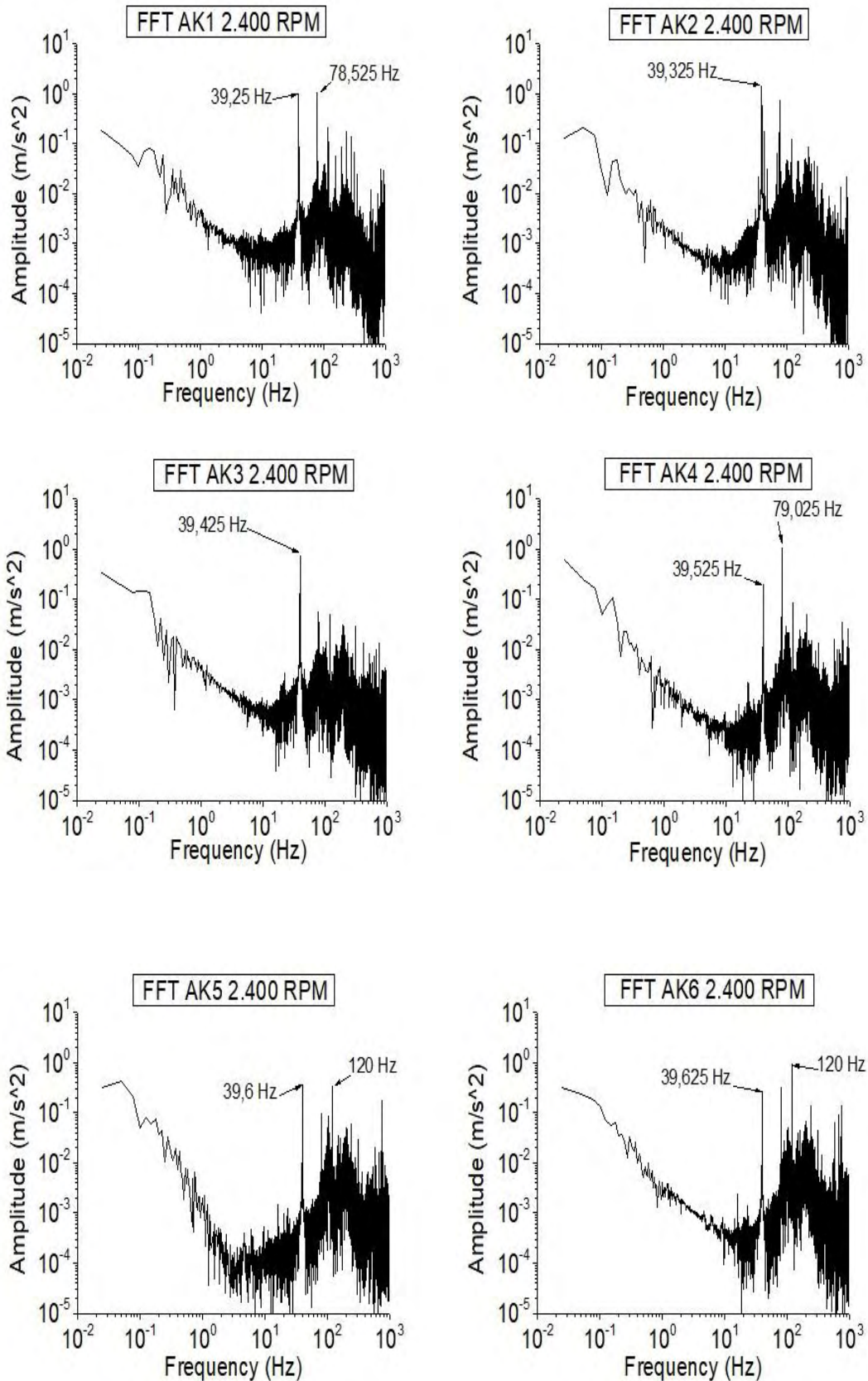


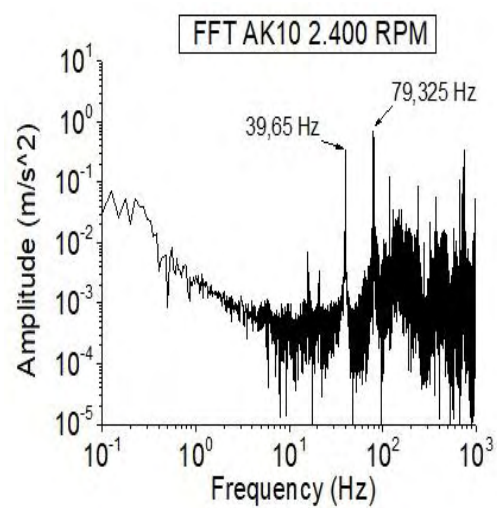
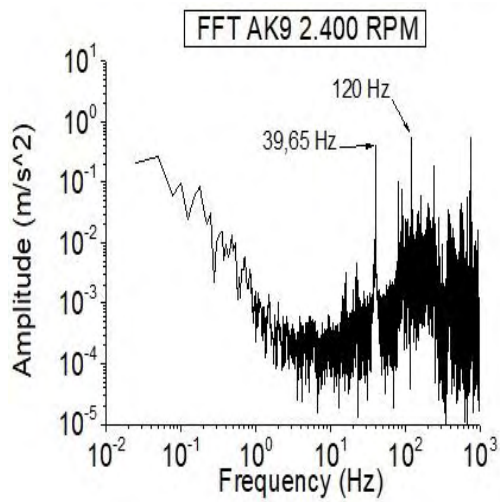
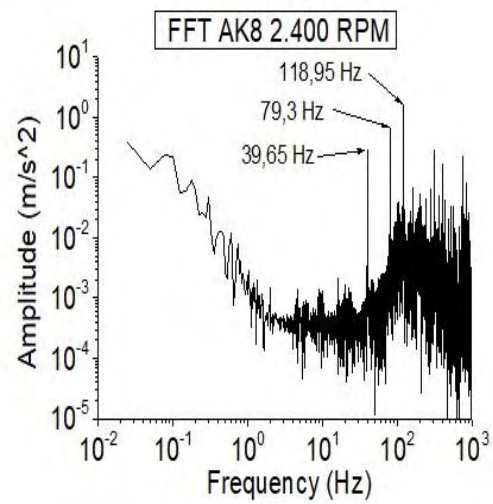
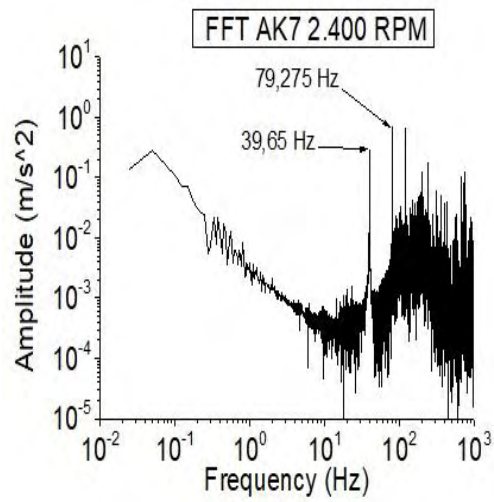


Διάγραμμα 7.2 : Αποτελέσματα FFT βάσης συμπίεστη για 3.000 RPM.

7.2 Αποτελέσματα δονήσεων για λειτουργία στις 2400 RPM

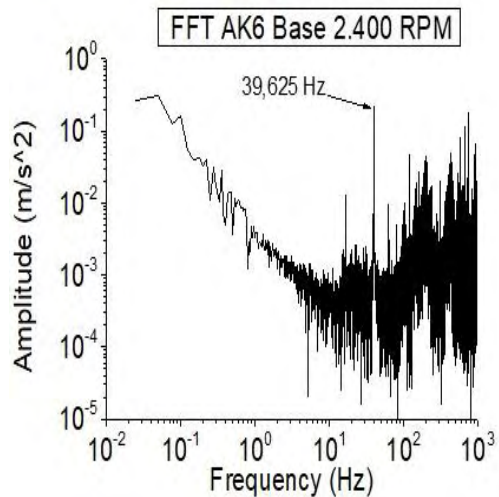
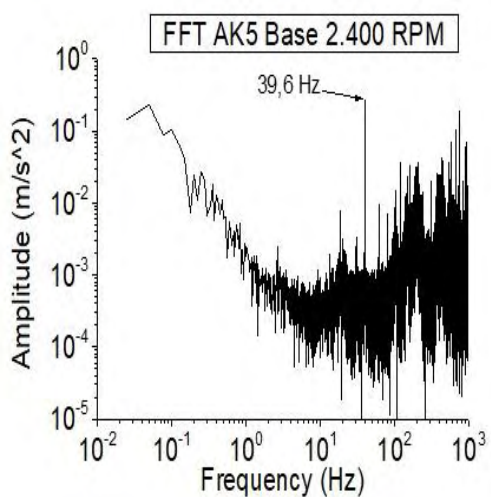
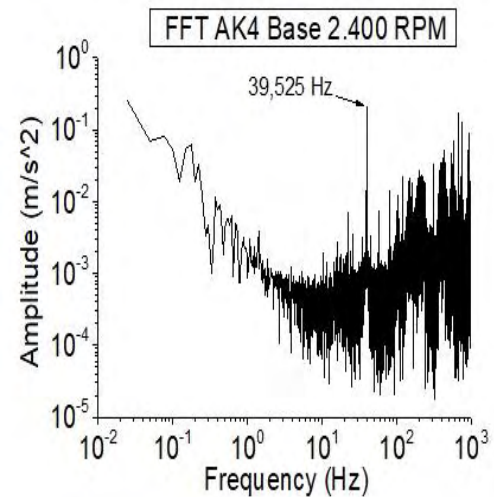
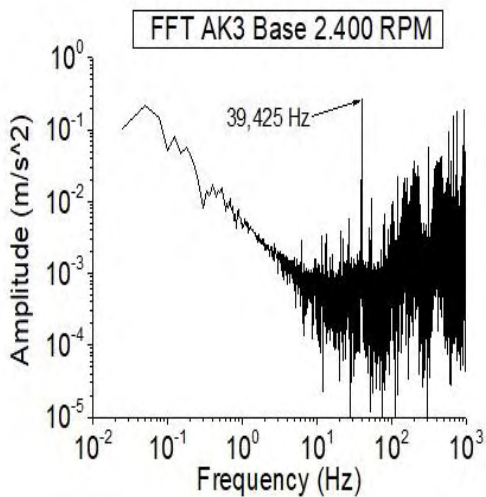
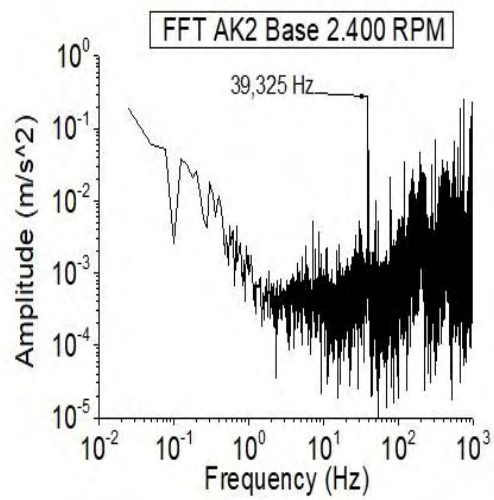
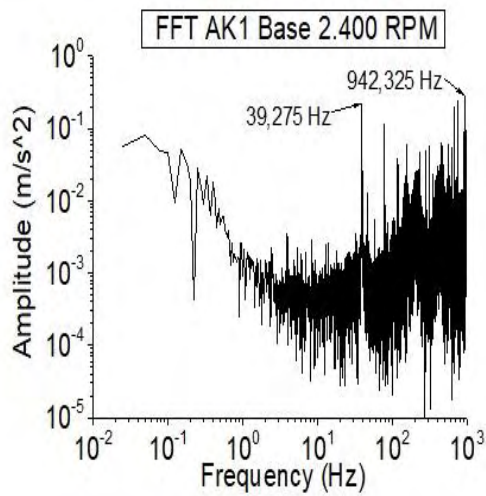
Θέση : Έξοδος ροής από ακροφύσιο.

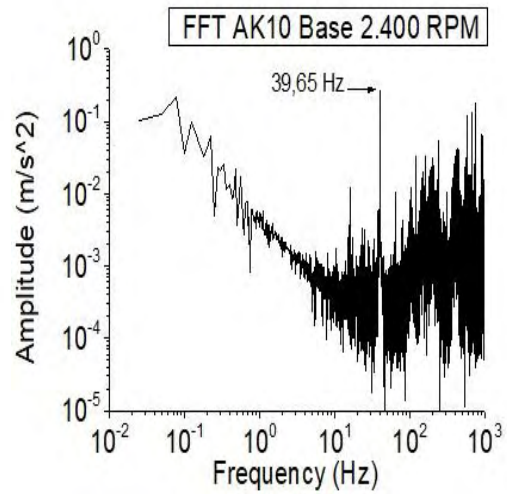
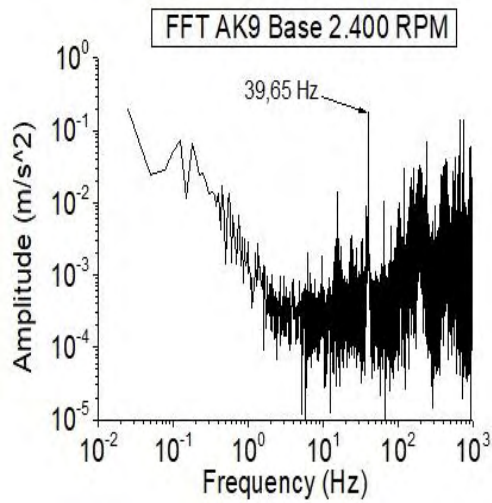
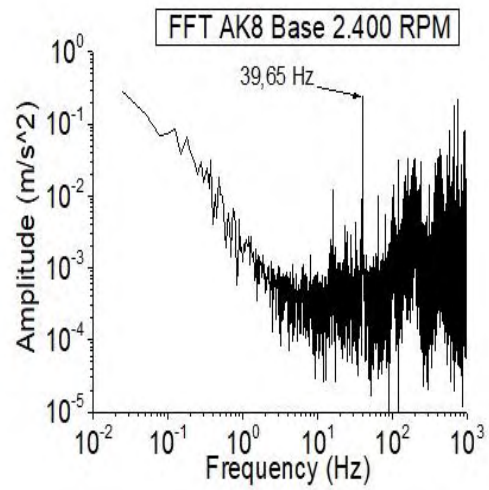
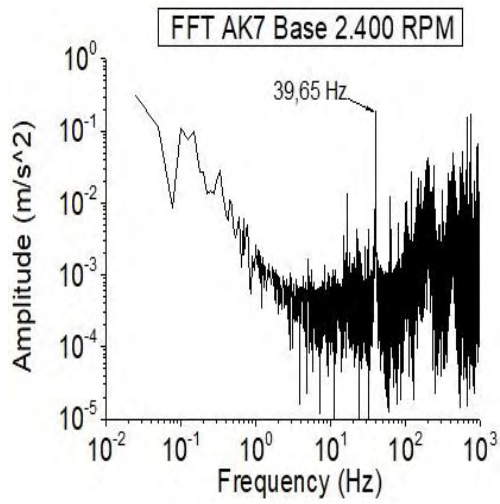




Διάγραμμα 7.3 : Αποτελέσματα FFT ακροφυσίων για 2.400 RPM.

Θέση : Βάση του συμπιεστή.

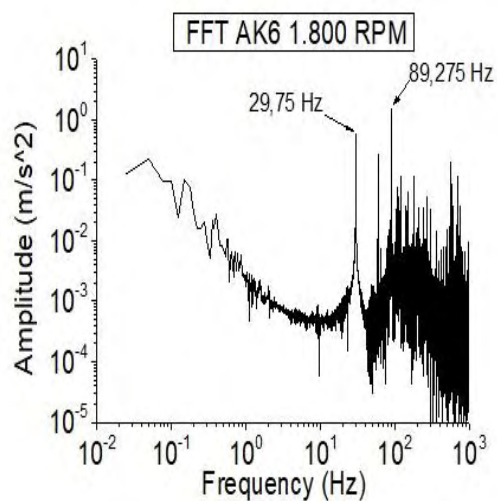
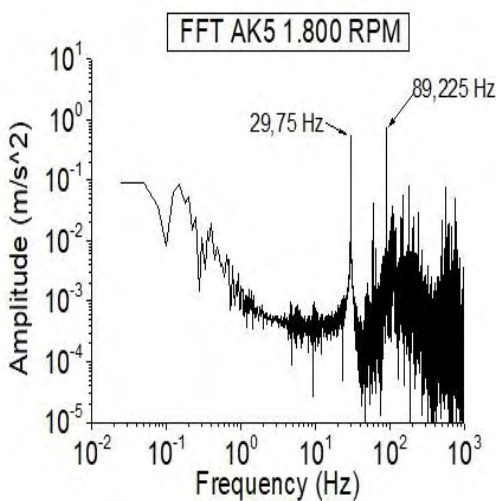
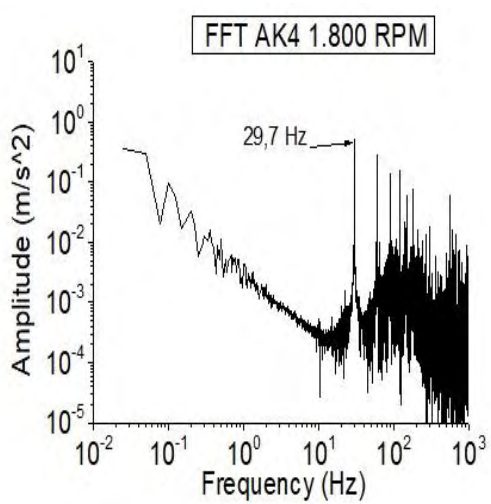
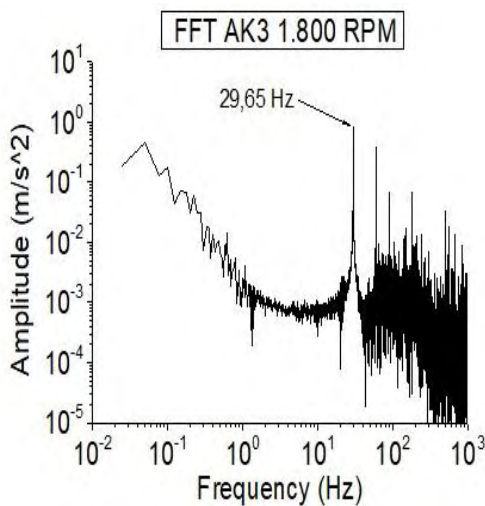
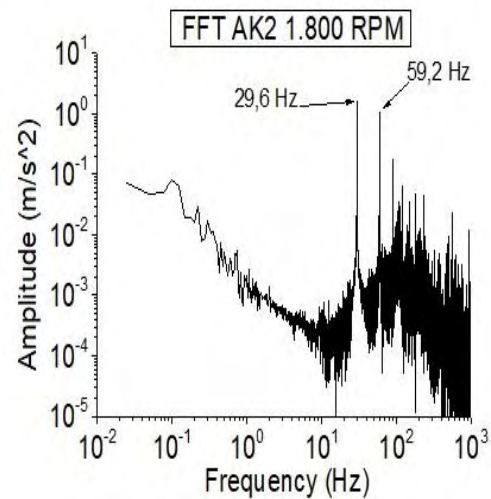
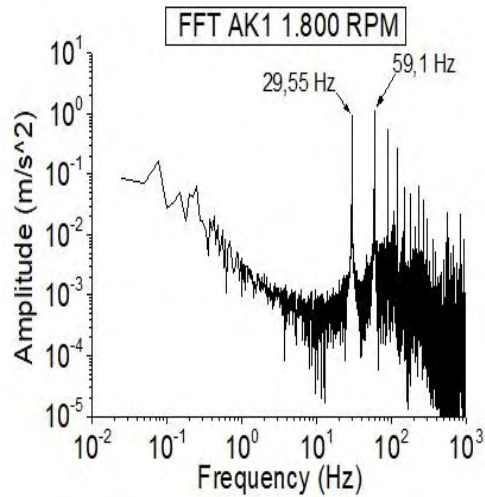


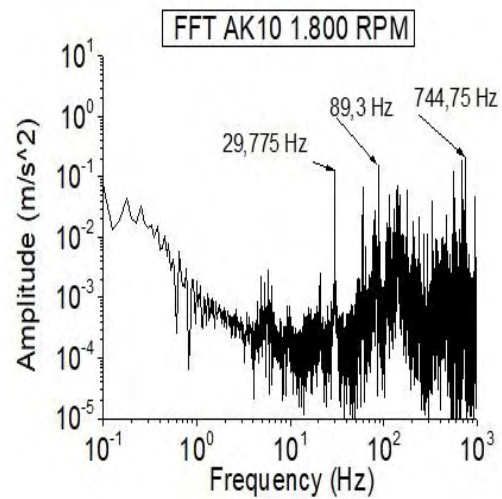
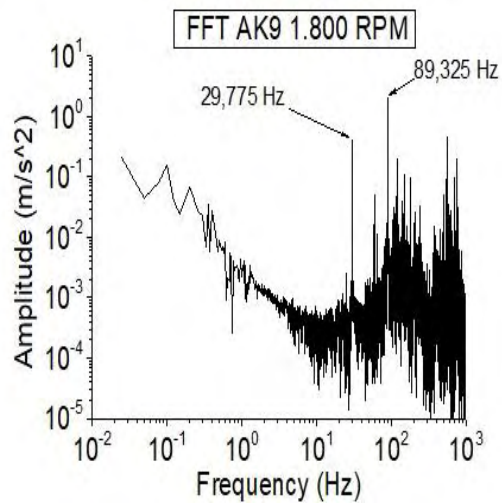
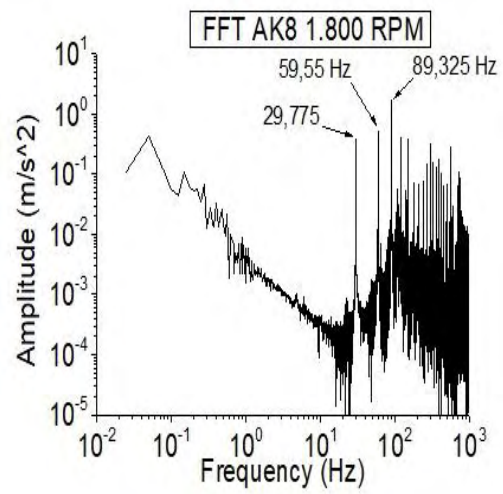
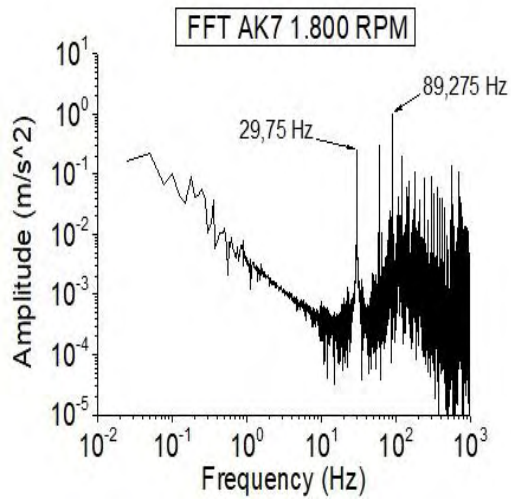


Διάγραμμα 7.4 : Αποτελέσματα FFT βάσης συμπιεστή για 2.400 RPM.

7.3 Αποτελέσματα δονήσεων για λειτουργία στις 1800 RPM

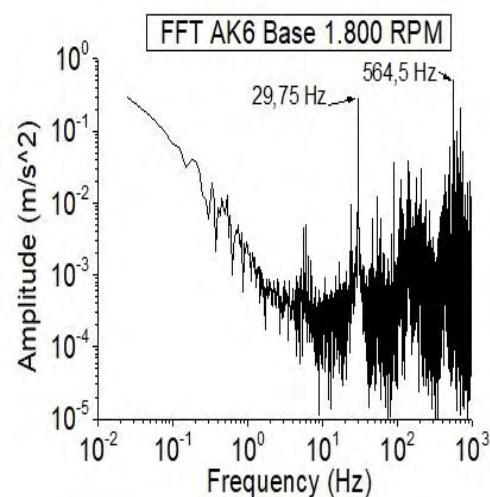
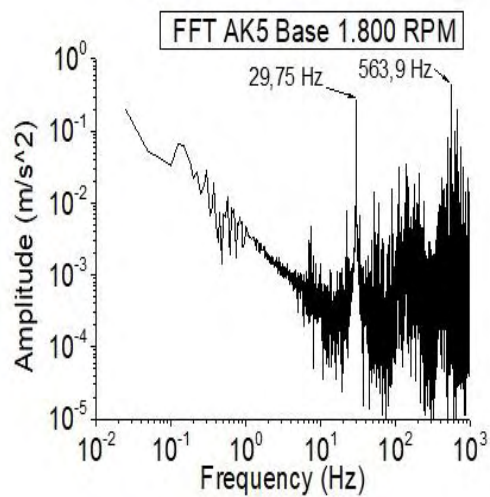
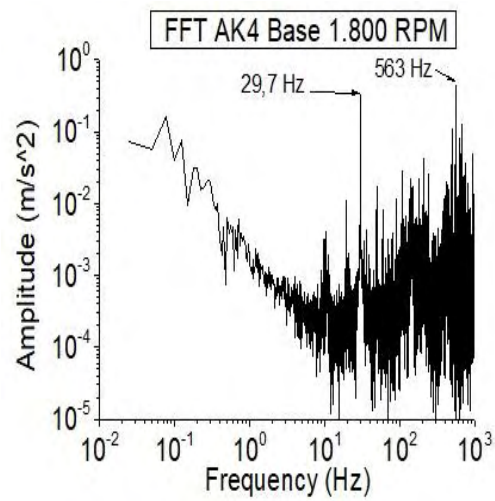
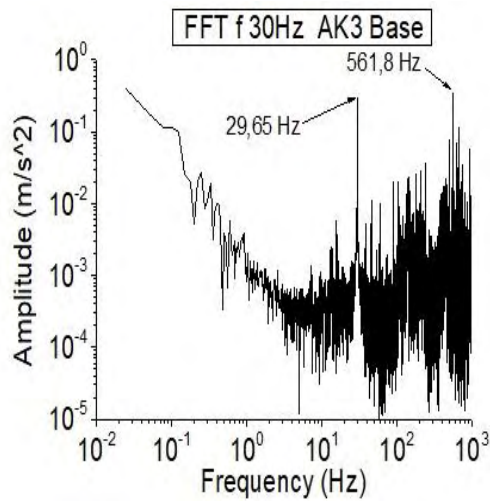
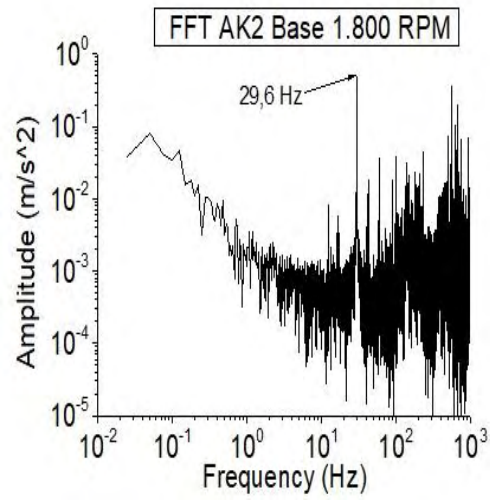
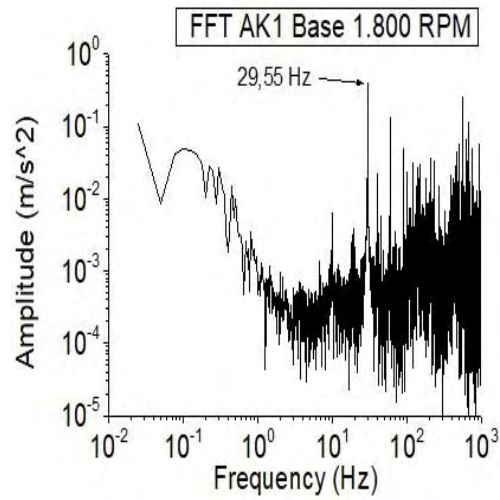
Θέση : Έξοδος ροής από ακροφύσιο.

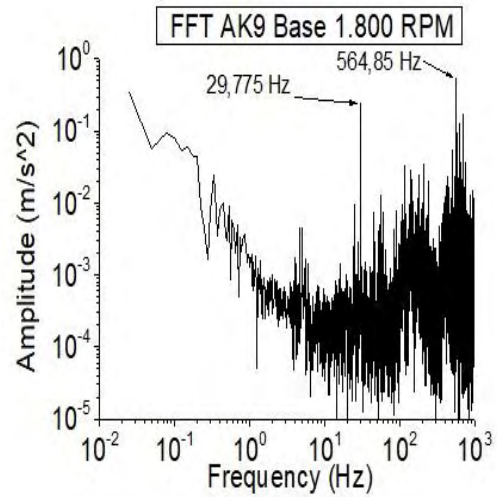
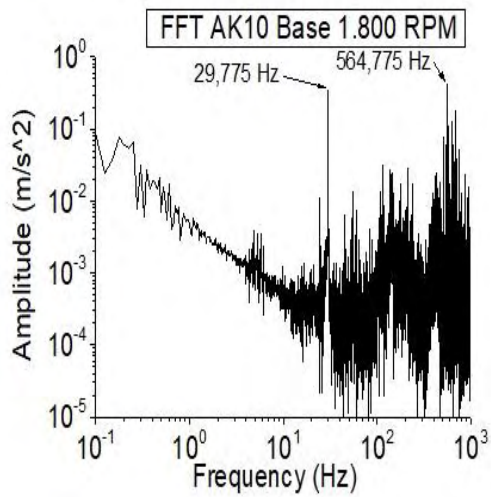
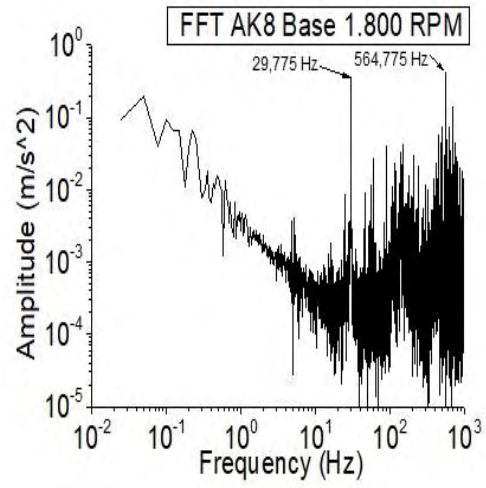
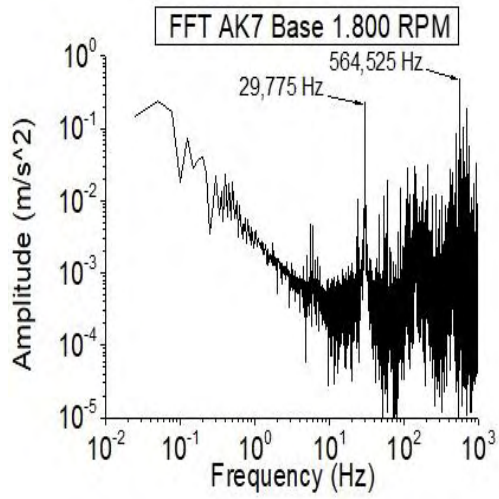




Διάγραμμα 7.5 : Αποτελέσματα FFT ακροφυσίων για 1.800 RPM.

Θέση : Βάση του συμπιεστή.

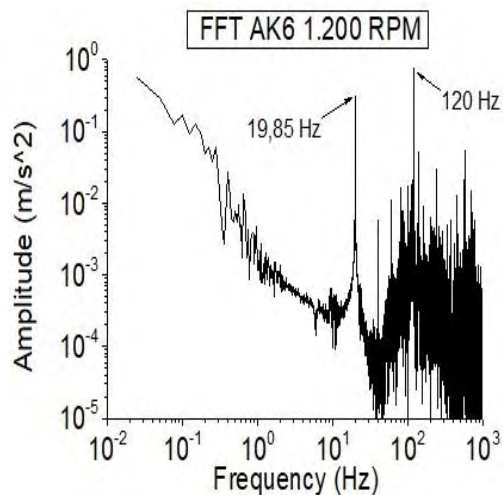
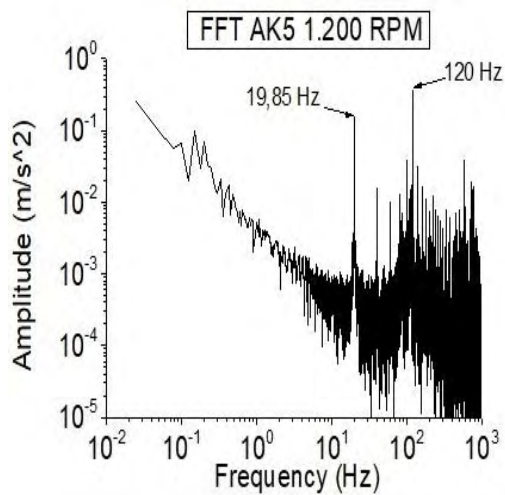
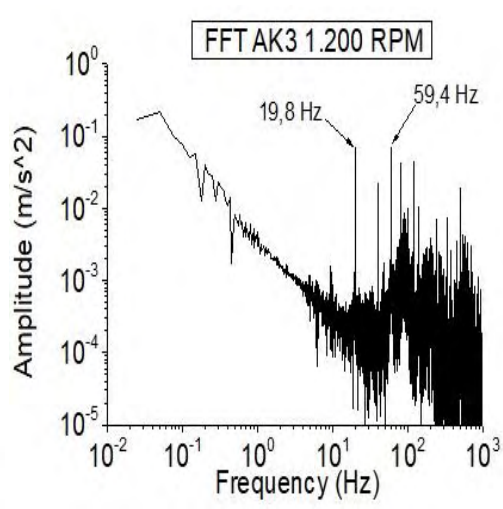
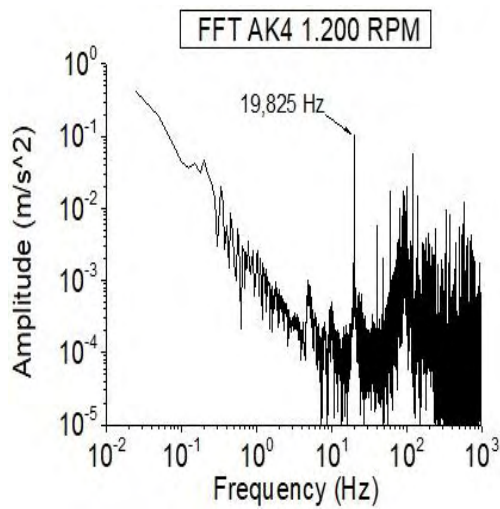
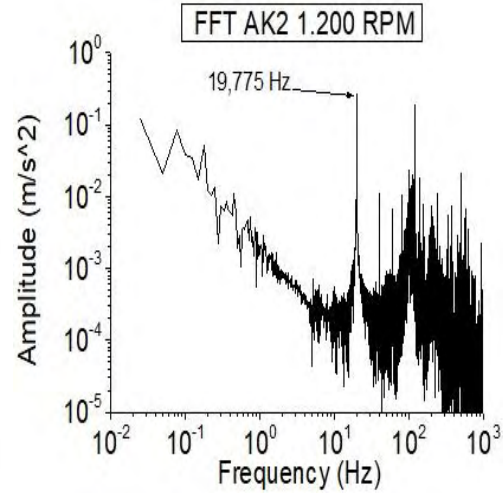
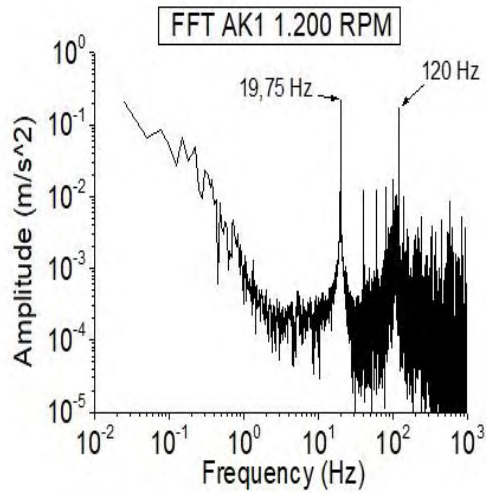


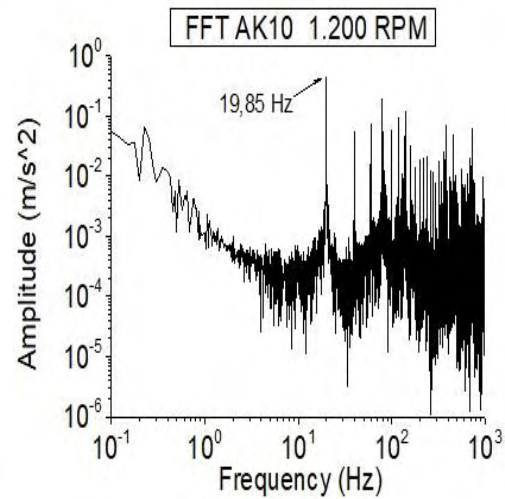
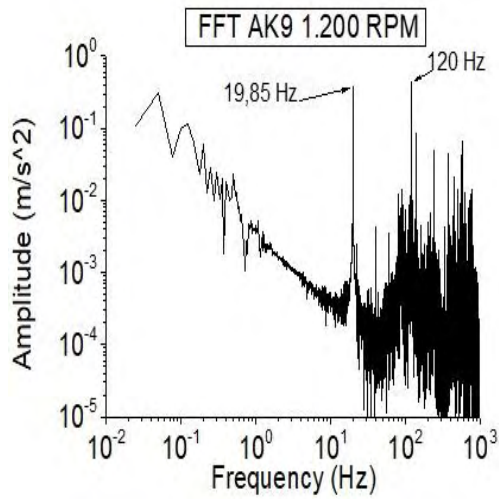
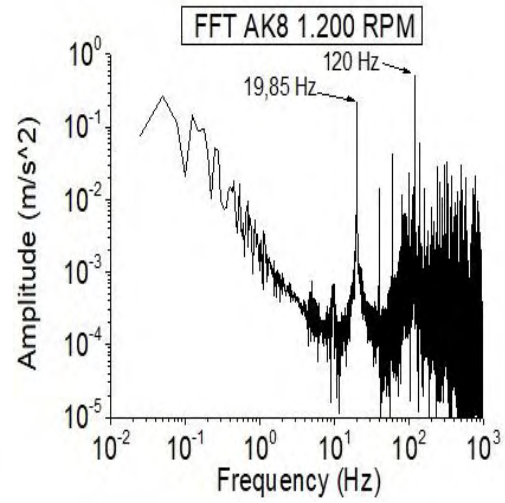
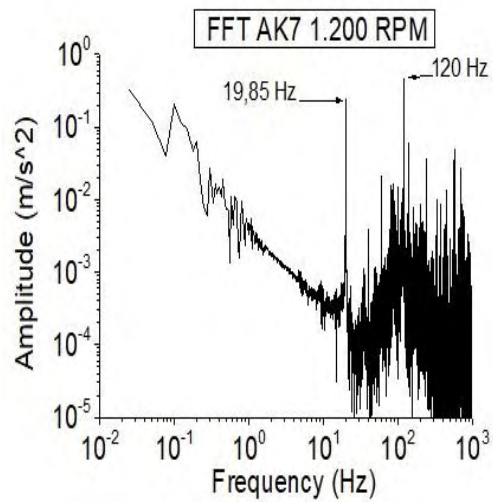


Διάγραμμα 7.6 : Αποτελέσματα FFT βάσης συμπίεστη για 1.800 RPM.

7.4 Αποτελέσματα δονήσεων για λειτουργία στις 1200 RPM

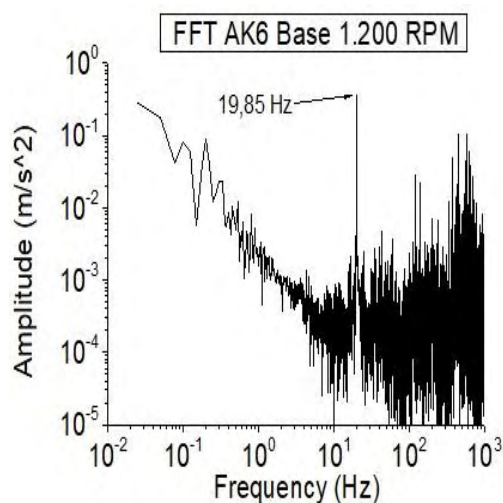
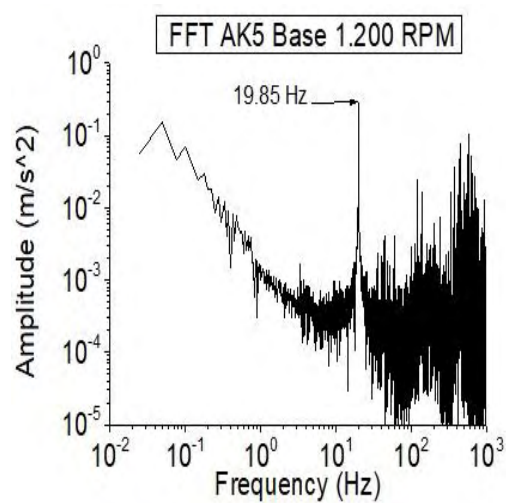
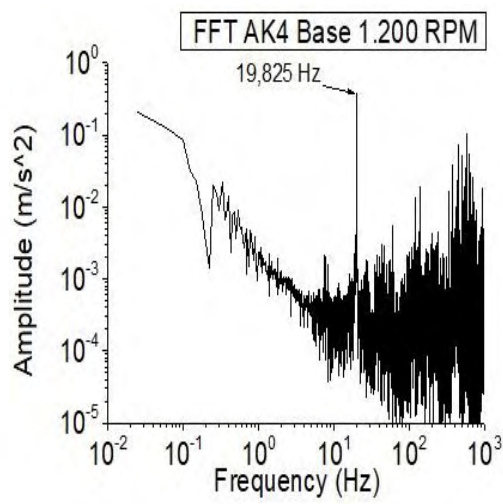
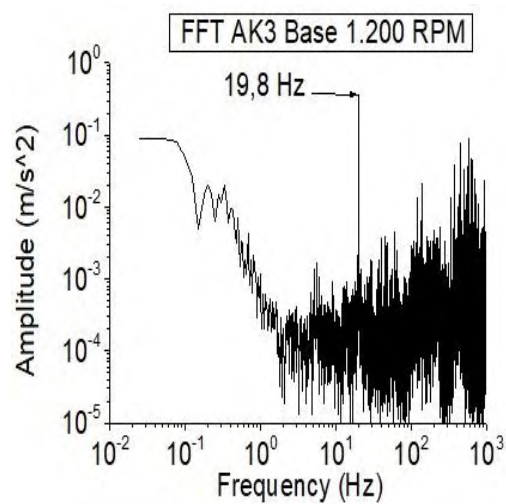
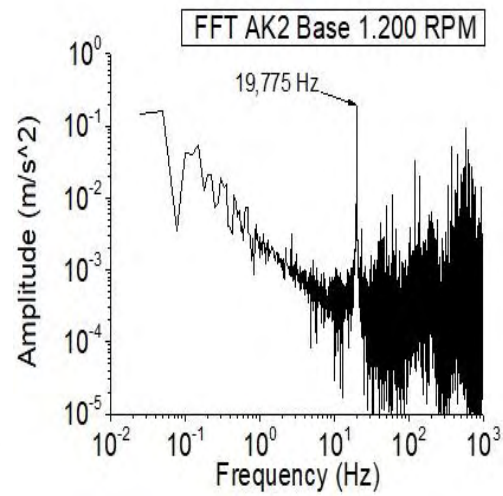
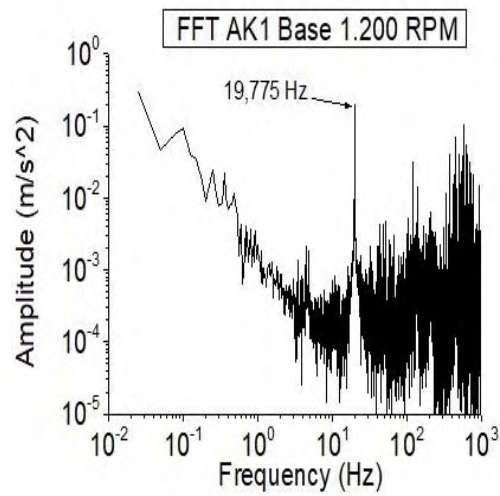
Θέση : Έξοδος ροής από ακροφύσιο.

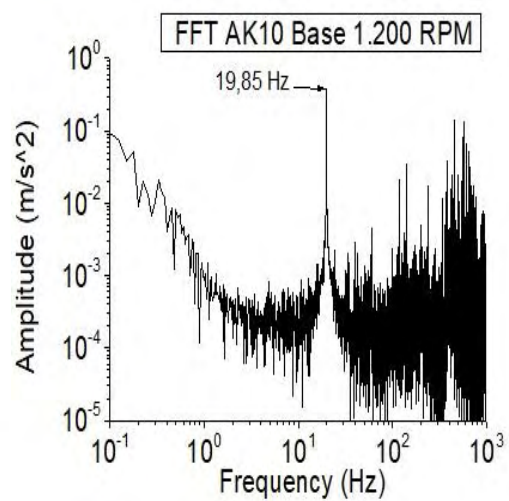
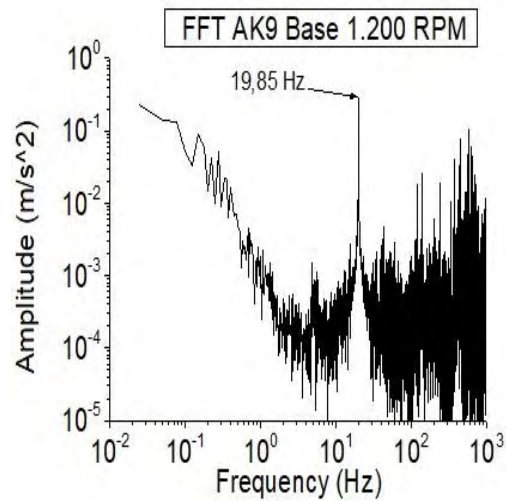
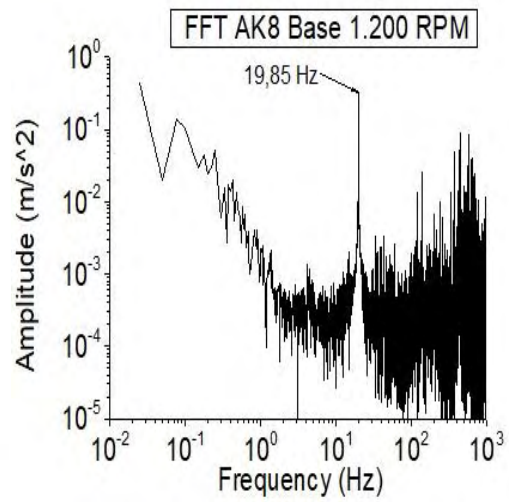
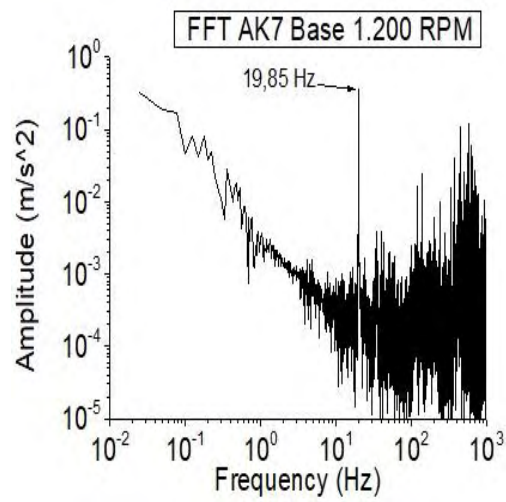




Διάγραμμα 7.7 : Αποτελέσματα FFT ακροφυσίων για 1.200 RPM.

Θέση : Βάση του συμπιεστή.

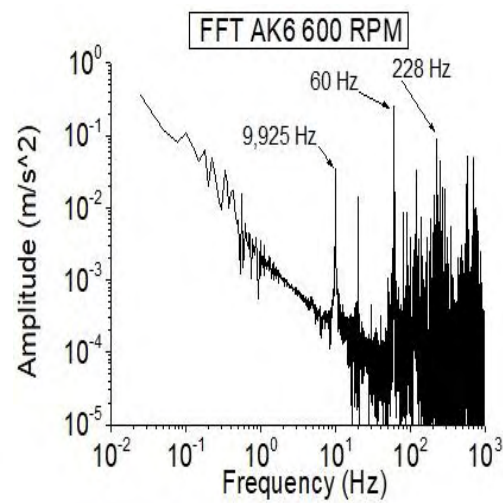
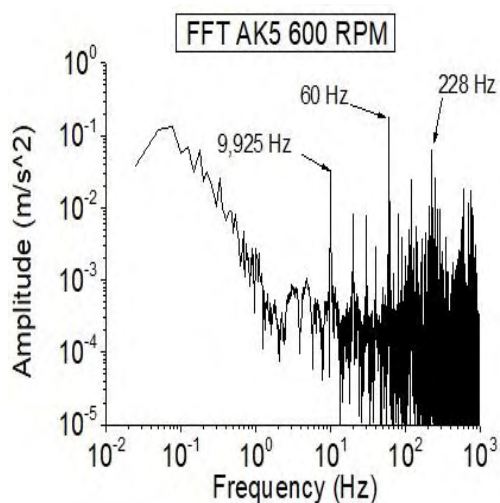
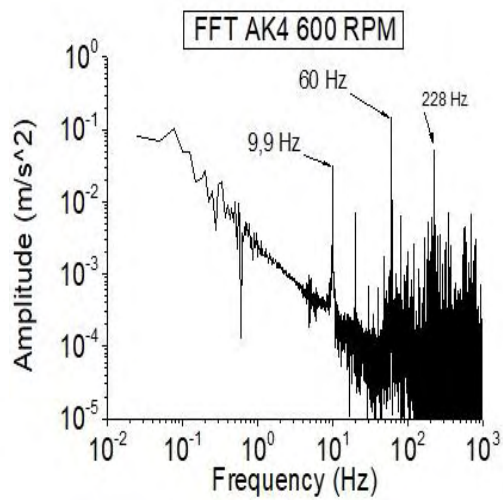
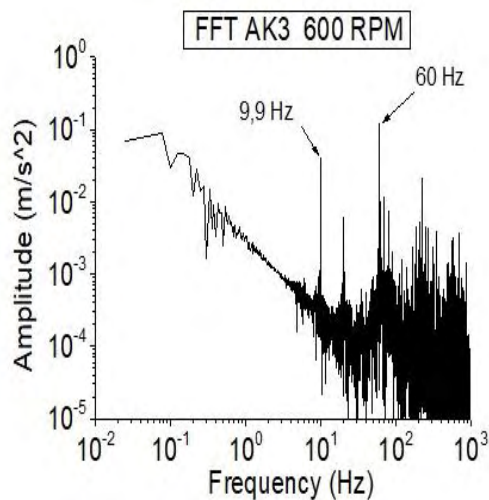
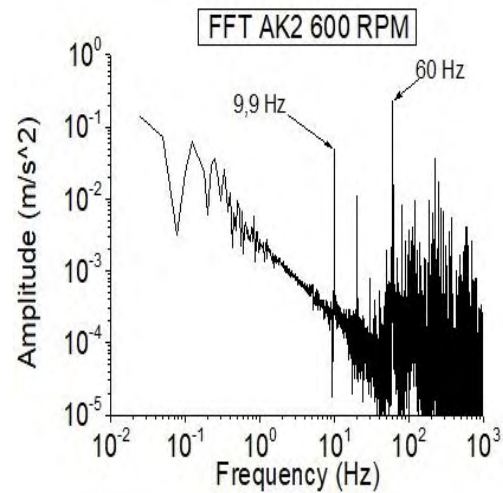
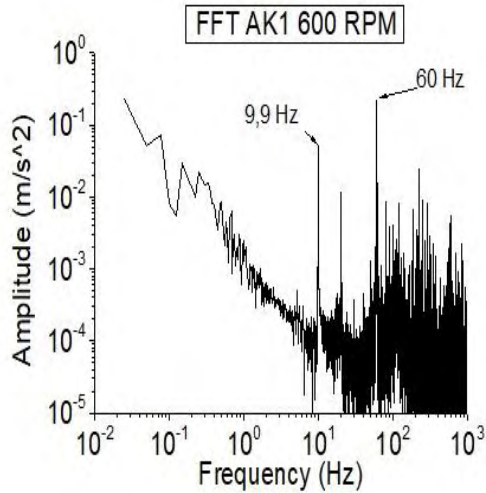


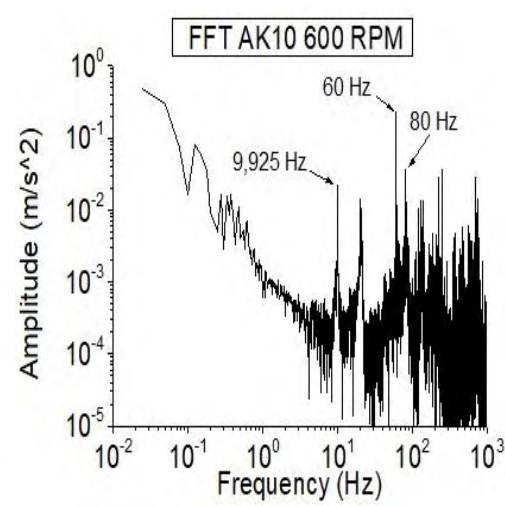
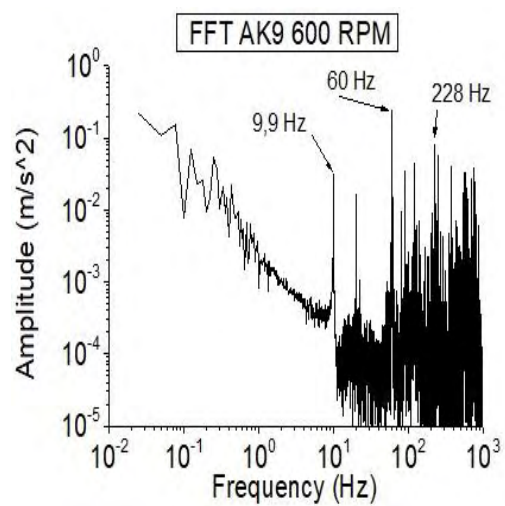
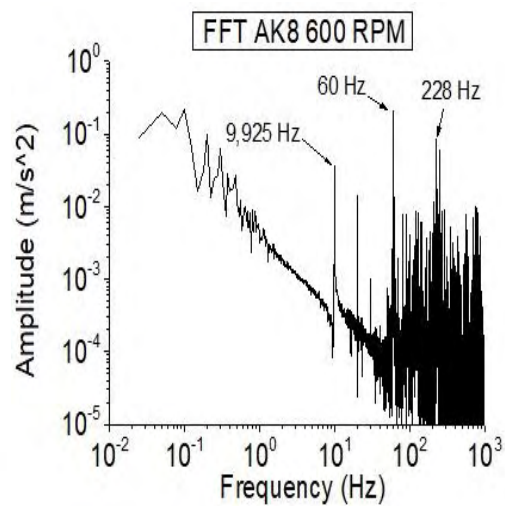
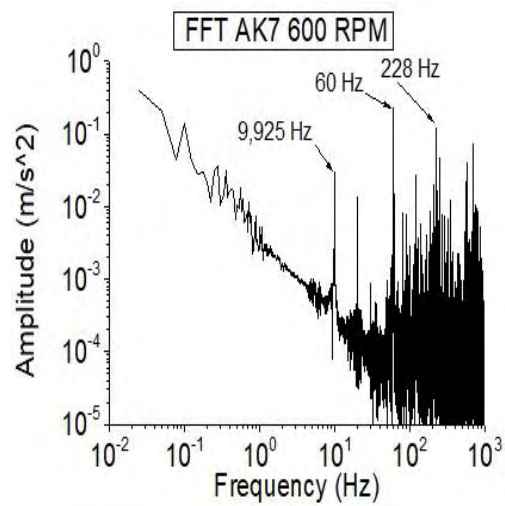


Διάγραμμα 7.8 : Αποτελέσματα FFT βάσης συμπιεστή για 1.200 RPM.

7.5 Αποτελέσματα δονήσεων για λειτουργία στις 600 RPM

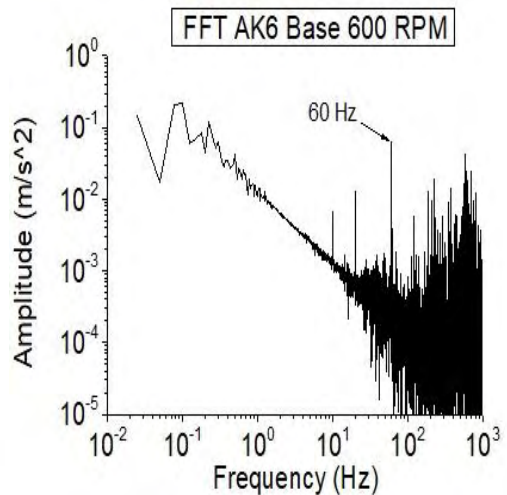
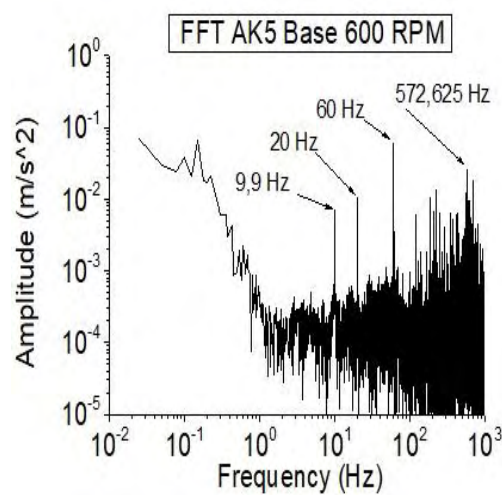
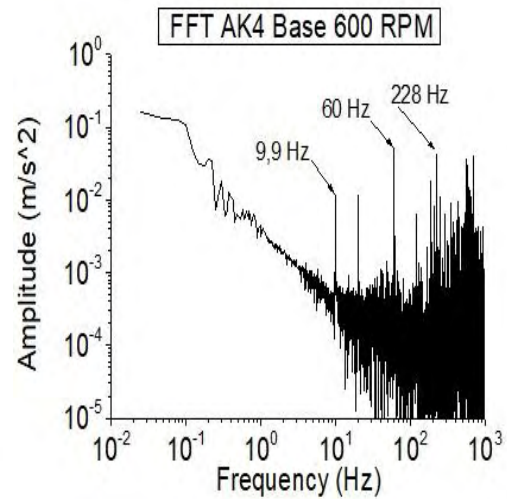
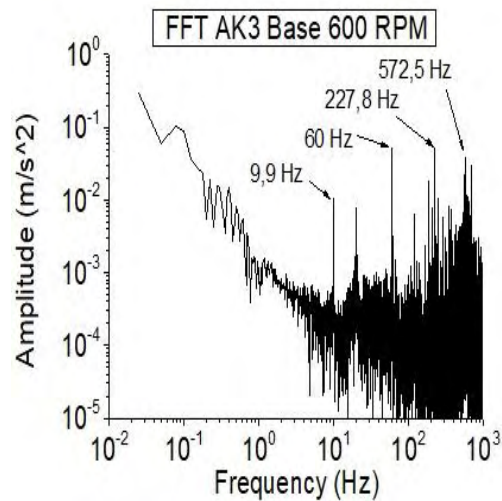
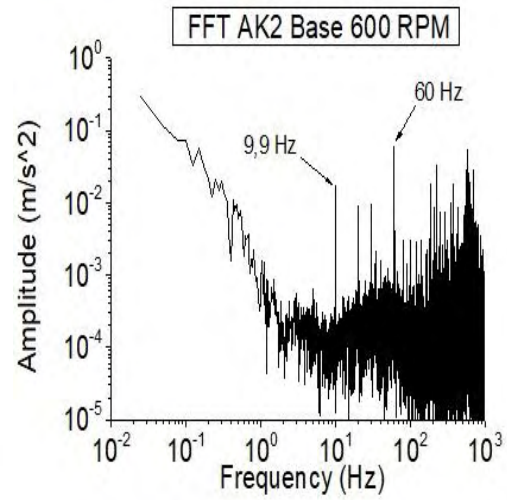
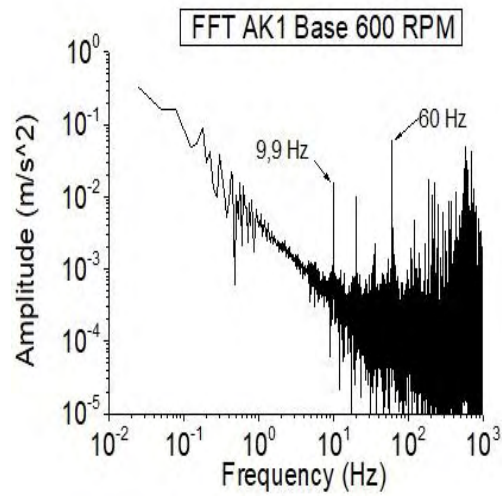
Θέση : Έξοδος ροής από ακροφύσιο.

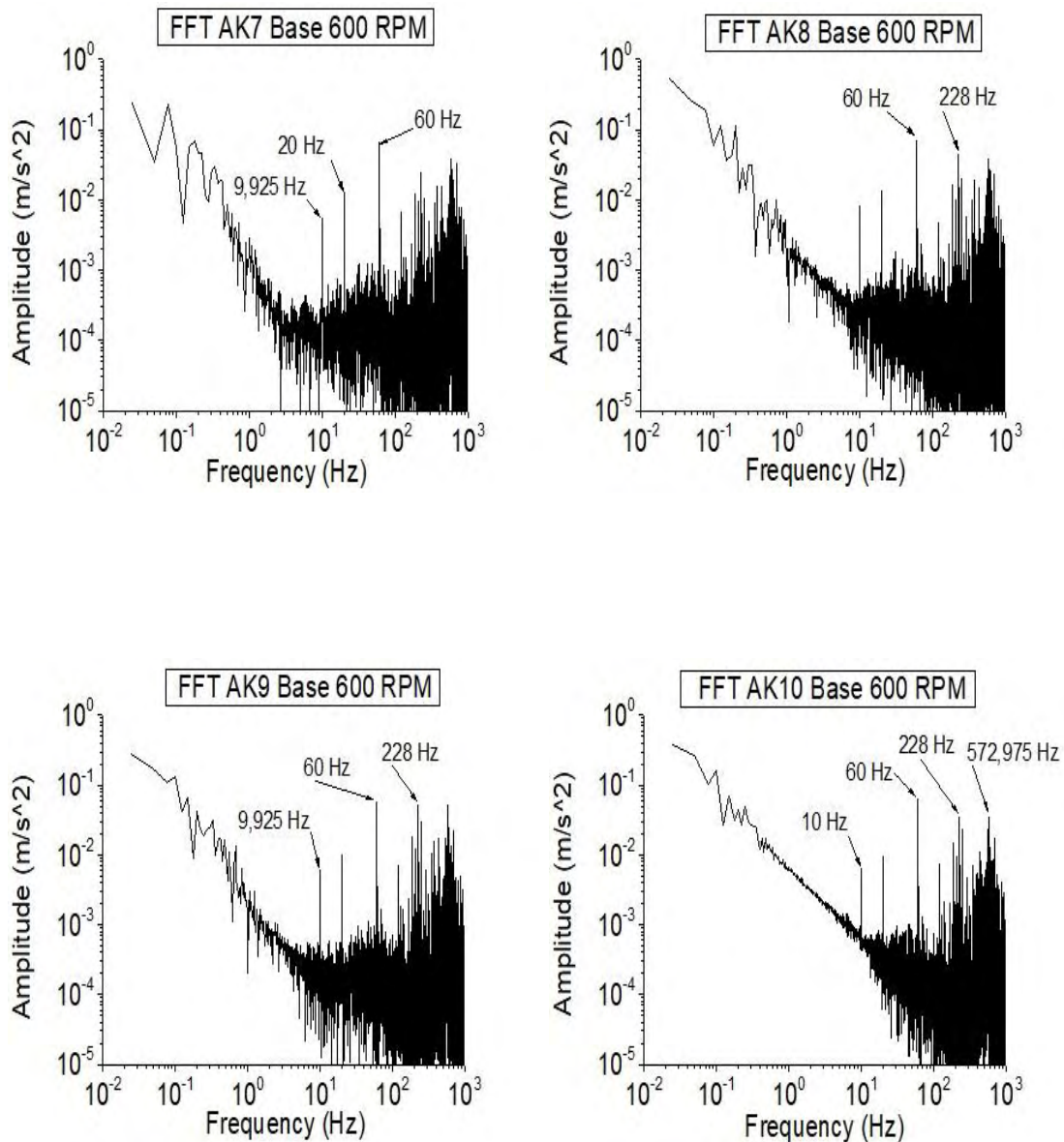




Διάγραμμα 7.9 : Αποτελέσματα FFT ακροφυσίων για 600 RPM.

Θέση : Βάση του συμπιεστή.





Διάγραμμα 7.10 : Αποτελέσματα FFT βάσης συμπίεστη για 600 RPM.

Από τα αποτελέσματα μπορούμε να δούμε όλο το φάσμα των συχνοτήτων με το οποίο ταλαντώνεται ο συμπίεστης στην περιοχή της βάσης του και της εξόδου της ροής για 100 διαφορετικές παροχές. Σε κάθε διάγραμμα βλέπουμε ότι είναι μεγάλος ο αριθμός των διαφορετικών ταλαντώσεων με τις οποίες ταλαντώνεται, αλλά είναι ορισμένες συχνότητες που ξεχωρίζουν εξαιτίας του πλάτους ταλάντωσής τους, το οποίο είναι σημαντικά μεγαλύτερο από των υπολοίπων συχνοτήτων. Οι συχνότητες αυτές θεωρούνται κύριες συχνότητες ταλάντωσης και πρέπει να ληφθούν κυρίως υπόψη για την μελέτη δομικής ακεραιότητας οποιασδήποτε διάταξης.

Σε μεγαλύτερες στροφές (από 1.200 RPM και πάνω), κυρίως, παρατηρείται το φαινόμενο η κύρια ταλάντωση να έχει την ίδια συχνότητα με την συχνότητα περιστροφής των πτερυγίων του συμπιεστή, δηλαδή με άλλα λόγια τις στροφές λειτουργίας του συμπιεστή. Σε μικρότερες στροφές, ωστόσο, δεν μπορεί να πει κανείς ξεκάθαρα το ίδιο, καθώς εμφανίζονται και άλλες συχνότητες με σημαντικά πλάτη ταλάντωσης. Αλλά, και αυτές οι συχνότητες παρατηρείται ότι είναι πολλαπλάσια των στροφών λειτουργίας.

Μία άλλη παρατήρηση είναι ότι οι πολύ χαμηλές συχνότητες έχουν μεγάλα πλάτη ταλάντωσης, ενώ αυτά έχουν σταθερή πορεία πτώσης, στη λογαριθμική κλίμακα, με την αύξηση της συχνότητας μέχρι τα 10 Hz, απ' όπου και φαίνεται ότι σταματάει αυτή η σταθερή μείωση του πλάτους ταλάντωσης και έπειτα ξεχωρίζουν οι κύριες ταλαντώσεις.

Κεφάλαιο 8 Συσχέτιση θορύβου και έντασης της τύρβης

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις του θορύβου και της έντασης της τύρβης, όπως αυτές περιγράφηκαν στην παράγραφο 3.2.5. και 3.2.6 αντίστοιχα. Πρώτα, θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα κάθε μέτρησης ξεχωριστά και έπειτα θα γίνει συσχετισμός μεταξύ αυτών των δύο μεγεθών.

8.1 Αποτελέσματα μετρήσεων θορύβου

Τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις του θορύβου στην είσοδο και στην έξοδο του συμπιεστή φαίνονται στον πίνακα 8.1 :

	AK 1		AK 2		AK 3		AK 4		AK 5	
	Noise (db)		Noise (db)		Noise (db)		Noise (db)		Noise (db)	
RPM	Out	In	Out	In	Out	In	Out	In	Out	In
3000	107	117	106	117	102	115	100	115	98	113
2400	102	111	100	111	96	110	94	110	91	109
1800	94	107	91	107	90	105	89	104	84	104
1200	83	100	82	105	81	102	78	99	79	99
600	75	80	72	81	65	81	70	79	64	76

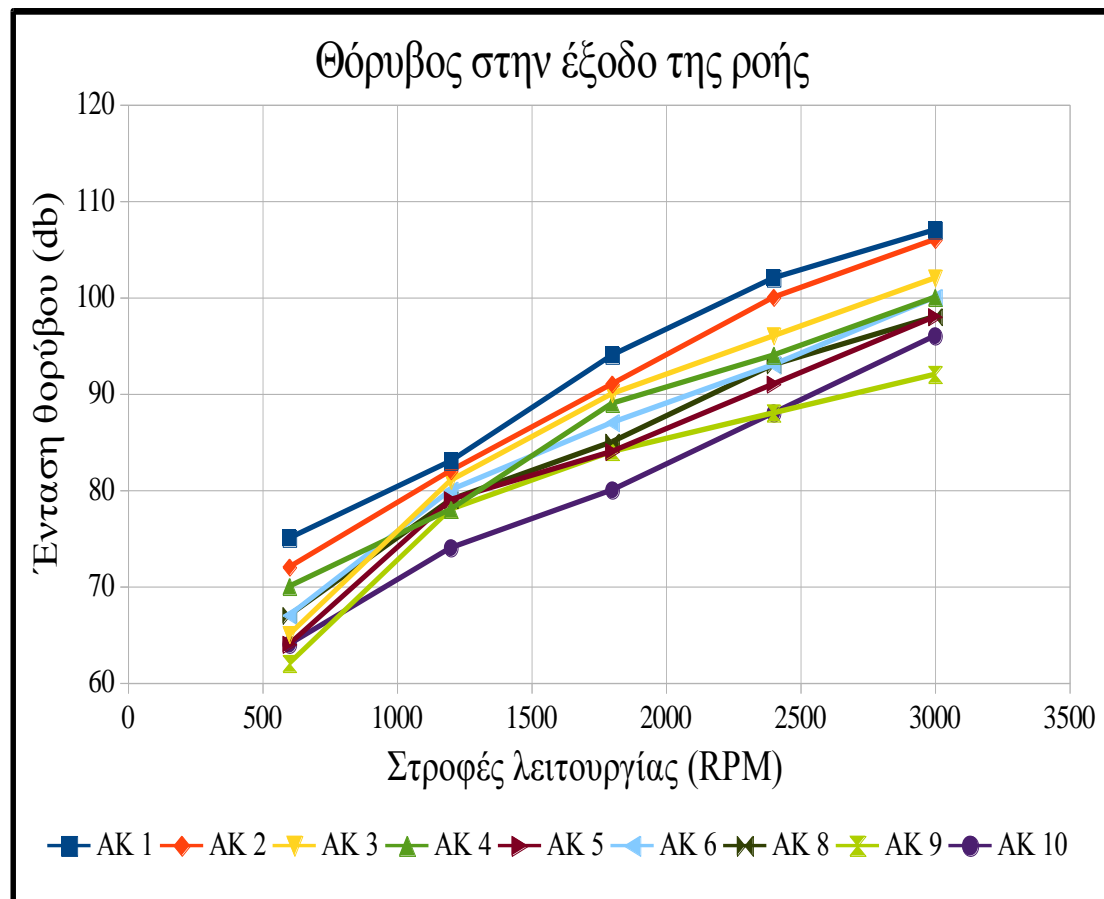
	AK 6		AK 8		AK 9		AK 10		
	Noise (db)		Noise (db)		Noise (db)		Noise (db)		
RPM	Out	In	Out	In	Out	In	Out	In	
3000	100	113	98	113	92	113	96	112	
2400	93	109	93	109	88	109	88	109	
1800	87	104	85	103	84	104	80	103	
1200	80	98	79	99	78	99	74	98	
600	67	77	67	76	62	76	64	75	

Πίνακας 8.1 : Θόρυβος στην είσοδο και έξοδο του συμπιεστή για όλες τις στροφές λειτουργίας.

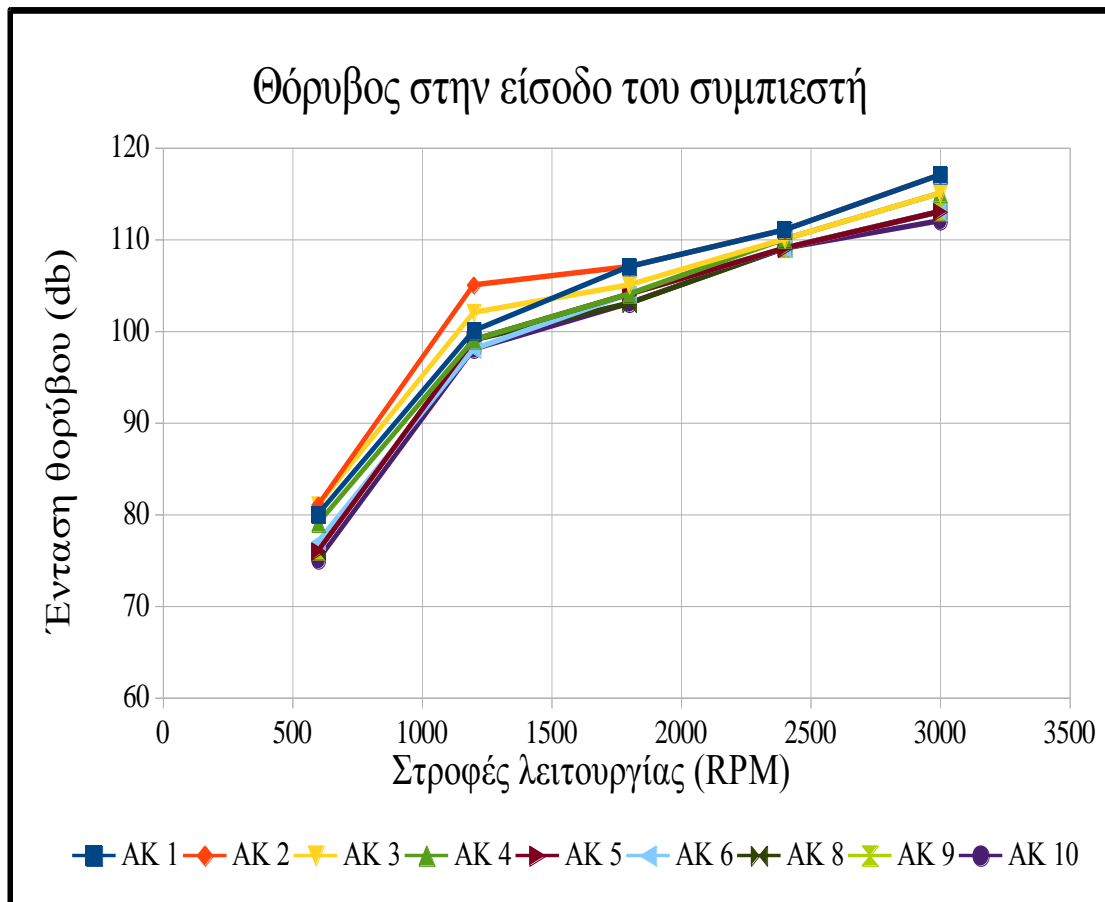
Στον πίνακα 8.1 στην έξοδο της ροής φαίνεται μείωση του θορύβου με την μείωση των στροφών λειτουργίας, κάτι που ήταν αναμενόμενο καθώς σε λιγότερες στροφές λειτουργίας και η εξερχόμενη ροή έχει μικρότερη ισχύ από ότι σε μεγαλύτερες στροφές λειτουργίας. Ακόμη, παρατηρείται ότι ο θόρυβος μειώνεται με την μείωση της διατομής εξόδου της ροής, ή με άλλα λόγια με την μείωση της παροχής της ροής.

Από την άλλη, στην είσοδο του συμπιεστή αν και υπάρχει μείωση του θορύβου με τις στροφές λειτουργίας, η μείωση με την αλλαγή της παροχής είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με αυτή που παρουσιάζεται για την έξοδο της ροής.

Για καλύτερη κατανόηση, τα αποτελέσματα του πίνακα 8.1 παρουσιάζονται σε μορφή διαγραμμάτων παρακάτω, ένα για το θόρυβο στην έξοδο της ροής και ένα για την είσοδο της ροής.



Διάγραμμα 8.1 : Θόρυβος στην έξοδο της ροής.



Διάγραμμα 8.2 : Θόρυβος στην είσοδο του συμπιεστή.

Από τα διαγράμματα 8.1 και 8.2 φαίνεται καλύτερα η μικρότερη κλίση των καμπυλών θορύβου στην είσοδο του συμπιεστή από ότι των καμπυλών θορύβου στην έξοδο της ροής, που δείχνει ότι στην είσοδο ο θόρυβος επηρεάζεται λιγότερο με την αλλαγή των στροφών απ' ότι στην έξοδο της ροής.

Ακόμη φαίνονται οι καμπύλες του θορύβου για την είσοδο του συμπιεστή να είναι περισσότερο συγκεντρωμένες, έναντι των καμπυλών του διαγράμματος για την έξοδο της ροής, όπου η καμπύλη κάθε ακροφυσίου μικρότερου από του προηγούμενου φαίνεται να μετατοπίζεται, με ομοιόμορφο για όλες τις καμπύλες τρόπο, προς τα κάτω.

8.2 Αποτελέσματα μετρήσεων τύρβης και συσχέτιση με θόρυβο

Η μέτρηση της τύρβης πραγματοποιήθηκε για το ακροφύσιο νούμερο 3, τόσο στη θέση που είχε τοποθετηθεί το ηχομέτρο στη προηγούμενη παράγραφο όσο και στη θέση του κέντρου της ροής. Οι μετρήσεις έγιναν για στροφές λειτουργίας από 3.000 RPM έως 1.200 RPM. Τα δεδομένα μετά από την επεξεργασία που είχαν, οποία παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο της μεθοδολογίας του πειράματος, συγκεντρώθηκαν σε πίνακα και παρουσιάζονται παρακάτω :

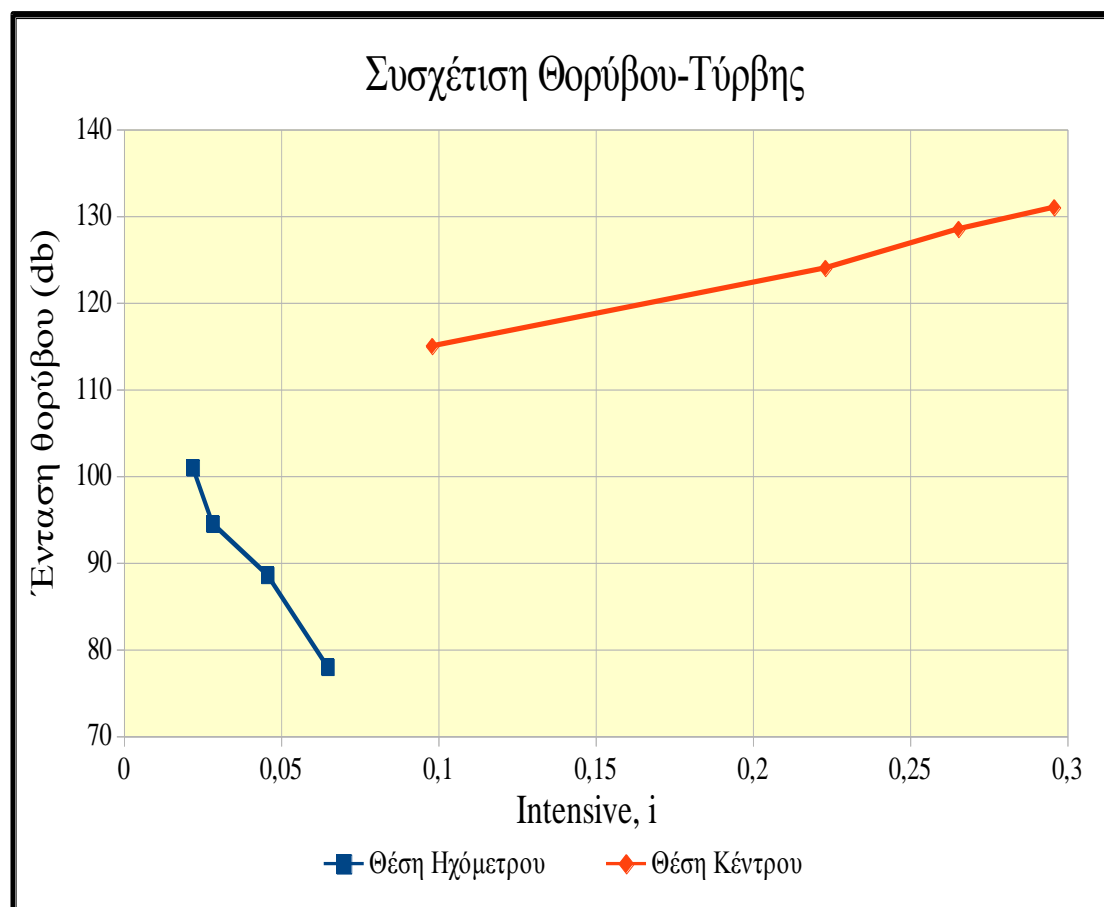
RPM	Θέση Ηχομέτρου			
	Real Vmean (m/s)	Real St.Div. (m/s)	Intensive	db
3000	3,68224	0,08068	0,02191	101
2400	3,68434	0,10397	0,02822	94,5
1800	3,61492	0,1648	0,04559	88,6
1200	3,47065	0,22467	0,06473	78

RPM	Θέση Κέντρου			
	Real Vmean (m/s)	Real St.Div. (m/s)	Intensive	db
3000	9,25621	2,73754	0,29575	131
2400	6,75467	1,7922	0,26533	128,5
1800	5,16139	1,15105	0,22301	124
1200	3,65837	0,35845	0,09798	115

Πίνακας 8.2 : Αποτελέσματα τύρβης για το ακροφύσιο 3 στη θέση του ηχομέτρου και στο κέντρο της ροής.

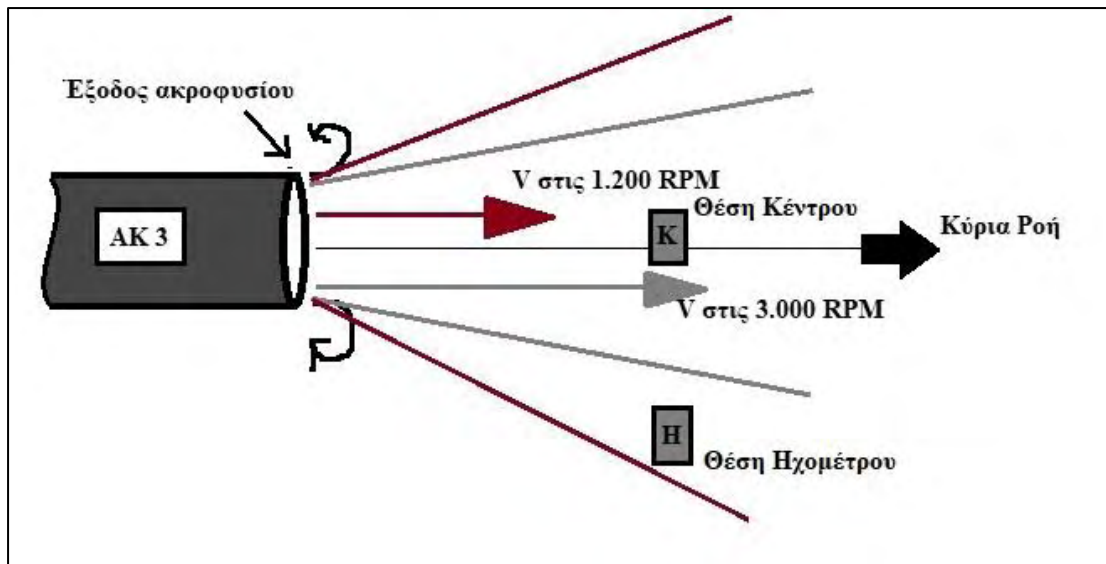
Επειδή οι μετρήσεις της τύρβης στο ακροφύσιο 3 και η μέτρηση του θορύβου της παραγράφου 8.1 έγιναν διαφορετικές ημέρες είναι πολύ πιθανό να υπήρχαν αποκλίσεις λόγω των περιβαλλοντικών παραγόντων οι οποίοι μεταβάλλονται. Συνεπώς, για την εξάλειψη τέτοιου σφάλματος και την καλύτερη συσχέτιση μεταξύ τύρβης και θορύβου, ξανάγινε μέτρηση του θορύβου ταυτόχρονα με τη μέτρηση Hot-Wire στις ίδιες θέσεις, ηχομέτρου παραγράφου 8.1 και κέντρου (Σχήμα 8.1). Πράγματι από τον πίνακα 8.2 παρατηρούνται μεταβολές στην ένταση θορύβου για το ακροφύσιο 3 στην έξοδο του σε σχέση με τις μετρήσεις του πίνακα 8.1, μικρές μεν αλλά υπαρκτές.

Με βάση λοιπόν τον πίνακα 8.2 σχεδιάζεται το διάγραμμα που ακολουθεί και συσχετίζει την ένταση της τύρβης με την ένταση του θορύβου στο κάθε σημείο μέτρησης.



Διάγραμμα 8.3 : Συσχέτιση θορύβου με την τύρβη στη ροή του ακροφυσίου 3.

Από το διάγραμμα 8.3 παρατηρείται μία τελείως διαφορετική συσχέτιση του θορύβου με την τύρβη για τη θέση του ηχομέτρου και για τη θέση του κέντρου της ροής. Στη θέση του ηχομέτρου φαίνεται ότι με αύξηση της έντασης του θορύβου μειώνεται η ένταση της τύρβης. Αυτό θα μπορούσε να εξηγηθεί ως ότι σε χαμηλότερες στροφές λειτουργίας, δηλαδή και σε μικρότερο θόρυβο όπως προκύπτει από την παράγραφο 8.1, η ταχύτητα εξόδου της ροής είναι μικρότερη και συνεπώς οι στροβιλότητες μετακινούνται στη διεύθυνση της κύριας ροής με μικρότερη ταχύτητα, επιτρέποντάς τες στο χρόνο να επεκταθούν περισσότερο κατά τη κάθετη διεύθυνση της ροής. Από την άλλη όταν η ταχύτητα εξόδου μεγαλώνει η επέκταση των στροβίλων στην κάθετη της ροής διεύθυνση είναι μικρότερη, καθώς κινείται γρηγορότερα στη διεύθυνση της ροής. Στο σχήμα 8.1 αναπαριστάται αυτή η διαφορά.



Σχήμα 8.1 : Επέκταση στροβίλων με τη μεταβολής της ταχύτητας εξόδου.

Στο σχήμα 8.1 οι γραμμές που φαίνονται να ανοίγουν για κάθε ταχύτητα διαφορετικά είναι η περιοχή που επηρεάζεται κυρίως από τους στροβίλους της ροής. Έτσι, στη θέση ηχομέτρου (H) της παραγράφου 8.1 η ένταση της τύρβης θα είναι εντονότερη σε μικρότερες ταχύτητες εξόδου από ότι σε μεγαλύτερες.

Όσον αφορά την καμπύλη έντασης τύρβης στο κέντρο της ροής βλέπουμε από το διάγραμμα 8.3 ότι αυξάνει με την αύξηση του θορύβου, και συνεπώς με την αύξηση της ταχύτητας της κύριας ροής. Εδώ ακριβώς επειδή η μέτρηση γίνεται στο κέντρο, όλες οι μετρήσεις βρίσκονται σε περιοχή όπου επηρεάζεται από τους στροβίλους και έτσι φαίνεται ότι ο θόρυβος σχετίζεται με τα επίπεδα έντασης της τύρβης με σχεδόν αναλογικό ρυθμό εάν παρατηρηθεί η κλίση της καμπύλης του διαγράμματος 8.3.

Κεφάλαιο 9 Εύρεση βαθμού απόδοσης συμπιεστή

Στο κεφάλαιο αυτό θα υπολογισθεί ο βαθμός απόδοσης του συμπιεστή μέσω της μέτρησης της ισχύς εισόδου, και του υπολογισμού της ισχύος εξόδου από προηγούμενες μετρήσεις διαφορικής πίεσης και παροχής ρευστού. Αυτός θα μεταβάλλεται συναρτήσει των στροφών, της παροχής και της τιμής της διαφοράς της πίεσης μεταξύ εισόδου και εξόδου του συμπιεστή. Ο υπολογισμός του γίνεται σύμφωνα με την παρακάτω σχέση :

$$\eta_{compressor} = \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} \quad (\Sigma\chi.9.1)$$

όπου, $\eta_{compressor}$ ο βαθμός απόδοσης του συμπιεστή

P_{OUT} η ισχύς εξόδου του συμπιεστή

P_{IN} η ισχύς εισόδου του συμπιεστή

Κατά την παροχή ισχύος στον συμπιεστή μετρήθηκαν από το δίκτυο η τάση (V), η ένταση του ρεύματος (A) και ο συντελεστής ισχύος (cosφ). Η ισχύς εισόδου (P_{IN}) που υπολογίζεται για κάθε τιμή των στροφών λειτουργίας θεωρείται σταθερή ανεξάρτητα με την μεταβολή της διατομής εξόδου του συμπιεστή και εξαρτάται αποκλειστικά από τις στροφές του συμπιεστή. Η τιμή της φαίνεται στον πίνακα που ακολουθεί :

Ισχύς εισόδου (P_{IN})						
$f_{Inverter}$ (Hz)	RPM	f_{AC} (Hz)	Volts	Amperes	cosφ	$P_{IN,TRUE}$ (Watt)
50	3000	49,91	225	2,77	0,62	386,4
40	2400	50,1	225,7	1,931	0,6	261,5
30	1800	50,06	226,2	1,361	0,57	175,5
20	1200	50,02	226,7	0,97	0,55	120,9
10	600	50,06	226,2	0,787	0,54	96,1
0	0	50,1	226,7	0,305	0,51	35,3
OFF	0	50,1	227	0,107	0,45	10,9

Πίνακας 9.1 : Υπολογισμός εισερχόμενης ισχύος του συμπιεστή.

Ο συμπιεστής λειτούργησε σε διαφορετικές στροφές και για μεταβαλλόμενες διατομές εξόδου. Σε κάθε μία από αυτές τις περιπτώσεις η παροχή ροής αέρα μεταβαλλόταν, καθώς επίσης και η τιμή της διαφορικής πίεσης μεταξύ εισόδου και εξόδου του συμπιεστή. Έχοντας τα αποτελέσματα από αυτές τις μεταβολές από τα κεφάλαια 5 και 6, μπορεί να μετρηθεί η ισχύς που προσδόθηκε στο ρευστό, δηλαδή στην έξοδο του συμπιεστή (P_{OUT}). Ο τρόπος υπολογισμού φαίνεται παρακάτω.

Η ισχύς που μεταφέρθηκε στο ρευστό από τον συμπιεστή μπορεί να εκφραστεί ως:

$$P_{OUT} = \dot{m} \cdot w \quad (\text{Σχ. 9.2})$$

όπου, \dot{m} ο ρυθμός παροχής μάζας (kg/s)

w το ειδικό έργο (Nm/kg, J/kg)

Το ειδικό έργο w μπορεί να εκφραστεί :

$$w = g \cdot h \quad (\text{Σχ. 9.3})$$

όπου, h ύψος στάθμης για υγρά ρευστά (m)

g η επιτάχυνση της βαρύτητας (9.81 m/s²)

Ο ρυθμός μάζας \dot{m} μπορεί να εκφραστεί :

$$\dot{m} = \rho \cdot \dot{V} \quad (\text{Σχ. 9.4})$$

όπου, ρ η πυκνότητα του ρευστού (kg/m³)

\dot{V} η ογκομετρική παροχή (m³/s)

Συνδυάζοντας τις σχέσεις 9.2-9.4 η ισχύς που αποδίδεται στο ρευστό από το συμπιεστή (ή από αντλία) μπορεί να εκφραστεί ως εξής :

$$P_{OUT} = \rho \cdot \dot{V} \cdot g \cdot h \quad (\text{Σχ. 9.5})$$

Με το ειδικό έργο μπορεί να εκφραστεί ως :

$$\gamma = \rho \cdot g \quad (\text{Σχ. 9.6})$$

όπου, γ το ειδικό βάρος (N/m³)

η σχέση 9.5 μπορεί να τροποποιηθεί, ώστε η αποδιδόμενη από το συμπιεστή ισχύς στο ρευστό να μπορεί να εκφραστεί ως εξής :

$$P_{OUT} = \gamma \cdot \dot{V} \cdot h \quad (\text{Σχ. 9.7})$$

Εφόσον το ύψος του ρευστού μπορεί να εκφραστεί και ως :

$$h = (p_2 - p_1) / \gamma \quad (\text{Σχ. 9.8})$$

από τις σχέσεις 9.7 και 9.8 η ισχύς που αποδίδει ο συμπιεστής στο ρευστό μπορεί να εκφραστεί ως :

$$P_{OUT} = \dot{V} \cdot (p_2 - p_1) \quad (\text{Σχ. 9.9})$$

με p_2 και p_1 τις ολικές πιέσεις εξόδου και εισόδου, αντίστοιχα.

Από την σχέση 9.9 υπολογίζεται η ισχύς που αποδίδει ο συμπιεστής στο ρευστό.

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών αυτών φαίνονται στον παρακάτω πίνακα :

f_{Inverter} (Hz)	RPM	P_{OUT} (Watt)									
		AK 1	AK 2	AK 3	AK 4	AK 5	AK 6	AK8	AK9	AK10	
50	3000	55,12	65,6	49,52	38,53	17,72	11,68	5,75	4,75	3,54	
40	2400	28,8	33,66	25,64	20,04	8,99	6	2,87	2,38	1,77	
30	1800	12,041	14,15	10,91	8,7	3,67	2,45	1,18	0,96	0,74	
20	1200	3,5	4,22	3,2	2,73	1,07	0,72	0,34	0,28	0,22	
10	600	1,28	0,51	0,41	0,34	0,13	0,09	0,04	0,03	0,03	

Πίνακας 9.2 : Ισχύς εξόδου συμπιεστή κάθε περίπτωσης λειτουργίας.

Με γνωστές πλέον τις τιμές της ισχύς εισόδου και της ισχύς εξόδου μπορεί να υπολογισθεί ο βαθμός απόδοσης από τη σχέση 9.1. Τα αποτελέσματα συγκεντρώνονται στον παρακάτω πίνακα :

RPM	η									
	AK 1	AK 2	AK 3	AK 4	AK 5	AK 6	AK8	AK9	AK10	
3000	0,143	0,17	0,128	0,1	0,046	0,03	0,015	0,012	0,009	
2400	0,11	0,129	0,098	0,077	0,034	0,023	0,011	0,009	0,007	
1800	0,069	0,081	0,062	0,05	0,021	0,014	0,007	0,005	0,0042	
1200	0,029	0,035	0,026	0,023	0,009	0,006	0,003	0,002	0,0018	
600	0,013	0,005	0,004	0,004	0,001	0,001	0,0004	0,0003	0,0003	

Πίνακας 9.3 : Βαθμοί απόδοσης συμπιεστή και κάθε ακροφύσιο σε κάθε τιμή στροφών λειτουργίας.

Κεφάλαιο 10 Συμπεράσματα

Στο σημείο αυτό η μελέτη του φυγοκεντρικού συμπιεστή ως προς την ρευστομηχανική και δυναμική συμπεριφορά του ολοκληρώθηκε. Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθενται συγκεντρωτικά τα κυριότερα αποτελέσματα και συμπεράσματα από τη μελέτη αυτή.

Αρχικά, υπολογίστηκαν οι στροφές με οπτικό και επαγωγικό τρόπο, χωρίς σημαντική παρέκκλιση των αποτελεσμάτων στους δύο τρόπους. Έπειτα με την μέτρηση των ταχυτήτων εξόδου της ροής σχεδιάστηκαν τα προφίλ ταχυτήτων, από τα οποία βρέθηκε ότι η ροή δεν ήταν πλήρων ανεπτυγμένη, υπολογίστηκαν οι ογκομετρικές παροχές και η μέση ταχύτητα κάθε περίπτωσης λειτουργίας. Στα προφίλ ταχυτήτων φάνηκε και το σφάλμα που είχε η μέτρηση με ανεμόμετρο, καθώς μετρώντας ταχύτητες πιο κοντά στο κέντρο περισσότερο στέλεχος του ανεμόμετρου εισερχόταν στη ροή εξόδου με αποτέλεσμα η ταχύτητα να μειώνεται αντί να είναι μέγιστη στο κέντρο του σωλήνα. Σε συνδυασμό με την μέτρηση της στατικής πίεσης, μέσω της οποίας και της μέσης ταχύτητας υπολογίστηκαν οι ολικές πιέσεις, έγινε ο σχεδιασμός του χάρτη λειτουργίας του συμπιεστή, από τα πιο βασικά διαγράμματα που πρέπει να χει στη διάθεση του ένας μηχανικός για την επιλογή ενός συμπιεστή.

Στη συνέχεια, στην επιχείρηση συσχετισμού του θορύβου λειτουργίας με την ένταση της τύρβης της ροής διαπιστώθηκε ότι σε χαμηλότερες στροφές λειτουργίας, δηλαδή και σε μικρότερο θόρυβο, η ταχύτητα εξόδου της ροής είναι μικρότερη και συνεπώς οι στροβιλότητες μετακινούνται στη διεύθυνση της κύριας ροής με μικρότερη ταχύτητα, επιτρέποντάς τες στο χρόνο να επεκταθούν περισσότερο κατά τη κάθετη διεύθυνση της ροής. Από την άλλη όταν η ταχύτητα εξόδου μεγαλώνει η επέκταση των στροβίλων στην κάθετη της ροής διεύθυνση είναι μικρότερη, καθώς κινείται γρηγορότερα στη διεύθυνση της ροής.

Η μελέτη της ρευστομηχανικής συμπεριφοράς γίνεται με τον υπολογισμό του βαθμού απόδοσης του συμπιεστή για όλες τις διαφορετικές ογκομετρικές παροχές. Ο βαθμός απόδοσης που υπολογίστηκε από τις πειραματικές μετρήσεις είναι πολύ χαμηλότερος του αναμενόμενου, και αυτό μπορεί να δικαιολογηθεί ως ότι ο συμπιεστής δεν λειτουργούσε στο ιδανικό σημείο λειτουργίας του, ακόμη μπορεί με το χρόνο να υπήρχε φθορά τέτοια που να μείωνε την αποδοτικότητά του.

Τέλος, η μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς που είχε στόχο την ανάλυση των ταλαντώσεων στις οποίες υπόκειται ο συμπιεστής στην έξοδο της ροής και στη βάση του έδειξε ότι δεν υπήρχαν μεγάλες αποκλίσεις όσον αφορά τις συχνότητες των κύριων ταλαντώσεων, αλλά είχε σχεδόν αποκλειστικά να κάνει με την συχνότητα των στροφών λειτουργίας του συμπιεστή. Δηλαδή, η συχνότητα των στροφών λειτουργίας του συμπιεστή ταυτιζόταν με την συχνότητα των κύριων ταλαντώσεων, εκτός από τις περιπτώσεις των χαμηλών στροφών όπου παρατηρήθηκε αρκετές φορές οι συχνότητες των κύριων ταλαντώσεων να είναι ακέραια πολλαπλάσια της συχνότητας των στροφών λειτουργίας. Έχοντας τις φασματικές αναλύσεις από κάθε περίπτωση ο μηχανικός μπορεί πλέον να λάβει τα κατάλληλα μέτρα για την αποφυγή κάποιας αστοχίας είτε στη βάση που εδράζεται είτε στη σύνδεσή του με άλλα κλειστά ή ανοιχτά κυκλώματα κατά τη λειτουργία του.

Βιβλιογραφία

1. http://edume.myds.me/00_0070_e_library/10020/book_009/02.pdf
2. https://en.wikipedia.org/wiki/Gas_compressor
3. https://en.wikipedia.org/wiki/Scroll_compressor
4. Dr. Meherwan P. Boyce, Principles Of Operation And Performance Estimation Of Centrifugal Compressors, Houston Texas
5. Omar Vidal Garcia, Jaroslaw Blaszcak, Ph.D., Determination of the correlation between turbulence intensity and acoustic noise level, 2012
6. IRA NICE Bruel & Kjaer - Booklet - Measuring Vibration (1982)
7. University of Oslo
https://www.uio.no/studier/emner/matnat/math/MEK4450/h11/undervisningsmateriale/modul-5/Pipeflow_intro.pdf
8. Daniel Cricthon, Trinity Hall-Fan design and operation for ultra low noise, 2007
9. Noise Sources in Turbulent Shear Flows_ Fundamentals and Applications- Springer-Verlag Wien, 2013

Παράρτημα

Παράρτημα 1

Οι τιμές των μετρήσεων συνολικού επιπέδου για την άκρη των ακροφυσίων εμφανίζονται στον Πίνακα Π.1, ενώ για τη βάση του συμπιεστή για κάθε ακροφύσιο με το οποίο λειτουργεί στον Πίνακα Π.2.

Δονήσεις συνολικού επιπέδου στην άκρη των ακροφυσίων										
RPM	AK 1		AK 2		AK 3		AK 4		AK 5	
	Mean (m/s ²)	St.Div (m/s ²)	Mean (m/s ²)	St.Div (m/s ²)	Mean (m/s ²)	St.Div (m/s ²)	Mean (m/s ²)	St.Div (m/s ²)	Mean (m/s ²)	St.Div (m/s ²)
3000	0,058	1,776	-0,039	2,259	0,307	2,665	0,149	2,229	0,105	2,256
2400	0,109	1,359	-0,046	1,608	-0,015	0,819	0,111	1,052	-0,085	0,878
1800	-0,004	1,489	0,022	1,445	-0,106	0,931	-0,081	0,649	-0,038	0,801
1200	-0,05	0,305	-0,042	0,307	-0,049	0,257	0,105	0,369	-0,043	0,391
600	0,056	0,241	-0,153	0,218	-0,011	0,156	0,078	0,172	-0,114	0,229

RPM	AK 6		AK 7		AK 8		AK 9		AK 10	
	Mean (m/s ²)	St.Div (m/s ²)	Mean (m/s ²)	St.Div (m/s ²)	Mean (m/s ²)	St.Div (m/s ²)	Mean (m/s ²)	St.Div (m/s ²)	Mean (m/s ²)	St.Div (m/s ²)
3000	-0,873	2,636	-0,119	2,617	-0,371	2,332	-0,005	2,227	-0,051	1,67
2400	0,042	1,221	0,141	1,206	0,16	1,862	-0,027	1,155	-0,091	1,044
1800	0,011	1,402	0,097	1,026	0,085	1,838	0,063	1,745	-0,015	0,586
1200	-0,054	0,798	-0,085	0,519	0,019	0,516	-0,096	0,556	0,006	0,501
600	-0,047	0,385	-0,487	0,406	-0,062	0,327	-0,127	0,336	0,001	0,003

Πίνακας Π.1 : Τιμές των μετρήσεων των δονήσεων συνολικού επιπέδου στην άκρη των ακροφυσίων.

Δονήσεις συνολικού επιπέδου στην βάση του συμπίεστη για κάθε ακροφύσιο.										
RPM	AK 1 Base		AK 2 Base		AK 3 Base		AK 4 Base		AK 5 Base	
	Mean (m/s ²)	St.Div (m/s ²)	Mean (m/s ²)	St.Div (m/s ²)	Mean (m/s ²)	St.Div (m/s ²)	Mean (m/s ²)	St.Div (m/s ²)	Mean (m/s ²)	St.Div (m/s ²)
3000	-0,039	1,637	0,002	1,375	0,002	1,519	-0,026	1,541	-0,089	1,323
2400	-0,039	1,019	0,104	0,891	0,044	0,926	0,096	0,896	0,004	0,778
1800	0,024	0,68	0,1	0,641	-0,012	0,676	0,088	0,606	0,005	0,613
1200	0,083	0,352	0,089	0,303	0,014	0,345	0,009	0,395	-0,021	0,343
600	-0,198	0,332	0,07	0,282	0,048	0,267	0,038	0,237	0,016	0,147

RPM	AK 6 Base		AK 7 Base		AK 8 Base		AK 9 Base		AK 10 Base	
	Mean (m/s ²)	St.Div (m/s ²)	Mean (m/s ²)	St.Div (m/s ²)	Mean (m/s ²)	St.Div (m/s ²)	Mean (m/s ²)	St.Div (m/s ²)	Mean (m/s ²)	St.Div (m/s ²)
3000	-0,005	1,284	-0	1,243	-0,07	1,264	-0,052	1,232	0,13	1,357
2400	0,006	0,8	-0,034	0,767	-0,061	0,77	0,102	0,736	0,095	0,776
1800	0,115	0,659	0,1	0,629	-0,027	0,627	0,085	0,652	0,051	0,699
1200	-0,015	0,413	0,073	0,454	0,052	0,471	-0,006	0,405	0,128	0,516
600	0,03	0,322	-0,04	0,291	-0,117	0,483	-0,015	0,307	0	0,003

Πίνακας Π.2 Τιμές των μετρήσεων των δονήσεων συνολικού επιπέδου στην βάση του συμπίεστη για κάθε ακροφύσιο.