



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΦΥΓΟΚΕΝΤΡΙΚΟΥ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ ΓΙΑ
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΠΟΔΟΣΗΣ, ΤΑΛΑΝΤΩΤΙΚΑ ΚΑΙ
ΑΚΟΥΣΤΙΚΑ ΣΗΜΑΤΑ**

Ανδρεάδης Βασίλειος

Επιβλέπων Καθηγητής:

Παπαδημητρίου Κωνσταντίνος

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των
απαιτήσεων για την απόκτηση του
Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού Βιομηχανίας

Βόλος, Ιούνιος 2017

© 2017 Ανδρέαδης Βασίλειος

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Βιομηχανίας 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 Παπαδημητρίου Κωνσταντίνος
(Επιβλέπων) Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Σταπουντζής Ερρίκος
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Πελεκάσης Νικόλαος
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή, κύριο Παπαδημητρίου Κωνσταντίνο, επιβλέποντα της παρούσας εργασίας, για την συνεχή καθοδήγηση του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της μελέτης αυτής, για τις πολύτιμες επιστημονικές συμβουλές του και για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα ιδιαίτερα ενδιαφέρον θέμα. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω και τους καθηγητές, κύριο Σταπουντζή Ερρίκο, και κύριο Πελεκάση Νικόλαο ως μελών της εξεταστικής επιτροπής. Τέλος, τον κύριο, Βέργο Αθανάσιο για την τεχνική υποστήριξη στις μηχανουργικές κατεργασίες που παρείχε κατά τη διάρκεια κατασκευής της πειραματικής εγκατάστασης αυτής και κατά την εκτέλεση των πειραμάτων.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η συμπεριφορά ενός φυγοκεντρικού συμπιεστή σε διάφορες συχνότητες λειτουργίας. Συγκεκριμένα, τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε τρία στάδια, για μέτρηση διαφορετικών μεγεθών κάθε φορά. Στο πρώτο στάδιο τοποθετήθηκαν στην έξοδο του συμπιεστή εννιά (9) σωλήνες διαφορετικής διατομής, με σκοπό την μέτρηση των ταχυτήτων εξόδου της ροής, της πτώσης πίεσης μεταξύ εισόδου και εξόδου του συμπιεστή και τη μέτρηση του ήχου από τη λειτουργία του σε δύο σημεία (είσοδος, έξοδος) στον κάθε ένα. Τα δεδομένα επεξεργάστηκαν με πρόγραμμα σε υπολογιστή για την εύρεση της παροχής και της μέσης ταχύτητας.

Στο δεύτερο στάδιο τοποθετήθηκαν στην έξοδο του συμπιεστή δέκα (10) σωλήνες, για τη μέτρηση των ταλαντώσεων που προκαλούνται από τη λειτουργία του με κάθε δοκίμιο ξεχωριστά. Οι μετρήσεις των επιταχύνσεων έγιναν σε δύο σημεία, στην άνω ελεύθερη άκρη κάθε σωλήνα και σε μία βάση του συμπιεστή. Στο τρίτο στάδιο των πειραμάτων, τοποθετήθηκε στην έξοδο του συμπιεστή ένας σωλήνας PVC, μεγάλου μήκους και διαμέτρου, με σκοπό την κατεύθυνση της ροής κάτω από την πτέρυγα, που βρίσκεται στο εργαστήριο Ρευστομηχανικής και Στροβιλομηχανών του τμήματος, έτσι ώστε να πραγματοποιηθούν μετρήσεις για ταλάντωση της πτέρυγας με παρεμπόδιση της από ρεύμα αέρα υψηλής ταχύτητας. Τα αποτελέσματα επεξεργάστηκαν με χρήση ειδικών προγραμμάτων (Labview, Origin) με σκοπό την εύρεση των συχνοτήτων ταλάντωσης και τον υπολογισμό των ρυθμών απόσβεσης των ταλαντώσεων.

Πίνακας Συμβόλων

A_c	εγκάρσια επιφάνεια σωλήνα (m^2)
c	συντελεστής απόσβεσης ($N\ s/m$)
c_p	ειδική θερμότητα υπό σταθερή πίεση ($J/kg\ K$)
c_v	ειδική θερμότητα υπό σταθερό όγκο ($J/kg\ K$)
C_{r2}	ακτινική συνιστώσα απόλυτης ταχύτητας εξόδου (m/s)
C_{u2}	εφαπτομενική συνιστώσα απόλυτης ταχύτητας εξόδου (m/s)
D	Διάμετρος εξόδου ροής (m)
H	αδιαβατικό μήκος κεφαλής (adiabatic head) (m)
h_1	ενθαλπία εισόδου (J/kg)
h_2	ενθαλπία εξόδου (J/kg)
J	Μηχανικό ισοδύναμο της θερμότητας
k	συντελεστής στιβαρότητας του ελατηρίου (N/m)
\dot{m}	παροχή μάζας (kg/s)
N	ταχύτητα ρευστού (m/s)
Q	παροχή (m^3/s)
Q_2	απόρριψη θερμότητας (J/kg)
r_1	ακτίνα εισόδου ρευστού στο συμπιεστή (m)
r_2	ακτίνα εξόδου ρευστού από συμπιεστή (m)
U_2	ταχύτητα άκρου (tip speed) (m/s)
V	απόλυτη ταχύτητα ρευστού (m/s)
$V_{\theta 1}$	εφαπτομενική προβολή απόλυτης ταχύτητας εισόδου (m/s)
$V_{\theta 2}$	εφαπτομενική προβολή απόλυτης ταχύτητας εξόδου (m/s)
V_m	μεσημβρινή συνιστώσα της απόλυτης ταχύτητας (m/s)
W_2	έργο (J/kg)
μ	ιξώδες ρευστού ($kg/s\ m$)
ρ	πυκνότητα ρευστού (kg/m^3)

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή.....	10
Κεφάλαιο 2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	12
2.1 Ιστορική αναδρομή, Χρήσεις φυγοκεντρικών συμπιεστών.....	12
2.2 Βασικές αρχές αεροδυναμικής συμπιεστών.....	13
2.3 Βασικά εξαρτήματα ενός φυγοκεντρικού συμπιεστή.....	15
2.3.1 Η πτερωτή.....	17
2.3.2 Ακτινικός διαχύτης.....	18
2.4 Αεροδυναμική πτερύγων.....	19
2.5 Ροή σε σωλήνες.....	21
2.5.1 Ταχύτητα ρευστού μέσα σε σωλήνα.....	21
2.5.2 Είδος ροής.....	22
2.5.3 Η περιοχή εισόδου του ρευστού.....	22
2.5.4 Πτώση πίεσης.....	24
2.6 Βασικές αρχές ταλαντώσεων.....	24
2.6.1 Βασικό μοντέλο κίνησης.....	24
2.6.2 Μεγέθη των ταλαντώσεων.....	25
2.6.3 Ελεύθερη ταλάντωση.....	25
2.6.4 Απόκριση σε αρμονική διέγερση.....	27
2.6.5 Μετασχηματισμός FFT (Fast Fourier Transform)	27
2.6.6 Πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο.....	28
2.6.7 Ηλεκτρικός θόρυβος.....	28
Κεφάλαιο 3 Πειραματική διάταξη και μεθοδολογία μετρήσεων.....	29
3.1 Φυγοκεντρικός συμπιεστής.....	29
3.2 Δοκίμια μετρήσεων (ακροφύσια).....	31
3.3 Μετατροπείας συχνότητας (frequency inverter).....	33
3.4 Όργανα μετρήσεων.....	34

3.4.1	Ανεμόμετρο.....	34
3.4.2	Μανόμετρο.....	35
3.4.3	Μετρητής στάθμης ήχου.....	36
3.4.4	Πιεζοηλεκτρικό επιταχυνσιόμετρο.....	37
3.4.5	Τροφοδοτικό/Συνδέτης (Power Supply/Coupler)	38
3.4.6	Παλμογράφος.....	39
3.5	Κατασκευή συγκράτησης τηλεσκοπικού αισθητήρα ανεμόμετρου.....	40
3.6	Βοηθητικά εργαλεία για εύστοχη εκπόνηση των πειραμάτων.....	42
3.7	Εργαλεία αποθήκευσης και επεξεργασίας αποτελεσμάτων.....	44
3.8	Μεθοδολογία μετρήσεων.....	46
	Κεφάλαιο 4 Μετρήσεις ταχυτήτων ροής και διαφοράς πίεσης.....	49
4.1	Μετρήσεις με δοκίμιο (1) – Εύρεση παροχής και μέσης ταχύτητας.....	50
4.2	Μετρήσεις με δοκίμιο (2).....	52
4.3	Μετρήσεις με δοκίμιο (3).....	53
4.4	Μετρήσεις με δοκίμιο (4).....	54
4.5	Μετρήσεις με δοκίμιο (5).....	55
4.6	Μετρήσεις με δοκίμιο (6).....	56
4.7	Μετρήσεις με δοκίμιο (8).....	56
4.8	Μετρήσεις με δοκίμιο (9).....	57
4.9	Μετρήσεις με δοκίμιο (10).....	58
4.10	Συγκεντρωτικά διαγράμματα.....	59
	Κεφάλαιο 5 Μετρήσεις θορύβου από λειτουργία συμπιεστή.....	65
5.1	Συγκριτικά διαγράμματα μετρήσεων.....	65
5.2	Σύγκριση αποτελεσμάτων με θεωρία για το θόρυβο από τη βιβλιογραφία.....	67
	Κεφάλαιο 6 Μετρήσεις στροφών λειτουργίας συμπιεστή με οπτικό μέσο.....	69
	Κεφάλαιο 7 Μετρήσεις δονήσεων συμπιεστή.....	71
7.1	Μετρήσεις με δοκίμιο (1).....	71

7.2	Μετρήσεις με δοκίμιο (2).....	74
7.3	Μετρήσεις με δοκίμιο (3).....	77
7.4	Μετρήσεις με δοκίμιο (4).....	79
7.5	Μετρήσεις με δοκίμιο (5).....	81
7.6	Μετρήσεις με δοκίμιο (6).....	83
7.7	Μετρήσεις με δοκίμιο (7).....	85
7.8	Μετρήσεις με δοκίμιο (8).....	87
7.9	Μετρήσεις με δοκίμιο (9).....	89
7.10	Μετρήσεις με δοκίμιο (10).....	91
7.11	Μετρήσεις χωρίς δοκίμιο.....	93
7.12	Μέση τιμή, τυπική απόκλιση.....	94
Κεφάλαιο 8 Μετρήσεις ταλαντώσεων πτέρυγας.....		97
8.1	Χρόνοι απόσβεσης.....	98
8.2	Μετασχηματισμοί FFT.....	101
8.3	Μέση τιμή, τυπική απόκλιση.....	103
Κεφάλαιο 9 Συμπεράσματα και συζήτηση αποτελεσμάτων.....		105
Βιβλιογραφία.....		107
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....		109

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Ένας συμπιεστής είναι μια συσκευή, η οποία χρησιμοποιείται για την αύξηση της πίεσης ενός ρευστού. Το μέγεθος της πίεσης εισόδου μπορεί να έχει οποιαδήποτε τιμή, από το κενό έως πολύ υψηλές θετικές πιέσεις. Η πίεση εξόδου παίρνει τιμές από υποατμοσφαιρικές πιέσεις έως πολύ υψηλές τιμές, της τάξης χιλιάδων Pa. Η πίεσεις εισόδου και εξόδου σχετίζονται, αντίστοιχα με τον τύπο του συμπιεστή και την ρύθμισή του. Το ρευστό μπορεί να είναι οποιοδήποτε συμπιεστό υγρό ή αέριο.^[1]

Οι συμπιεστές χρησιμοποιούνται για έναν τεράστιο αριθμό εφαρμογών, όπως για παράδειγμα για εξαγωγή μετάλλων και ορυκτών, για τη μετατροπή ενέργειας σε εργοστάσια φυσικού αερίου, για εργοστάσια χημικής και πετροχημικής επεξεργασίας και πολλές άλλες. Η οικονομία και η εργονομία όλων αυτών των εφαρμογών εξαρτάται από την αξιοπιστία των συμπιεστών και τη δυνατότητά τους να ελέγχουν τις επιθυμητές χωρητικότητες των ρευστών.^[13]

Ένας φυγοκεντρικός συμπιεστής είναι ένας δυναμικός συμπιεστής και έτσι εξαρτάται από την κίνηση για να μεταφέρει την ενέργεια από τον ρότορα στο ρευστό. Αυτή η περιστροφική κίνηση έχει σαν αποτέλεσμα μια ταχύτητα εξόδου, εξαιτίας των φυγοκεντρικών δυνάμεων. Τότε, η εφαπτομενική συνιστώσα της ταχύτητας μετατρέπεται σε πίεση σε ένα διαχύτη.

Οι σημαντικότερες παράμετροι για την μέτρηση των επιδόσεων και της επιλογής ενός συμπιεστή είναι η παροχή, η απόδοση και η αύξηση της πίεσης μέσα στον συμπιεστή. Οι φυγοκεντρικοί συμπιεστές χρησιμοποιούνται, όταν υπάρχει απαίτηση για μεσαίου μεγέθους παροχές. Κάποια πλεονεκτήματα των φυγοκεντρικών συμπιεστών είναι ότι αυτοί είναι αξιόπιστοι, στιβαροί σαν κατασκευές, έχουν καλύτερη αντίσταση σε βλάβες από ξένα αντικείμενα και επηρεάζονται σε μικρό βαθμό από υποβάθμιση των επιδόσεων λόγω ρύπανσης.^[3]

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει την συμπεριφορά ενός φυγοκεντρικού συμπιεστή σε διάφορες ταχύτητες λειτουργίας και συνθήκες. Για την εκπόνηση της μελέτης πραγματοποιήθηκαν πειράματα στο εργαστήριο με εφαρμογή δοκιμίων (σωλήνες) στην έξοδο του συμπιεστή και έγιναν ξεχωριστές μετρήσεις για το καθένα. Επίσης, εφαρμόστηκε σωλήνας PVC στον φυγοκεντρικό συμπιεστή για μετρήσεις, που διεξάχθηκαν στο σημείο όπου βρίσκεται η πτέρυγα, για οδήγηση της ροής από το συμπιεστή στο κάτω μέρος της πτέρυγας. Ο σκοπός της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας ήταν η εξαγωγή αποτελεσμάτων για τις ταχύτητες εξόδου της ροής από τα δοκίμια, για τη διαφορά πίεσης, τις ταλαντώσεις και του θορύβου από τη λειτουργία του

συμπιεστή με τα διαφορετικά δοκίμια, αλλά και για τις επιταχύνσεις της πτέρυγας με αντίσταση στην ταλάντωσή της από τη ροή που εξέρχεται από τον συμπιεστή.

Κεφάλαιο 2

Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστεί όλη η απαραίτητη θεωρία για την κατανόηση των βασικών εννοιών και των μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη. Αρχικά, θα γίνει μια ιστορική αναδρομή για του φυγοκεντρικούς συμπιεστές και τις χρήσεις τους. Στη συνέχεια, θα γίνει μια αναφορά στη βασική θεωρία της αεροδυναμικής και θερμοδυναμικής των συμπιεστών. Μετά, παρουσιάζονται κάποια στοιχεία για την αεροδυναμική των πτερύγων και για τη ροή σε σωλήνες. Στο τέλος, γίνεται αναφορά στις βασικές αρχές της θεωρίας των ταλαντώσεων.

2.1 Ιστορική αναδρομή, Χρήσεις φυγοκεντρικών συμπιεστών

Τα τελευταία 50 χρόνια η χρήση των φυγοκεντρικών συμπιεστών, εξαιτίας της απλότητας κατασκευής τους και του μεγάλου λόγου χωρητικότητας μεγέθους τους, αυξήθηκε ραγδαία σε σύγκριση με τις υπόλοιπες παλινδρομικές μηχανές. Αρχικά, οι απόδοσή τους ήταν πολύ χαμηλή σε σύγκριση με άλλους τύπους συμπιεστών. Όμως, εξαιτίας της ανάγκης για φθηνούς τρόπους αξιοποίησης της ενέργειας η ζήτηση τους αυξήθηκε.^[1]

Στις αρχές του της δεκαετίας του 1930 η κύρια εφαρμογή τους ήταν στη βιομηχανία σιδήρου, όπου χρησιμοποιούνταν για την οξείδωση του αέρα στις υψικαμίνους. Στα τέλη της δεκαετίας του 1930 εμφανίστηκε μια νέα γενιά μικρότερων φυγοκεντρικών συμπιεστών, για τον κλιματισμό αιθουσών και γραφείων. Οι συγκεκριμένοι συμπιεστές λόγω του μικρού μεγέθους τους δεν εμφάνιζαν σημαντικές δονήσεις, οι οποίες δύσκολα περιορίζονταν όταν η χωρητικότητα του συμπιεστή ήταν μεγάλη. Από τη δεκαετία του 1950 νέες εξελίξεις οδήγησαν σε βελτίωση της αξιοπιστίας, της απόδοσης και των επιδόσεων των φυγοκεντρικών συμπιεστών.^[1] Τη δεκαετία του 1960 η απόδοσή τους έγινε συγκρίσιμη με αυτή των υπόλοιπων παλινδρομικών μηχανών, παρόλο το χαμηλό κόστος συντήρησής τους.^[2]

Σήμερα οι φυγοκεντρικοί συμπιεστές, εξαιτίας της συμπαγούς κατασκευής τους και του συγκριτικά μικρού βάρους τους, είναι οι κύριοι συμπιεστές σε πολλές βιομηχανίες. Είναι ένα βασικό κομμάτι στις βιομηχανίες χημικής μεταποίησης, εξαιτίας της ήπιας λειτουργίας τους και της υψηλής αξιοπιστίας τους σε σχέση με άλλους τύπους συμπιεστών. Επίσης, χρησιμοποιούνται σε βιομηχανίες μεταποίησης και αγωγών. Η εφαρμογή τους στη βιομηχανία μεταποίησης είναι ευρεία και απαιτείται να διαθέτουν μικρή αναλογία πίεσης. Τέλος, η εφαρμογή τους σε αεριοστρόβιλους απαιτεί να έχουν μεγάλη αναλογία πίεσης.



Σχήμα 2.1 Φυγοκεντρικός συμπιεστής (Αναπαραγωγή από <http://www.machinedesign.com/whats-difference-between/what-s-difference-between-pump-and-compressor>)

2.2 Βασικές αρχές αεροδυναμικής συμπιεστών

Οι στροβιλομηχανές μπορούν να συγκριθούν μεταξύ τους με τη διαστατική ανάλυση. Η διαστατική ανάλυση είναι μια διαδικασία, στην οποία οι μεταβλητές που προσδιορίζουν κάποια φυσική κατάσταση εκφράζονται σε αδιάστατες ομάδες. Με χρήση αυτής της διαδικασίας, μπορούν να συγκριθούν δεδομένα από διαφορετικές μηχανές. Επίσης, είναι δυνατή η επιλογή διαφόρων τύπων μονάδων, ανάλογα με τις απαιτήσεις για μέγιστη απόδοση. Τέλος, είναι δυνατή η πρόβλεψη των επιδόσεων ενός πρωτοτύπου από μετρήσεις σε μικρότερη κλίμακα ή σε χαμηλότερες ταχύτητες.^[3]

Μερικές από τις πιο σημαντικές αδιάστατες παραμέτρους είναι:

$$\text{Αριθμός Reynolds} \quad Re = \frac{\rho DV}{\mu} \quad (2.1)$$

$$\text{Ειδική ταχύτητα} \quad N_s = \frac{N\sqrt{Q}}{H^{3/4}} \quad (2.2)$$

$$\text{Ειδική διάμετρος} \quad D_s = \frac{DH^{1/4}}{\sqrt{Q}} \quad (2.3)$$

$$\text{Συντελεστής ροής} \quad \Phi = \frac{Q}{ND^3} \quad \text{ή} \quad (2.4)$$

$$\Phi = \frac{V_m}{U_2} \quad (\text{για φυγοκεντρικούς συμπιεστές}) \quad (2.5)$$

$$\text{Συντελεστής πίεσης} \quad \varphi = \frac{H}{ND^2} \quad (2.6)$$

$$\text{Αριθμός Prandtl} \quad Pr = \frac{\mu c_p}{\gamma}, \quad \gamma = \frac{c_p}{c_v} \quad (2.7)$$

Εξίσωση του Euler για στροβιλομηχανές

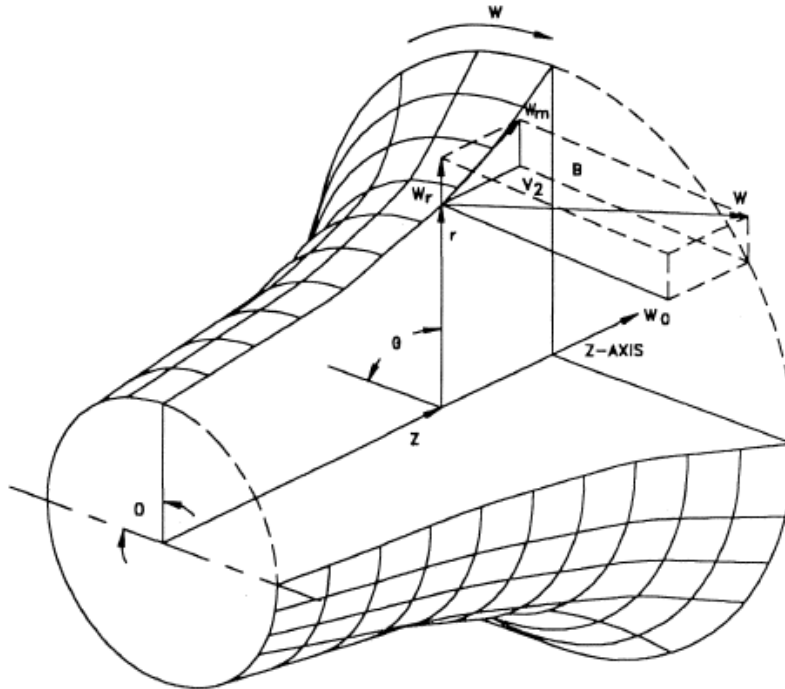
Η εξίσωση του Euler είναι μια μετατροπή της μαθηματικής σχέσης του νόμου διατήρησης της ορμής. Δηλώνει ότι ο ρυθμός μεταβολής της γραμμικής ορμής ενός όγκου που κινείται με ένα ρευστό, είναι ίσος με τις επιφανειακές δυνάμεις και τις δυνάμεις σώματος που δρουν στο ρευστό.^[3] Οι συνιστώσες της ταχύτητας σε μια στροβιλομηχανή φαίνονται στην εικόνα 2.3.

Εφαρμόζοντας την αρχή διατήρησης της ορμής, η μεταβολή της γωνιακής ορμής, που προκύπτει από την αλλαγή στην εφαπτομενική ταχύτητα είναι ίση με το άθροισμα όλων των δυνάμεων που εφαρμόζονται στον ρότορα. Μια ορισμένη μάζα ρευστού εισέρχεται στην στροβιλομηχανή με αρχική ταχύτητα V_1 σε ακτίνα r_1 , και εξέρχεται με εφαπτομενική ταχύτητα V_2 και ακτίνα r_2 . Με την υπόθεση ότι η ροή μάζας δια μέσου της στροβιλομηχανής παραμένει αμετάβλητη, η ροπή δίνεται από τη σχέση:

$$\tau = \frac{\dot{m}}{g_c} (r_1 V_{\theta 1} - r_2 V_{\theta 2}) \quad (2.8)$$

Επίσης, η μεταφορά μάζας ανά μονάδα μάζας ροής δίνεται από τη σχέση:

$$H = \frac{1}{g_c} (U_1 V_{\theta 1} - U_2 V_{\theta 2}) \quad (2.9)$$



Σχήμα 2.2 Διανύσματα ταχύτητας σε συμπιεστή (Αναπαραγωγή από Boyce, Meherwan P., *Centrifugal Compressors - A Basic Guide*, PennWell 2003)

Μετατροπή ενέργειας

Ο ρότορας σε ένα συμπιεστή μεταφέρει την κινητική του ενέργεια στο αέριο μέσα στην πτερωτή. Όμως, όλη η ενέργεια του αερίου δεν μετατρέπεται σε δυναμικό εντός της πτερωτής. Η κατανομή της μεταφοράς ενέργειας μέσα στο συμπιεστή καθορίζεται από τον σχεδιασμό του. Επομένως, εφαρμόζοντας βασική τριγωνομετρία προκύπτει η σχέση:

$$H = \frac{1}{2g_c} [(V_2^2 - V_1^2) + (U_2^2 - U_1^2) + (W_1^2 - W_2^2)] \quad (2.10)$$

Ο πρώτος όρος στην παραπάνω σχέση προσδιορίζει την κινητική ενέργεια που μεταφέρεται στο αέριο από τον ρότορα. Ο δεύτερος όρος περιγράφει την πιθανή άνοδο της πίεσης εντός του ρότορα λόγω του φυγοκεντρικού φαινομένου, το οποίο συμβαίνει μόνο σε φυγοκεντρικούς συμπιεστές, όπου η είσοδος και η έξοδος στο ρότορα είναι σε διαφορετικές ακτίνες. Ο τρίτος όρος περιγράφει την πιθανή άνοδο της πίεσης μέσα στο ρότορα, με μείωση της σχετικής ταχύτητας μέσα στο ρότορα.^[3]

Εξίσωση ενέργειας

Η εξίσωση ενέργειας δηλώνει ότι ο ρυθμός με τον οποίο η ενέργεια εισέρχεται σε έναν όγκο ρευστού είναι ίσος με τον ρυθμό του έργου γύρω από το ρευστό και τον ρυθμό με τον οποίο η ενέργεια αυξάνεται με το κινούμενο ρευστό.

$$h_1 + \frac{V_1^2}{2g_cJ} + Q_2 = h_2 + \frac{V_2^2}{2g_cJ} + W_2 \quad (2.11)$$

Εξίσωση συνέχειας

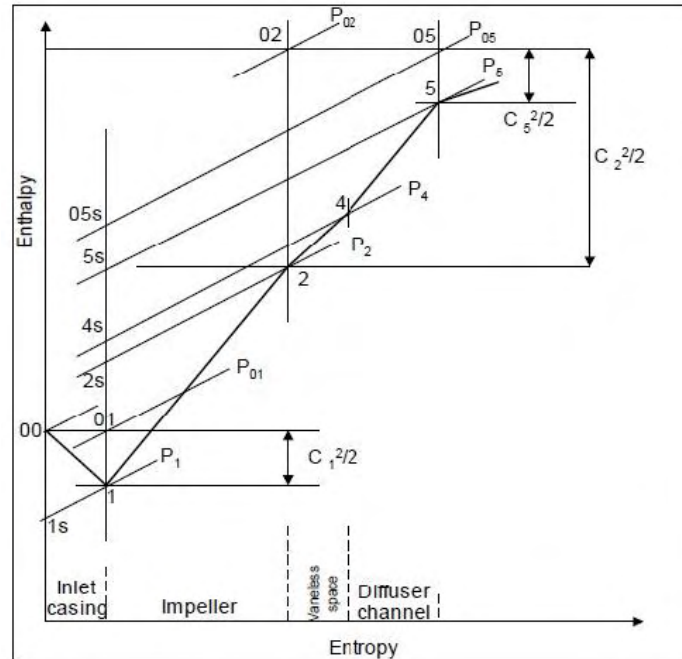
Η εξίσωση συνέχειας είναι ένας μαθηματικός προσδιορισμός της αρχής διατήρησης της μάζας ενός συνεχούς αερίου. Η μάζα του κινούμενου όγκου με το ρευστό παραμένει αμετάβλητη.

$$\dot{m} = A_1 V_1 \rho_1 = A_2 V_2 \rho_2 \quad (2.12)$$

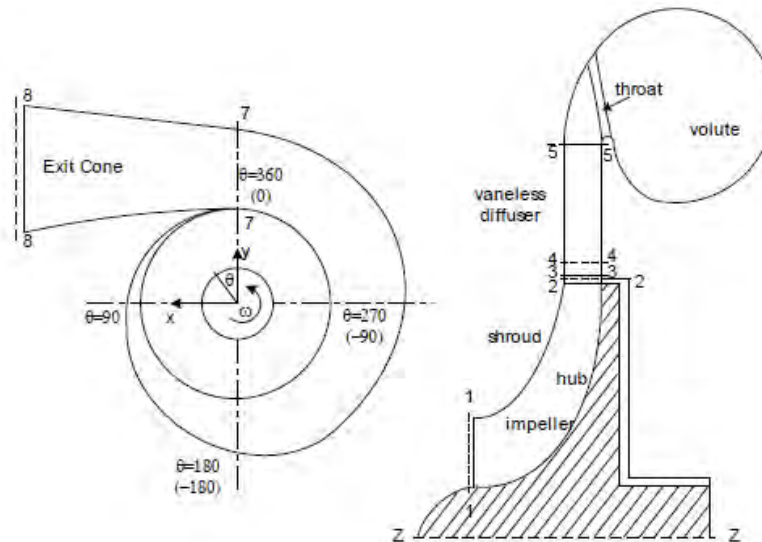
2.3 Βασικά εξαρτήματα ενός φυγοκεντρικού συμπιεστή

Ένας φυγοκεντρικός συμπιεστής μονής βαθμίδας αποτελείται κυρίως από μία πτερωτή (κινούμενο μέρος), ένα διαχύτη (ακίνητο μέρος), έναν επαγωγέα, οδηγούμενα πτερύγια εισόδου και ενός κυλίνδρου. Τα οδηγούμενα πτερύγια χρησιμοποιούνται για να κατευθύνουν τη ροή στο σύστημα πτερωτής διαχύτη. Η πτερωτή μεταδίδει ενέργεια στη ροή αυξάνοντας την ταχύτητα και την πίεση του ρευστού. Ο διαχύτης μετατρέπει τη διαθέσιμη ενέργεια στην έξοδο της πτερωτής σε στατική πίεση επιβραδύνοντας το ρευστό.

Μετά το διαχύτη υπάρχει ένας κύλινδρος, ο οποίος συλλέγει το ρευστό από την περιφέρεια του διαχύτη. Συνήθως, χρησιμοποιείται ένας κώνος (αποκλίνουσα συσκευή) στην άκρη του κυλίνδρου για τη μεταφορά του συμπιεσμένου ρευστού στην επιθυμητή εφαρμογή.^[4]



Σχήμα 2.3 Διαδικασία συμπίεσης (Αναπαραγωγή από, Kangsoo Im, *DEVELOPMENT OF A DESIGN METHOD FOR CENTRIFUGAL COMPRESSORS*, 2012)



Σχήμα 2.4 Φυγοκεντρικός συμπιεστής μονής βαθμίδας (Αναπαραγωγή από Kangsoo Im, *DEVELOPMENT OF A DESIGN METHOD FOR CENTRIFUGAL COMPRESSORS*, 2012)

Γενικά, στις στροβιλομηχανές η διανυσματική απόλυτη ταχύτητα (C) δίνεται από τη σχέση 2.13. Η απόλυτη ταχύτητα είναι η ταχύτητα του αερίου σε σχέση με ένα σταθερό σύστημα συντεταγμένων. Η σχετική ταχύτητα (W) είναι η ταχύτητα σε σχέση με τον ρότορα. Όταν το αέριο εισέρχεται στον ρότορα θα έχει μια συνιστώσα, τη σχετική ταχύτητα παράλληλη στο κινούμενο περύγιο και μια συνιστώσα, την απόλυτη ταχύτητα παράλληλη στα σταθερά περύγια.^[2]

$$\vec{C} = \vec{W} + \vec{U} \quad (2.13)$$

2.3.1 Η πτερωτή

Η πτερωτή είναι το κινούμενο εξάρτημα ενός φυγοκεντρικού συμπιεστή, όπου συμβαίνει η μεταφορά ενέργειας. (σύμφωνα με σχήμα 2.3)

$$\Delta h_{0c} = h_{05} - h_{01} = h_{02} - h_{01} \quad (2.14)$$

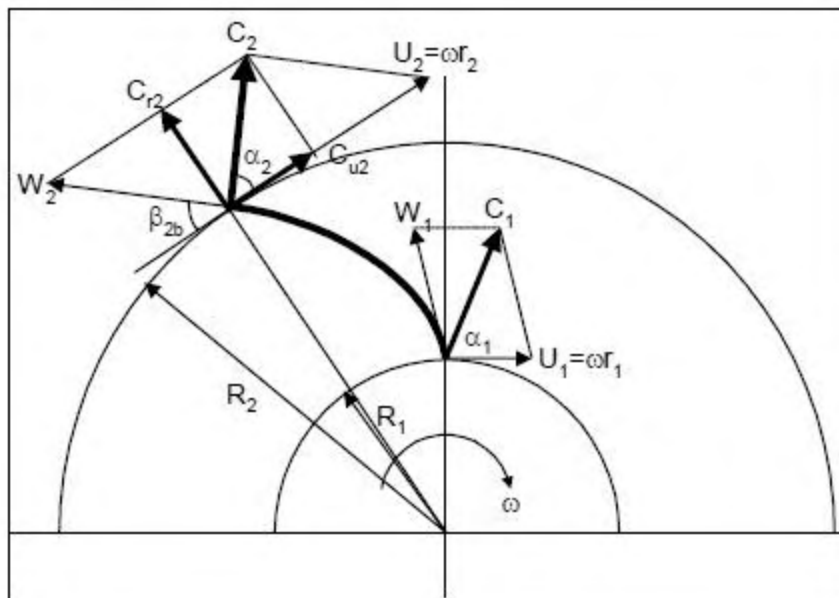
Στη συνέχεια με συνδυασμό της εξίσωσης του Euler και τριγωνομετρία στα τρίγωνα ταχυτήτων στην είσοδο και στην έξοδο της πτερωτής καταλήγουμε στην εξίσωση μετατροπής της ενέργειας, η οποία είναι ίση με το Δh_{0c} . Αν αμελήσουμε την εισερχόμενη γωνιακή ροπή, κάτι το οποίο είναι γενικά αποδεκτό, καταλήγουμε ότι η θεωρητική ειδική ενθαλπία (σχήμα 2.5) είναι:

$$\Delta h_{0c} = \frac{W}{\dot{m}} = U_2 C_{u2} \quad (2.15)$$

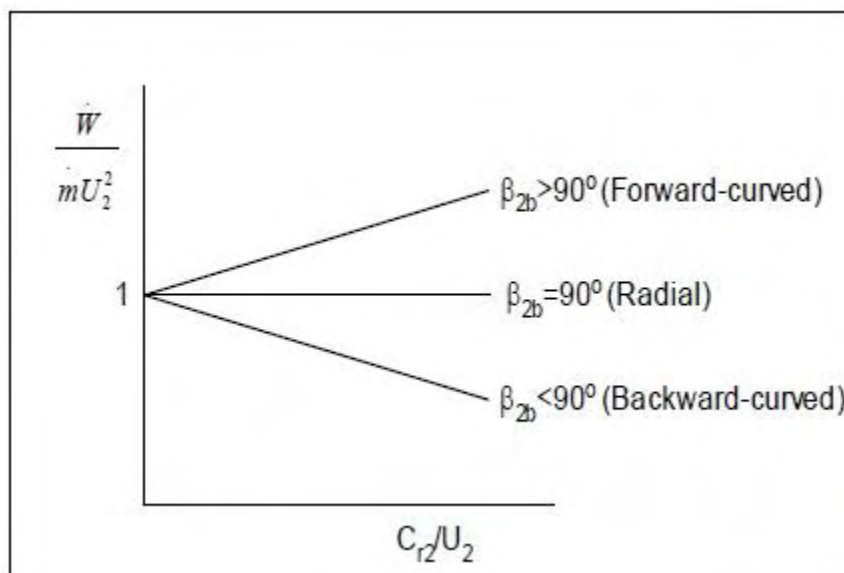
Τότε, με την επίδραση της γωνίας εξόδου του περυσίου, β_{2b} , η ειδική θεωρητική ενθαλπία γίνεται:

$$\Delta h_{0c} = U_2^2 \left(1 - \frac{C_{r2}}{U_2} \cot \beta_{2b}\right) \quad (2.16)$$

Για συγκεκριμένη τιμή της β_{2b} υπάρχει μια γραμμική σχέση της ειδικής ενέργειας μεταφοράς και της παροχής. Η ενθαλπία αυξάνεται τα περυσίων, που είναι καμπυλωμένα προς τα πίσω μειώνεται όσο η παροχή αυξάνεται, ενώ η ενθαλπία των ακτινικών περυσίων παραμένει σταθερή.



Σχήμα 2.5 Τρίγωνα ταχυτήτων (Αναπαραγωγή από Kangsoo Im, *DEVELOPMENT OF A DESIGN METHOD FOR CENTRIFUGAL COMPRESSORS*, 2012)



Σχήμα 2.6 Επίδραση της γωνίας εξόδου του πτερυγίου (Αναπαραγωγή από Kangsoo Im, *DEVELOPMENT OF A DESIGN METHOD FOR CENTRIFUGAL COMPRESSORS*, 2012)

2.3.2 Ακτινικός διαχύτης

Αν και οι πτερωτές σχεδιάζονται, ώστε να επιτρέπουν καλή διάχυση διαμέσου των πτερυγίων, περίπου μισή από την ενέργεια που μεταδόθηκε στο ρευστό, παραμένει ως κινητική ενέργεια στην έξοδο της πτερωτής. Έτσι, αυτή η κινητική ενέργεια πρέπει να μετατραπεί σε στατική, κάτι το οποίο γίνεται από το διαχύτη, που βρίσκεται αμέσως μετά την πτερωτή. Εξαιτίας της αυξανόμενης ζήτησης για υψηλότερες αποδόσεις και λόγους

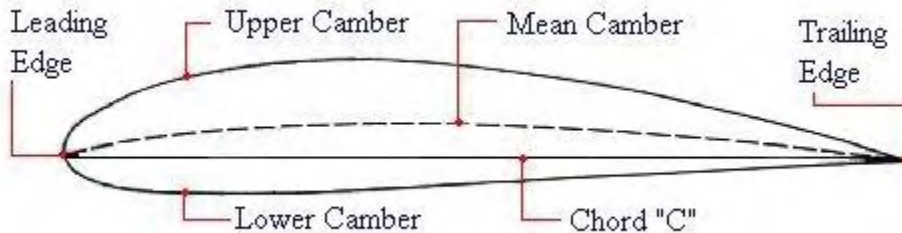
πιέσεων στους φυγοκεντρικούς συμπιεστές, διάφοροι τύποι ακτινικών διαχύτων έχουν δημιουργηθεί.^[4]

2.4 Αεροδυναμική πτερόγων

Κατά την κίνηση ενός σώματος μέσα σε ένα ρευστό αναπτύσσονται δυνάμεις που συχνά εμποδίζουν την κίνηση. Η παράλληλη συνιστώσα των δυνάμεων προς τη διεύθυνση κίνησης λέγεται αντίσταση ή οπισθέλκουσα, D , ενώ η κάθετη συνιστώσα λέγεται άνωση, L . Για τα αεροδυναμικά σώματα η άνωση είναι τουλάχιστον μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από την αντίσταση. Η παράλληλη διάσταση προς τη ροή διάσταση ενός αεροδυναμικού σώματος είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από την εγκάρσια διάσταση.^[6]

Στις πτέρυγες των αεροσκαφών μας ενδιαφέρει η όσο μικρότερη παραμόρφωση της ροής και η απόκτηση όσο το δυνατό μεγαλύτερης άνωσης για την ανύψωση του αεροπλάνου. Επίσης, από το νόμο του Bernoulli οι πιέσεις στο άνω και κάτω μέρος της πτέρυγας πρέπει να είναι αντίστοιχα μικρότερες και μεγαλύτερες από την πίεση του ρευστού μακριά από την αεροτομή. Επιπλέον, έχει παρατηρηθεί ότι η αύξηση του πάχους σε μια πτέρυγα αυξάνει τη δυναμική της άνωση. Ωστόσο, η υπερβολική αύξηση του πάχους οδηγεί σε αύξηση της αντίστασης, κάτι ανεπιθύμητο, γιατί αυτό ταυτόχρονα συνεπάγεται αυξημένη προωθητική δύναμη και χρήση περισσότερου καυσίμου.

Σε μια πτέρυγα δίνεται και κυρτότητα, έτσι ώστε να μην είναι συμμετρική, κάτι το οποίο αυξάνει τη δυναμική άνωσή της. Η χορδή (c) είναι η ευθεία που ενώνει το κέντρο καμπυλότητας της μύτης της πτέρυγας με την οξεία ακμή προσβολής.^[6]

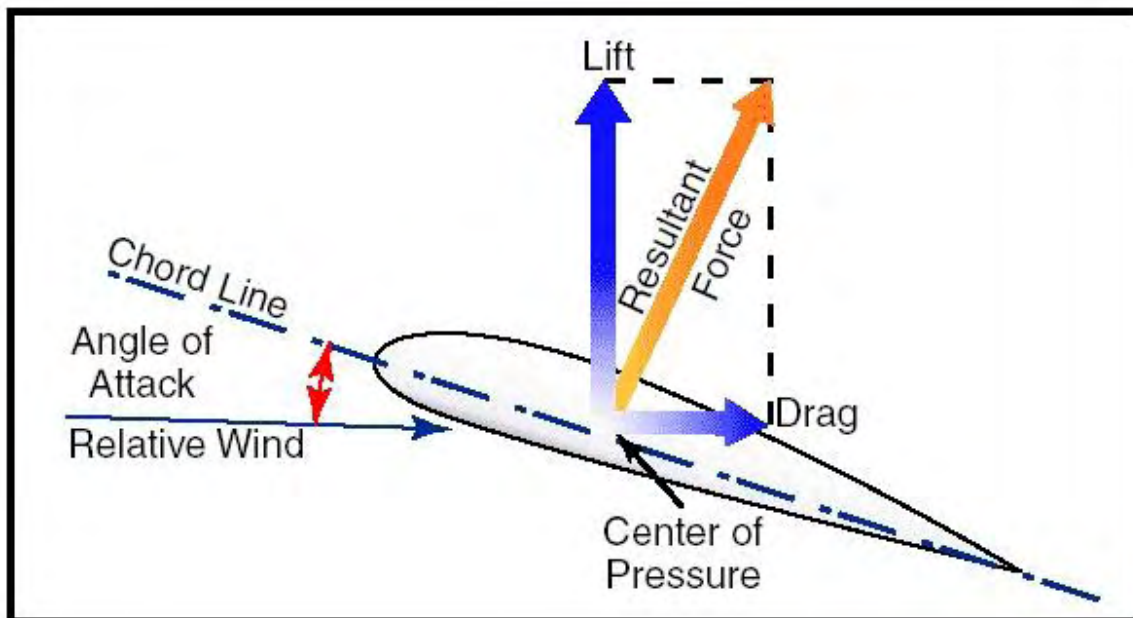


Σχήμα 2.7 Βασικά χαρακτηριστικά πτέρυγας (Αναπαραγωγή από <http://www.aerospaceweb.org/>)

Από τη διαστατική ανάλυση, για ένα αρκετά μεγάλο πεδίο τιμών του αριθμού Re , μπορούν να βρεθούν η άνωση (L) και η αντίσταση (D) της πτέρυγας, τα οποία εξαρτώνται από το σχήμα της πτέρυγας (το πιο απλό σχήμα είναι εκείνο με ορθογωνική διατομή, S), το τετράγωνο της ταχύτητας, U^2 , της ευθύγραμμης ομαλής κίνησης σχετικά με το ρευστό και την πυκνότητα (ρ) ου ρευστού.^[6]

$$L = \frac{1}{2} \rho U^2 S C_L \quad (2.17)$$

$$D = \frac{1}{2} \rho U^2 S C_D \quad (2.18)$$



Σχήμα 2.8 Δυνάμεις άνωσης και αντίστασης στην πτέρυγα (Αναπαραγωγή από <https://sites.google.com/site/1o306darylchionh/contemporary-science-research/aerodynamics>)

Τα αδιάστατα μεγέθη C_L και C_D , λέγονται αντίστοιχα συντελεστές δυναμικής άνωσης και αντίστασης. Οι συντελεστές αυτοί είναι συναρτήσεις της γεωμετρίας της πτέρυγας και των χαρακτηριστικών της ροής. Το σημείο εφαρμογής των δυνάμεων L και D , λέγεται κέντρο πίεσης και μπορεί να βρίσκεται και εκτός της χορδής της πτέρυγας. Αυτό εξαρτάται από την διανομή των πιέσεων γύρω από την αεροτομή. Επομένως, ο συντελεστής πίεσης, ο οποίος είναι αδιάστατος, ορίζεται ως

$$C_P = \frac{P - P_\infty}{\frac{1}{2} \rho U^2} \quad (2.19)$$

Από την ολοκλήρωση των ροπών των πιέσεων γύρω από την πτέρυγα μπορεί να βρεθεί και η ροπή που δημιουργούν τα L και D ως προς το σημείο εφαρμογής τους (κέντρο πίεσης). Η ροπή δίνεται από τον τύπο:

$$M = \frac{1}{2} \rho U^2 S c C_M \quad (2.20)$$

Όπου ο C_M λέγεται συντελεστής ροπής.^[6]

2.5 Ροή σε σωλήνες

Η ροή υγρού ή αερίου μέσα από σωλήνες χρησιμοποιείται συνήθως για εφαρμογές θέρμανσης και ψύξης, αλλά και για δίκτυα διανομής ρευστού. Το ρευστό σε τέτοιες εφαρμογές αναγκάζεται να ρεύσει από έναν συμπιεστή ή μια αντλία. Δίνεται μεγάλη προσοχή στην τριβή, η οποία σχετίζεται με την πτώση πίεσης. Επιπλέον, η τριβή ανάμεσα στα σωματίδια του ρευστού μέσα στο σωλήνα προκαλεί μια μικρή αύξηση της θερμοκρασίας του ρευστού ως αποτέλεσμα ότι η μηχανική ενέργεια μετατρέπεται σε ορατή θερμική ενέργεια. Ωστόσο, αυτή η αύξηση της θερμοκρασίας είναι πολύ μικρή και είναι δυνατό να μη ληφθεί υπόψη στους υπολογισμούς.^[9]

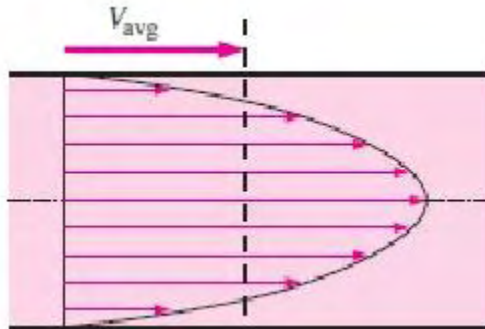
2.5.1 Ταχύτητα ρευστού μέσα σε σωλήνα

Η ταχύτητα του ρευστού μέσα σε έναν σωλήνα μεταβάλλεται από μηδέν στην επιφάνεια του σωλήνα (εξαιτίας της μη ολίσθησης) στη μέγιστη τιμή της στο κέντρο του σωλήνα. Επίσης, είναι βολικό να βρούμε τη μέση ταχύτητα (V_{avg}), η οποία παραμένει σταθερή σε ασυμπίεστη ροή όταν η εγκάρσια διατομή του σωλήνα παραμένει σταθερή. Η τιμή της μέσης ταχύτητας σε κάποιο σημείο του σωλήνα καθορίζεται από την απαίτηση για διατήρηση της μάζας μέσα στο σωλήνα δηλαδή,^[9]

$$\dot{m} = \rho V_{avg} A_c = \int_{A_c} \rho u(r) dA_c \quad (2.21)$$

όπου A_c είναι η εγκάρσια επιφάνεια του σωλήνα και $u(r)$ το προφίλ ταχυτήτων. Επομένως, η μέση ταχύτητα για ασυμπίεστη ροή σε κυλινδρικό σωλήνα ακτίνας R εκφράζεται ως:

$$V_{avg} = \frac{\int_{A_c} \rho u(r) dA_c}{\rho A_c} = \frac{\int_0^R \rho u(r) 2\pi r dr}{\rho \pi R^2} = \frac{2}{R^2} \int_0^R u(r) r dr \quad (2.22)$$



Σχήμα 2.9 Προφίλ ταχυτήτων μέσα σε σωλήνα (Αναπαραγωγή από *FLOW IN PIPES* στο <https://www.uio.no/>, University of Oslo, 2011)

2.5.2 Είδος ροής

Μέσα σε έναν σωλήνα η ροή του ρευστού είναι στρογγυλόμακρη σε χαμηλές ταχύτητες ρευστού, ενώ αλλάζει σε μια χαοτική συμπεριφορά όταν η ταχύτητα αυξάνεται πάνω από ένα κρίσιμο σημείο. Στην πρώτη περίπτωση η ροή λέγεται στρωτή και χαρακτηρίζεται από προσανατολισμένη κίνηση. Στη δεύτερη περίπτωση η ροή λέγεται τυρβώδης και χαρακτηρίζεται από υψηλές διακυμάνσεις της ταχύτητας και απρόβλεπτες κινήσεις. Η μετάβαση από στρωτή σε τυρβώδης ροή δεν συμβαίνει ακαριαία, αλλά συμβαίνει σε μια περιοχή όπου υπάρχει στρωτή και τυρβώδης ροή μαζί πριν την πλήρη μετάβαση σε τυρβώδη ροή. Στην πράξη οι περισσότερες ροές είναι τυρβώδεις.

Η μετάβαση αυτή εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως η γεωμετρία, η σκληρότητα της επιφάνειας του σωλήνα, η ταχύτητα της ροής, η θερμοκρασία της επιφάνειας και ο τύπος του ρευστού. Ωστόσο, το είδος της ροής εξαρτάται κυρίως από τον αριθμό Reynolds. Σε μεγάλους αριθμούς Reynolds οι αδρανειακές δυνάμεις είναι μεγάλες σε σχέση με τις ιξώδεις δυνάμεις και έτσι οι δεύτερες δεν μπορούν να αποτρέψουν τις τυχαίες και γρήγορες διακυμάνσεις του ρευστού. Σε μικρούς ή μεσαίους αριθμούς Reynolds, οι ιξώδεις δυνάμεις είναι αρκετά μεγάλες ώστε να αποτρέψουν αυτές τις διακυμάνσεις. Ο αριθμός Reynolds, στον οποίο η ροή γίνεται τυρβώδης λέγεται κρίσιμος αριθμός Reynolds (Re_{cr}). Σύμφωνα με τα παραπάνω:^[9]

$Re \leq 2300$	(στρωτή ροή)
$2300 \leq Re \leq 4000$	(μεταβατική ροή)
$Re \geq 4000$	(τυρβώδης ροή)

2.5.3 Η περιοχή εισόδου του ρευστού

Ένα ρευστό εισέρχεται σε ένα σωλήνα με ομοιόμορφη ταχύτητα. Εξαιτίας της συνθήκης μη ολίσθησης, τα σωματίδια του ρευστού που είναι σε επαφή με την επιφάνεια του σωλήνα σταματούν τελείως να κινούνται. Αυτό το στρώμα προκαλεί στα υπόλοιπα σωματίδια του ρευστού μια σταδιακή επιβράδυνση, εξαιτίας της τριβής. Για να διατηρηθεί η παροχή μάζας σταθερή, η ταχύτητα του ρευστού στη μεσαία περιοχή του σωλήνα αυξάνεται.

Η περιοχή στην οποία οι τιμές των ιξωδών διατμητικών δυνάμεων μειώνονται ονομάζεται οριακό στρώμα. Το πάχος του οριακού στρώματος αυξάνει στη διεύθυνση της ροής μέχρι να φτάσει στο κέντρο του σωλήνα και έτσι να γεμίσει όλος ο σωλήνας. Η ροή λέγεται πλήρως ανεπτυγμένη όταν το προφίλ ταχυτήτων παραμένει αμετάβλητο. Η περιοχή, όπου συμβαίνει αυτό ονομάζεται περιοχή υδροδυναμικά πλήρους ανεπτυγμένης ροής. Το προφίλ ταχυτήτων σε πλήρως ανεπτυγμένη ροή είναι παραβολικό σε στρωτή ροή και κάπως πιο επίπεδο σε τυρβώδης ροή.^[9]

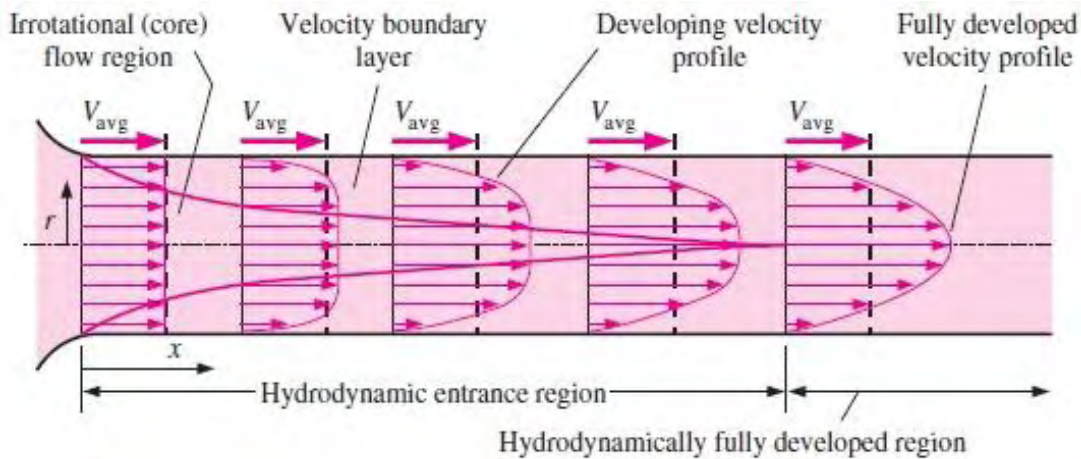
Η διατμητική τάση στα τοιχώματα του σωλήνα (τ_w), σχετίζεται με την κλίση του προφίλ ταχυτήτων στην επιφάνεια. Αυτή η διατμητική τάση παραμένει επίσης σταθερή στην περιοχή υδροδυναμικά πλήρους ανεπτυγμένης ροής. Επίσης, η τάση στα τοιχώματα

παίρνει τη μέγιστη τιμή στην είσοδο του σωλήνα και σταδιακά μειώνεται. Επομένως, η πτώση πίεσης είναι υψηλότερη στην είσοδο του σωλήνα.

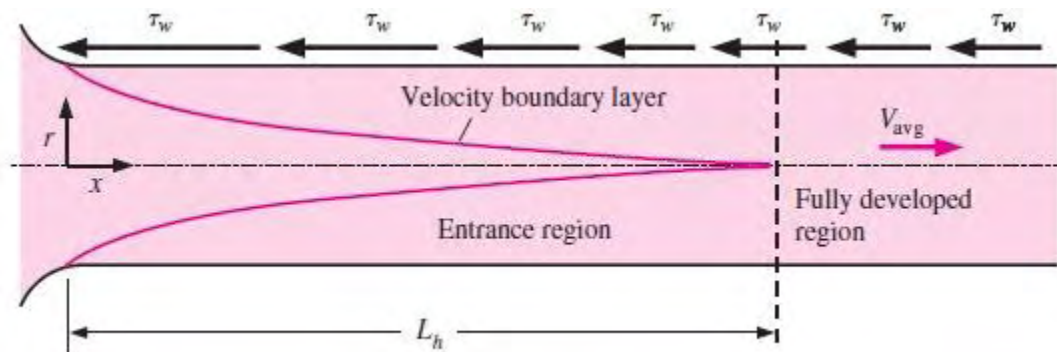
Το υδροδυναμικό μήκος (L_h) εισόδου είναι συνήθως η απόσταση από την είσοδο του σωλήνα μέχρι το σημείο όπου η διατμητική τάση στα τοιχώματα να φτάσει στο 2% της τιμής της στην πλήρη ανεπτυγμένη περιοχή. Το υδροδυναμικό μήκος έχει υπολογιστεί ότι είναι συνάρτηση της διαμέτρου του σωλήνα επί τον αριθμό Reynolds. Σε τυρβώδη ροή είναι πολύ μικρότερο από τους υπολογισμούς, εξαιτίας των πολύ μεγάλων διακυμάνσεων και της μικρής εξάρτησης από τον αριθμό Reynolds.^[9] Επομένως το L_h δίνεται από:

$$L_{h,στρωτή} = 0,05ReD \quad (2.23)$$

$$L_{h,τυρβώδης} \approx 10D \quad (2.24)$$



Σχήμα 2.10 Η ανάπτυξη του προφίλ ταχυτήτων μέσα στον σωλήνα (Αναπαραγωγή από *FLOW IN PIPES* στο <https://www.uio.no/>, University of Oslo, 2011)



Σχήμα 2.11 Η μεταβολή της διατμητικής τάσης στα τοιχώματα του σωλήνα (Αναπαραγωγή από *FLOW IN PIPES* στο <https://www.uio.no/>, University of Oslo, 2011)

2.5.4 Πτώση πίεσης

Η πτώση πίεσης (ΔP) είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος στην ανάλυση της ροής σε σωλήνα, γιατί σχετίζεται άμεσα με τις απαιτήσεις για ισχύ του συμπιεστή, ώστε να διατηρήσει την ροή. Η πτώση πίεσης είναι ανάλογη του ιξώδους του ρευστού και θα ήταν μηδενική εάν δεν υπήρχε τριβή. Ισχύει ότι $dP/dx = \text{σταθερό}$ και ολοκληρώνοντας από x_1 η πίεση είναι P_1 έως x_2 όπου η πίεση είναι P_2 έχουμε:^[9]

$$\frac{dP}{dx} = \frac{P_2 - P_1}{L} \quad (2.25)$$

2.6 Βασικές αρχές ταλαντώσεων

2.6.1 Βασικό μοντέλο κίνησης

Η ταλαντωτική συμπεριφορά πολλών μηχανικών συστημάτων περιγράφεται με ακρίβεια από ένα μοντέλο ενός βαθμού ελευθερίας. Σύμφωνα, με αυτό το μοντέλο η μάζα του συστήματος είναι στερεή και θεωρείται απόλυτα συγκεντρωμένη σε ένα στοιχείο. Η μάζα εκτελεί κυκλική κίνηση γύρω από μια θέση, που ονομάζεται Θέση Ισορροπίας της ταλάντωσης. Επιπλέον, η ελαστικότητα του συστήματος χαρακτηρίζεται από ένα ελατήριο αμελητέας μάζας. Η δύναμη που ασκεί το ελατήριο στη μάζα υπολογίζεται από τον τύπο:

$$f_s(x) = kx \quad (2.26)$$

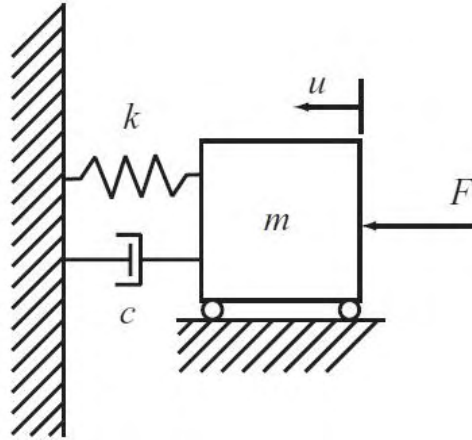
Όπου k είναι ο συντελεστής στιβαρότητας του ελατηρίου. Ακόμη, υπάρχει ένα άλλο στοιχείο στο σύστημα, ο αποσβεστήρας, ο οποίος αντιπροσωπεύει δυνάμεις απόσβεσης που εμφανίζονται στο σύστημα. Η δύναμη αυτή θεωρείται ότι είναι γραμμική συνάρτηση της ταχύτητας (για μικρά εύρη ταλάντωσης), δηλαδή είναι:

$$f_c(x) = c\dot{x} \quad (2.27)$$

όπου η σταθερά c ονομάζεται συντελεστής απόσβεσης του συστήματος.

Το μηχανικό μοντέλο τίθεται σε κίνηση με την επίδραση εξωτερικής δύναμης, καθώς επίσης και με την επιβολή αρχικής μετατόπισης ή ταχύτητας. Η εξωτερική διέγερση μπορεί να προέρχεται από διάφορες αιτίες, όπως από αζυγοσταθμίες σε συστήματα με περιστρεφόμενα μέλη ή από δίνες αέρα σε αεροπορικές κατασκευές. Επομένως, η κίνηση του μοντέλου, με βάση το διάγραμμα ελευθέρου σώματος που παρουσιάζεται στην εικόνα 2.12 και με εφαρμογή του νόμου του Νεύτωνα, δίνεται από την εξίσωση:^[10]

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(x) \quad (2.28)$$



Σχήμα 2.12 Σύστημα ταλάντωσης (Αναπαραγωγή από Anders Brandt, *NOISE AND VIBRATION ANALYSIS, SIGNAL ANALYSIS AND EXPERIMENTAL PROCEDURES*, 2011)

2.6.2 Μεγέθη των ταλαντώσεων

Περίοδος (T) ενός περιοδικού φαινομένου είναι ο χρόνος που απαιτείται για μια πλήρη επανάληψη του φαινομένου με μονάδα μέτρησης 1 sec. Αν σε χρόνο t γίνονται N επαναλήψεις η περίοδος είναι:

$$T = \frac{t}{N} \quad (2.29)$$

Συχνότητα (f) ενός περιοδικού φαινομένου είναι το πηλίκο των N επαναλήψεων σε έναν ορισμένο χρόνο, με το χρόνο. Έχει μονάδα μέτρησης το 1 Hz. Δίνεται από τον τύπο:

$$f = \frac{N}{t} = \frac{1}{T} \quad (2.30)$$

Γωνιακή συχνότητα (ω) εκφράζει τον αριθμό επαναλήψεων ενός φαινομένου σε χρόνο 2π sec. Έχει μονάδα μέτρησης το 1 rad/sec και δίνεται από τον τύπο:

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \quad (2.31)$$

Εύρος ταλάντωσης (A) ονομάζεται η μέγιστη τιμή απομάκρυνσης του σώματος από τη θέση ισορροπίας.^[11]

2.6.3 Ελεύθερη ταλάντωση

Όταν δεν εξασκείται εξωτερική δύναμη στον ταλαντωτή, η εξίσωση κίνησης δίνεται από τον τύπο:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (2.32)$$

Αρχικά, διαίρεση των μελών με m οδηγεί στη μορφή:

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_0\dot{x} + \omega_0^2x = 0 \quad (2.33)$$

όπου οι σταθερές

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ και } \zeta = \frac{c}{2\sqrt{km}} \quad (2.34)$$

ονομάζονται ιδιοσυχνότητα και μέτρο απόσβεσης του συστήματος.

Υπάρχουν τρία είδη απόσβεσης του συστήματος, τα οποία είναι:

- **Υπερκρίσιμη απόσβεση ($\zeta > 1$)**, τέτοιες τιμές του ζ είναι πολύ μεγάλες και παρουσιάζονται μόνο μετά από προσθήκη κατάλληλου αποσβεστήρα στο σύστημα. Η δυναμική απόκριση του συστήματος φθίνει απότομα εκθετικά, χωρίς ταλάντωση.
- **Κρίσιμη απόσβεση ($\zeta = 1$)**, η δυναμική απόκριση του συστήματος φθίνει εκθετικά, αλλά πιο ομαλά, χωρίς ταλαντώσεις.
- **Υποκρίσιμη απόσβεση ($0 \leq \zeta < 1$)**, η περίπτωση αυτή είναι πιο συνηθισμένη στην πράξη.

Για ταλάντωση με απόσβεση, ορίζεται η ιδιοσυχνότητα με απόσβεση ως:

$$\omega_d = \omega_0\sqrt{1 - \zeta^2} \quad (2.35)$$

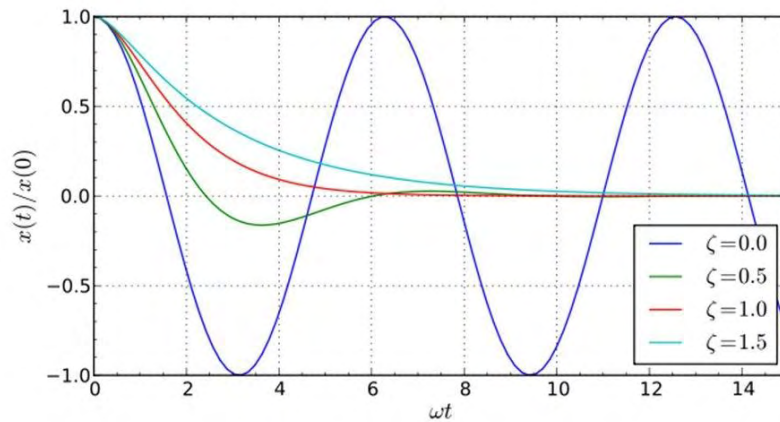
Ακόμη, αλλάζει η περίοδος της ταλάντωσης, η οποία πλέον είναι:

$$T = 2\pi/\omega_d \quad (2.36)$$

Τώρα στην εξιδανικευμένη περίπτωση όπου η απόσβεση είναι αμελητέα ($\zeta = 0$), προκύπτει από επίλυση της εξίσωσης 2.33 ότι η απόκριση έχει τη μορφή

$$x(t) = A\cos(\omega_0 t - \theta) \quad (2.37)$$

η οποία παριστάνει αρμονική ταλάντωση με σταθερό εύρος και συχνότητα ίση με την ιδιοσυχνότητα ω_0 . Επίσης, η θ είναι η αρχική φάση.^[11]



Σχήμα 2.13 Ταλάντωση για διάφορες τιμές του ζ (Αναπαραγωγή από Δαμασκηνός, *Ποιο είναι το χαρακτηριστικό της απλής αρμονικής ταλάντωσης; Εάν ένα σύστημα αφού εκτραπεί από τη θέση ισορροπίας, δέχεται δύναμη επαναφοράς $F=-kx$* , στο <http://slideplayer.gr/>, 2016)

2.6.4 Απόκριση σε αρμονική διέγερση

Αν ο ταλαντωτής ενός βαθμού ελευθερίας υπόκειται σε εξωτερική αρμονική διέγερση δηλαδή

$$F(t) = \hat{F} \cos(\Omega t) \quad (2.38)$$

τότε η λύση της εξίσωσης 2.28 δίνεται από την σχέση

$$x(t) = A \cos(\Omega t - \varphi) \quad (2.39)$$

όπου Ω είναι η διεγείρουσα συχνότητα και $0 \leq \varphi < \pi$ είναι η διαφορά φάσης. Γενικά η λύση είναι πιο πολύπλοκη από αυτή της εξίσωσης 2.39, αλλά οι υπόλοιποι όροι της εξίσωσης θεωρούνται αμελητέοι μετά από κάποιο μικρό χρονικό διάστημα. Επομένως, η γενική λύση ταυτίζεται με αυτή της εξίσωσης 2.39.^[11]

2.6.5 Μετασχηματισμός FFT (Fast Fourier Transform)

Ο FFT είναι ένας αλγόριθμος, ο οποίος υπολογίζει την εξίσωση 2.40, η οποία προέκυψε από το διακριτό μετασχηματισμό Fourier, πολύ πιο γρήγορα σε σχέση με άμεση εφαρμογή της ίδιας της εξίσωσης.

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j2\pi kn/N} \quad (2.40)$$

Μια προσεκτική μελέτη της εξίσωσης 2.40 αποκαλύπτει ότι ο αριθμός των υπολογισμών για τον υπολογισμό N συχνοτήτων $X(k)$, είναι ανάλογος με N^2 πράξεις. Ο αλγόριθμος FFT χρησιμοποιεί την συμμετρία του όρου $e^{-j2\pi kn/N}$ και έτσι τελικά αποκαλύπτεται ότι ένας μεγάλος αριθμός των μπορεί να αποφευχθεί. Επομένως, ο αριθμός των πράξεων του αλγορίθμου FFT είναι ανάλογος με $\log_2(n)$ πράξεις. Για μεγάλους αριθμούς δεδομένων, N , αυτό είναι μια σημαντική μείωση του απαιτούμενου αριθμού των πράξεων.^[10]

2.6.6 Πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο

Οι πιο συνηθισμένοι μετατροπείς, που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση ταλαντώσεων βασίζονται στο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Το φαινόμενο αυτό συμβαίνει, όταν ένα φορτίο, q , παράγεται σε έναν κρύσταλλο, με την εφαρμογή μιας δύναμης σε αυτόν. Το φορτίο είναι ανάλογο της δύναμης:

$$q = S \cdot F \quad (2.41)$$

όπου S είναι ο παράγοντας ευαισθησίας. Το εξαρτώμενο από τη διεύθυνση πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο εξηγείται με την ύπαρξη ηλεκτρικών δίπολων στο υλικό. Κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες αυτά τα δίπολα αναγκάζονται να προσανατολιστούν σε μια συγκεκριμένη διεύθυνση, η οποία στην συνέχεια γίνεται η διεύθυνση του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου του υλικού.^[10]

2.6.7 Ηλεκτρικός θόρυβος

Όταν για μετρήσεις ταλαντώσεων χρησιμοποιούνται πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα, ο θόρυβος στις μετρήσεις αυξάνεται λόγω διαφοράς δυναμικού μεταξύ των σημείων, στα οποία είναι τοποθετημένα τα επιταχυνσιόμετρα. Αυτό συμβαίνει ακόμα και όταν υπάρχει μονωτική επικάλυψη στα επιταχυνσιόμετρα. Επομένως, για όσο το δυνατό μεγαλύτερη μείωση του θορύβου, όταν μετρούνται επιταχύνσεις, θα πρέπει τα επιταχυνσιόμετρα να διαχωρίζονται με την επιφάνεια μέτρησης με ειδικό μονωτικό πιάτο. Επίσης, θα πρέπει να ληφθούν σοβαρά υπόψη τα καλώδια με τα οποία είναι συνδεδεμένα τα επιταχυνσιόμετρα, τα οποία θα πρέπει να είναι στερεωμένα και να μην κρέμονται και δονούνται. Ακόμα, το μήκος των καλωδίων μεταξύ επιταχυνσιόμετρου και ενισχυτή θα πρέπει να είναι όσο το δυνατό μικρότερο.^[10]

Κεφάλαιο 3

Πειραματική διάταξη και μεθοδολογία μετρήσεων

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι συνθήκες διεξαγωγής των πειραμάτων και η βασική πειραματική διάταξη. Επίσης, γίνεται μια εκτενής παρουσίαση των μεθόδων και των μετρητικών οργάνων, που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτέλεση των πειραμάτων αυτής της μελέτης. Τέλος, αναφέρονται οι τρόποι συλλογής και επεξεργασίας των δεδομένων.

Ο χώρος διεξαγωγής των πειραμάτων είναι το εργαστήριο της Μηχανικής Ρευστών του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών. Οι μετρήσεις των ταλαντωτικών και των ακουστικών σημάτων, όπως και οι μετρήσεις των ταχυτήτων της ροής στα διαφορετικά δοκίμια, έγιναν σε σημείο όπου υπάρχει τραπέζι, το οποίο κρίθηκε κατάλληλο για την τοποθέτηση του φυγοκεντρικού συμπιεστή. Ωστόσο, οι μετρήσεις των ταλαντωτικών σημάτων της πτέρυγας πραγματοποιήθηκαν στο χώρο όπου βρίσκεται αυτή, με αλλαγή της θέσης του συμπιεστή, έτσι ώστε να είναι δυνατή η κατάλληλη τοποθέτηση του σωλήνα, μέσα από τον οποίο εξέρχεται ο αέρας.

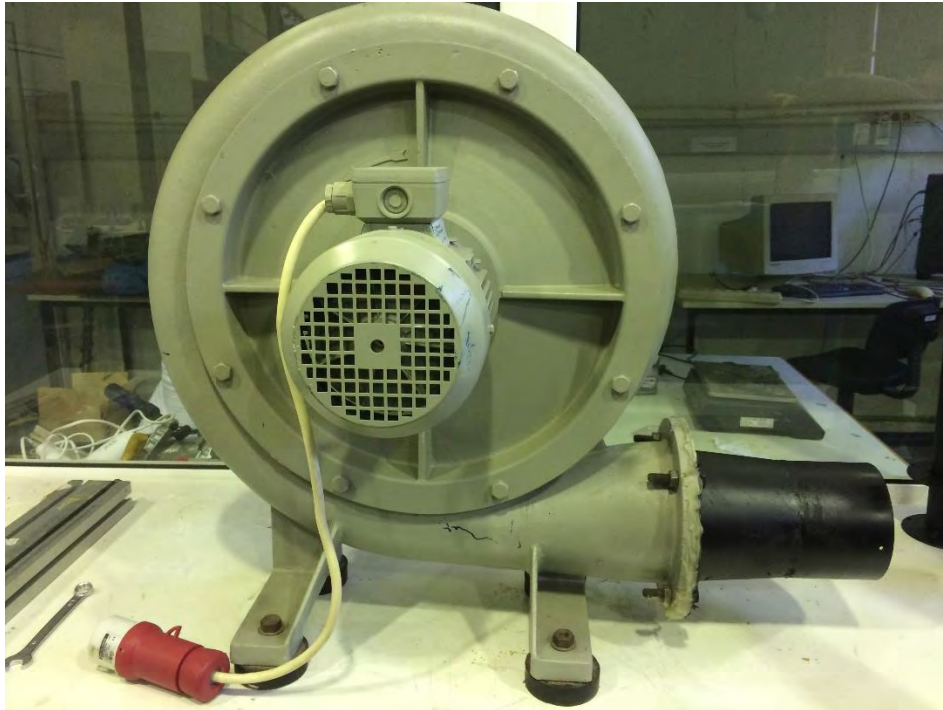


Σχήμα 3.1 Εγκατάσταση για μετρήσεις ροής

3.1 Φυγοκεντρικός συμπιεστής

Ο συμπιεστής αποτελεί το βασικό εργαλείο αυτής της μελέτης, αφού έγινε χρήση του σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Το μοτέρ του

είναι μάρκας Siemens AG μοντέλο D – 97615 με πίεση $p_{int\ max} = 1,1\ bar\ abs.$ Επιπλέον, ο συμπιεστής λειτουργεί με τριφασικό ρεύμα, οπότε άλλος ένας λόγος εκτέλεσης των πειραμάτων στο εργαστήριο της Μηχανικής Ρευστών του τμήματος, είναι η ύπαρξη τριφασικής παροχής μέσα σε αυτό.



Σχήμα 3.2 Φυγοκεντρικός συμπιεστής

Για την εύρυθμη εκτέλεση των πειραμάτων και τη διευκόλυνση των μετρήσεων έγιναν κάποιες τροποποιήσεις στην κάσα του συμπιεστή. Αρχικά, τοποθετήθηκε σωλήνας διαμέτρου εκατό και είκοσι (120) χιλιοστών στην έξοδο, ώστε να τοποθετούνται ιδανικά τα διάφορα δοκίμια, περιορίζοντας τις απώλειες ταχύτητας και πίεσης στο ελάχιστο. Ο σωλήνας συγκρατήθηκε με τέσσερις (4) βίδες για μεγαλύτερη ασφάλεια και έγινε εφαρμογή σιλικόνης στο σημείο ένωσης για περαιτέρω μείωση των απωλειών. Επίσης, ανοίχτηκαν τέσσερις (4) τρύπες για μικρότερες βίδες στην άκρη του σωλήνα για ασφάλεια και καλύτερη συγκράτηση των δοκιμίων. Ακόμη, ανοίχτηκαν δύο τρύπες, η μία σε σημείο του σωλήνα και η άλλη στην κάσα του συμπιεστή, για την κόλληση των σωληνών μέτρησης του μανομέτρου. Επιλέχθηκε μικρότερη διάμετρος για τις δύο τρύπες από τα σωληνάκια μέτρησης, ώστε με την εισαγωγή τους να ‘σφηνώσουν’ και επιπλέον, κολλήθηκαν με κόλλα δύο σημείων, με αυτό τον τρόπο οι απώλειες από αυτά τα σημεία θα είναι αμελητέες. Τέλος, χρωματίστηκε με λευκή μπογιά μικρό τμήμα ενός από τα πτερύγια του μοτέρ, για την μέτρηση των στροφών του με κάμερα υψηλής ταχύτητας.

α)



β)



Σχήμα 3.3 α) Άνω όψη σωλήνα (διακρίνονται οι τρύπες συγκράτησης, το κολλημένο σωληνάκι μέτρησης και η σιλικόνη), β) Δεύτερο σωληνάκι για μέτρηση διαφοράς πίεσης

3.2 Δοκίμια μετρήσεων (ακροφύσια)

Για την πρώτη φάση των πειραμάτων της συγκεκριμένης μελέτης χρησιμοποιήθηκαν δέκα (10) σωλήνες διαφορετικών διαμέτρων. Επιλέχθηκαν εννιά (9) σωλήνες του ίδιου υλικού, για την εξαγωγή ακριβέστερων αποτελεσμάτων. Επιπλέον, επιλέχθηκε ένας (1) σωλήνας από διαφορετικό υλικό με διάμετρο περίπου ίση με τον μικρότερο από τους υπόλοιπους εννιά, ώστε να γίνουν διάφορες συγκρίσεις μεταξύ των δύο υλικών. Σε όλους τους σωλήνες έγινε ‘κόλληση’ ροδελών συγκράτησης, για την

εφαρμογή τους στον συμπιεστή (διάσταση διαμέτρου σωλήνα συμπιεστή περίπου ίση με διάσταση ροδελών συγκράτησης των δοκιμίων).

Για την επίτευξη περαιτέρω ακρίβειας στις μετρήσεις, πραγματοποιήθηκαν κάποιες κατεργασίες στους σωλήνες, οι οποίες έγιναν με τη βοήθεια του προσωπικού του μηχανουργείου του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών. Πιο συγκεκριμένα έγιναν κατεργασίες κοπής, λείανσης και συγκόλληση με ηλεκτρόδιο. Για τις κατεργασίες αυτές χρησιμοποιήθηκαν εργαλεία που υπάρχουν στο μηχανουργείο.

Πρώτα από όλα, έγινε επιλογή μήκους πενήντα (50) εκατοστών για κάθε έναν από τους σωλήνες, το συγκεκριμένο μήκος κρίθηκε κατάλληλο για δύο κυρίως λόγους. Πρώτον, υπολογίστηκε ότι είναι αρκετό, ώστε η ροή του αέρα στην έξοδο να μην επηρεάζεται σημαντικά από τις αναταραχές που δημιουργούνται στην περιοχή σύνδεσης του δοκιμίου με τον συμπιεστή. Δεύτερον, η πλειοψηφία των δοκιμίων δεν εμφανίζει ατέλειες σε μήκη μικρότερα των 50 εκατοστών. Μόνο τα δύο μεγαλύτερα είχαν ατέλειες σε μικρότερα μήκη, για αυτό το λόγο η κοπή τους έγινε στα τριάντα τέσσερα (34) εκατοστά σε αυτό με τη μεγαλύτερη διάμετρο και στα τριάντα έξι (36) εκατοστά στο άλλο.

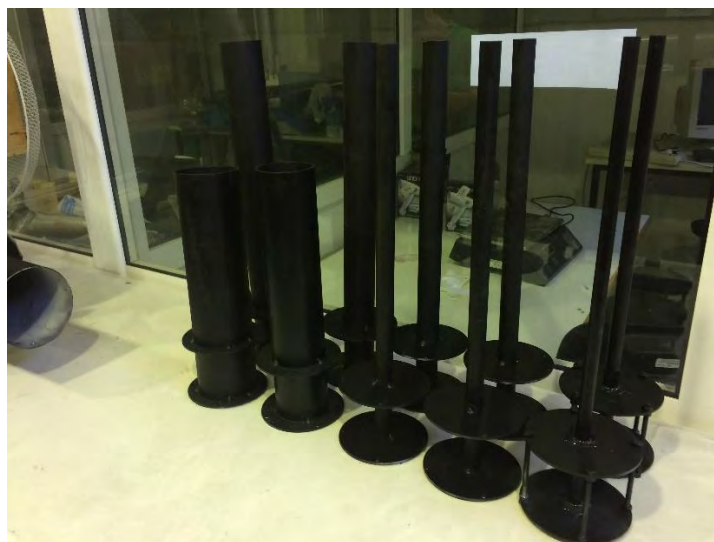
Η λείανση των δοκιμίων έγινε μετά την κοπή τους στο κατάλληλο μήκος. Πρώτα λειάνθηκε το εσωτερικό τους, έτσι ώστε να παρεμποδίζεται στο ελάχιστο η ροή από ρινίσματα, τα οποία προέκυψαν από την κοπή, αλλά και για τη διόρθωση τυχών προϋπαρχόντων ατελειών. Επιπρόσθετα, λειάνθηκαν οι άκρες τους για τη διευκόλυνση της εφαρμογής των ροδελών συγκράτησης στο κάθε ένα.

Στα μεγαλύτερα δοκίμια έγινε συγκόλληση των δύο (2) ροδελών συγκράτησης (κατασκευάστηκαν στο μηχανουργείο, ώστε να εφαρμόζουν με ακρίβεια στον κάθε σωλήνα) σε απόσταση οκτώ (8) εκατοστών μεταξύ τους, με την πρώτη να συγκολλάται στη μία άκρη του κάθε δοκιμίου. Η συγκόλληση των ροδελών συγκράτησης δεν ήταν δυνατή στα δύο μικρότερα δοκίμια, λόγω των πολύ μικρών διαμέτρων τους. Σε αυτά οι ροδέλες εφαρμόστηκαν με το άνοιγμα τεσσάρων (4) τρυπών στην καθεμία και με συγκράτηση τους με βίδες (η απόσταση μεταξύ των δύο διατηρήθηκε η ίδια όπως στα υπόλοιπα δοκίμια).

Τέλος, όλα τα δοκίμια βάφτηκαν, με σκοπό την καλύτερη παρουσίασή τους και ώστε να υπάρχει μια ομοιομορφία μεταξύ τους. Η βαφή τους έγινε με σπρέι σε χρώμα μαύρο ματ.

Πίνακας 3.1 Ονοματολογία και διαστάσεις δοκιμίων

Όνομα	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Διάμετρος εσωτερική (mm)	80	69	56	45	28	21	20	16	14	12



Σχήμα 3.4 Δοκίμια μετρήσεων

3.3 Μετατροπέας συχνότητας (frequency inverter)

Για την λειτουργία του φυγοκεντρικού συμπιεστή χρησιμοποιήθηκε μετατροπέας συχνότητας μάρκας Siemens και μοντέλου Micromaster 420. Ο συγκεκριμένος μετατροπέας λειτουργεί σε ένα εύρος συχνοτήτων μεταξύ 5 – 50 Hz. Επομένως, κρίθηκε κατάλληλος για τα πειράματα της μελέτης, γιατί οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε έναν ικανοποιητικό αριθμό διαφορετικών συχνοτήτων, ώστε με αυτόν τον τρόπο να εξαχθούν καλύτερα και πιο αξιόπιστα αποτελέσματα.

Οι μετατροπείς αυτού του τύπου χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της ταχύτητας μηχανών, οι οποίες λειτουργούν με τριφασικό ρεύμα. Επίσης, ελέγχονται από μικροεπεξεργαστές και χρησιμοποιούν σύγχρονη τεχνολογία Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT), που τους καθιστά αξιόπιστους και ευπροσάρμοστους. Επιπλέον, μία μέθοδος ρύθμισης εύρους παλμού με επιτρεπόμενες επιλογές συχνότητας επιτρέπει την ήσυχη λειτουργία του κινητήρα. Τέλος, ο μετατροπέας διαθέτει πλήρεις προστατευτικές λειτουργίες, που παρέχουν προστασία τόσο στον ίδιο, όσο και στο μοτέρ^[14].



Σχήμα 3.5 Μετατροπέας συχνότητας Siemens MICROMASTER 420

3.4 Όργανα μετρήσεων

Για τις μετρήσεις και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων της μελέτης χρησιμοποιήθηκαν τα εξής μετρητικά όργανα: ανεμόμετρο, μανόμετρο, μετρητής στάθμης ήχου, επιταχυνσιόμετρο και παλμογράφος. Η παρουσίασή τους και η επεξήγηση της λειτουργίας και των βασικών χαρακτηριστικών τους γίνεται στην συνέχεια.

3.4.1 Ανεμόμετρο

Για την μέτρηση των ταχυτήτων της ροής, αλλά και για μέτρηση της θερμοκρασίας εξόδου του αέρα από τον συμπιεστή χρησιμοποιήθηκε ένα ανεμόμετρο μάρκας TSI και μοντέλο VELOCICALC 8350. Το συγκεκριμένο ανεμόμετρο διαθέτει έναν τηλεσκοπικό ανιχνευτή, ο οποίος έχει στην άκρη του αισθητήρες για μέτρηση ταχύτητας και θερμοκρασίας. Ο αισθητήρας θα πρέπει να είναι στραμμένος σωστά (η κόκκινη κουκίδα στη μύτη του να είναι προσανατολισμένη προς τη ροή) και να είναι ολόκληρος μέσα στο ρεύμα αέρα, έτσι ώστε να γίνονται σωστά και με περισσότερη ακρίβεια οι μετρήσεις^[15]. Οι μετρήσεις της ταχύτητας γίνονται σε FPM και οι μετρήσεις της θερμοκρασίας σε βαθμούς Fahrenheit (°F). Τέλος, στους πίνακες 3.1 και 3.2 φαίνονται οι προδιαγραφές του συγκεκριμένου τύπου ανεμόμετρου.

Πίνακας 3.2 Προδιαγραφές TSI VELOCICALC 8350

Εύρος μέτρησης ταχυτήτων	15 – 9999 FPM
Εύρος μέτρησης θερμοκρασίας	0 °F – 200 °F
Ακρίβεια μέτρησης θερμοκρασίας	± 0.5 °F
Διαστάσεις εργαλείου (χωρίς ανιχνευτή)	38 x 105 x 190 mm
Συνολικό βάρος	0.5 kg
Διαστάσεις τηλεσκοπικού ανιχνευτή	178 – 533 mm μήκος / 6 mm διάμετρος στην άκρη

(Πηγή: TSI Incorporated, *Model 8350 VELOCICALC air velocity meter, Operation and Service Manual*, copyright 1989)

Πίνακας 3.3 Ακρίβεια μέτρησης ταχυτήτων TSI VELOCICALC 8350

Ταχύτητα (FPM)	30 – 500	500 – 2000	2000 – 6000	6000 – 9999
Ακρίβεια (FPM)	± 2	± 10	± 50	± 100

(Πηγή: TSI Incorporated, *Model 8350 VELOCICALC air velocity meter, Operation and Service Manual*, copyright 1989)



Σχήμα 3.6 Ανεμόμετρο TSI VELOCICALC 8350

3.4.2 Μανόμετρο

Το μανόμετρο που χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση της διαφοράς πίεσης είναι το Furness FC0510 Micromanometer. Τα δύο σωληνάκια που κολλήθηκαν στην κάσα του συμπιεστή, αποτελούν σωλήνες Pitot, οι οποίοι χρησιμεύουν για τη μέτρηση της διαφοράς πίεσης στο συμπιεστή. Αυτά ενώνονται με το μανόμετρο με σωλήνωση σιλικόνης διπλού πυρήνα, το οποίο διαθέτει δύο θύρες εισόδου πίεσης (θετική και αρνητική). Η θετική συνδέεται μέσω του σωλήνα σιλικόνης με το σωληνάκι που βρίσκεται στο άνω τμήμα της κάσας του συμπιεστή, ενώ η αρνητική θύρα με το σωληνάκι που βρίσκεται κοντά στην έξοδο.

Ουσιαστικά, το συγκεκριμένο μανόμετρο αποτελεί μία συσκευή μέτρησης ακριβείας με βάση μικροεπεξεργαστή για μετρήσεις διαφορικών πιέσεων εξαιρετικά χαμηλού εύρους. Επιπλέον, το αέριο που εισέρχεται στη μονάδα πρέπει να είναι στεγνό και μη διαβρωτικό^[16].

Πίνακας 3.4 Προδιαγραφές Furness FC0510 Micromanometer

Βάρος	9.75 lbs.
Διαστάσεις	12" x 9.5" x 5"
Εύρος μέτρησης	0 – 8.0" H₂O
Ακρίβεια μέτρησης	Βαθμονόμηση στο 0.25% της ανάγνωσης
Θερμοκρασία λειτουργίας	0 – 45 °C

(Πηγή: CleanAir, Furness FC0510 Micromanometer Specifications, copyright 2014)



Σχήμα 3.7 Μανόμετρο Furness FC0510 Micromanometer



Σχήμα 3.8 Διάταξη σωλήνων μέτρησης διαφοράς πίεσης

3.4.3 Μετρητής στάθμης ήχου

Για τη μέτρηση του ήχου του αερίου ρεύματος χρησιμοποιήθηκε ο μετρητής στάθμης ήχου χειρός της εταιρίας LUTRON ELECTRONIC μοντέλο SL – 4011. Το

συγκεκριμένο εργαλείο διαθέτει ένα μικρόφωνο, το διάφραγμα του οποίου ανταποκρίνεται στις αλλαγές στην πίεση του αέρα που προκαλούνται από τα ηχητικά κύματα^[17]. Επίσης, είναι κατασκευασμένο από ανθεκτικά υλικά, συμπεριλαμβανομένου του ABS – πλαστικού περιβλήματός του^[18].

Ο μετρητής διαθέτει δύο κανάλια μέτρησης (A και C), ώστε να συμμορφώνεται επαρκώς με τα πρότυπα. Το κανάλι A επιλέγεται εάν γίνεται μέτρηση του ‘περιβαλλοντικού’ ήχου, ενώ το κανάλι C είναι κατάλληλο για έλεγχο του θορύβου μηχανικού εξοπλισμού. Επιπλέον, διαθέτει τρεις επιλογές χρονομέτρησης (Fast, Slow και Max Hold, η οποία εμφανίζει την μέγιστη τιμή στην οθόνη). Η μονάδα μέτρησης, στην οποία μετριέται η ένταση του ήχου, είναι τα decibel (dB)^[18].

Πίνακας 3.5 Προδιαγραφές μετρητή στάθμης ήχου SL – 4011

Εύρος μέτρησης	30 – 80 dB, 50 – 100 dB, 80 – 130 dB
Μέγεθος μικροφώνου	½ inch
Θερμοκρασία λειτουργίας	0 – 50 °C
Διάσταση	255 x 70 x 28 mm
Βάρος	280 g

(Πηγή: LUTRON ELECTRONIC, *DIGITAL SOUND METER SL – 4011 SPECS.*)



Σχήμα 3.9 Μετρητής στάθμης ήχου SL – 4011

3.4.4 Πιεζοηλεκτρικό επιταχυνσιόμετρο

Για τις μετρήσεις των ταλαντώσεων χρησιμοποιήθηκε επιταχυνσιόμετρο PiezoBeam Cube τύπου 8632C της εταιρίας Kistler. Ο συγκεκριμένος αισθητήρας είναι ένα μονοαξονικό επιταχυνσιόμετρο, δηλαδή κάνει μετρήσεις δονήσεων σε μία διεύθυνση. Γίνεται χρήση του για κατασκευαστική διερεύνηση σε θερμικά σταθερά περιβάλλοντα. Κάποια χαρακτηριστικά του είναι ότι έχει μικρό κυβικό σχεδιασμό, υψηλή ευαισθησία,

λειτουργία χαμηλής αντίστασης τάσης και σύνδεση γείωσης^[19] (για εμφάνιση ελάχιστου δυνατού ‘θορύβου’ στις μετρήσεις).



Σχήμα 3.10 Κυβικό επιταχυνσιόμετρο PiezoBeam Cube 8632C (Αναπαραγωγή από KISTLER, *Accelerometers, providing quick, accurate and reliable motion data*, 2005)

Πίνακας 3.6 Προδιαγραφές PiezoBeam Cube 8632C10T

Εύρος μέτρησης	± 10 g
Ευαισθησία	496 mV/g
Εγκάρσια Ευαισθησία	<1.0 %
Συχνότητα συντονισμού	22.0 kHz
Θερμοκρασία λειτουργίας	0 – 65 °C
Βάρος	6 grams

(Πηγή: KISTLER, *Accelerometers, providing quick, accurate and reliable motion data*, copyright 2005)

3.4.5 Τροφοδοτικό/Συνδέτης (Power Supply/Coupler)

Για την παροχή ρεύματος και έλεγχο λειτουργίας του επιταχυνσιόμετρου χρησιμοποιήθηκε τροφοδοτικό τεσσάρων (4) καναλιών τύπου 5134A1 της εταιρίας Kistler. Το τροφοδοτικό αυτού του τύπου επιτρέπει έλεγχο και παρακολούθηση των εξής παραμέτρων: ειδοποίηση για παροχή ή μη ρεύματος στον αισθητήρα, μη – πτητική μνήμη για καθορισμό παραμέτρων, επτά (7) επιλέξιμα κέρδη (gains) και τέσσερα (4) επιλέξιμα φίλτρα. Η χρήση του ενδείκνυται για εργαστηριακές μετρήσεις ταλαντώσεις με μονοαξονικά ή τριαξονικά επιταχυνσιόμετρα^[19].



Σχήμα 3.11 Τροφοδοτικό Four Channel Piezotron Coupler 5134A1 (Αναπαραγωγή από KISTLER, *Accelerometers, providing quick, accurate and reliable motion data*, 2005)

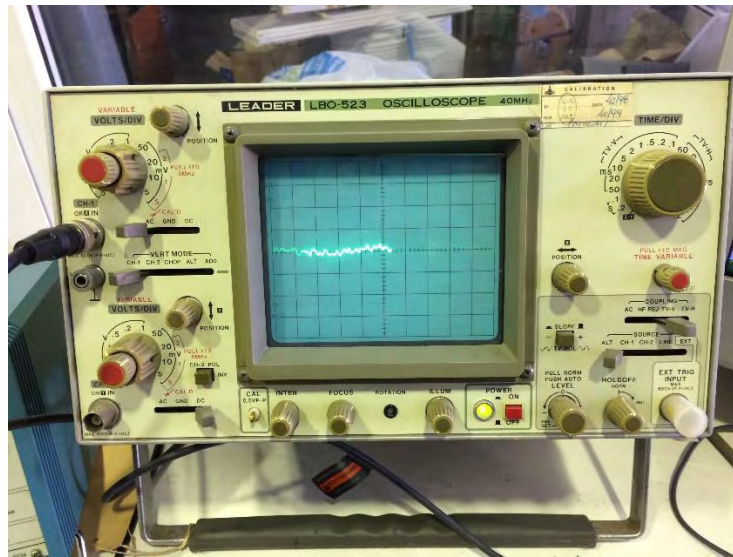
Πίνακας 3.7 Προδιαγραφές τροφοδοτικού Four Channel Piezotron Coupler 5134A1

Ρεύμα διέγερσης αισθητήρα	4 mA
Κέρδος (Gain)	1, 2, 5, 10, 20, 50, 100
Θερμοκρασία λειτουργίας	0 – 50 °C
Διαστάσεις	94 x 150 x 196 mm
Βάρος	1.8 kg

(Πηγή: KISTLER, *Accelerometers, providing quick, accurate and reliable motion data*, copyright 2005)

3.4.6 Παλμογράφος

Για την βαθμονόμηση του επιταχυνσιόμετρου χρησιμοποιήθηκε παλμογράφος της εταιρίας LEADER ELECTRONICS και μοντέλο LBO – 523. Η λειτουργία του παλμογράφου μέσα σε ισχυρό μαγνητικό πεδίο ή όταν χρησιμοποιείται δίπλα σε εξοπλισμό που καταναλώνει υψηλά ποσά ενέργειας προκαλεί αλλοιώσεις στις κυματομορφές που εμφανίζονται στην οθόνη^[20].



Σχήμα 3.12 Παλμογράφος LBO – 523

Πίνακας 3.8 Προδιαγραφές παλμογράφου LBO – 523

Ευαισθησία στον x – άξονα	5mV/div. – 5V/div.
Ευαισθησία στον y – άξονα	5mV/div. – 5V/div.
Θερμοκρασία λειτουργίας	0 – 40 °C
Διαστάσεις	160 x 290 x 375 mm
Βάρος	8.5 kg

(Πηγή: LEADER ELECTRONICS CORP., DUAL TRACE OSCILLOSCOPE INSTRUCTION MANUAL)

3.5 Κατασκευή συγκράτησης τηλεσκοπικού αισθητήρα ανεμόμετρου

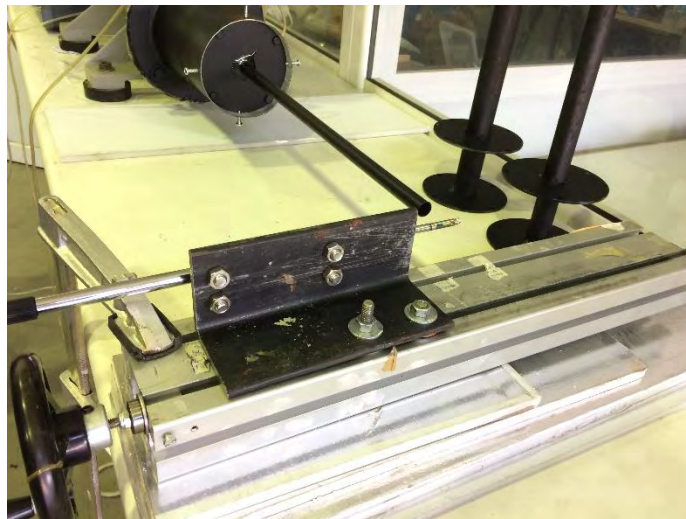
Με σκοπό την ευκολία των μετρήσεων, αλλά και την ομοιογένεια των αποτελεσμάτων στα διάφορα δοκίμια και στις διαφορετικές συχνότητες, κρίθηκε απαραίτητη η κατασκευή ενός εργαλείου συγκράτησης, όπως και μετακίνησης του τηλεσκοπικού αισθητήρα του ανεμόμετρου. Μετά από προσεκτική έρευνα βρέθηκε ένας μηχανισμός με μανιβέλα χεριού, ο οποίος έχει τις κατάλληλες προδιαγραφές για τη συγκεκριμένη εργασία. Μία πλήρης περιστροφή του τιμονιού έχει βήμα ένα (1) χιλιοστό, αυτό είναι ένα ακόμη χαρακτηριστικό του συγκεκριμένου μηχανισμού, το οποίο τον καθιστά πλήρως κατάλληλο για τη μελέτη, για το λόγο ότι τα δοκίμια έχουν μικρές διαμέτρους και επομένως διευκολύνεται η μέτρηση σε περισσότερα σημεία, ώστε να βρεθεί το σωστότερο προφίλ ταχυτήτων.

Ο μηχανισμός διαθέτει δύο (2) βίδες για συγκράτηση αντικείμενων επάνω του. Έτσι βρέθηκε κομμάτι σίδηρο με σχήμα ορθή γωνία, το οποίο με βοήθεια από το προσωπικό του μηχανουργείου του τμήματος υπέστη κατεργασίες κοπής και λείανσης, ώστε να αποκτήσει το ιδανικό μέγεθος. Επιπλέον, ανοίχτηκαν στην δύο (2) τρύπες στην οριζόντια πλευρά του, ώστε να μπορεί να ‘βιδωθεί’ στο μηχανισμό με τη μανιβέλα. Για να επιτευχθεί η συγκράτηση του αισθητήρα του ανεμόμετρου ανοίχτηκαν τέσσερις (4) τρύπες στην κάθετη πλευρά του για την εισαγωγή των δύο (2) καμπύλων βιδών συγκράτησης.

Ο μηχανισμός μετά από τις τροποποιήσεις τοποθετήθηκε στο τραπέζι, όπου έχει τοποθετηθεί ο συμπιεστής. Από κάτω του τοποθετήθηκαν ξύλινες πλάκες, έτσι ώστε ο αισθητήρας να έρθει στο κατάλληλο ύψος. Τέλος, όλη η κατασκευή στερεώθηκε στο τραπέζι με ένα σφιγκτήρα.



Σχήμα 3.13 Εμπρός όψη κατασκευής (διακρίνεται ο τρόπος συγκράτησης του αισθητήρα του μανομέτρου)



Σχήμα 3.14 Πίσω όψη κατασκευής

3.6 Βοηθητικά εργαλεία για εύστοχη εκπόνηση των πειραμάτων

Αρχικά, στα σημεία ένωσης των δοκιμίων με τις ροδέλες συγκράτησης, αλλά και στα σημεία ένωσης των ροδελών με τον σωλήνα του συμπιεστή (δηλαδή όπου υπήρχαν κενά) εφαρμόστηκε πλαστελίνη, ώστε να μειωθούν στο ελάχιστο οι απώλειες. Επίσης, για την ευθυγράμμιση των δοκιμίων κατά τις μετρήσεις των ταχυτήτων της ροής χρησιμοποιήθηκαν αλφάδι και στήριξη.

Έπειτα από κάποιες αρχικές μετρήσεις ταλαντώσεων του συμπιεστή παρατηρήθηκε ότι η στήριξη, που εφαρμόστηκε στα δοκίμια για την ευθυγράμμισή τους παρεμποδίζει την ταλάντωση. Για αυτόν το λόγο βρέθηκε εναλλακτικός τρόπος ευθυγράμμισης των δοκιμίων, ο οποίος επηρεάζει ελάχιστα την ταλάντωση του συμπιεστή. Χρησιμοποιήθηκε μια πρόχειρη κατασκευή με μια 'πίαστρα', το άνοιγμα της οποίας είναι μεταβαλλόμενο (για συγκράτηση όλων των δοκιμίων διαφορετικών διαμέτρων), η οποία στηρίζεται σε μια κατακόρυφη χαλύβδινη βέργα. Η βέργα είναι 'κολλημένη' σε μία βάση, πάνω στην οποία εφαρμόστηκε αντίβαρο επτά (7) κιλών για καλύτερη στήριξη.

Τέλος, για τις μετρήσεις των ταλαντώσεων της πτέρυγας, χρησιμοποιήθηκε εύκαμπτος σωλήνας PVC διαμέτρου εκατό και τριάντα (130) χιλιοστών. Η μία άκρη του σωλήνα εφαρμόστηκε στον συμπιεστή και η άλλη στηρίχθηκε κατακόρυφα κάτω από την άκρη της πτέρυγας σε απόσταση εβδομήντα (70) χιλιοστών από αυτή.



Σχήμα 3.15 Πλαστελίνα για μείωση απωλειών



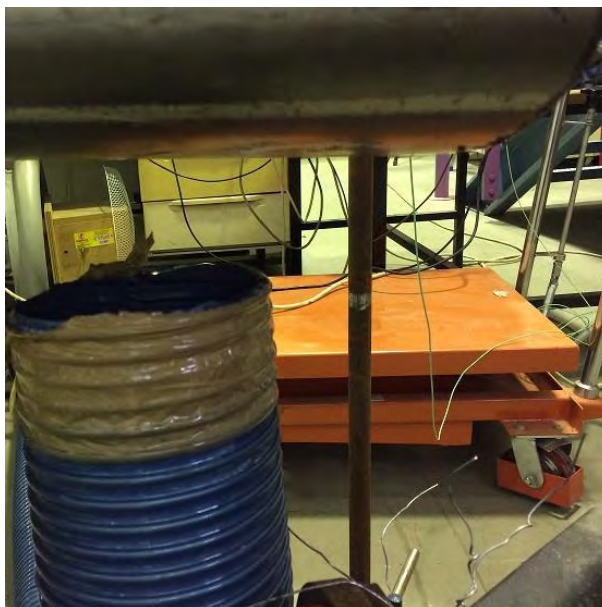
Σχήμα 3.16 Στήριξη δοκιμίων σε μετρήσεις ταχυτήτων ροής



Σχήμα 3.17 Στήριξη δοκιμίων σε μετρήσεις ταλαντώσεων συμπιεστή



Σχήμα 3.18 Σύνδεση σωλήνα PVC με συμπιεστή



Σχήμα 3.19 Απόσταση σωλήνα PVC από πτέρυγα

3.7 Εργαλεία αποθήκευσης και επεξεργασίας αποτελεσμάτων

Για την επεξεργασία και αποθήκευση των αποτελεσμάτων, που προέκυψαν από τη διεξαγωγή των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρονικός υπολογιστής. Πιο συγκεκριμένα έγινε χρήση των προγραμμάτων Microsoft Excel, Origin, FreeVideoToJPGConverter και LabVIEW της εταιρίας National Instruments. Τα αποτελέσματα από όλες τις μετρήσεις καταγράφηκαν στο Microsoft Excel και επεξεργάστηκαν με το Origin. Συγκεκριμένα, βρέθηκαν τα προφίλ των ταχυτήτων και δημιουργήθηκαν τα αντίστοιχα διαγράμματα¹. Επιπλέον, στα ταλαντωτικά σήματα έγινε ο μετασχηματισμός FFT².

Για την αποθήκευση και καταγραφή των ταλαντωτικών σημάτων του συμπιεστή και της πτέρυγας χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα LabVIEW της National Instruments με τη βοήθεια της συσκευής NI USB – 6009 της ίδιας εταιρίας, η οποία συνδέει το επιταχυνσιόμετρο με τον υπολογιστή και έτσι επιτρέπει την ψηφιοποίηση των δεδομένων. Η συγκεκριμένη συσκευή διαθέτει οκτώ (8) αναλογικά κανάλια στα 12 ή 14 bits και έχει δυνατότητα ανάγνωσης μέχρι τα 48 kS/s (kilo-samples per second)^[21]. Το πρόγραμμα LabVIEW είναι προγραμματισμένο, ώστε να δέχεται διάφορες παραμέτρους όπως το χρόνο μέτρησης και τη συχνότητα και εκτός από καταγραφή των μετρήσεων δίνει τιμές, όπως η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση.

Οι μετρήσεις των στροφών του συμπιεστή έγιναν με κάμερα υψηλής ταχύτητας μάρκας Sony (εστίαση σε ένα σημείο της πτέρυγας του μοτέρ του συμπιεστή). Το πρόγραμμα FreeVideoToJPGConverter χρησιμοποιήθηκε για τη μετατροπή του βίντεο σε

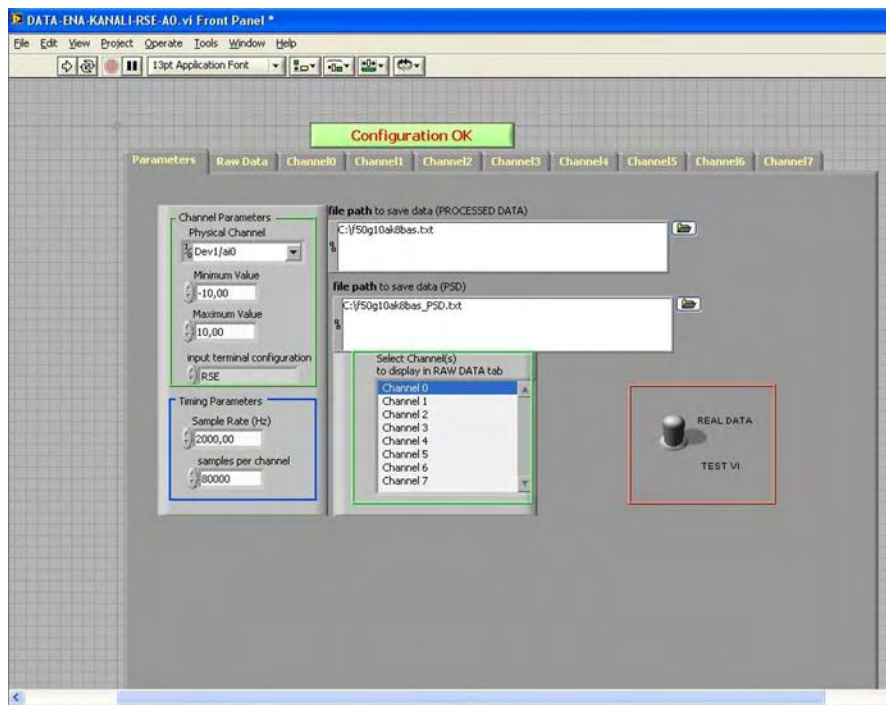
¹ Λεπτομερής ανάλυση στο Κεφ. 4

² Λεπτομερής ανάλυση στα Κεφ. 7,8

εικόνες, ώστε με αυτόν τον τρόπο να είναι δυνατή η μέτρηση των στροφών (μέτρηση των εικόνων που εμφανίζεται η λευκή κουκκίδα)³.



Σχήμα 3.20 Συσκευή NI USB – 6009 (Αναπαραγωγή από <http://sine.ni.com>)



Σχήμα 3.21 Αρχική σελίδα προγράμματος LabVIEW

³ Αναφορά στο Κεφ. 3.1

3.8 Μεθοδολογία μετρήσεων

Για την επίτευξη των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν ανεμομετρία και πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Στο αρχικό στάδιο της μελέτης πραγματοποιήθηκαν αρκετές προκαταρκτικές μετρήσεις, ώστε να καταλήξουμε στον τρόπο που θα γίνουν τελικά αυτές. Έτσι, δημιουργήθηκε ένα πρωτόκολλο μετρήσεων, το οποίο ακολουθήθηκε αυστηρά με σκοπό να εκτελούνται ομαλά και χωρίς παρεμβολές οι μετρήσεις. Ακόμη, τα αποτελέσματα που θα εξαχθούν να παρουσιάζουν μια ομοιογένεια, δηλαδή η σύγκρισή τους να οδηγεί σε λογικά συμπεράσματα. Όλες οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε πέντε διαφορετικές συχνότητες λειτουργίας του μετατροπέα συχνοτήτων, στα 10, 20, 30, 40 και 50 Hz.

Για τις μετρήσεις των ταχυτήτων της ροής χρησιμοποιήθηκαν τα 9 δοκίμια. Το δοκίμιο (7) δεν χρησιμοποιήθηκε, λόγω του ότι παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά με το δοκίμιο (6), όπως διαπιστώθηκε από τους προκαταρκτικούς ελέγχους. Στα δοκίμια (1),(2),(3) και (4) μετρήθηκε η ταχύτητα σε πέντε (5) σημεία, μεταξύ της άκρης (μέτρηση από πλευρά τιμονιού μανιβέλας) και του κέντρου τους. Στα δοκίμια (5) και (6) έγινε μέτρηση ταχυτήτων σε τρία (3) σημεία, ενώ στα δοκίμια (8), (9) και (10) έγινε μέτρηση σε δύο (2) σημεία. Τα σημεία στα οποία έγιναν οι μετρήσεις των ταχυτήτων της ροής στα δοκίμια (5),(6),(8),(9) και (10) μετρήθηκαν από την άλλη άκρη των δοκιμίων προς το τιμόνι της μανιβέλας, γιατί ο αισθητήρας του ανεμόμετρου παρεμβαλλόταν στη ροή εξαιτίας της μικρής διαμέτρου τους. Ο αισθητήρας του ανεμόμετρου τοποθετήθηκε σε απόσταση 1 cm από το πέρας των δοκιμίων.

Ταυτόχρονα με τις μετρήσεις των ταχυτήτων μετρήθηκαν η διαφορά πίεσης, η ένταση του ήχου και η θερμοκρασία στα 9 δοκίμια. Η ένταση του ήχου μετρήθηκε και στις πέντε διαφορετικές συχνότητες, στην είσοδο και στην έξοδο της ροής. Η τοποθέτηση του μετρητή ήχου έγινε σε απόσταση τεσσάρων (4) διαμέτρων εξόδου της ροής παράλληλα στη διεύθυνση αυτής και σε απόσταση δύο διαμέτρων κάθετα στη διεύθυνση της ροής. Η θερμοκρασία μετρήθηκε στην έξοδο της ροής στη συχνότητα των 50 Hz για κάθε δοκίμιο.

Στο δεύτερο στάδιο των πειραμάτων έγιναν οι μετρήσεις των ταλαντωτικών σημάτων στο συμπιεστή. Οι μετρήσεις έγιναν με χρήση όλων των δοκιμίων (10 δοκίμια) σε δύο σημεία, στο πέρας των δοκιμίων (στην έξοδο της ροής) και σε μία από τις τέσσερις βάσεις του συμπιεστή. Αντίστοιχα, οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στις συχνότητες 10, 20, 30, 40, 50 Hz. Ακόμη, σε αυτό το στάδιο έγιναν οι μετρήσεις των στροφών με την κάμερα υψηλής ταχύτητας και στις πέντε συχνότητες. Επιλέχθηκαν τα δοκίμια (3) και (9), με τα οποία έγινε η μέτρηση των στροφών, για να διαπιστωθεί αν υπάρχει μεταβολή των στροφών όταν αλλάζει η διάμετρος εξόδου της ροής. Επιπλέον, μετρήθηκαν οι ταλαντώσεις και οι στροφές του συμπιεστή στη συχνότητα των 50 Hz χωρίς την εισαγωγή κάποιου δοκιμίου σε αυτόν, σε δύο περιπτώσεις, μία μπλοκάροντας την έξοδο του αέρα και μία όχι.

Στο τρίτο στάδιο των πειραμάτων έγιναν οι μετρήσεις των ταλαντωτικών σημάτων στην πτέρυγα. Οι μετρήσεις έγιναν στις συχνότητες 0, 10, 20, 30, 40, και 50 Hz. Το επιταχυνσιόμετρο τοποθετήθηκε στην ελεύθερη άκρη της πτέρυγας και σε όλες τις συχνότητες δόθηκε μια αρχική στιγμιαία δύναμη στην πτέρυγα, και στην συνέχεια

αφέθηκε να ταλαντωθεί με την ιδιοσυχνότητά της. Βρέθηκε η θέση ισορροπίας της και χρησιμοποιήθηκε χαλύβδινη ράβδος, πάνω στην οποία με ταινία πάρθηκε το σημείο όπου βρίσκεται αυτή.



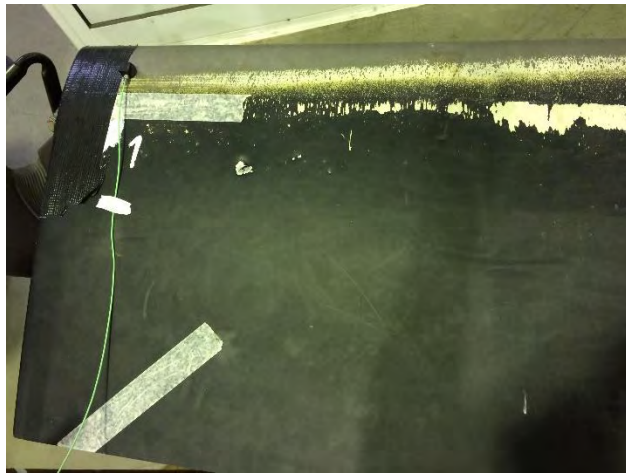
Σχήμα 3.22 Μέτρηση ταλαντωτικών σημάτων στη βάση του συμπιεστή



Σχήμα 3.23 Μέτρηση επιταχύνσεων στο πέρας του δοκιμίου (9)



Σχήμα 3.24 Μέτρηση στροφών με κάμερα υψηλής ταχύτητας



Σχήμα 3.25 Μέτρηση ταλαντωτικών σημάτων στην πτέρυγα



Σχήμα 3.26 Θέση ισορροπίας πτέρυγας (λευκή ταινία πάνω στη ράβδο)

Κεφάλαιο 4

Μετρήσεις ταχυτήτων ροής και διαφοράς πίεσης

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μια λεπτομερής παρουσίαση των αποτελεσμάτων, που προέκυψαν από το πρώτο στάδιο των πειραμάτων, και πιο συγκεκριμένα από τις μετρήσεις των ταχυτήτων της ροής στο συμπιεστή. Θα γίνει παρουσίαση των αποτελεσμάτων σε κάθε δοκίμιο ξεχωριστά, όπως αυτά μετρήθηκαν. Στην αρχή, θα γίνει αναλυτική επεξήγηση της διαδικασίας για την εύρεση της παροχής και της μέσης ταχύτητας από τα πειραματικά δεδομένα. Η επεξήγηση θα γίνει μόνο για το δοκίμιο (1), αλλά αντίστοιχη μεθοδολογία ακολουθήθηκε και για τα υπόλοιπα δοκίμια, όπου θα παρουσιαστούν χωρίς ανάλυση οι παροχές και οι μέσες ταχύτητες σε κάθε συχνότητα λειτουργίας του συμπιεστή. Στα υπόλοιπα δοκίμια θα γίνει παρουσίαση των προφίλ ταχυτήτων με διαγράμματα. Στο τέλος, θα γίνει μια συνολική ανασκόπηση της λειτουργίας του συμπιεστή, με παρουσίαση συγκεντρωτικών διαγραμμάτων για να γίνει κατανοητή η συνάφεια των μετρήσεων μεταξύ των δοκιμίων. Στο παρακάτω σχήμα παρατηρούμε ότι η ροή εξέρχεται από τον συμπιεστή στη **διεύθυνση z**. Οι ταχύτητες μετρήθηκαν σε διάφορες θέσεις στη **διεύθυνση x** και στο επίπεδο του κέντρου των δοκιμίων στη **διεύθυνση y**.



Σχήμα 4.1 Άξονες μέτρησης αποτελεσμάτων στο χώρο

4.1 Μετρήσεις με δοκίμιο (1) – Εύρεση παροχής και μέσης ταχύτητας

Αρχικά, η λήψη των δεδομένων και οι αντίστοιχες θέσεις, όπου αυτά μετρήθηκαν φαίνονται στον πίνακα 4.1

Πίνακας 4.1 Προφίλ ταχυτήτων δοκιμίου (1)

f(Hz) :	50	40	30	20	10
x(mm) :	V (fpm)	V (fpm)	V (fpm)	V (fpm)	V (fpm)
0	0	0	0	0	0
8	4460	3621	2720	1770	850
16	4980	3930	2970	1920	890
24	5100	4050	3050	1950	890
32	5100	4000	3020	1970	910
40	5000	3950	3020	1960	920

Στην συνέχεια, για διευκόλυνση στους υπολογισμούς οι μονάδες των ταχυτήτων μετατράπηκαν σε m/s. Ο πίνακας 4.2 είναι ο ανανεωμένος πίνακας με την μετατροπή των μονάδων.

Πίνακας 4.2 Προφίλ ταχυτήτων δοκιμίου (1) με μονάδες m/s

f (Hz)	50	40	30	20	10
x (mm)	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)
0	0	0	0	0	0
8	22,6568	18,39468	13,8176	8,9916	4,318
16	25,2984	19,9644	15,0876	9,7536	4,5212
24	25,908	20,574	15,494	9,906	4,5212
32	25,908	20,32	15,3416	10,0076	4,6228
40	25,4	20,066	15,3416	9,9568	4,6736

Στην συνέχεια, για τον υπολογισμό της παροχής (q) έπρεπε να υπολογιστούν οι παράμετροι $v(r)$, r , dr :

$$q = \int 2 \times \pi \times V(r) \times r \times dr \quad (4.1)$$

Η παράμετρος r αποτελεί των μέσο όρο δύο διαδοχικών θέσεων x , η παράμετρος dr αποτελεί τη διαφορά δύο διαδοχικών r και η παράμετρος $V(r)$ αποτελεί τον μέσο όρο δύο διαδοχικών ταχυτήτων στην ίδια συχνότητα. Τα αποτελέσματα από τον υπολογισμό τους φαίνονται στους πίνακες 4.3 και 4.4.

Πίνακας 4.3 Αποτελέσματα υπολογισμών r , dr

r (m)	dr (m)
0,036	0,008
0,028	0,008
0,02	0,008
0,012	0,008
0,004	0,008
0	0

Πίνακας 4.4 Αποτελέσματα υπολογισμών $V(r)$ σε (m/s)

r (m)	50 (Hz)	40 (Hz)	30 (Hz)	20 (Hz)	10 (Hz)
0,036	25,654	20,193	15,3416	9,9822	4,6482
0,028	25,908	20,447	15,4178	9,9568	4,572
0,02	25,6032	20,2692	15,2908	9,8298	4,5212
0,012	23,9776	19,17954	14,4526	9,3726	4,4196
0,008	11,3284	9,19734	6,9088	4,4958	2,159

Μετά από τον υπολογισμό όλων των παραμέτρων υπολογίζεται η παροχή σε κάθε συχνότητα λειτουργίας σύμφωνα με τον τύπο (4.1). Επίσης, γίνεται ο υπολογισμός της μέσης ταχύτητας ($V_{avg.}$) για κάθε συχνότητα λειτουργίας με διαίρεση της παροχής με την επιφάνεια του δοκιμίου, που είναι κάθετη στην διεύθυνση της ροής (επιφάνεια κύκλου).

Πίνακας 4.5 Παροχή και μέση ταχύτητα στις διαφορετικές συχνότητες λειτουργίας

f (Hz)	50	40	30	20	10
q (m ³ /s)	0,1253	0,099	0,075	0,484	0,022
$V_{avg.}$ (m/s)	24,94	19,72	14,91	9,65	4,47

Τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις της διαφοράς πίεσης μεταξύ εξόδου και εισόδου της ροής φαίνονται στον πίνακα 4.6 για κάθε συχνότητα λειτουργίας.

Πίνακας 4.6 Μετρήσεις διαφοράς πίεσης (ΔP) στις συχνότητες λειτουργίας

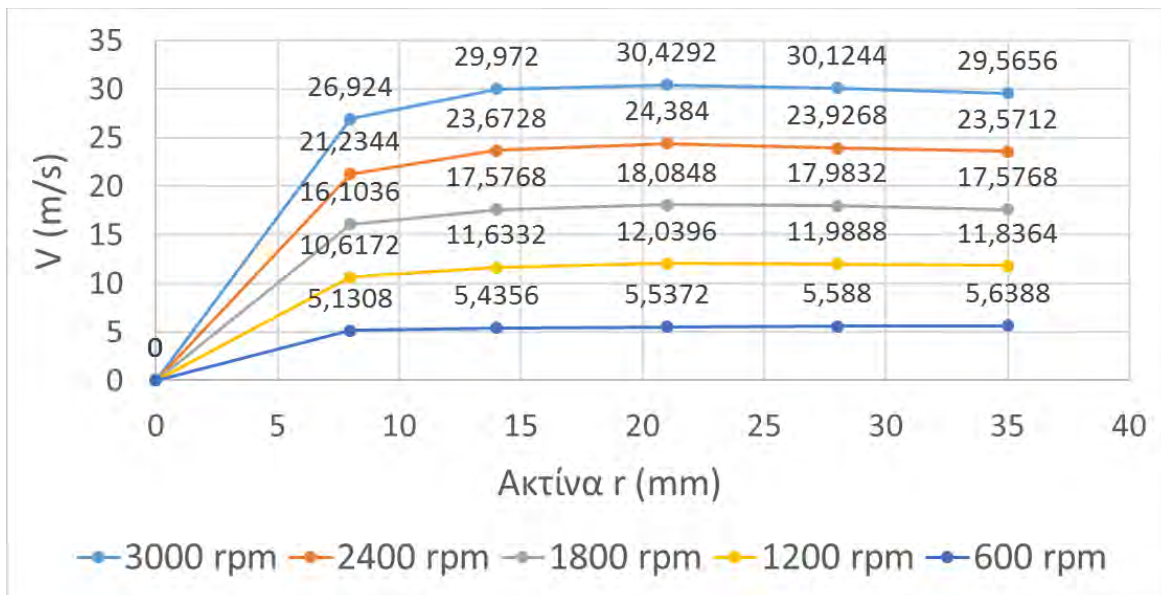
f (Hz)	ΔP (mmH ₂ O)	ΔP (Pa)
50	44	431,49
40	29	284,39
30	16	156,90
20	7,3	71,58
10	1,8	17,65

4.2 Μετρήσεις με δοκίμιο (2)

Με αντίστοιχο τρόπο βρέθηκαν η παροχή και η μέση ταχύτητα από τα αποτελέσματα των μετρήσεων σε αυτό το δοκίμιο. Επίσης, σε αυτό το δοκίμιο όπως και στα υπόλοιπα θα παρουσιαστούν διαγράμματα με τα προφίλ ταχυτήτων, τα οποία θα αναλυθούν.

Πίνακας 4.7 Διαφορά πίεσης, παροχή και μέση ταχύτητα στις 5 συχνότητες λειτουργίας (δοκίμιο (2))

F (Hz)	$V_{avg.}$ (m/s)	q (m ³ /h)	ΔP (Pa)
50	23,68	404,27	617,81
40	18,76	321,53	402,07
30	14,06	240,22	225,55
20	9,31	160,11	101,98
10	4,39	74,97	26,47



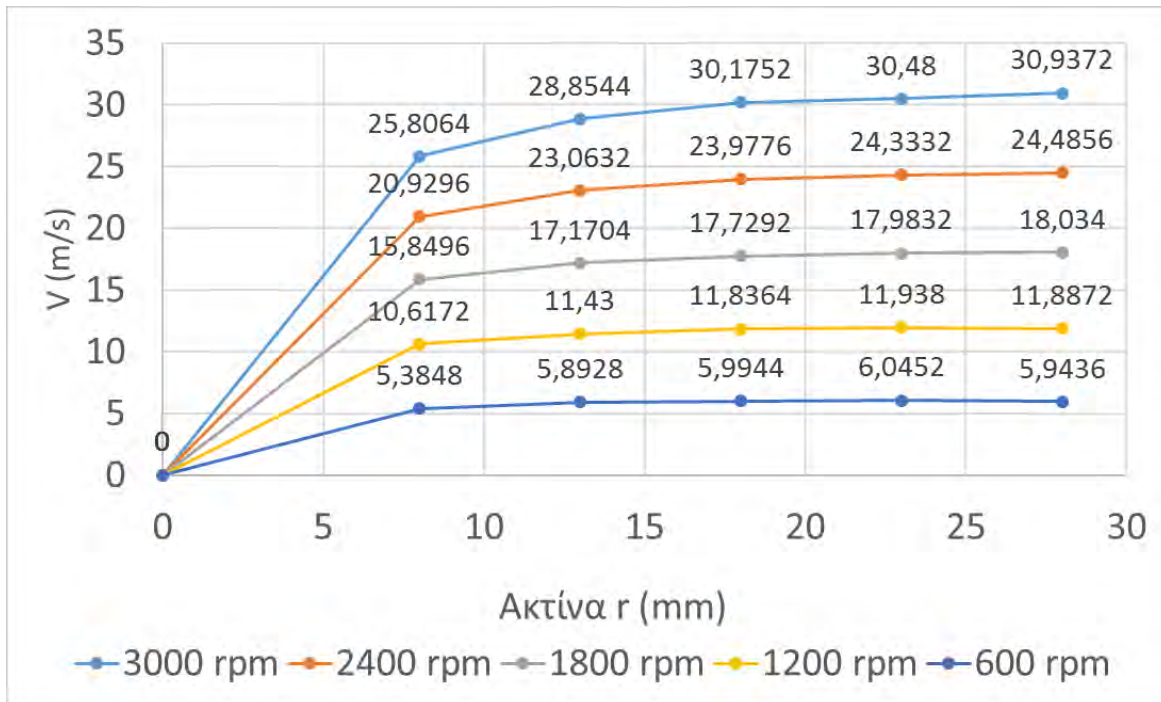
Σχήμα 4.2 Προφίλ ταχυτήτων με χρήση δοκιμίου (2)

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι οι μετρήσεις των ταχυτήτων της ροής διατηρούν ένα μοτίβο μεταξύ των διαφορετικών στροφών λειτουργίας του συμπιεστή. Επίσης, φαίνεται ξεκάθαρα ότι στις τέσσερις υψηλότερες στροφές λειτουργίας η μέγιστη ταχύτητα εμφανίζεται στα 21 χιλιοστά και στη συνέχεια υπάρχει μια σταθερή μείωση της ταχύτητας, ενώ στις 600 rpm η τάση της ταχύτητας είναι ανοδική μέχρι τα 35 χιλιοστά, όπου λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της.

4.3 Μετρήσεις με δοκίμιο (3)

Πίνακας 4.8 Διαφορά πίεσης, παροχή και μέση ταχύτητα στις 5 συχνότητες λειτουργίας (δοκίμιο (3))

F (Hz)	V _{avg.} (m/s)	q (m ³ /h)	ΔP (Pa)
50	21,01	261,81	882,59
40	16,87	208,57	568,78
30	12,63	111,94	323,61
20	8,43	102,50	142,19
10	4,29	51,86	35,30



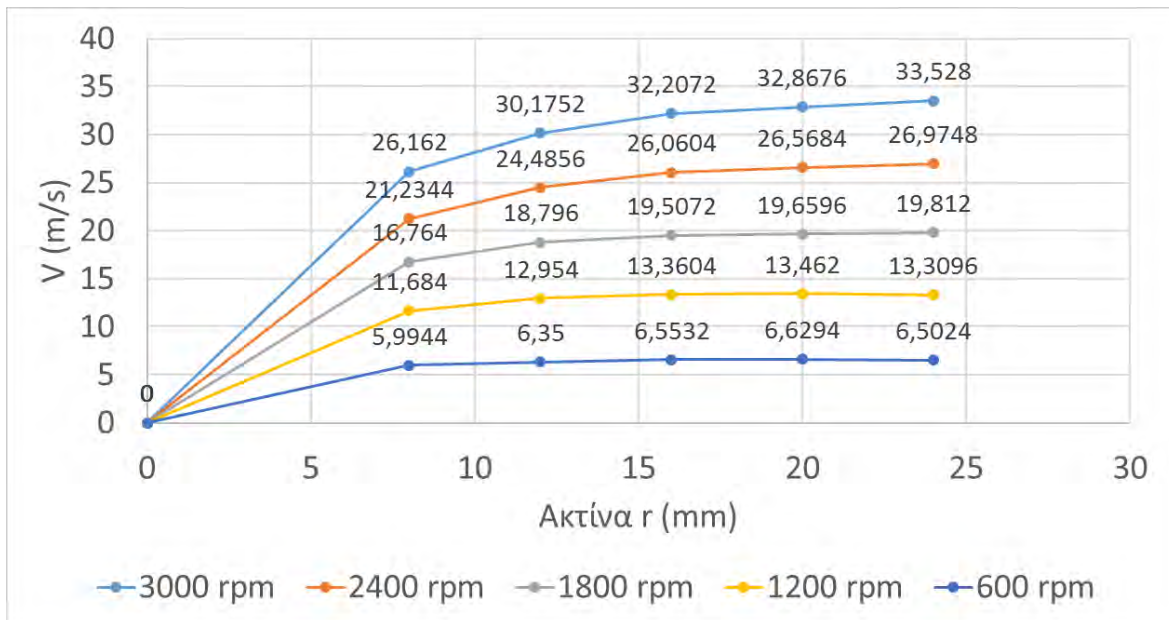
Σχήμα 4.3 Προφίλ ταχυτήτων με χρήση δοκιμίου (3)

Από το διάγραμμα είναι προφανές ότι, οι ταχύτητες στα ίδια σημεία, αλλά σε διαφορετικές συχνότητες είναι ανάλογες της ανόδου των στροφών λειτουργίας. Επιπλέον, στις τρεις υψηλότερες στροφές λειτουργίας οι ταχύτητες παρουσιάζουν μέγιστο στο τελευταίο σημείο μέτρησης (28 χιλιοστά), δηλαδή στο κέντρο του δοκιμίου. Από την άλλη πλευρά, στις δύο χαμηλότερες στροφές λειτουργίας υπάρχει μια πολύ μικρή μείωση της ταχύτητας μεταξύ του τέταρτου και του πέμπτου σημείου μέτρησης. Επομένως, βλέπουμε ότι το δοκίμιο (3) εμφανίζει μια σχεδόν ιδανική συμπεριφορά, χωρίς να επηρεάζεται ιδιαίτερα η ροή από τον αισθητήρα του ανεμόμετρου.

4.4 Μετρήσεις με δοκίμιο (4)

Πίνακας 4.9 Διαφορά πίεσης, παροχή και μέση ταχύτητα στις 5 συχνότητες λειτουργίας (δοκίμιο (4))

F (Hz)	V _{avg.} (m/s)	q (m ³ /h)	ΔP (Pa)
50	20,13	184,22	1147,37
40	16,32	148,80	735,49
30	12,62	110,72	411,87
20	8,74	75,48	186,32
10	4,39	37,10	46,09



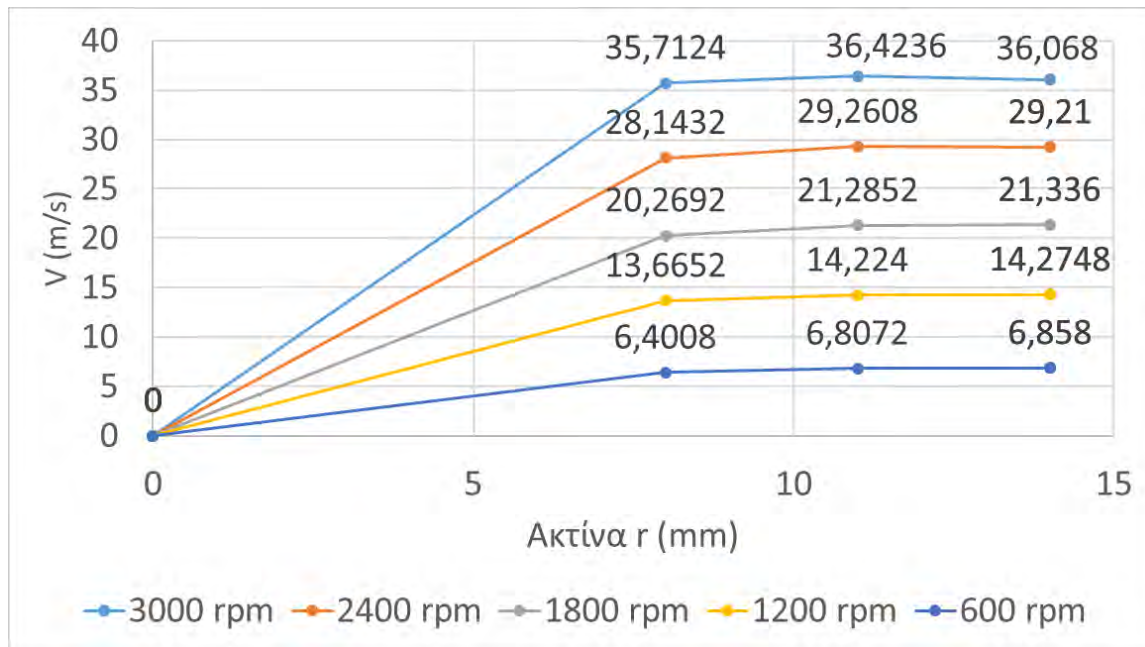
Σχήμα 4.4 Προφίλ ταχυτήτων με χρήση δοκιμίου (4)

Στο διάγραμμα οι ταχύτητες στις υψηλότερες στροφές λειτουργίας ακολουθούν μια σταθερή ανοδική πορεία. Έτσι η ταχύτητα λαμβάνει μέγιστες τιμές στο κέντρο του δοκιμίου (ιδανική συμπεριφορά), στις στροφές 1800, 2400 και 3000 rpm. Στις δύο χαμηλότερες στροφές λειτουργίας μετά το τέταρτο σημείο παρατηρείται μία πολύ μικρή μείωση της ταχύτητας.

4.5 Μετρήσεις με δοκίμιο (5)

Πίνακας 4.10 Διαφορά πίεσης, παροχή και μέση ταχύτητα στις 5 συχνότητες λειτουργίας (δοκίμιο (5))

F (Hz)	V _{avg.} (m/s)	q (m ³ /h)	ΔP (Pa)
50	20,36	80,25	1372,93
40	16,09	64,61	882,59
30	11,6	47,05	500,13
20	7,81	31,47	215,74
10	3,67	15,06	55,89



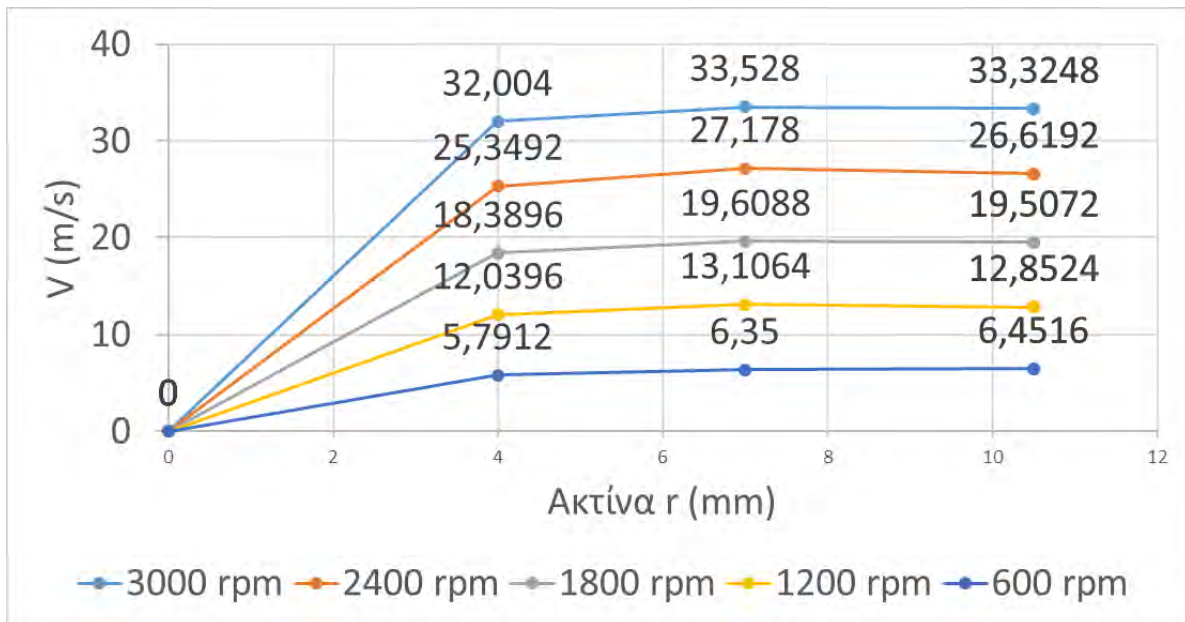
Σχήμα 4.5 Προφίλ ταχυτήτων με χρήση δοκιμίου (5)

Από το διάγραμμα φαίνεται ότι σε αυτό το δοκίμιο μετρήθηκαν οι ταχύτητες σε τρεις μόνο θέσεις (λόγω μικρής συνολικής διαμέτρου). Η συμπεριφορά των ταχυτήτων είναι ανοδική στις τρεις χαμηλότερες στροφές λειτουργίας, με τη μέγιστη τιμή να εμφανίζεται στο κέντρο του δοκιμίου. Στις 2400 rpm η πτώση της ταχύτητας μεταξύ του τέταρτου (μέγιστη τιμή) και του πέμπτου σημείου είναι ελάχιστη. Στις 3000 rpm η αντίστοιχη πτώση της ταχύτητας είναι πιο αισθητή.

4.6 Μετρήσεις με δοκίμιο (6)

Πίνακας 4.11 Διαφορά πίεσης, παροχή και μέση ταχύτητα στις 5 συχνότητες λειτουργίας (δοκίμιο (6))

F (Hz)	V _{avg.} (m/s)	q (m ³ /h)	ΔP (Pa)
50	22,5	39,02	1461,19
40	17,95	31,33	941,43
30	13,01	22,74	529,55
20	8,58	15,07	235,35
10	4,15	7,37	58,83

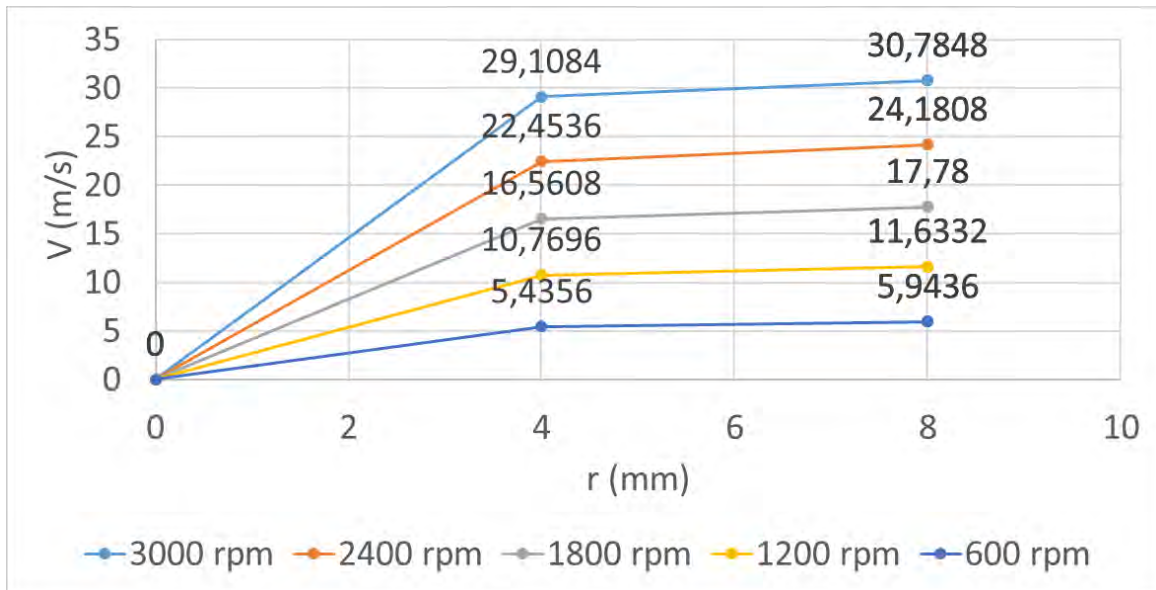


Σχήμα 4.6 Προφίλ ταχυτήτων με χρήση δοκιμίου (6)

Από το διάγραμμα παρατηρείται ότι οι μέγιστες ταχύτητες δεν εμφανίζονται στο κέντρο του δοκιμίου στις περισσότερες περιπτώσεις. Μόνο στις 600 rpm η ταχύτητα παρουσιάζει τη μέγιστη τιμή στο κέντρο του δοκιμίου.

4.7 Μετρήσεις με δοκίμιο (8)

Οι μετρήσεις των ταχυτήτων, όπως φαίνεται από το διάγραμμα, έγιναν μόνο σε δύο σημεία λόγω της μικρής διαμέτρου του δοκιμίου. Το δοκίμιο παρουσιάζει ιδανική συμπεριφορά, με ανοδική τάση της ταχύτητας ως τη μέγιστη τιμή της, την οποία λαμβάνει στο κέντρο (8 χιλιοστά).



Σχήμα 4.7 Προφίλ ταχυτήτων με χρήση δοκιμίου (8)

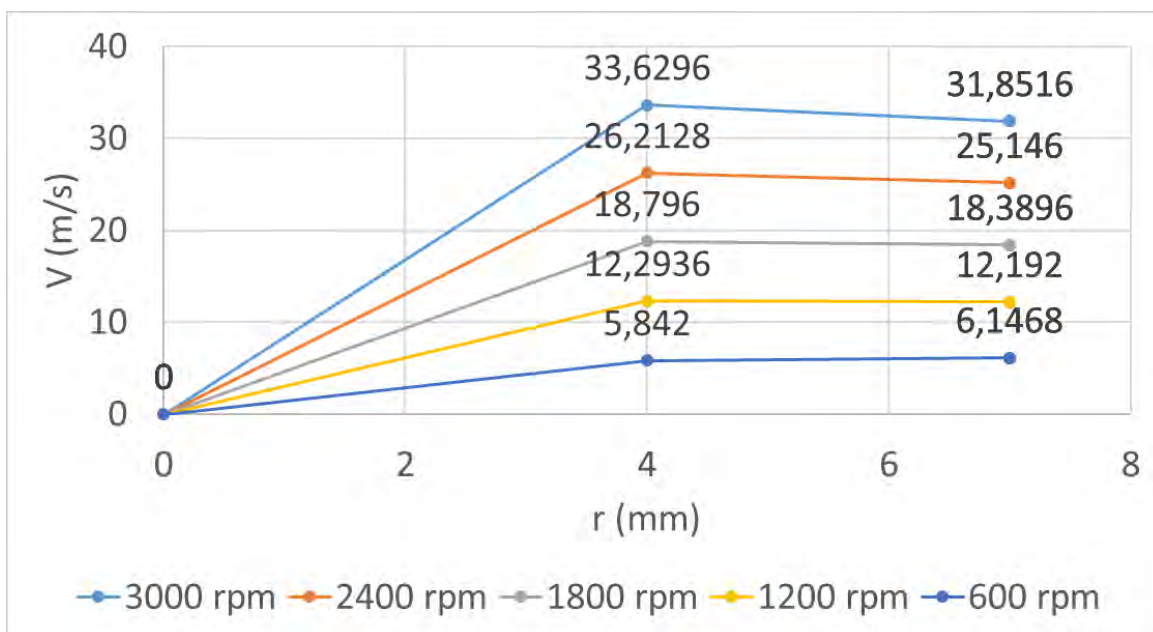
Πίνακας 4.12 Διαφορά πίεσης, παροχή και μέση ταχύτητα στις 5 συχνότητες λειτουργίας (δοκίμιο (8))

F (Hz)	$V_{avg.}$ (m/s)	q (m ³ /h)	ΔP (Pa)
50	18,4	18,88	1520,03
40	14,25	14,68	980,66
30	10,5	10,81	549,17
20	6,84	7,05	245,16
10	3,46	3,57	61,78

4.8 Μετρήσεις με δοκίμιο (9)

Πίνακας 4.13 Διαφορά πίεσης, παροχή και μέση ταχύτητα στις 5 συχνότητες λειτουργίας (δοκίμιο (9))

F (Hz)	$V_{avg.}$ (m/s)	q (m ³ /h)	ΔP (Pa)
50	19,74	16,51	1529,83
40	15,42	12,94	980,66
30	11,09	9,36	549,17
20	7,27	4,02	245,16
10	3,49	3,007	61,78



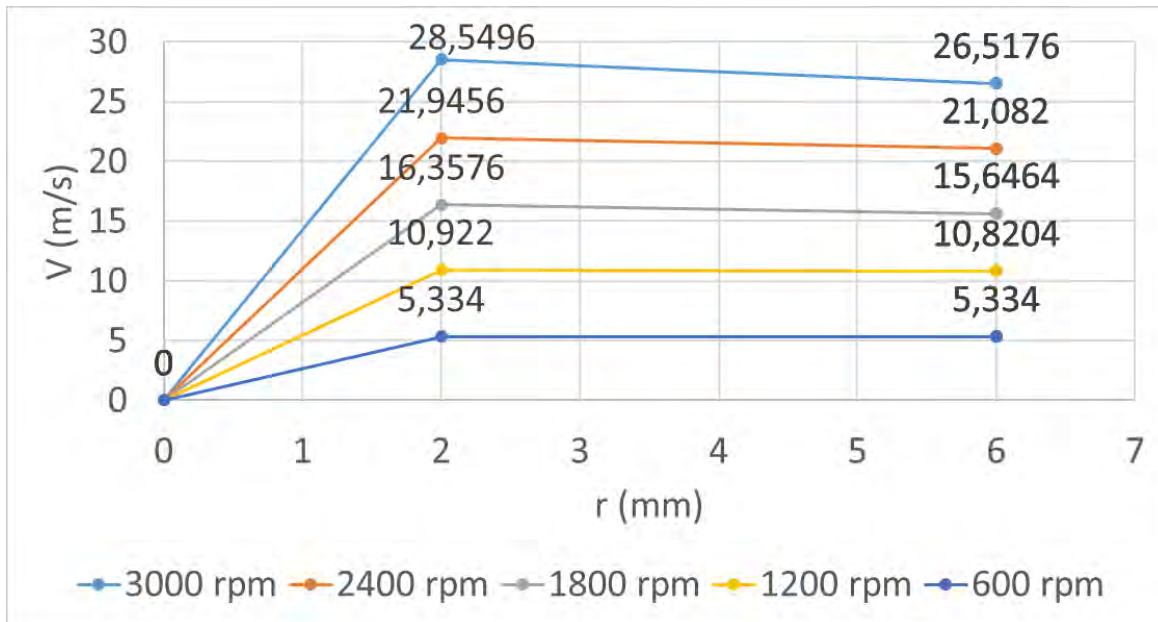
Σχήμα 4.8 Προφίλ ταχυτήτων με χρήση δοκιμίου (9)

Στο διάγραμμα φαίνεται ότι οι ταχύτητες σε όλες σχεδόν τις στροφές λειτουργίας έχουν μια μικρή μείωση από τα 4 χιλιοστά (όπου παρουσιάζουν το μέγιστο) και μετά μέχρι το κέντρο του δοκιμίου. Μόνο στις 600 στροφές το λεπτό υπάρχει συνεχόμενη αύξηση της ταχύτητας μέχρι το κέντρο του δοκιμίου, όπου παριστάνεται το μέγιστο.

4.9 Μετρήσεις με δοκίμιο (10)

Πίνακας 4.14 Διαφορά πίεσης, παροχή και μέση ταχύτητα στις 5 συχνότητες λειτουργίας (δοκίμιο (10))

F (Hz)	$V_{avg.}$ (m/s)	q (m ³ /h)	ΔP (Pa)
50	20,17	8,80	1520,03
40	15,66	6,37	980,66
30	11,66	5,09	549,17
20	7,87	3,44	245,16
10	3,85	1,68	61,78

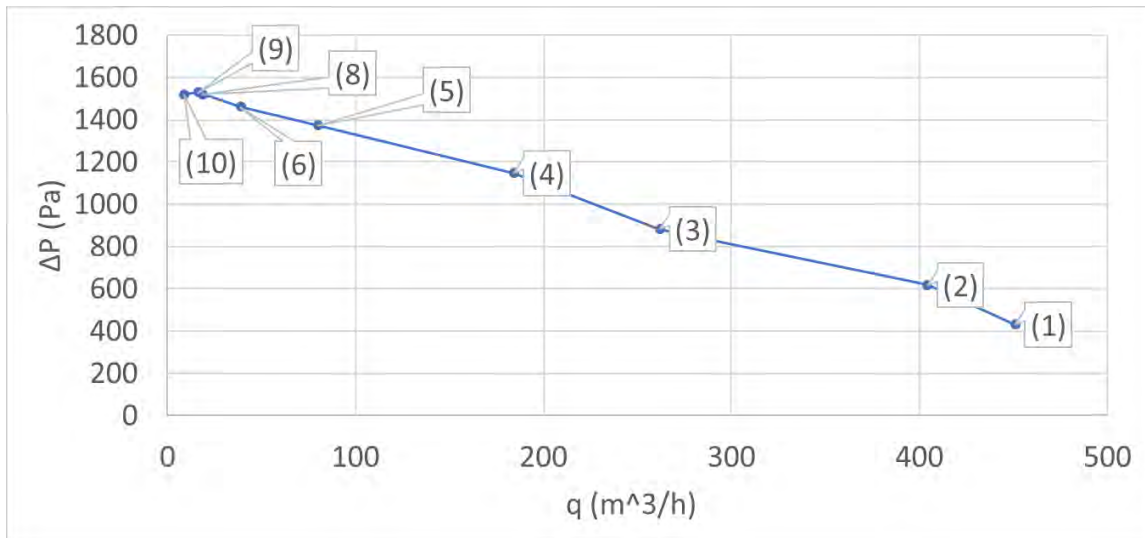


Σχήμα 4.9 Προφίλ ταχυτήτων με χρήση δοκιμίου (10)

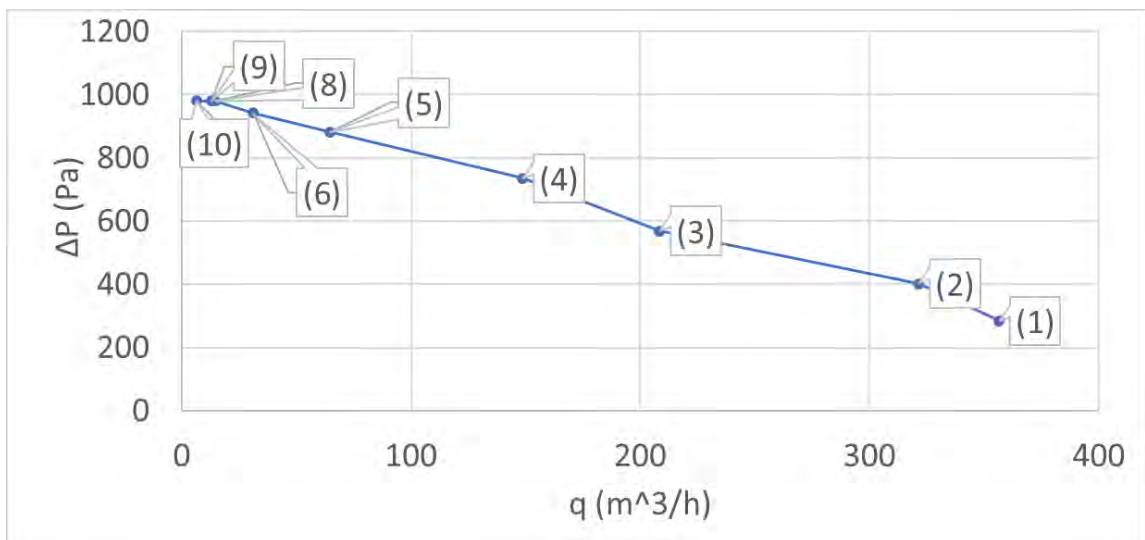
Στο παραπάνω διάγραμμα παριστάνεται η συμπεριφορά της ροής με χρήση του δοκιμίου με τη μικρότερη διάμετρο, το οποίο είναι και διαφορετικού υλικού από τα υπόλοιπα. Είναι προφανές ότι σε όλες τις στροφές λειτουργίας η ταχύτητα λαμβάνει τη μέγιστη τιμή σε ακτίνα 2 χιλιοστά από την άκρη του δοκιμίου. Όσο η ακτίνα μεγαλώνει η ταχύτητα μειώνεται σταθερά με τη μεγαλύτερη μείωση να παρατηρείται στις 3000 rpm. Αντίθετα στις 600 rpm η ταχύτητα διατηρείται σχεδόν σταθερή με την τιμή στο κέντρο του δοκιμίου να είναι ίση με αυτή στα 2 χιλιοστά.

4.10 Συγκεντρωτικά διαγράμματα

Στο σχήμα 4.10 φαίνεται η διαφορά πίεσης σε συνάρτηση με την παροχή για όλα τα δοκίμια στις 3000 στροφές λειτουργίας το λεπτό. Η καμπύλη έχει μια πτωτική τάση, κάτι που φαίνεται πολύ λογικό, γιατί με αύξηση της διατομής εξόδου του συμπιεστή αυξάνεται η παροχή και ταυτόχρονα μειώνεται η διαφορά πίεσης. Ο συνδυασμός παροχής και διαφοράς πίεσης είναι ανάλογος με την αύξηση της διατομής εξόδου, όπως φαίνεται στο διάγραμμα τα δοκίμια εμφανίζονται στην καμπύλη από το μικρότερο στο μεγαλύτερο με τη σωστή σειρά, χωρίς καμία παραλλαγή. Τα δοκίμια (1) και (2) εμφανίζονται σε κοντινή σχετικά απόσταση το ένα από το άλλο και απέχουν πολύ από τα υπόλοιπα. Αντίστοιχα, τα δοκίμια (8), (9) και (10) βρίσκονται στην άλλη άκρη της καμπύλης και οι τιμές τους και για την παροχή και για τη διαφορά πίεσης σχεδόν ταυτίζονται.



Σχήμα 4.10 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή στις 3000 rpm

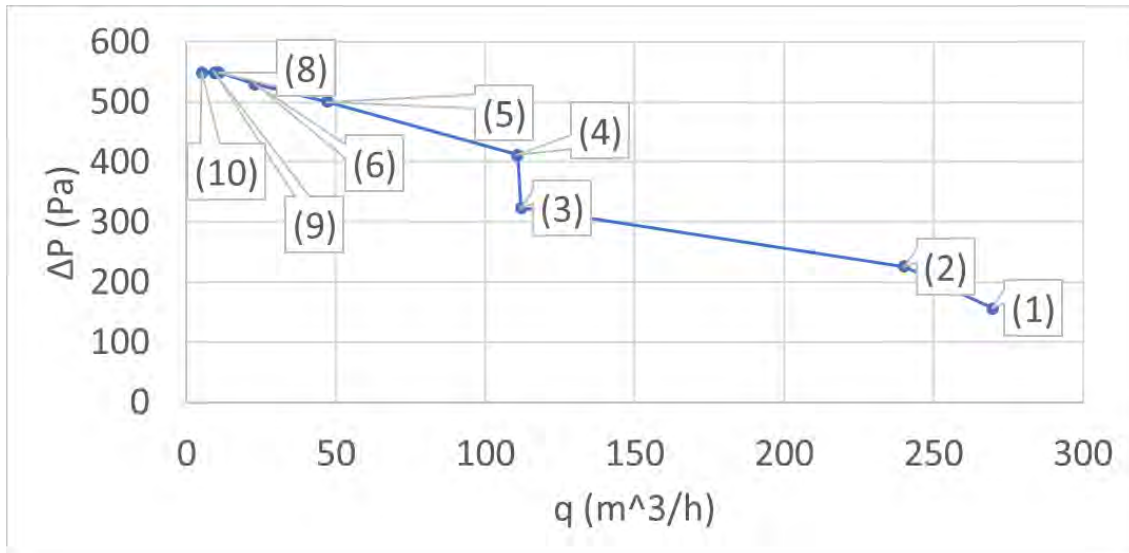


Σχήμα 4.11 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή στις 2400 rpm

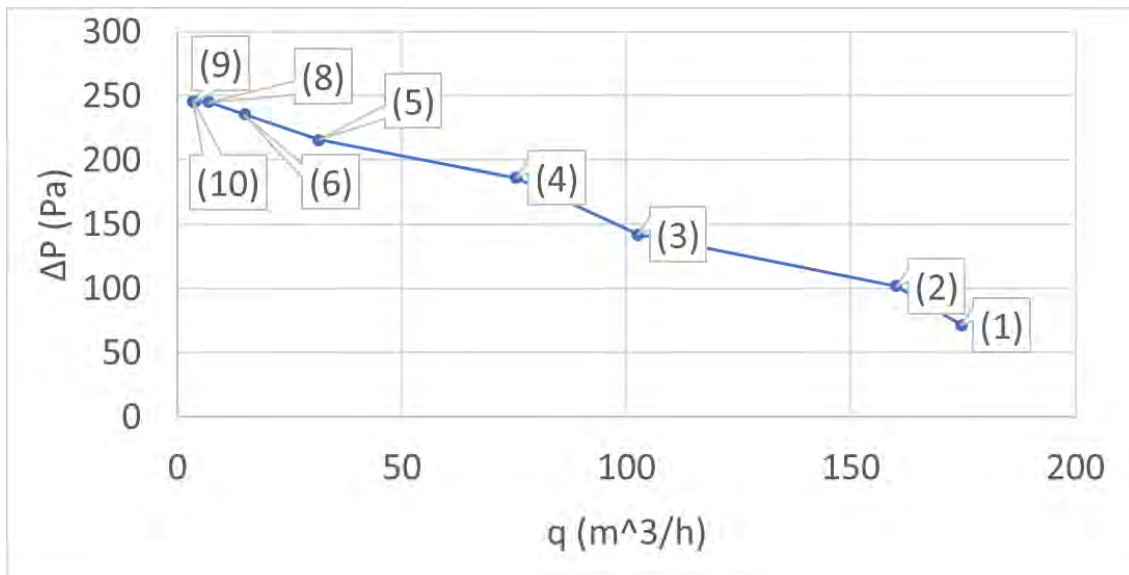
Στο σχήμα 4.11 φαίνεται η διαφορά πίεσης σε συνάρτηση με την παροχή για όλα τα δοκίμια στις 2400 rpm. Τα στοιχεία αυτής της καμπύλης είναι παρόμοια με εκείνα του σχήματος 4.10, δηλαδή έχει μια πτωτική τάση με αύξηση της παροχής και μείωση της διαφοράς πίεσης. Επιπλέον, τα δοκίμια εμφανίζονται στις ίδιες θέσεις πάνω στην καμπύλη, όπως στο σχήμα 4.10. Συγκεκριμένα, τα δοκίμια (3) και (4) εμφανίζονται στη μέση περίπου της καμπύλης με μικρή απόσταση μεταξύ τους, άρα παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά.

Στο σχήμα 4.12 φαίνεται η διαφορά πίεσης σε συνάρτηση με την παροχή για όλα τα δοκίμια στις 1800 rpm. Η καμπύλη έχει πτωτική τάση με αύξηση της παροχής, αλλά παρατηρείται ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό. Έχει μια απότομη πτώση μεταξύ στις τιμές των δοκιμίων (3) και (4), δηλαδή δεν είναι ομαλή η συμπεριφορά της σε εκείνο το σημείο. Αν παρατηρήσουμε καλύτερα βλέπουμε ότι τα δοκίμια (3) και (4) εμφανίζουν περίπου ίση

παροχή, όμως διαφορετική πτώση πίεσης (δοκίμιο (4) μεγαλύτερη πτώση πίεσης). Οι τιμές για τα υπόλοιπα δοκίμια βρίσκονται στα ίδια σημεία πάνω στην καμπύλη, όπως στις προηγούμενες περιπτώσεις.

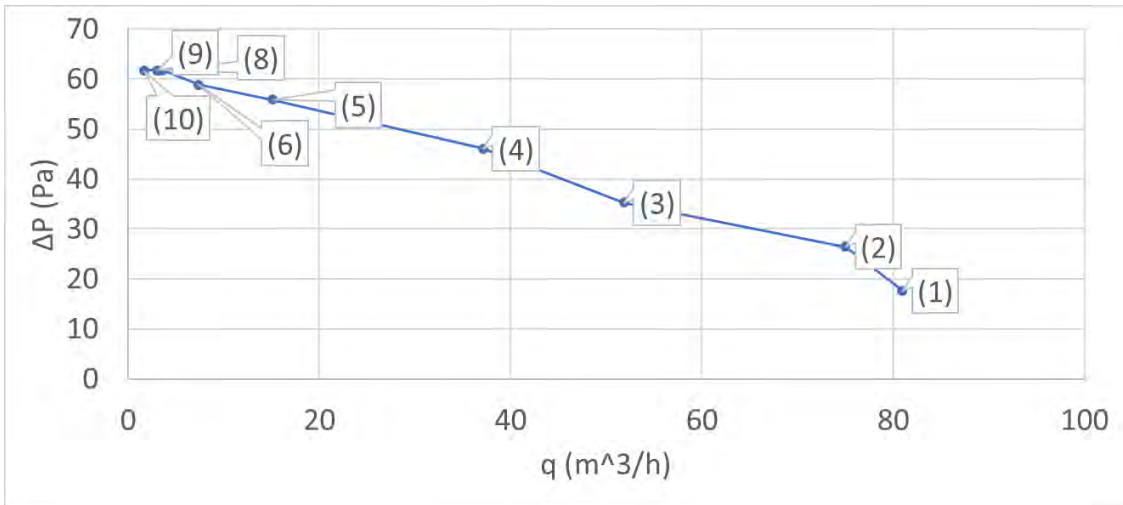


Σχήμα 4.12 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή στις 1800 rpm

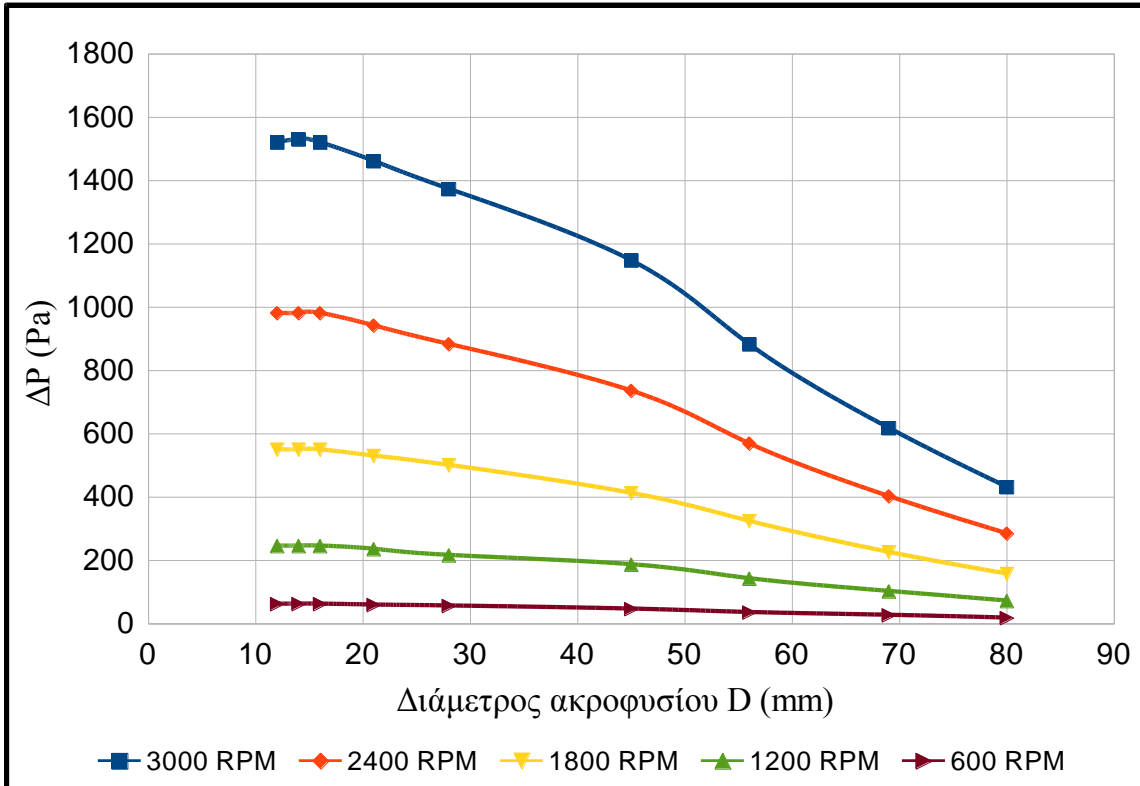


Σχήμα 4.13 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή στις 1200 rpm

Στα σχήματα 4.13 και 4.14 φαίνεται η διαφορά πίεσης σε συνάρτηση με την παροχή για όλα τα δοκίμια στις 1200 rpm και στις 600 rpm αντίστοιχα. Οι καμπύλες στις δύο περιπτώσεις είναι παρόμοιες, παρουσιάζοντας ομαλή πτωτική τάση και οι τιμές για τα δοκίμια βρίσκονται στις ίδιες θέσεις. Όπως, είναι λογικό στις 1200 rpm οι τιμές της παροχής και τις πτώσεις πίεσης είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες τιμές στις 600 στροφές λειτουργίας του συμπιεστή του λεπτό.



Σχήμα 4.14 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή στις 600 rpm

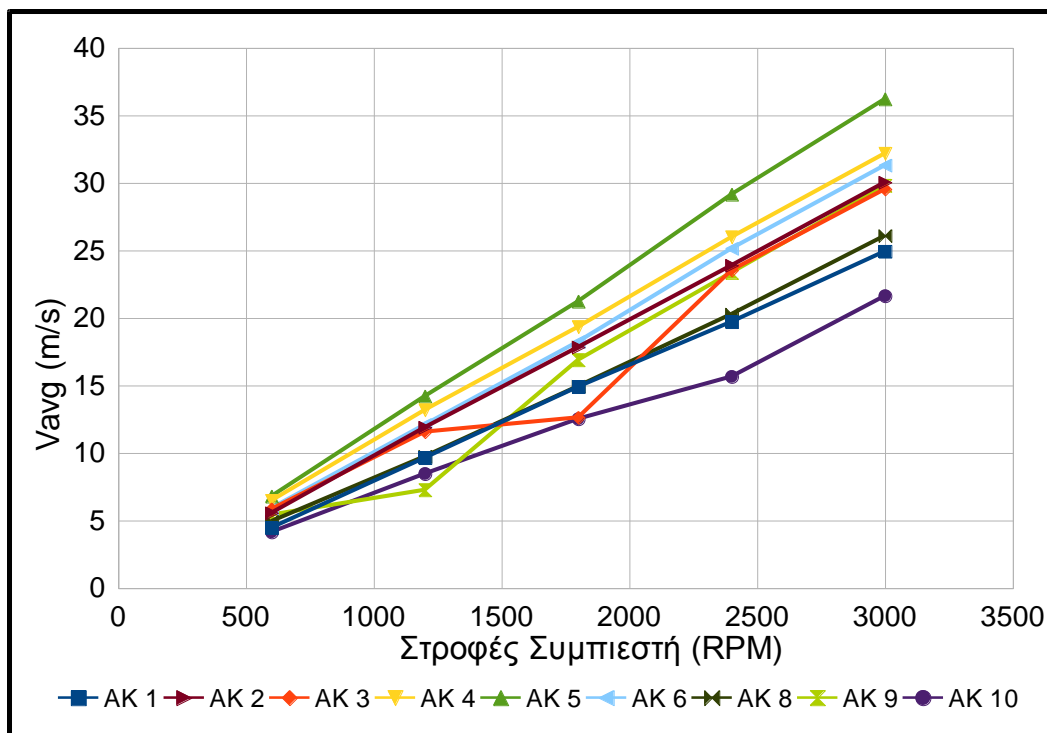


Σχήμα 4.15 Μεταβολή ΔP συναρτήσει της αλλαγής της διατομής εξόδου για 5 διαφορετικές ταχύτητες λειτουργίας

Το διάγραμμα απεικονίζει τη μεταβολή της διαφοράς πίεσης σε συνάρτηση με τη διάμετρο των δοκιμίων στις πέντε συχνότητες λειτουργίας. Με την αύξηση της διατομής εξόδου της ροής παρατηρείται μια μείωση στη διαφορά πίεσης σε όλες τις ταχύτητες λειτουργίας. Η πιο έντονη μεταβολή της διαφοράς πίεσης είναι στις 3000 rpm, όπου από τα 12 χιλιοστά διατομής εξόδου μέχρι τα 80 χιλιοστά παρατηρείται σχεδόν τετραπλάσια

μείωση του ΔP . Από την άλλη πλευρά, στις 600 rpm η μεταβολή της διαφοράς πίεσης είναι σχεδόν γραμμική, με την μείωση της να είναι ελάχιστη όσο αυξάνει η διατομή εξόδου της ροής.

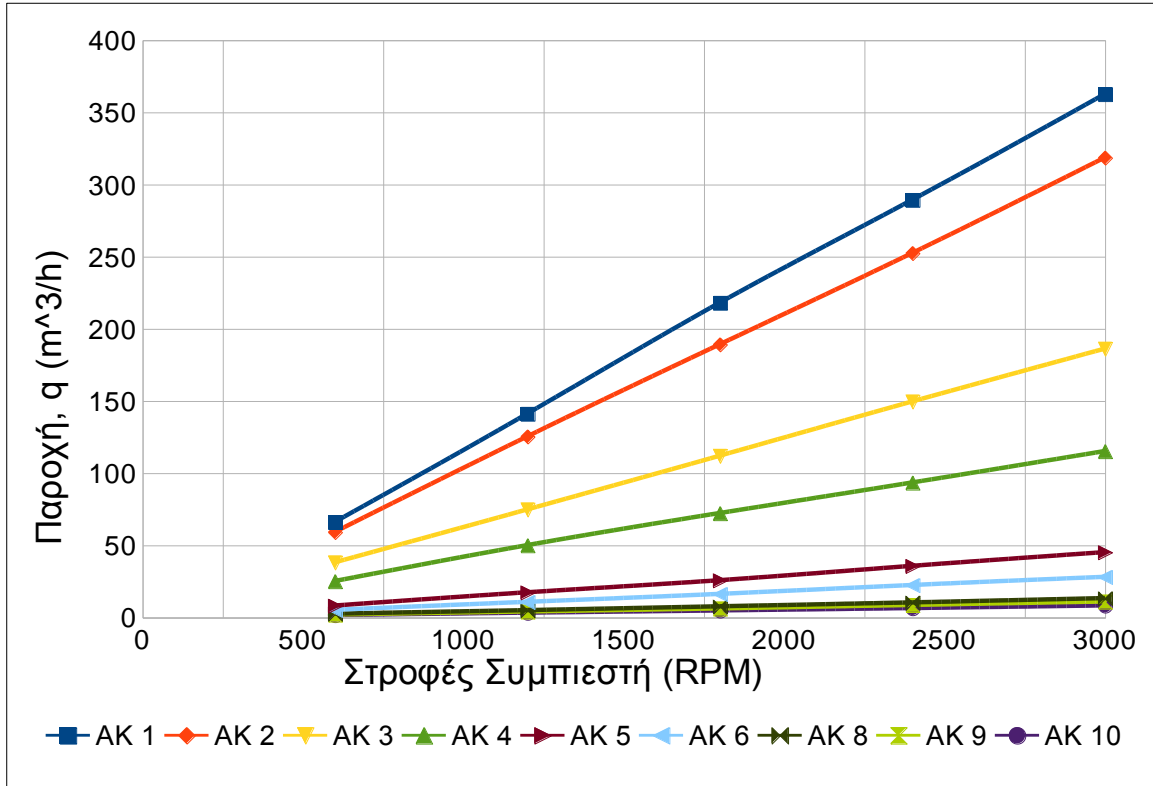
Στο σχήμα 4.16 απεικονίζεται η μεταβολή της μέσης ταχύτητας για κάθε δοκίμιο σε συνάρτηση με τις στροφές λειτουργίας του συμπιεστή. Στα περισσότερα δοκίμια παρατηρείται γραμμική μεταβολή και σε όλα μια ανοδική τάση όσο αυξάνονται οι στροφές λειτουργίας. Η υψηλότερη μέση ταχύτητα σε όλες τις στροφές λειτουργίας εμφανίζεται με χρήση του δοκιμίου (5). Αντίθετα, η χαμηλότερη μέση ταχύτητα σε όλες τις στροφές λειτουργίας εμφανίζεται με το δοκίμιο (10). Τα δοκίμια (2), (4), και (6) παρουσιάζουν μια ευθυγράμμιση στο μεγαλύτερο εύρος των στροφών λειτουργίας. Με χρήση του δοκιμίου (3) παρατηρείται μια περίεργη συμπεριφορά, πιο συγκεκριμένα στις 1800 rpm υπάρχει μια απότομη μείωση της μέσης ταχύτητας, η οποία λαμβάνει χαμηλή τιμή όσο με χρήση του δοκιμίου (10). Επιπλέον, μια απόκλιση από τη γραμμική συμπεριφορά παρατηρείται και στο δοκίμιο (9) στις 1200 rpm, όπου εμφανίζει τη χαμηλότερη μέση ταχύτητα από όλα τα υπόλοιπα δοκίμια. Τέλος, στις 600 rpm οι τιμές της μέσης ταχύτητας της ροής σε όλα τα δοκίμια είναι περίπου ίσες.



Σχήμα 4.16 Μεταβολή μέσης ταχύτητας σε συνάρτηση με τις στροφές του συμπιεστή

Το επόμενο διάγραμμα δείχνει τη μεταβολή της παροχής σε συνάρτηση με τις στροφές λειτουργίας του συμπιεστή για κάθε δοκίμιο. Είναι προφανές ότι τα δοκίμια με μεγαλύτερη διατομή έχουν μεγαλύτερη παροχή αέρα σε όλες τις συχνότητες λειτουργίας. Επίσης, όλα τα δοκίμια εμφανίζουν γραμμική συμπεριφορά. Τα δοκίμια (1) και (2) έχουν παρόμοια ανοδική τάση. Όσο μειώνεται το μέγεθος της διατομής μειώνεται και η κλίση των ευθειών, με τις ευθείες των δοκιμίων (8), (9) και (10) να είναι σχεδόν παράλληλες με

τον οριζόντιο άξονα. Η κλίση των ευθειών των δοκιμίων (3) και (4) δεν είναι τόσο μεγάλη όσο εκείνη των (1) και (2). Επίσης, τα δοκίμια (5) και (6) εμφανίζουν συμπεριφορά σχεδόν παράλληλη με τον άξονα των στροφών λειτουργίας, αλλά προφανώς εμφανίζουν λίγο μεγαλύτερες τιμές παροχής από τα δοκίμια μικρότερης διατομής.



Σχήμα 4.17 Μεταβολή παροχής σε συνάρτηση με τις στροφές λειτουργίας του συμπιεστή

Κεφάλαιο 5

Μετρήσεις θορύβου από λειτουργία συμπιεστή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει μια αναλυτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων, που προέκυψαν από τις μετρήσεις του θορύβου του συμπιεστή. Τα δεδομένα θα αναπαρασταθούν σε διαγράμματα για την καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς του συμπιεστή⁴. Σύμφωνα με το **σχήμα 4.1** η θέση στην οποία τοποθετήθηκε ο μετρητής ήχου για τη μέτρηση του ήχου στην έξοδο της ροής είναι:

απόσταση z: $4 \cdot D$

απόσταση x: $2 \cdot D$

απόσταση y: Στο επίπεδο του κέντρου της διατομής εξόδου

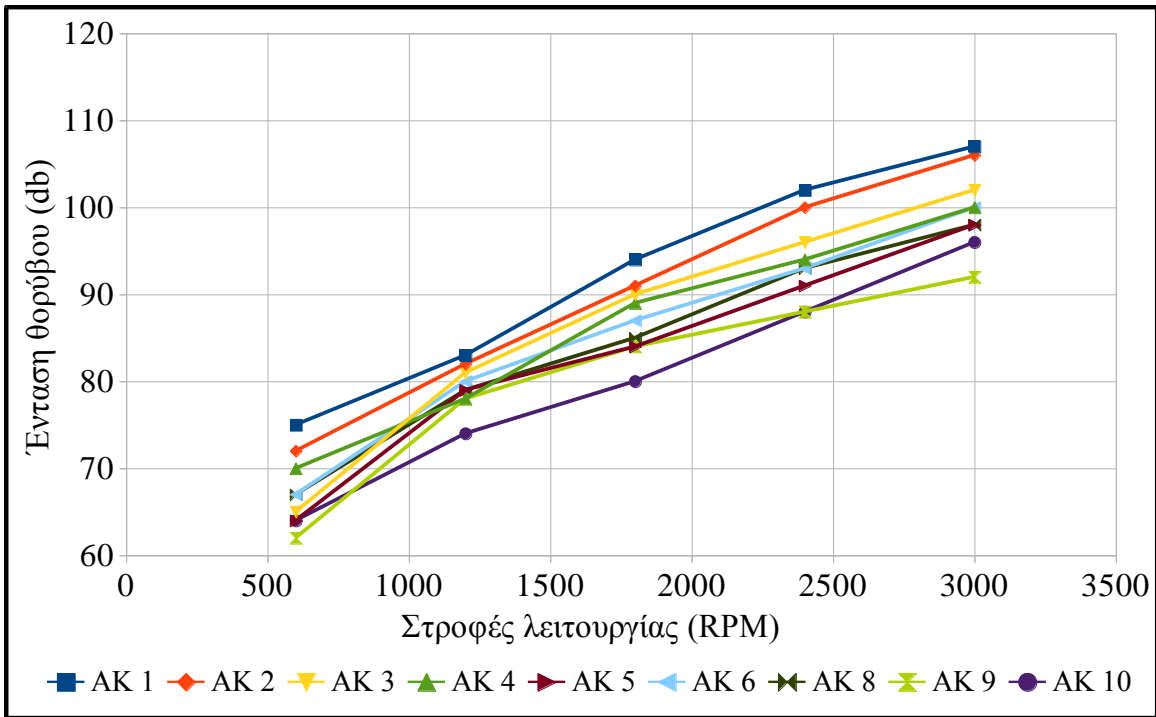
D = Διατομή εξόδου της ροής (μεταβάλλεται με χρήση δοκιμίων διαφορετικής διατομής)

Ενώ, για τη μέτρηση του ήχου στην είσοδο του συμπιεστή τοποθετήθηκε ακριβώς δίπλα στην κάσα του συμπιεστή σε **διεύθυνση y** ίση με τον άξονα του συμπιεστή και το μικρόφωνο με προσανατολισμό στη **διεύθυνση x**.

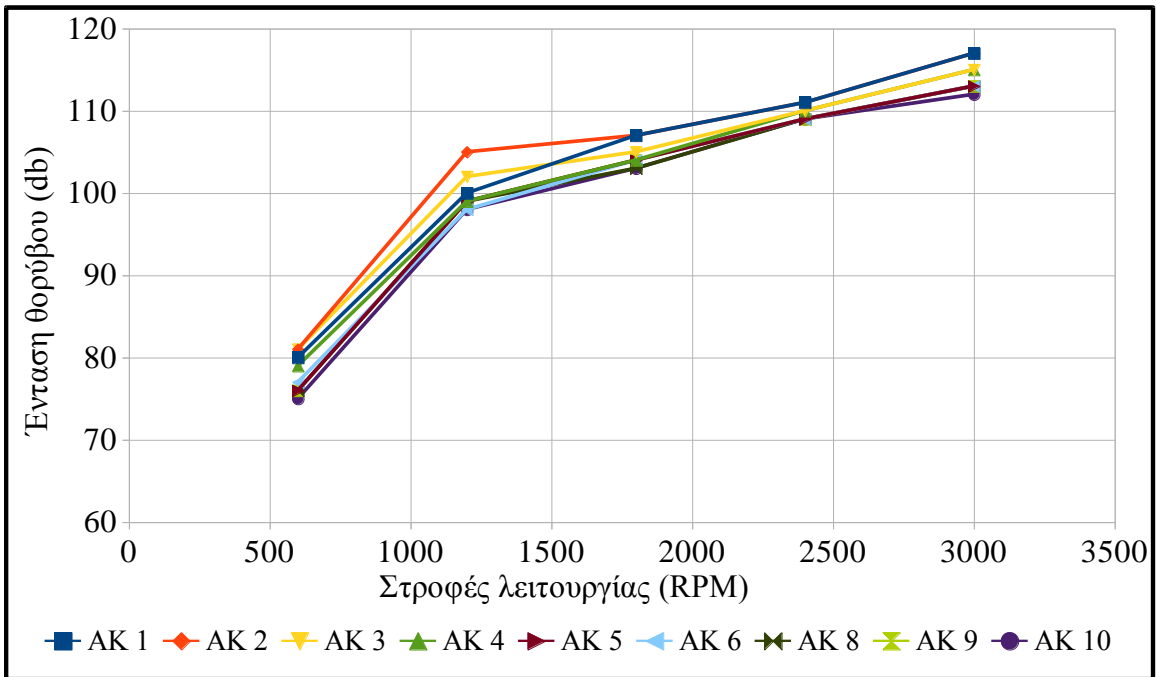
5.1 Συγκριτικά διαγράμματα μετρήσεων

Στο σχήμα 5.1 φαίνεται ο θόρυβος στην έξοδο της ροής του αέριου ρεύματος σε συνάρτηση με τις στροφές λειτουργίας για όλα τα δοκίμια. Ο θόρυβος αυξάνεται με την αύξηση των στροφών λειτουργίας σε όλες τις περιπτώσεις. Η συμπεριφορά σε όλα τα δοκίμια είναι μη γραμμική και οι αντίστοιχες τιμές της έντασης του θορύβου μεταξύ των διαφορετικών δοκιμίων δεν διαφέρουν σημαντικά. Επιπλέον, παρατηρείται ότι στις 3000 rpm η χρήση δοκιμίου μεγαλύτερης διατομής, συνεπάγεται υψηλότερο θόρυβο στην έξοδο της ροής. Πιο συγκεκριμένα, το δοκίμιο (10) παρουσιάζει τον υψηλότερο θόρυβο σε όλες τις στροφές λειτουργίας του συμπιεστή. Στις 1200 rpm, εκτός από το (1) και το (10), τα υπόλοιπα δοκίμια εμφανίζουν περίπου ίση τιμή θορύβου. Το δοκίμιο (9) εμφανίζει τις χαμηλότερες τιμές στις 600 και στις 3000 rpm.

⁴ Πίνακας δεδομένων στο Παράρτημα



Σχήμα 5.1 Θόρυβος στην έξοδο της ροής



Σχήμα 5.2 Θόρυβος στην είσοδο του συμπιεστή

Το σχήμα 5.2 δείχνει την ένταση του θορύβου στην είσοδο του συμπιεστή σε συνάρτηση με τις στροφές λειτουργίας του συμπιεστή για όλα τα δοκίμια. Η συμπεριφορά των καμπυλών είναι παρόμοια, δηλαδή η χρήση διαφορετικών δοκιμίων επηρεάζει ελάχιστα την ένταση του θορύβου στην είσοδο. Οι μετρήσεις σε όλες τις συχνότητες

λειτουργίας είχαν παρόμοια αποτελέσματα για κάθε δοκίμιο. Η καμπύλες έχουν μεγάλη κλίση από τις 600 έως τις 1200 rpm και στη συνέχεια μέχρι τις 3000 rpm η κλίση τους μικραίνει αισθητά. Τέλος, είναι προφανές ότι σε μεγαλύτερες στροφές λειτουργίας παράγεται υψηλότερος θόρυβος. Στις 1200 rpm το δοκίμιο (2) εμφανίζει μια απόκλιση από τις υπόλοιπες τιμές, με λίγο μεγαλύτερη ένταση ήχου.

5.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων με θεωρία για το θόρυβο από τη βιβλιογραφία

Στην αρχή, θα παρουσιαστεί η σχετική θεωρία για τον ήχο και την παραγωγή του θορύβου για ροή μέσα από σωλήνες και από τη λειτουργία του συμπιεστή. Στη συνέχεια, θα γίνει μια προσπάθεια να γίνουν συγκρίσεις των αποτελεσμάτων, που προέκυψαν από τα πειράματα, με τη θεωρία από τη βιβλιογραφία.

Ο ήχος είναι ένα κύμα συμπίεσης (μηχανικής) σε ένα ρευστό. Σημαντικός θόρυβος μπορεί να προκληθεί από την ταλάντωση ενός συστήματος κάποιου στερεού με ένα ρευστό, εξαιτίας των κυμάτων που παράγονται. Τυπικά παραδείγματα είναι τα ηχεία και τα μικρόφωνα. Επομένως, ο θόρυβος σε ένα σωλήνα είναι ένας συνδυασμός του πως τα πιεστικά κύματα σε ένα ρευστό, τα οποία παράγονται λόγω τυρβώδους ροής ή της διέγερσης του από ένα συμπιεστή, ανακλώνται στα εσωτερικά τοιχώματα της κατασκευής και του πως αυτά τα κύματα προκαλούν ταλαντώσεις στη κατασκευή.

Το επίπεδο της ηχητικής πίεσης είναι η πιο εύκολη παράμετρος, που μπορεί να μετρηθεί για να κατανοήσουμε το μέγεθος του θορύβου και σχετίζεται άμεσα με την ανταπόκριση του ανθρώπινου αυτιού. Το επίπεδο ηχητικής πίεσης μετριέται, μεταξύ άλλων, με την κλίμακα decibel. Η κλίμακα αυτή χρησιμοποιείται εξαιτίας του μεγάλου εύρους τιμών, που μπορούν να παρατηρηθούν από το ανθρώπινο αυτί. Η κλίμακα decibel είναι μια σχετική κλίμακα, που απαιτεί μια τιμή αναφοράς. Για μετρήσεις θορύβου και ήχου αυτή η τιμή είναι τα 20 kPa, η οποία είναι το κατώτερο όριο που μπορεί να καταλάβει ο άνθρωπος.

Ο θόρυβος σε ένα σύστημα συμπιεστή με σωλήνες παράγεται κυρίως από τέσσερις μηχανισμούς. Ο πρώτος μηχανισμός αφορά την πλήρως ανεπτυγμένη ροή σε υψηλές ταχύτητες εξαιτίας της τύρβης που αναπτύσσεται, αλλά και την ημιανεπτυγμένη ροή στα διάφορα μηχανικά μέρη του συμπιεστή και στις βαλβίδες, μεταξύ των σωλήνων. Το επίπεδο του θορύβου σχετίζεται άμεσα με το επίπεδο της τυρβώδους ροής, που δημιουργεί διακυμάνσεις στην πίεση μέσα μέσα στους σωλήνες. Έτσι, ο παραγόμενος θόρυβος θα αυξάνεται με την αύξηση της ταχύτητας της ροής και του επιπέδου τύρβης.

Ο δεύτερος μηχανισμός αφορά διάφορες διαταραχές στη ροή, λόγω συστολής και διαστολής των εγκάρσιων επιφανειών στη ροή και λόγω γωνιών στο σύστημα, που αυξάνουν σημαντικά τις διακυμάνσεις της ακουστικής πίεσης. Η αύξηση των εγκάρσιων επιφανειών στη ροή μπορεί να προκαλέσει έναν επιπρόσθετο θόρυβο, ο οποίος μπορεί να διανύσει μεγαλύτερες αποστάσεις.

Εκτός, από το θόρυβο που παράγεται λόγω των πιεστικών κυμάτων στο οριακό στρώμα, σε ένα σύστημα συμπιεστή σωλήνων προκαλείται θόρυβος και από τη διέγερση

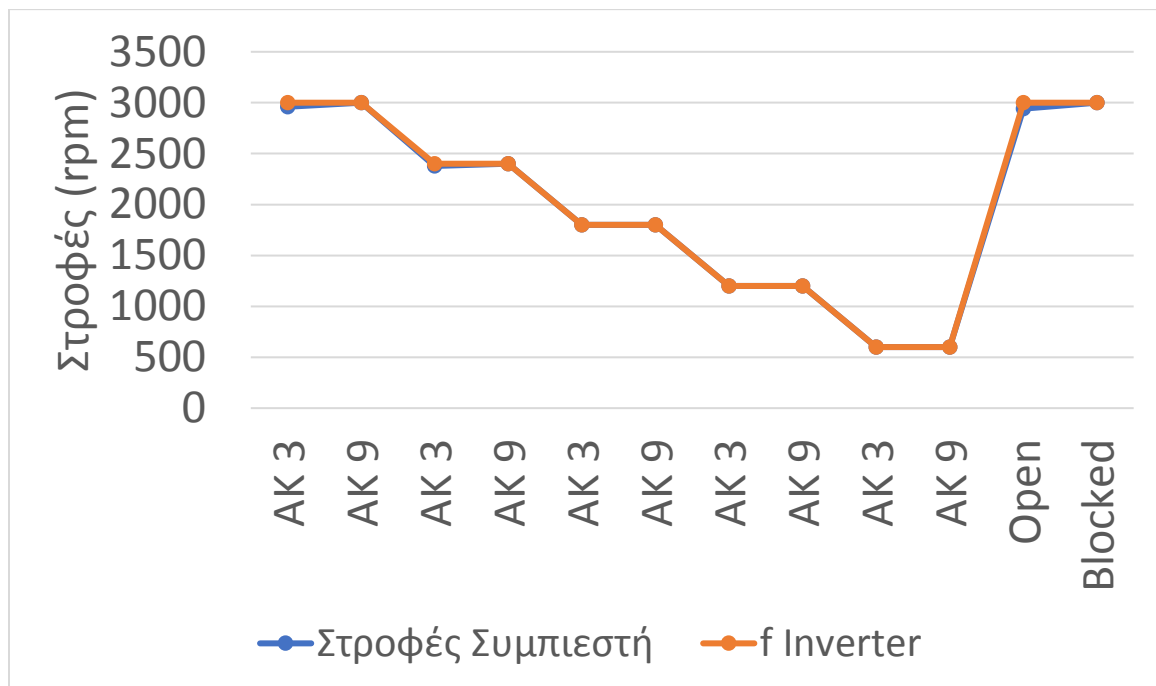
του ρευστού από τον συμπιεστή (τρίτος μηχανισμός). Η ταχύτητα του ρευστού, το επίπεδο της τύρβης και η διάμετρος του σωλήνα που εξέρχεται η ροή είναι πολύ σημαντικές παράμετροι για τον υπολογισμό αυτού του θορύβου. Επίσης, θόρυβος σε ένα τέτοιο σύστημα προκαλείται λόγω ταλαντώσεων του συστήματος, από τη λειτουργία του συμπιεστή και από την εισροή του ρεύματος μέσα από τους σωλήνες (τέταρτος μηχανισμός).^[22]

Με βάση τη συγκεκριμένη θεωρία για το θόρυβο σε σύστημα συμπιεστών σωλήνων, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι τα αποτελέσματα των πειραμάτων ήταν σωστά. Πιο συγκεκριμένα, τονίστηκε ότι η πλήρως ανεπτυγμένη τυρβώδης ροή σε υψηλές ταχύτητες προκαλεί θόρυβο, εφόσον όσο αυξάνεται η ταχύτητα της ροής και το επίπεδο της τύρβης, ταυτόχρονα αυξάνεται και ο θόρυβος στο σύστημα. Κάτι το οποίο παρατηρήθηκε στα πειράματα, αν παρατηρήσει κανείς την ανοδική τάση των καμπύλων στα σχήματα 5.1 και 5.2. Επίσης, το γεγονός ότι η αύξηση της εγκάρσιας επιφάνειας προκαλεί αύξηση του προκαλούμενου θορύβου, παρατηρήθηκε από τα πειράματα, με τα δοκίμια μεγαλύτερης διατομής να εμφανίζουν υψηλότερη ένταση ήχου σε όλες τις στροφές λειτουργίας (σχήμα 5.1).

Κεφάλαιο 6

Μετρήσεις στροφών λειτουργίας συμπιεστή με οπτικό μέσο

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις των στροφών λειτουργίας με την κάμερα υψηλής ταχύτητας. Οι μετρήσεις έγιναν με χρήση δύο δοκιμών σε όλες τις συχνότητες λειτουργίας που έγιναν τα προηγούμενα πειράματα. Επιπλέον, παρουσιάζονται οι δύο μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στα 50 Hz χωρίς τη χρήση κάποιου δοκιμίου. Τα δεδομένα παρουσιάζονται στο επόμενο συγκεντρωτικό διάγραμμα.⁵



Σχήμα 6.1 Σύγκριση στροφών λειτουργίας inverter με μέτρηση στροφών με οπτικό μέσο

Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα σύγκρισης των συχνοτήτων λειτουργίας του inverter με τη μέτρηση των στροφών λειτουργίας του συμπιεστή, μετά από παρατήρηση με οπτικό μέσο, το συμπέρασμα είναι ότι οι στροφές ταυτίζονται. Μόνο τρεις περιπτώσεις παρατηρούνται, στις οποίες οι στροφές δεν ταυτίζονται πλήρως. Οι δύο περιπτώσεις

⁵ Πίνακας δεδομένων στο παράρτημα

παρατηρούνται με χρήση του δοκιμίου (3) στα 40 και 50 Hz λειτουργίας του inverter, όπου αντί για 2400 και 3000 στροφές το λεπτό μετρήθηκαν 2380 και 2960 στροφές το λεπτό αντίστοιχα. Η τρίτη περίπτωση, στην οποία παρατηρείται μια διαφορά από την ένδειξη του inverter, είναι η μέτρηση που έγινε χωρίς τη χρήση κάποιου δοκιμίου (χωρίς φραγή της εξόδου), όπου μετρήθηκαν 2940 στροφές το λεπτό.

Κεφάλαιο 7

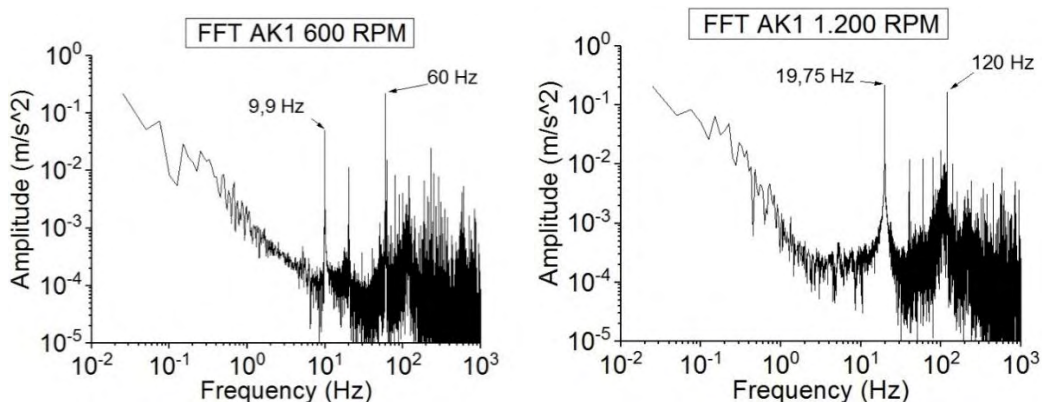
Μετρήσεις δονήσεων συμπιεστή

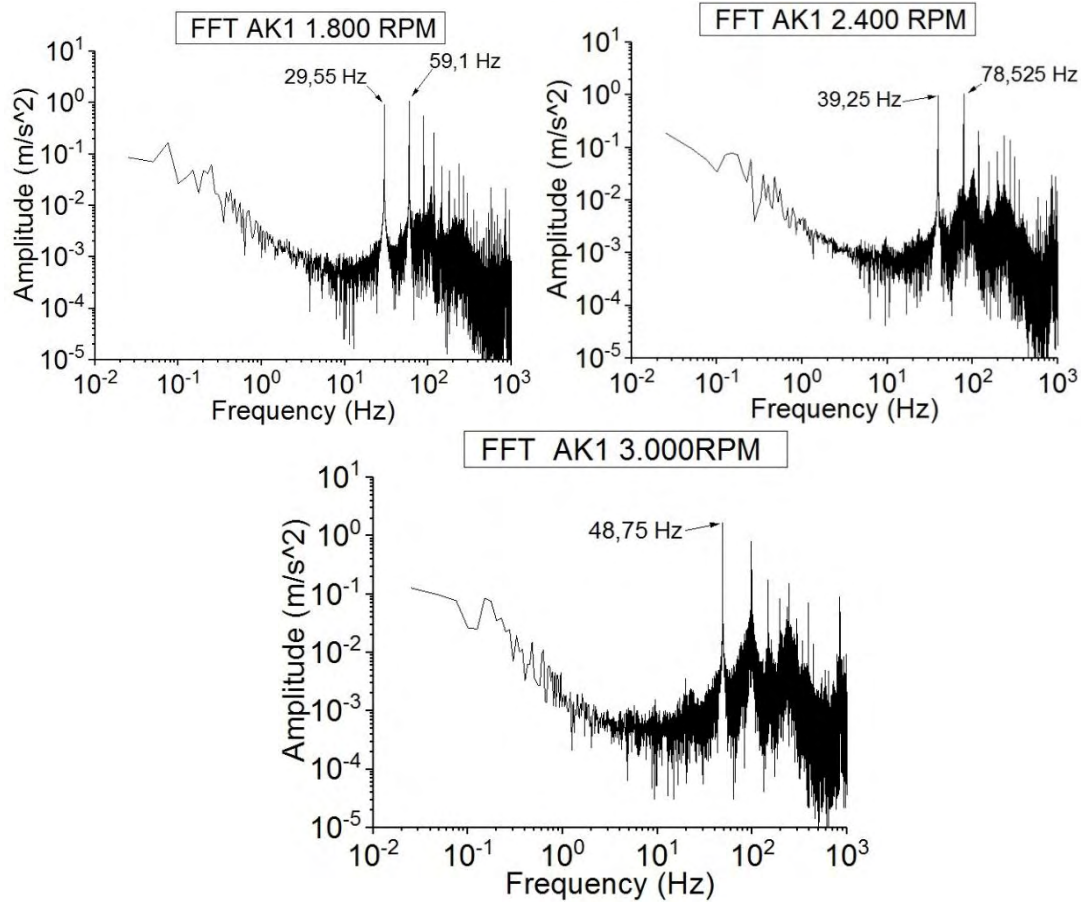
Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις των δονήσεων του συμπιεστή με χρήση των διαφορετικών δοκιμών στις πέντε συχνότητες λειτουργίας. Θα παρουσιαστούν και θα εξηγηθούν τα διαγράμματα του εύρους της ταλάντωσης του συμπιεστή, που προέκυψαν από το μετασχηματισμό FFT, για κάθε δοκίμιο στα δύο σημεία μετρήσεων. Στο τέλος, θα αναλυθούν συγκριτικά διαγράμματα της μεταβολής της τυπικής απόκλισης και της μέσης τιμής σε συνάρτηση με την συχνότητα λειτουργίας ανάμεσα σε όλα τα δοκίμια.

Τα χαρακτηριστικά των διαγραμμάτων είναι τα ίδια για όλα τα δοκίμια, οι μόνες διαφορές είναι αλλαγές στις τιμές και διαφοροποιήσεις στη συμπεριφορά της ταλάντωσης. Επομένως, θα γίνει η ανάλυση των διαγραμμάτων με χρήση του δοκιμίου (1) (για τη μέτρηση πάνω σε αυτό και για τη μέτρηση στη βάση του συμπιεστή)

7.1 Μετρήσεις με δοκίμιο (1)

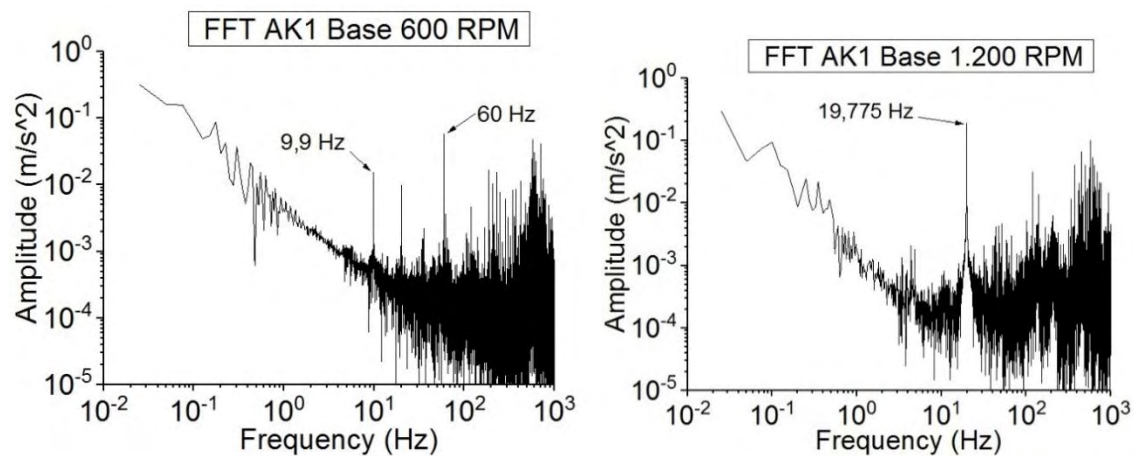
Στα παρακάτω διαγράμματα βλέπουμε τη μεταβολή της συχνότητας σε συνάρτηση με την επιτάχυνση, που προέκυψε από τον μετασχηματισμό FFT. Οι συχνότητες που επισημαίνονται είναι οι συχνότητες εμφάνισης κορυφής της απόκρισης (βασικό σήμα εισόδου). Στις χαμηλότερες στροφές λειτουργίας (εκτός από τις 3000 rpm) φαίνεται να υπάρχουν δύο βασικά σήματα εισόδου. Ο θόρυβος επηρεάζει την ταλάντωση πιο πολύ στις χαμηλές στροφές λειτουργίας. Αυτό φαίνεται από το λόγο σήματος θορύβου, ο οποίος είναι μεγαλύτερος στις 600 rpm και όσο αυξάνονται οι στροφές λειτουργίας μειώνεται.

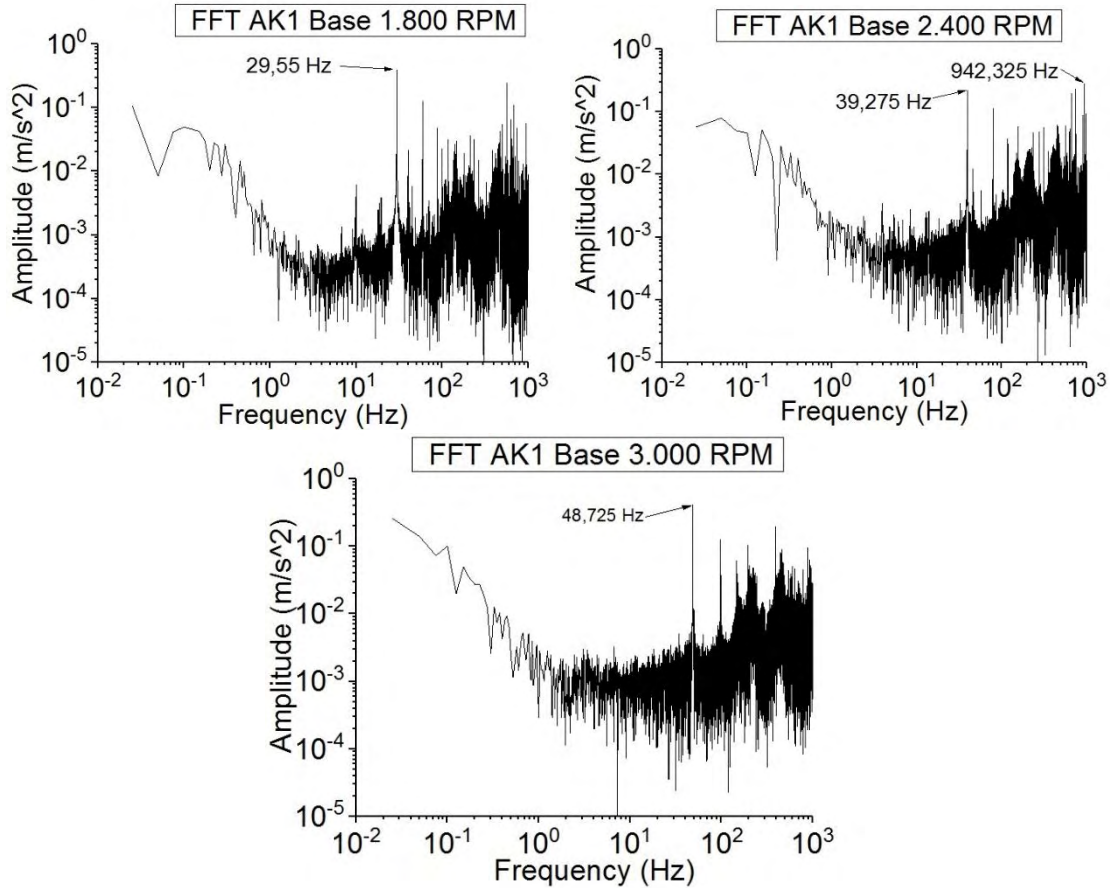




Σχήμα 7.1 Επιτάχυνση σε συνάρτηση με τη συχνότητα από μετασχηματισμό FFT (σημείο μέτρησης: άκρη δοκιμίου)

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα από τις μετρήσεις στη βάση του συμπιεστή σε όλες τις στροφές λειτουργίας.

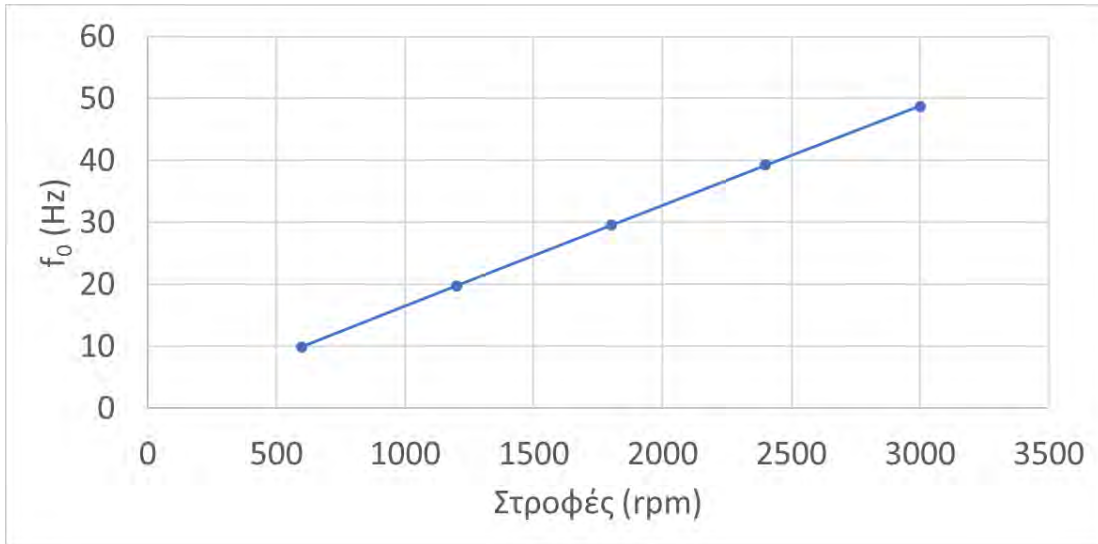




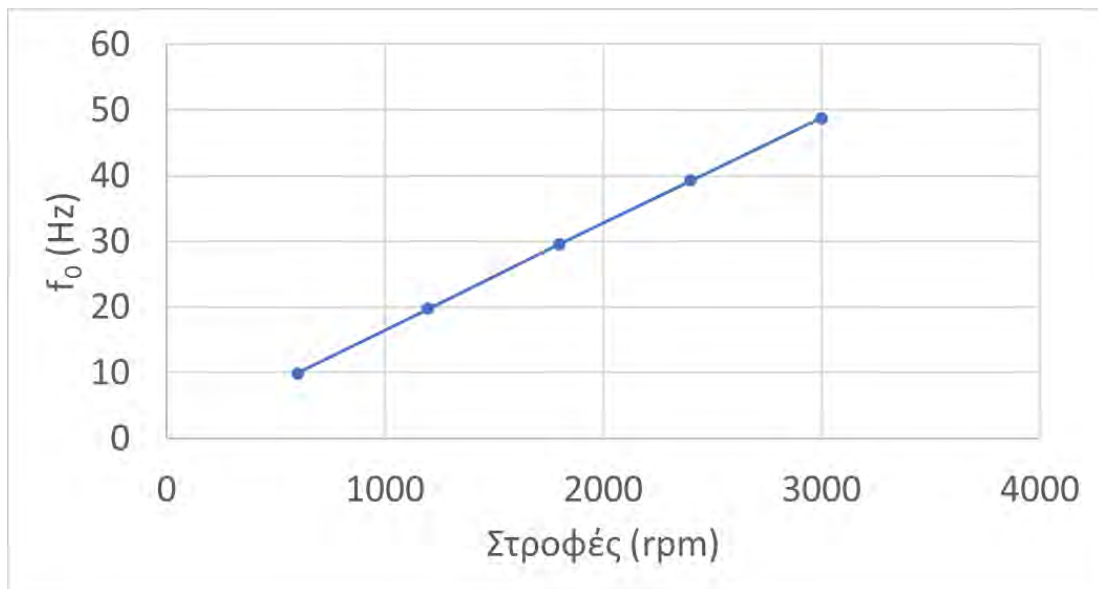
Σχήμα 7.2 Επιτάχυνση σε συνάρτηση με τη συχνότητα από μετασχηματισμό FFT (σημείο μέτρησης: βάση συμπιεστή)

Στα παραπάνω διαγράμματα φαίνεται η μεταβολή της επιτάχυνσης, όπως προέκυψε από το μετασχηματισμό FFT, με τα δεδομένα να μετρούνται στη βάση του συμπιεστή. Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνονται οι στροφές λειτουργίας, αυξάνεται και η συχνότητα εμφάνισης κορυφής της επιτάχυνσης. Επίσης, η ταλάντωση στις υψηλότερες στροφές λειτουργίας είναι πιο ομαλή, δηλαδή επηρεάζεται πιο λίγο από το θόρυβο. Όσο μειώνονται οι στροφές λειτουργίας παρατηρούνται μεγαλύτερες διακυμάνσεις μεταξύ των τιμών των δεδομένων.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται δύο διαγράμματα των ιδιοσυχνότητων της ταλάντωσης σε συνάρτηση με τις στροφές λειτουργίας του συμπιεστή, για τις δύο περιπτώσεις μετρήσεων. Όπως, παρατηρείται η σχέση των συχνοτήτων με τις στροφές λειτουργίας και στις δύο περιπτώσεις είναι γραμμική. Οι καμπύλες έχουν ανοδική τάση επαληθεύοντας το γεγονός ότι σε υψηλότερες στροφές λειτουργίας εμφανίζονται υψηλότερες συχνότητες εμφάνισης μέγιστης επιτάχυνσης.



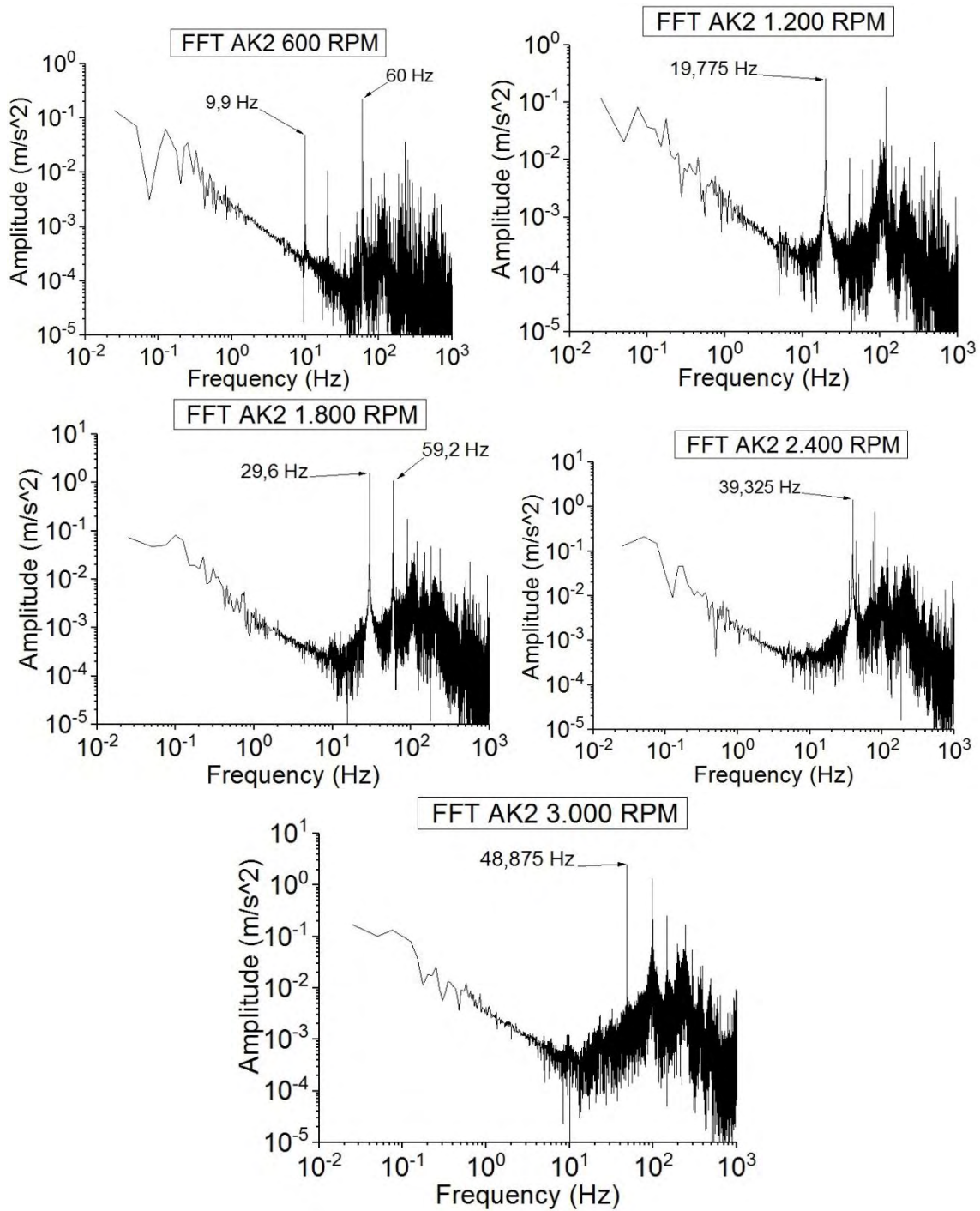
Σχήμα 7.3 Συχνότητα εμφάνισης μέγιστης επιτάχυνσης σε συνάρτηση με τις στροφές λειτουργίας του συμπιεστή (σημείο μέτρησης: άκρη δοκιμίου)



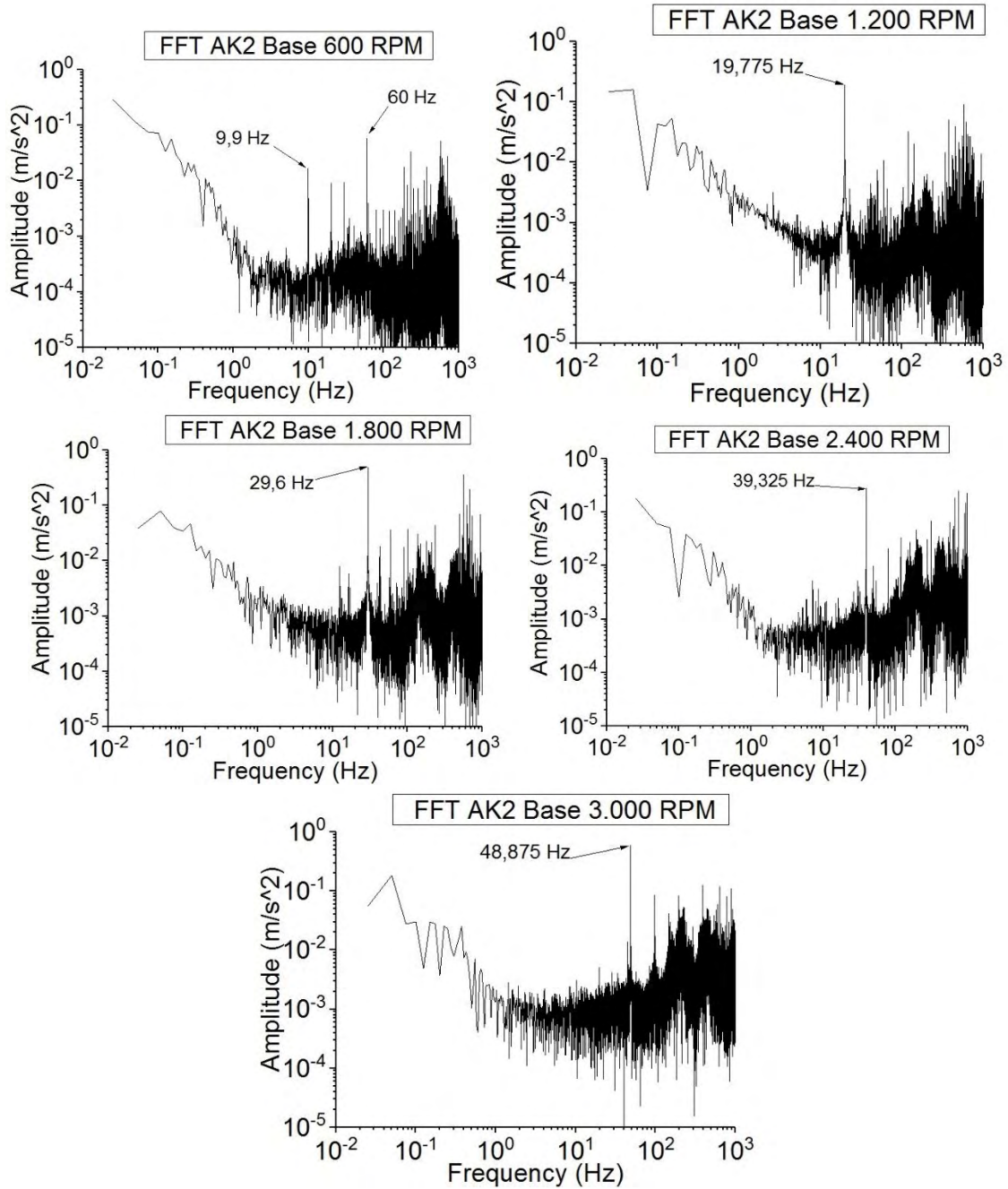
Σχήμα 7.4 Συχνότητα εμφάνισης μέγιστης επιτάχυνσης σε συνάρτηση με τις στροφές λειτουργίας του συμπιεστή (σημείο μέτρησης: βάση συμπιεστή)

7.2 Μετρήσεις με δοκίμιο (2)

Στα επόμενα διαγράμματα (σχήμα 7.5) φαίνεται ο μετασχηματισμός FFT από τις μετρήσεις των επιταχύνσεων στην άκρη του δοκιμίου (2) σε όλες τις στροφές λειτουργίας. Παρατηρείται ότι οι συχνότητες όπου εμφανίζεται η μέγιστη επιτάχυνση είναι ίδιες με αυτές με χρήση του δοκιμίου (1). Οι διακυμάνσεις στις χαμηλότερες στροφές λειτουργίας είναι μεγαλύτερες, ενώ όσο αυξάνονται οι στροφές οι έντονες διακυμάνσεις περιορίζονται.



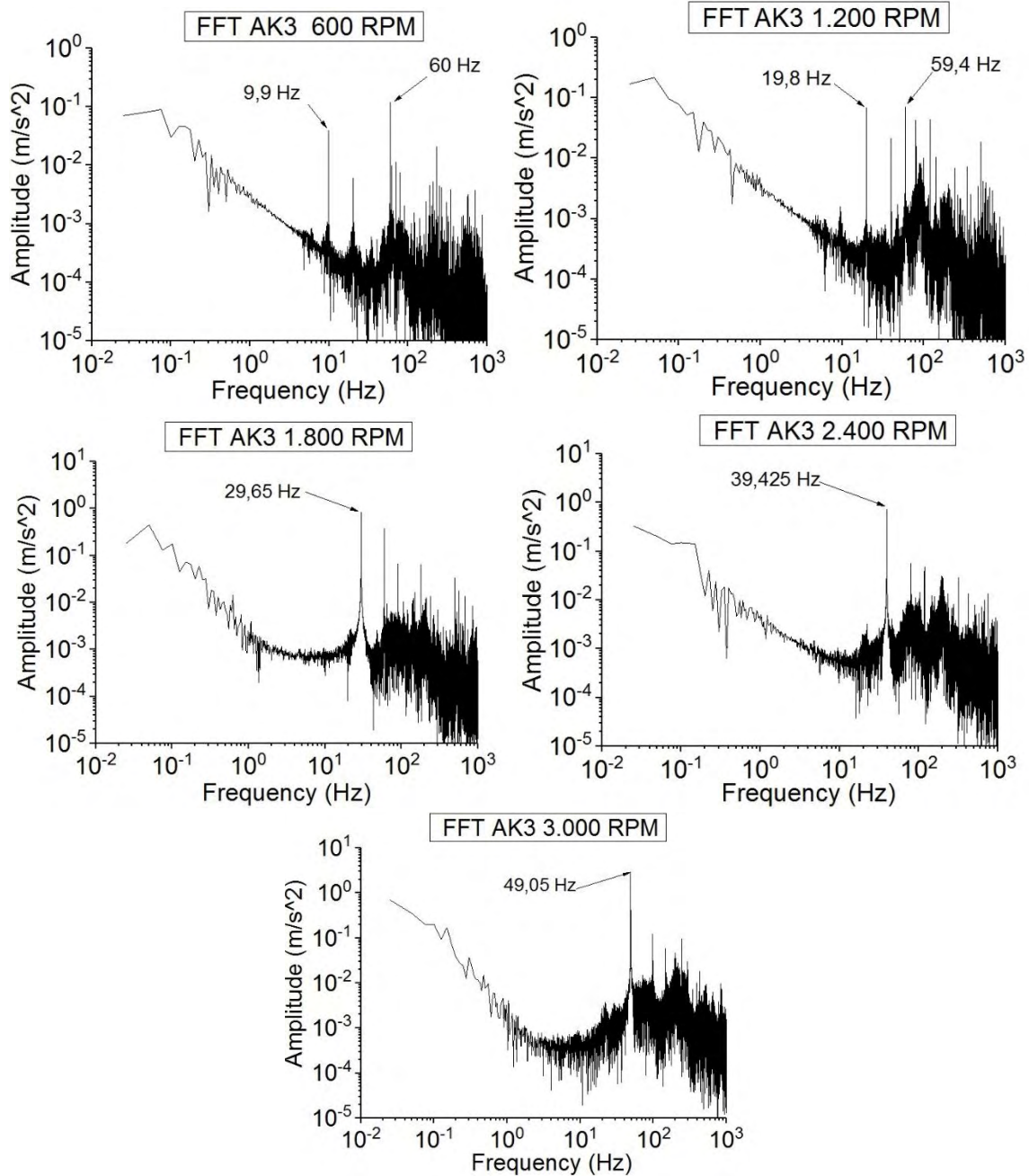
Σχήμα 7.5 Επιτάχυνση σε συνάρτηση με τη συχνότητα από μετασχηματισμό FFT (σημείο μέτρησης: άκρη δοκιμίου)



Σχήμα 7.6 Επιτάχυνση σε συνάρτηση με τη συχνότητα από μετασχηματισμό FFT (σημείο μέτρησης: βάση συμπιεστή)

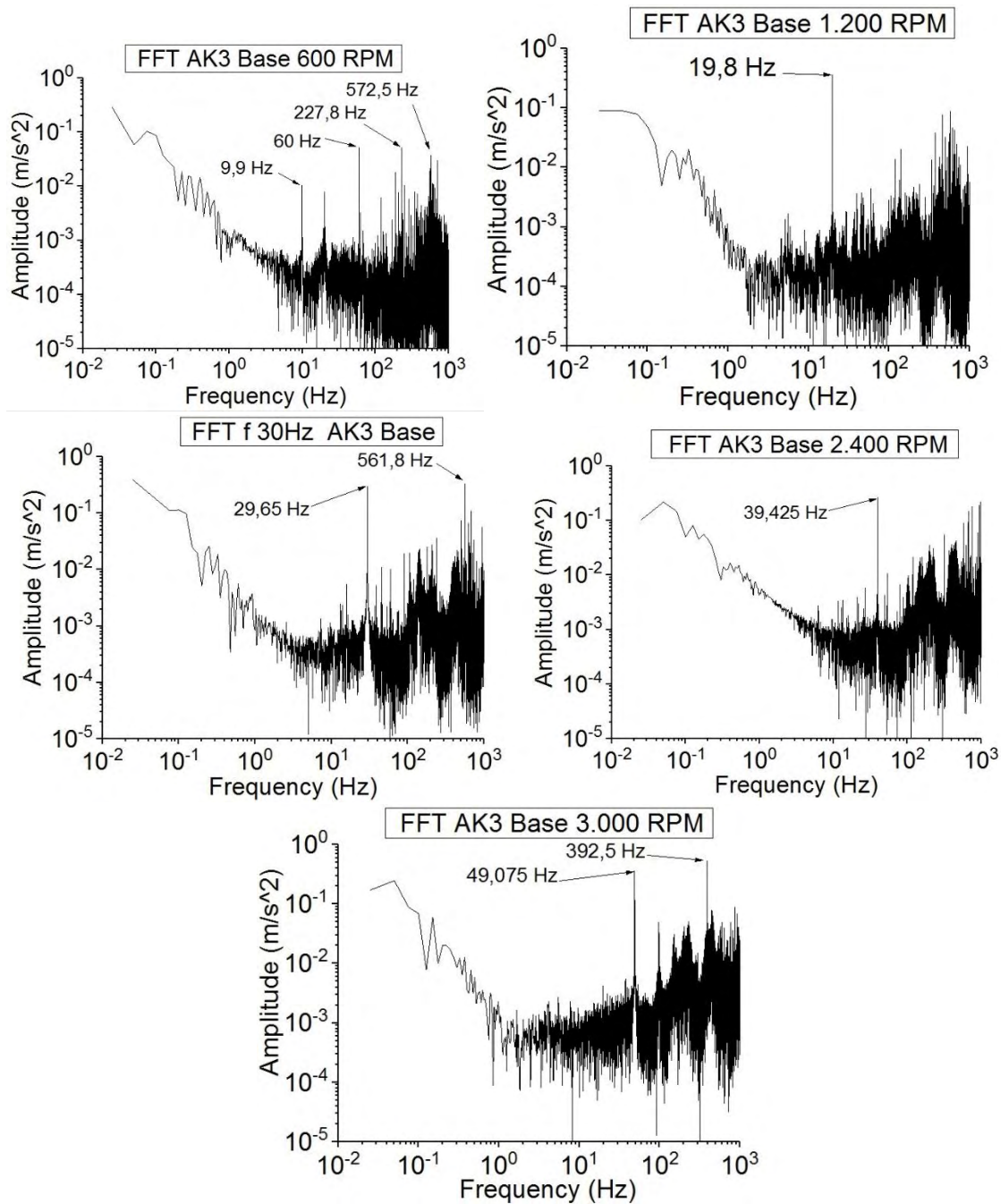
Στο σχήμα 7.6 φαίνεται ο μετασχηματισμός FFT από μέτρηση στη βάση του συμπιεστή για όλες τις στροφές λειτουργίας. Στις 600 στροφές το λεπτό παρατηρούνται πολύ μεγάλες διακυμάνσεις. Οι διακυμάνσεις περιορίζονται όσο αυξάνονται οι στροφές λειτουργίας, αλλά όχι σε μεγάλο βαθμό.

7.3 Μετρήσεις με δοκίμιο (3)



Σχήμα 7.7 Επιτάχυνση σε συνάρτηση με τη συχνότητα από μετασχηματισμό FFT (σημείο μέτρησης: άκρη δοκιμίου)

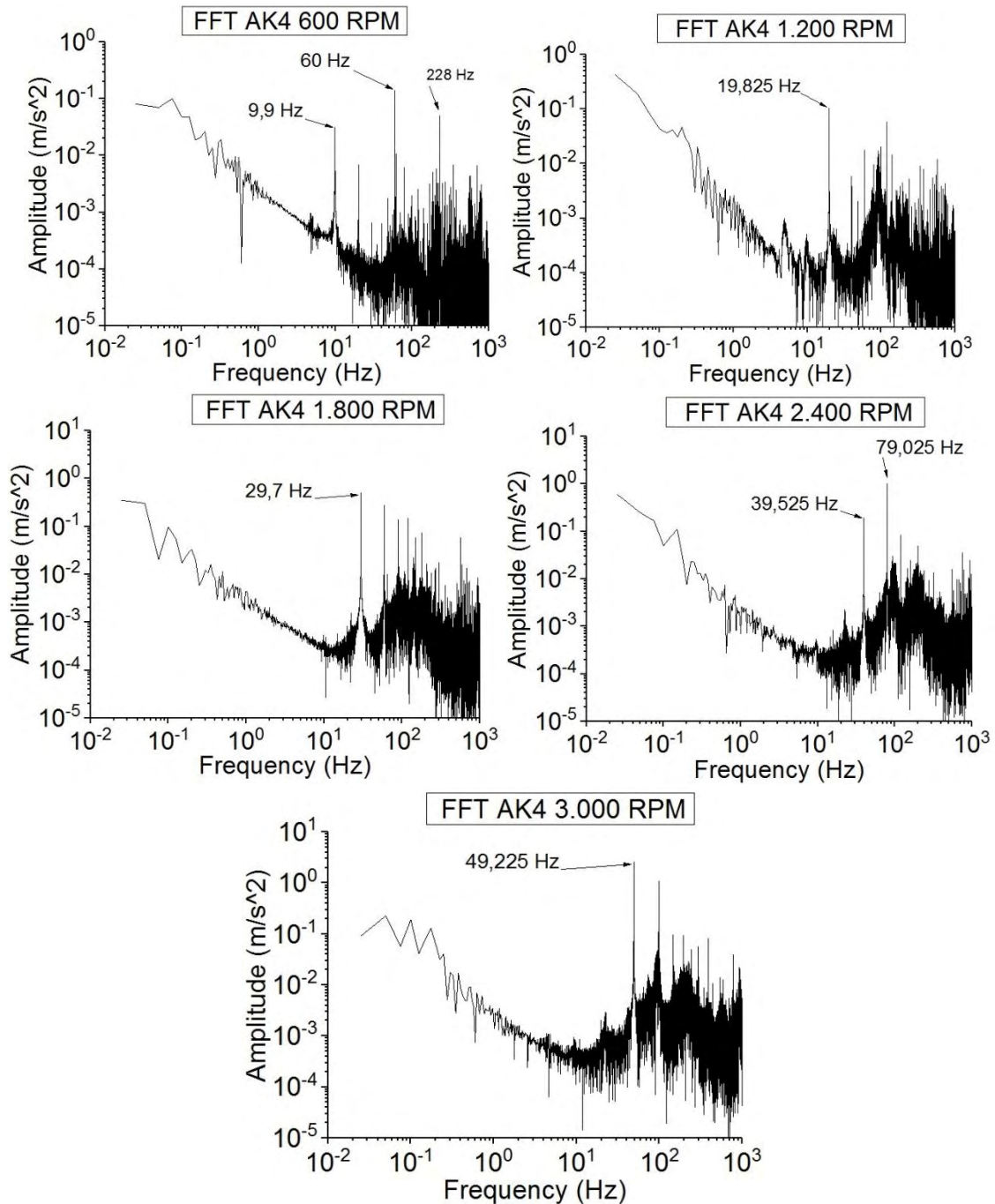
Στο σχήμα 7.7 φαίνεται ο μετασχηματισμός FFT από μέτρηση στην άκρη του δοκιμίου για όλες τις στροφές λειτουργίας. Στις 600 και στις 1200 rpm παρατηρούνται δύο συχνότητες εμφάνισης μέγιστης επιτάχυνσης. Στις υψηλότερες στροφές οι διακυμάνσεις είναι πιο περιορισμένες.



Σχήμα 7.8 Επιτάχυνση σε συνάρτηση με τη συχνότητα από μετασχηματισμό FFT (σημείο μέτρησης: βάση συμπιεστή)

Στο σχήμα 7.8 φαίνεται ο μετασχηματισμός FFT από μέτρηση στη βάση του συμπιεστή για όλες τις στροφές λειτουργίας. Στις 600 rpm παρατηρούνται τέσσερις συχνότητες εμφάνισης μέγιστης επιτάχυνσης. Επίσης, όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις με αύξηση των στροφών λειτουργίας παρατηρείται αύξηση των συχνοτήτων αυτών. Επιπλέον, σε όλες τις στροφές λειτουργίας παρατηρούνται σημαντικές διακυμάνσεις.

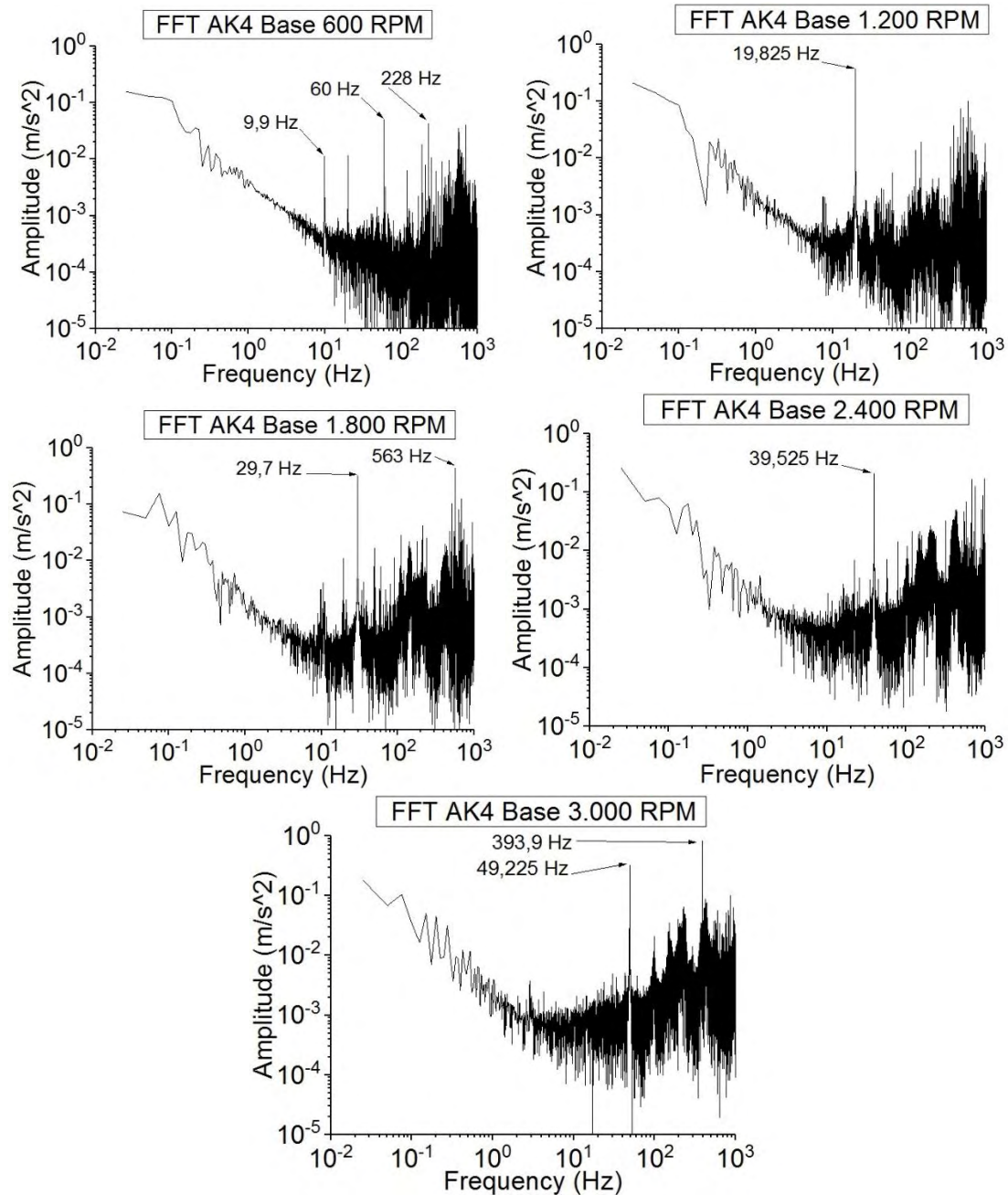
7.4 Μετρήσεις με δοκίμιο (4)



Σχήμα 7.9 Επιτάχυνση σε συνάρτηση με τη συχνότητα από μετασχηματισμό FFT (σημείο μέτρησης: άκρη δοκιμίου)

Στο σχήμα 7.9 φαίνεται ο μετασχηματισμός FFT από μέτρηση στην άκρη του δοκιμίου για όλες τις στροφές λειτουργίας. Όπως με χρήση των προηγούμενων δοκιμίων έτσι και εδώ

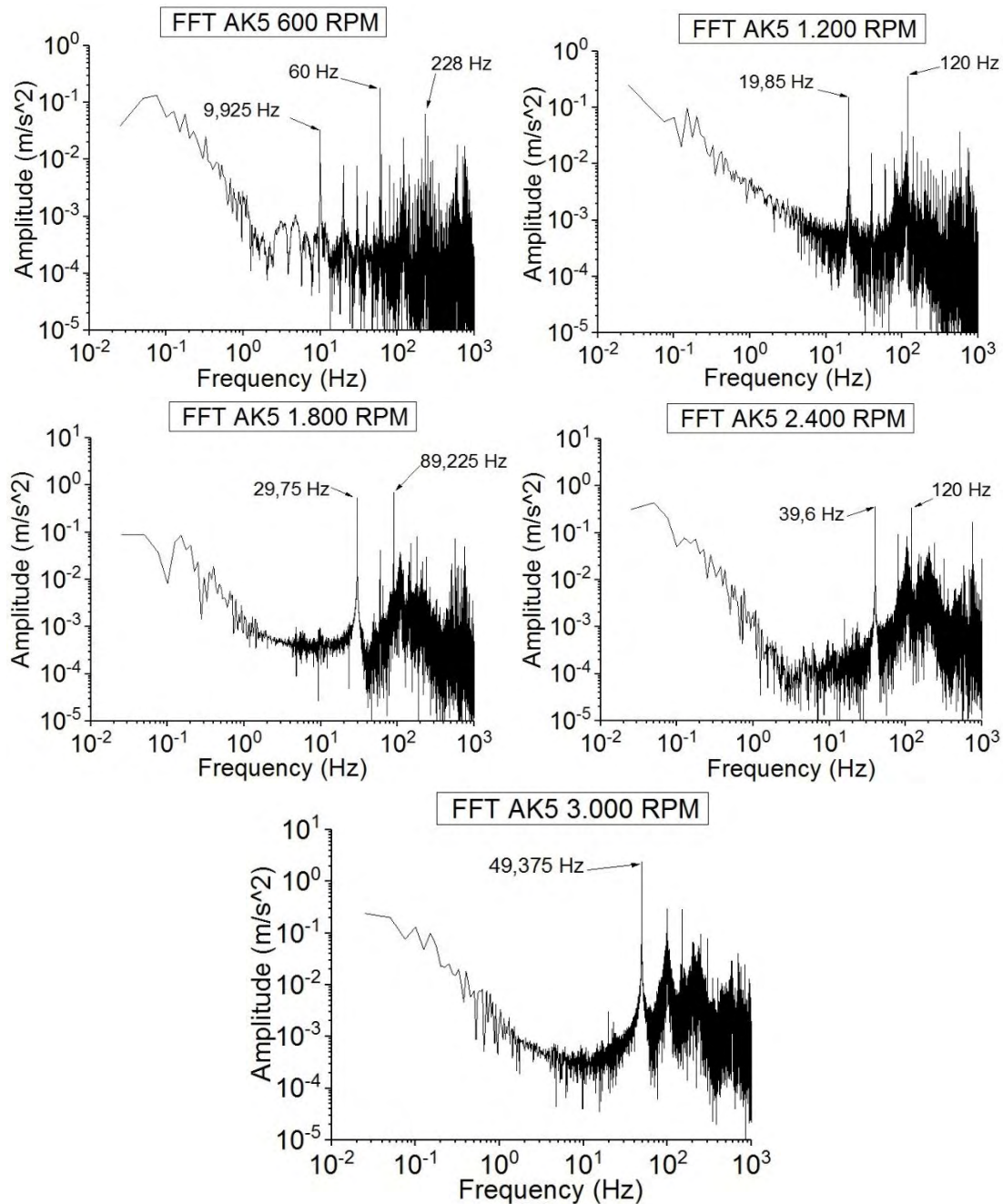
στις 600 rpm εμφανίζονται πάνω από μια συχνότητες μέγιστης επιτάχυνσης. Όσο αυξάνονται οι στροφές κάπως μειώνονται οι έντονες διακυμάνσεις των τιμών.



Σχήμα 7.10 Επιτάχυνση σε συνάρτηση με τη συχνότητα από μετασχηματισμό FFT (σημείο μέτρησης: βάση συμπιεστή)

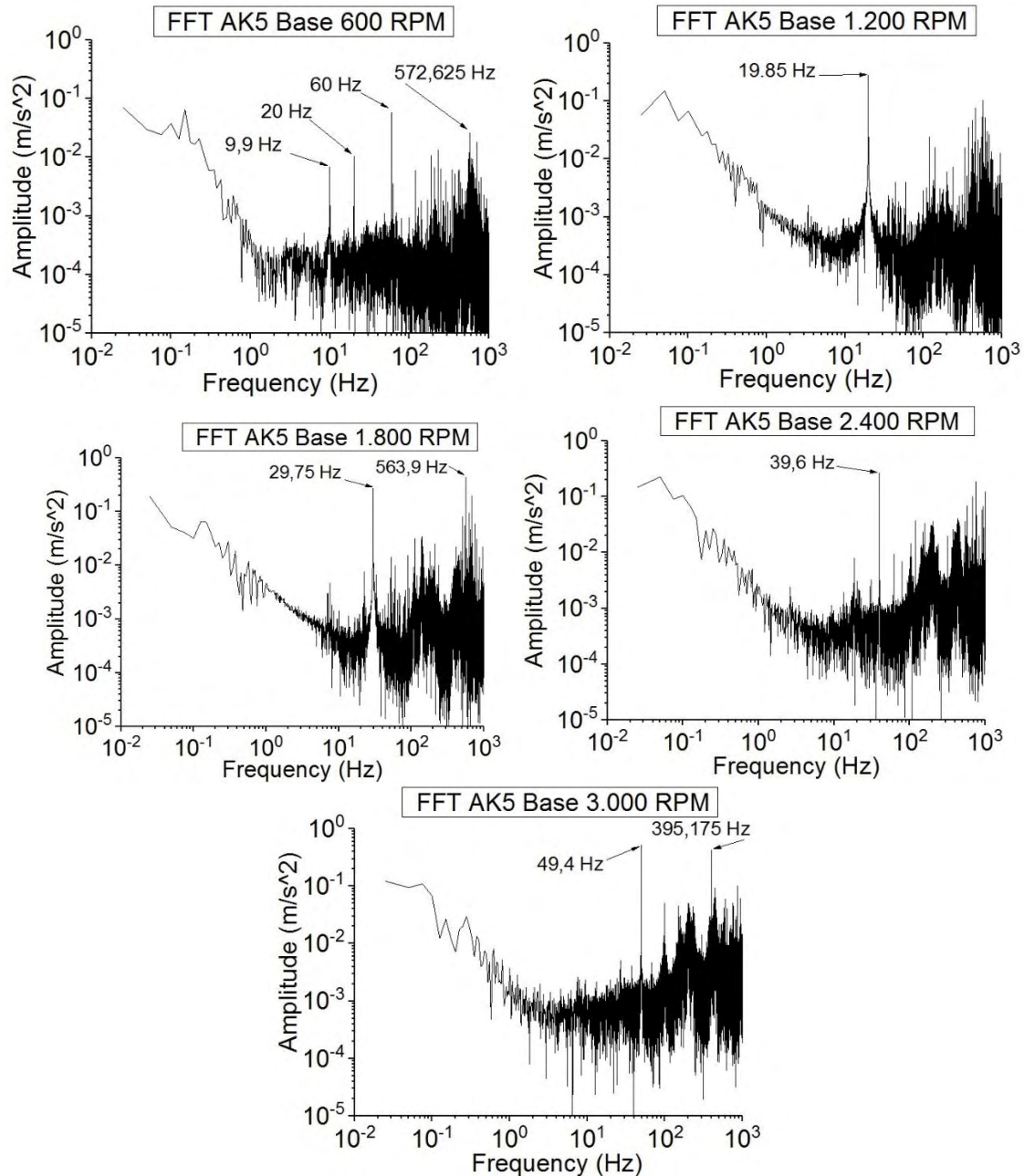
Στο σχήμα 7.10 φαίνεται ο μετασχηματισμός FFT από τη μέτρηση στη βάση του συμπιεστή για όλες τις στροφές λειτουργίας. Στις 600 rpm παρατηρούνται δύο συχνότητες εμφάνισης μέγιστης επιτάχυνσης και έντονες διακυμάνσεις τιμών. Στις 1800 και στις 3000 rpm παρατηρούνται δύο συχνότητες εμφάνισης της μέγιστης επιτάχυνσης.

7.5 Μετρήσεις με δοκίμιο (5)



Σχήμα 7.11 Επιτάχυνση σε συνάρτηση με τη συχνότητα από μετασχηματισμό FFT (σημείο μέτρησης: άκρη δοκιμίου)

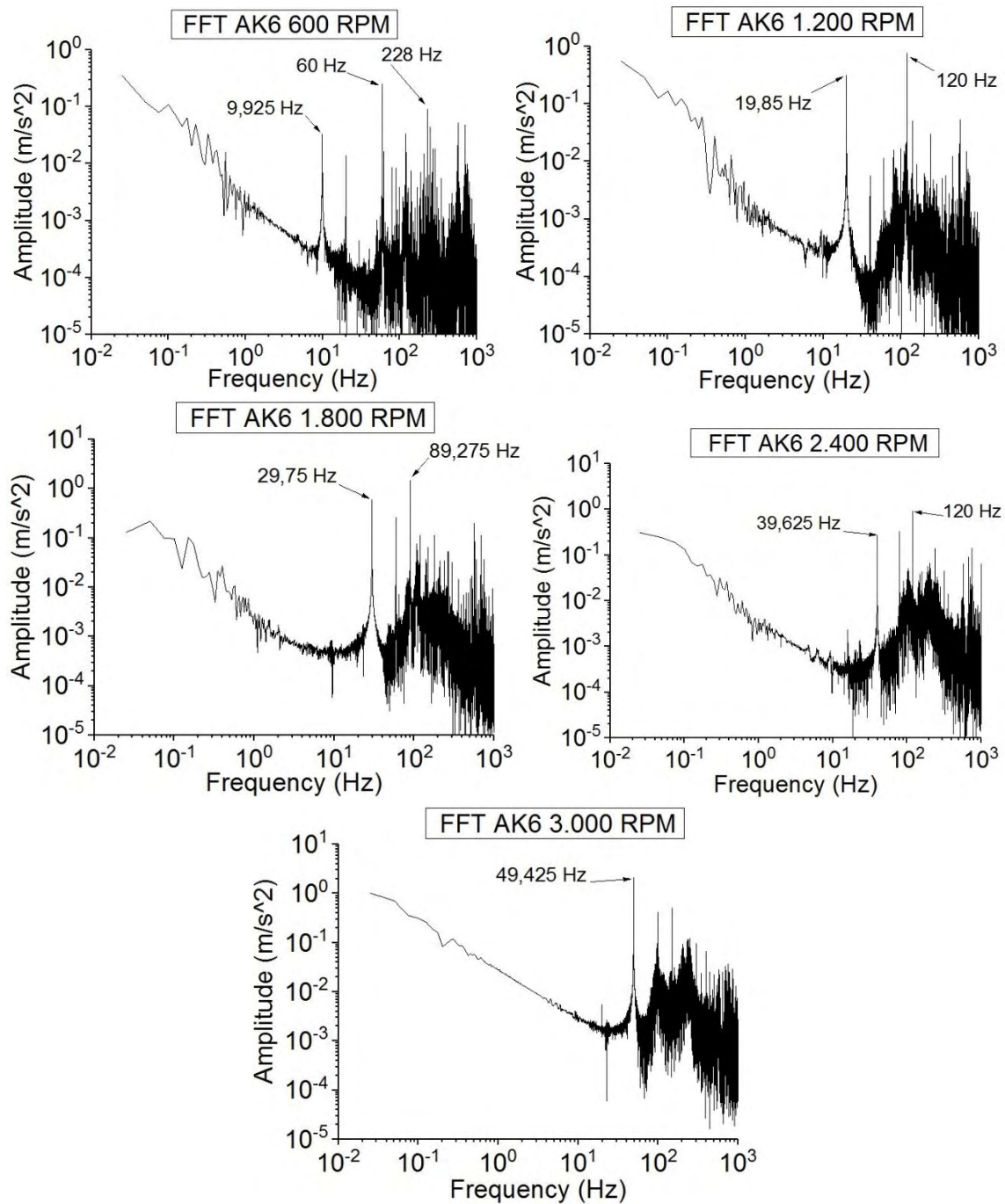
Στο σχήμα 7.11 φαίνεται ο μετασχηματισμός FFT από τη μέτρηση στην άκρη του δοκιμίου για όλες τις στροφές λειτουργίας. Στις 600 rpm παρατηρούνται τρεις συχνότητες εμφάνισης μέγιστης επιτάχυνσης και έντονες διακυμάνσεις τιμών. Στις 1200 και στις 1800 rpm παρατηρούνται δύο συχνότητες εμφάνισης της μέγιστης επιτάχυνσης. Οι διακυμάνσεις περιορίζονται αισθητά στις 3000 σε σχέση με τις 600 rpm.



Σχήμα 7.12 Επιτάχυνση σε συνάρτηση με τη συχνότητα από μετασχηματισμό FFT (σημείο μέτρησης: βάση συμπιεστή)

Στο σχήμα 7.12 φαίνεται ο μετασχηματισμός FFT από τη μέτρηση στη βάση του συμπιεστή για όλες τις στροφές λειτουργίας. Στις 600 rpm παρατηρούνται τέσσερις συχνότητες εμφάνισης μέγιστης επιτάχυνσης και έντονες διακυμάνσεις τιμών. Στις 1800 και στις 3000 rpm παρατηρούνται δύο συχνότητες εμφάνισης της μέγιστης επιτάχυνσης. Οι διακυμάνσεις περιορίζονται λίγο στις 3000 σε σχέση με τις 600 rpm.

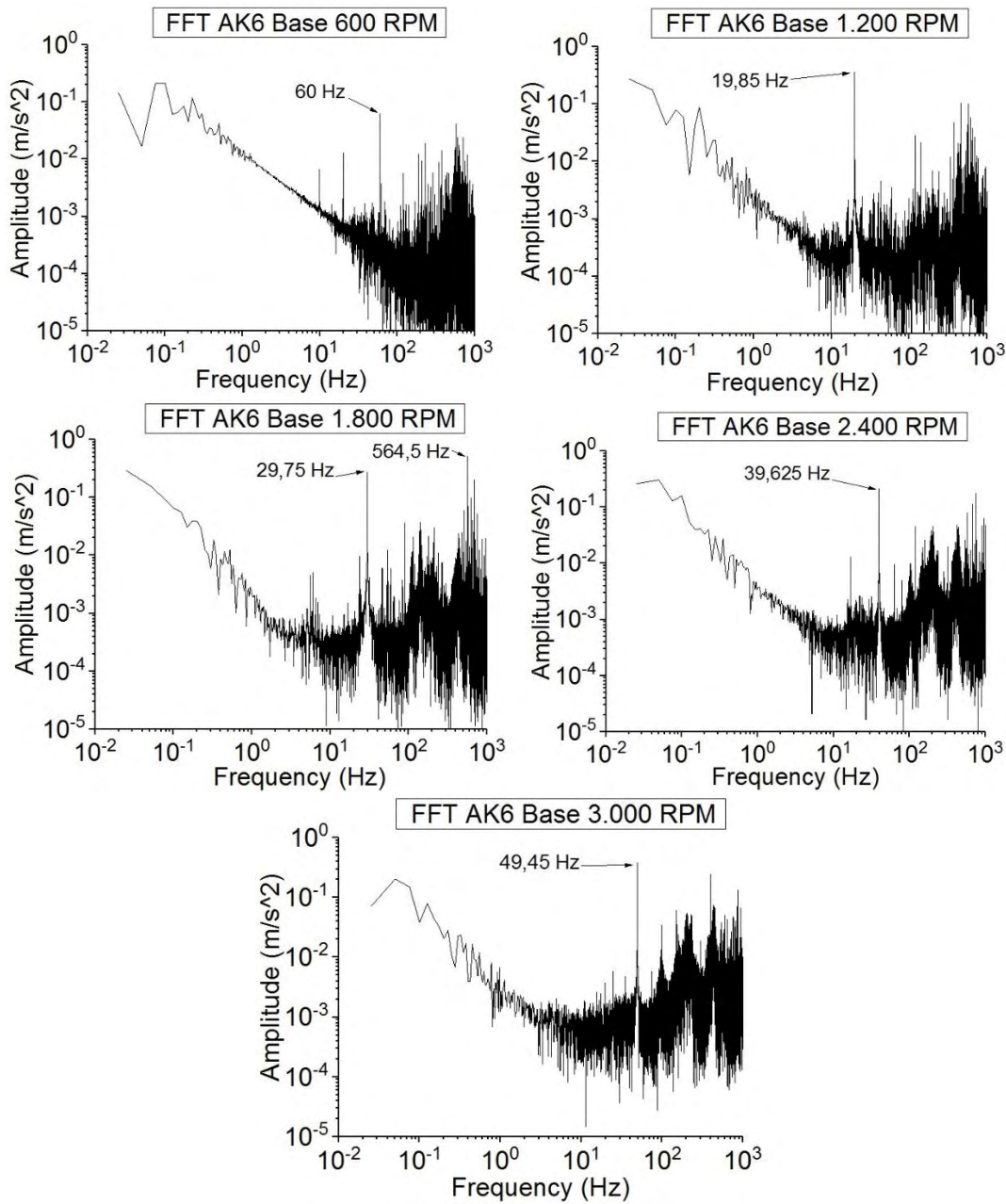
7.6 Μετρήσεις με δοκίμιο (6)



Σχήμα 7.13 Επιτάχυνση σε συνάρτηση με τη συχνότητα από μετασχηματισμό FFT (σημείο μέτρησης: άκρη δοκιμίου)

Στο σχήμα 7.13 φαίνεται ο μετασχηματισμός FFT από τη μέτρηση στην άκρη του δοκιμίου για όλες τις στροφές λειτουργίας. Στις 600 rpm παρατηρούνται τρία σημεία εμφάνισης μέγιστης επιτάχυνσης και πολύ έντονες διακυμάνσεις τιμών. Στις 1200, στις

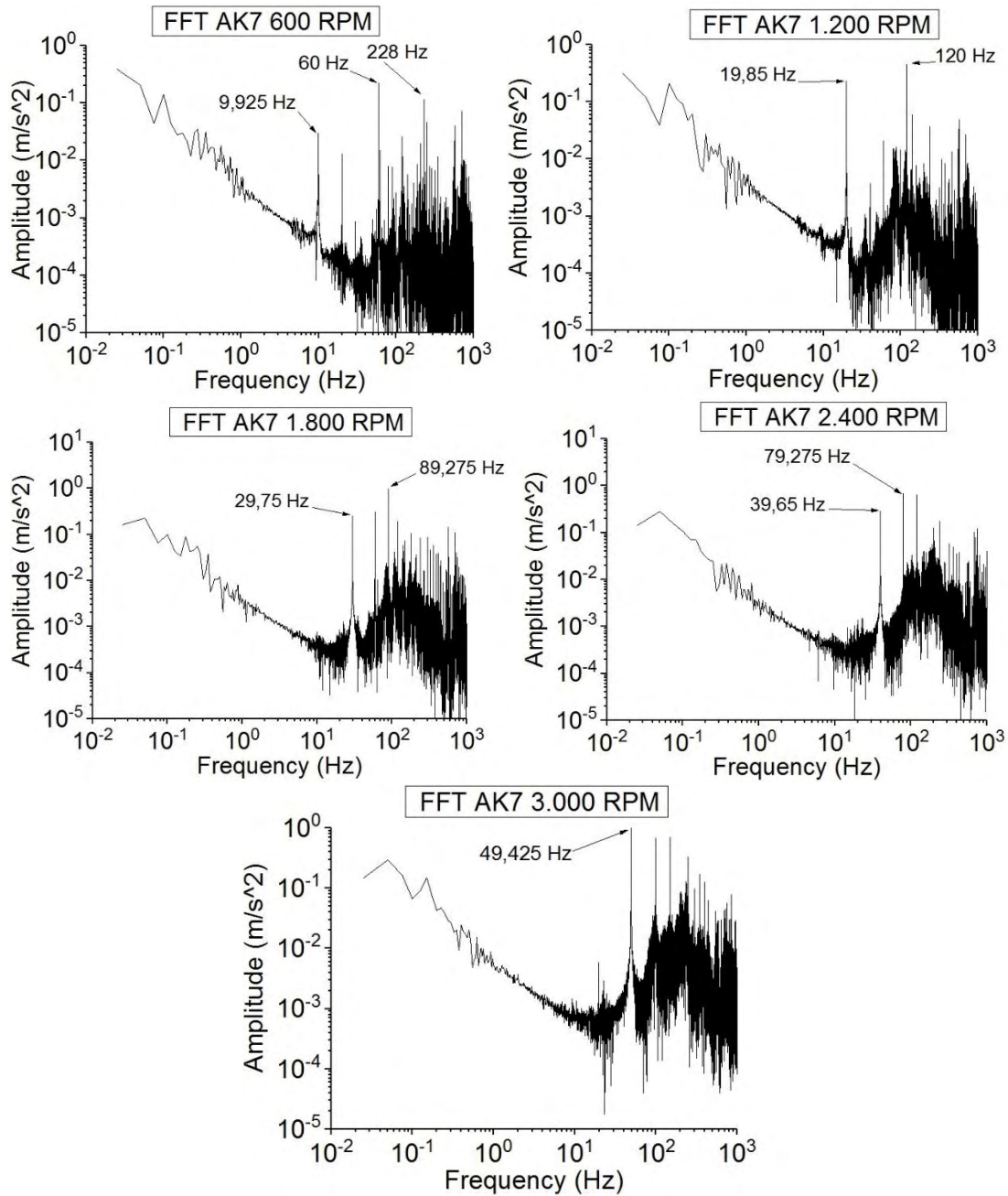
1800 και στις 2400 rpm παρατηρούνται δύο συχνότητες εμφάνισης της μέγιστης επιτάχυνσης. Οι διακυμάνσεις περιορίζονται αισθητά στις 3000 σε σχέση με τις 600 rpm.



Σχήμα 7.14 Επιτάχυνση σε συνάρτηση με τη συχνότητα από μετασχηματισμό FFT (σημείο μέτρησης: βάση συμπιεστή)

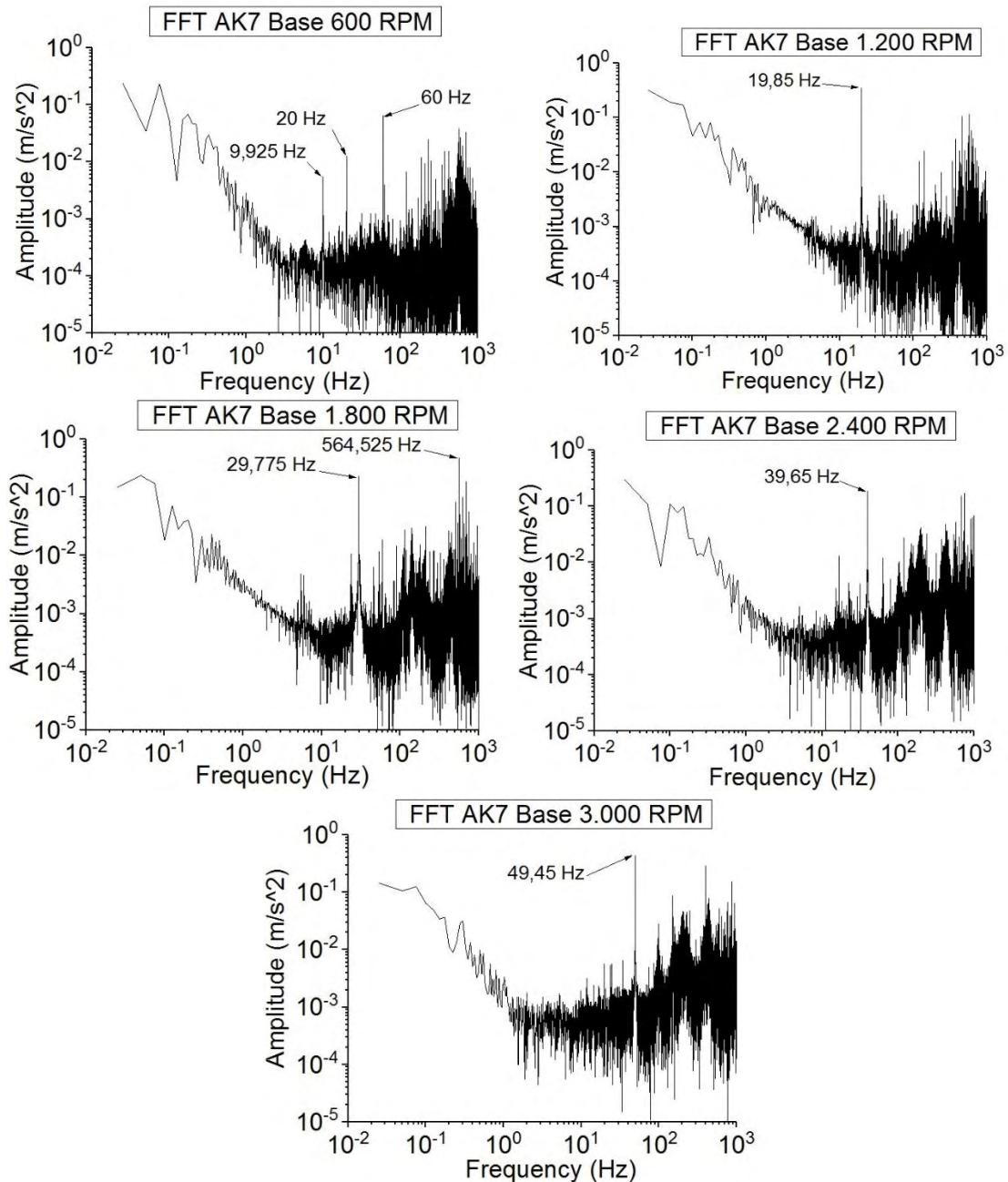
Στο σχήμα 7.14 φαίνεται ο μετασχηματισμός FFT από τη μέτρηση στη βάση του συμπιεστή για όλες τις στροφές λειτουργίας. Γενικά, παρατηρείται ότι σε όλες σχεδόν τις στροφές λειτουργίας εμφανίζεται ένα σημείο μέγιστης επιτάχυνσης, εκτός από τις 1800 rpm, όπου εμφανίζονται δύο σημεία. Οι διακυμάνσεις των τιμών είναι πιο έντονες στις 1200 και στις 1800 rpm.

7.7 Μετρήσεις με δοκίμιο (7)



Σχήμα 7.15 Επιτάχυνση σε συνάρτηση με τη συχνότητα από μετασχηματισμό FFT (σημείο μέτρησης: άκρη δοκιμίου)

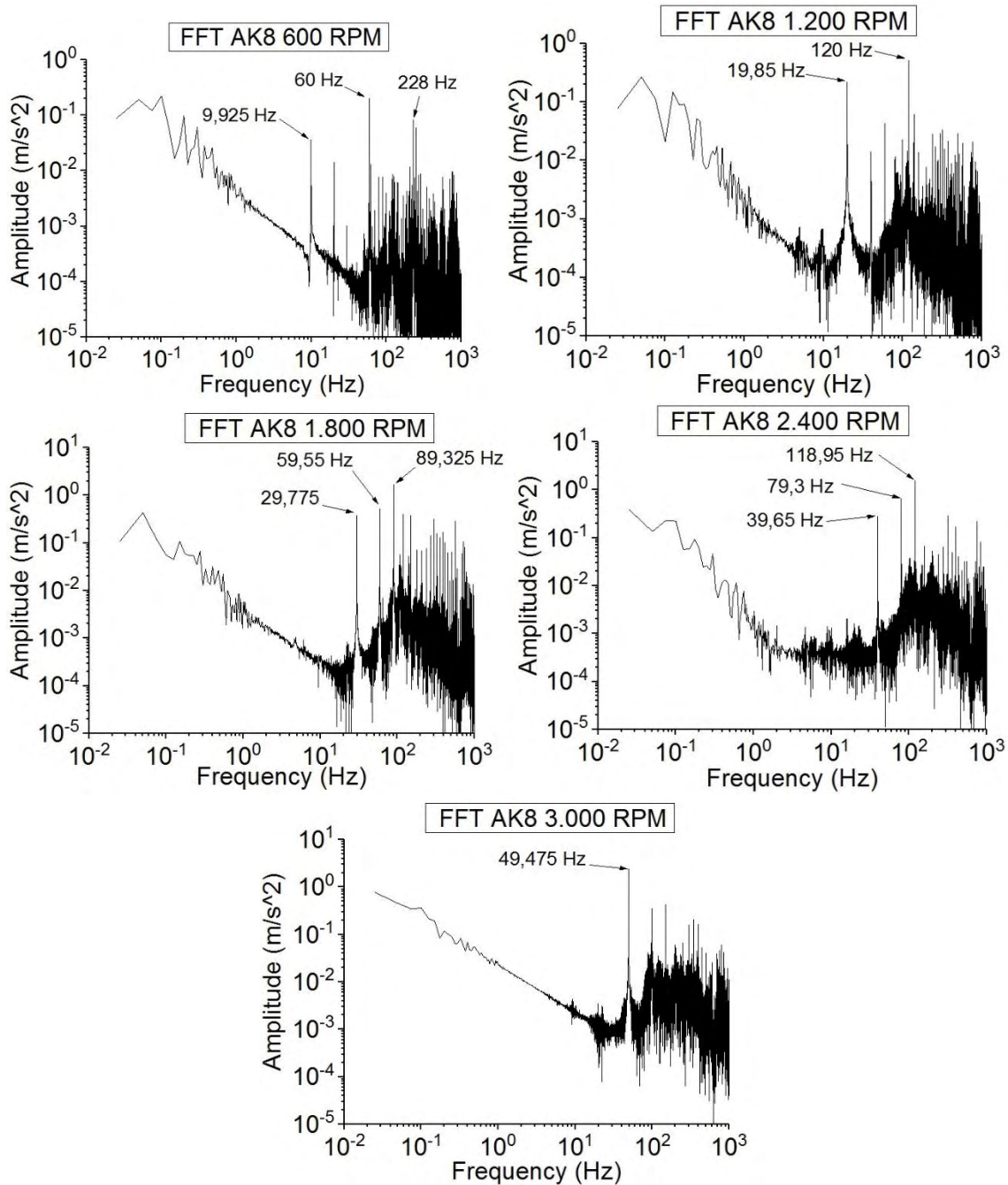
Στο σχήμα 7.15 φαίνεται ο μετασχηματισμός FFT από τη μέτρηση στην άκρη του δοκιμίου για όλες τις στροφές λειτουργίας. Στις 600 rpm εμφανίζονται τρία σημεία μέγιστης επιτάχυνσης, ενώ στις 1200, 1800 και 2400 rpm παρατηρούνται δύο συχνότητες εμφάνισης κορυφής της ταλάντωσης. Οι διακυμάνσεις των τιμών είναι πιο έντονες στις χαμηλότερες στροφές λειτουργίας.



Σχήμα 7.16 Επιτάχυνση σε συνάρτηση με τη συχνότητα από μετασχηματισμό FFT (σημείο μέτρησης: βάση συμπιεστή)

Στο σχήμα 7.16 φαίνεται ο μετασχηματισμός FFT από τη μέτρηση στη βάση του συμπιεστή για όλες τις στροφές λειτουργίας. Παρατηρείται ότι στις 600 rpm εμφανίζονται τρεις συχνότητες, οι οποίες αντιστοιχούν στη μέγιστη επιτάχυνση της ταλάντωσης και οι διακυμάνσεις είναι μεγάλου εύρους. Στις 1800 rpm παρατηρούνται δύο συχνότητες εμφάνισης μέγιστης επιτάχυνσης, ενώ στις υπόλοιπες στροφές λειτουργίας παρατηρείται λίγο καλύτερη συμπεριφορά ταλάντωσης.

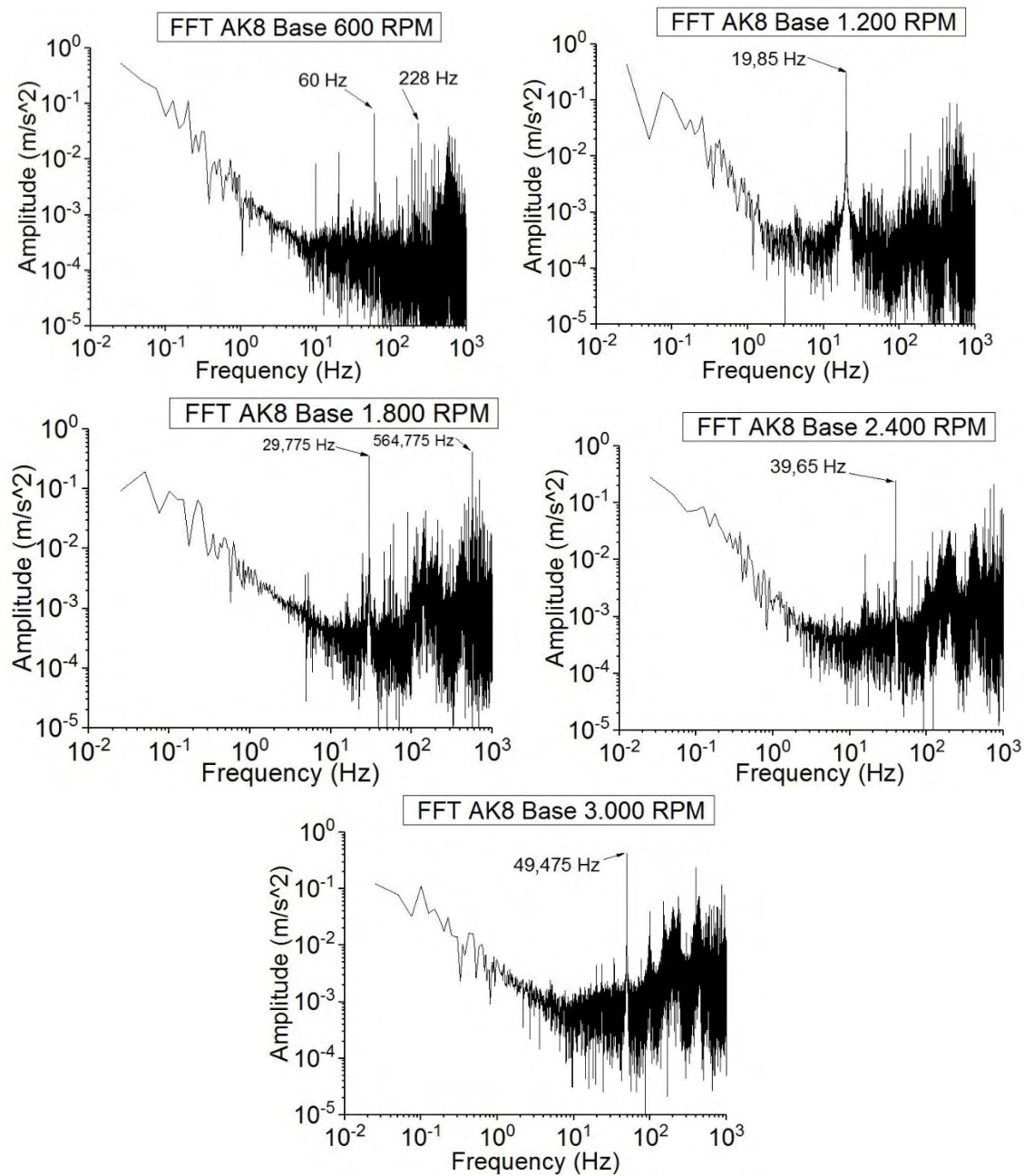
7.8 Μετρήσεις με δοκίμιο (8)



Σχήμα 7.17 Επιτάχυνση σε συνάρτηση με τη συχνότητα από μετασχηματισμό FFT (σημείο μέτρησης: άκρη δοκιμίου)

Στο σχήμα 7.17 φαίνεται ο μετασχηματισμός FFT από τη μέτρηση στην άκρη του δοκιμίου για όλες τις στροφές λειτουργίας. Γενικά, παρατηρείται ότι σε όλες σχεδόν τις στροφές λειτουργίας εμφανίζονται πάνω από ένα σημεία μέγιστης επιτάχυνσης και πολύ

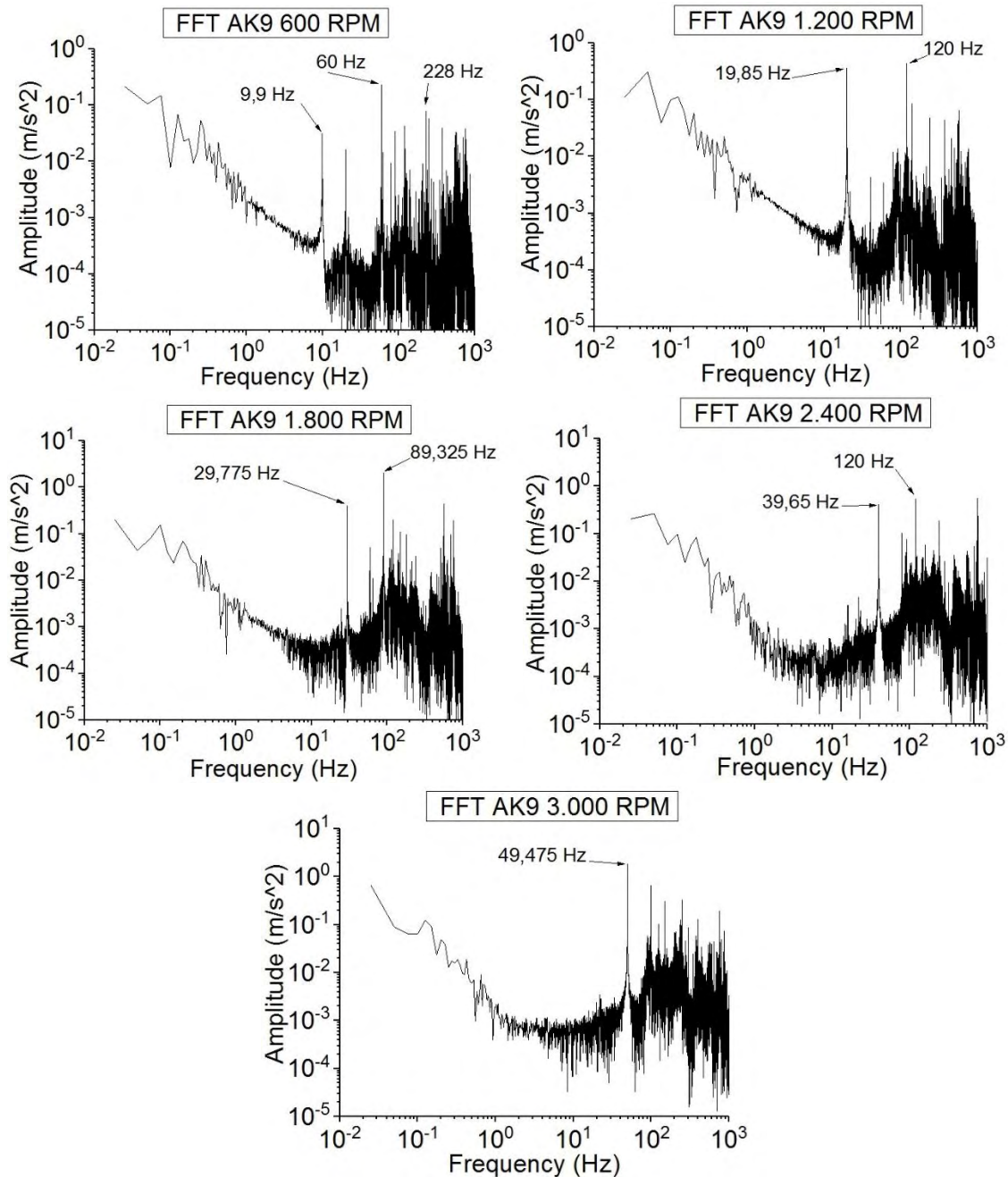
έντονες διακυμάνσεις. Μόνο στις 3000 rpm παρατηρείται μια συχνότητα εμφάνισης κορυφής της ταλάντωσης.



Σχήμα 7.18 Επιτάχυνση σε συνάρτηση με τη συχνότητα από μετασχηματισμό FFT (σημείο μέτρησης: βάση συμπιεστή)

Στο σχήμα 7.18 φαίνεται ο μετασχηματισμός FFT από τη μέτρηση στη βάση του συμπιεστή για όλες τις στροφές λειτουργίας. Οι διακυμάνσεις των τιμών είναι πιο έντονες στις 600 και στις 1800 rpm, όπου επισημαίνονται δύο συχνότητες εμφάνισης μέγιστης επιτάχυνσης.

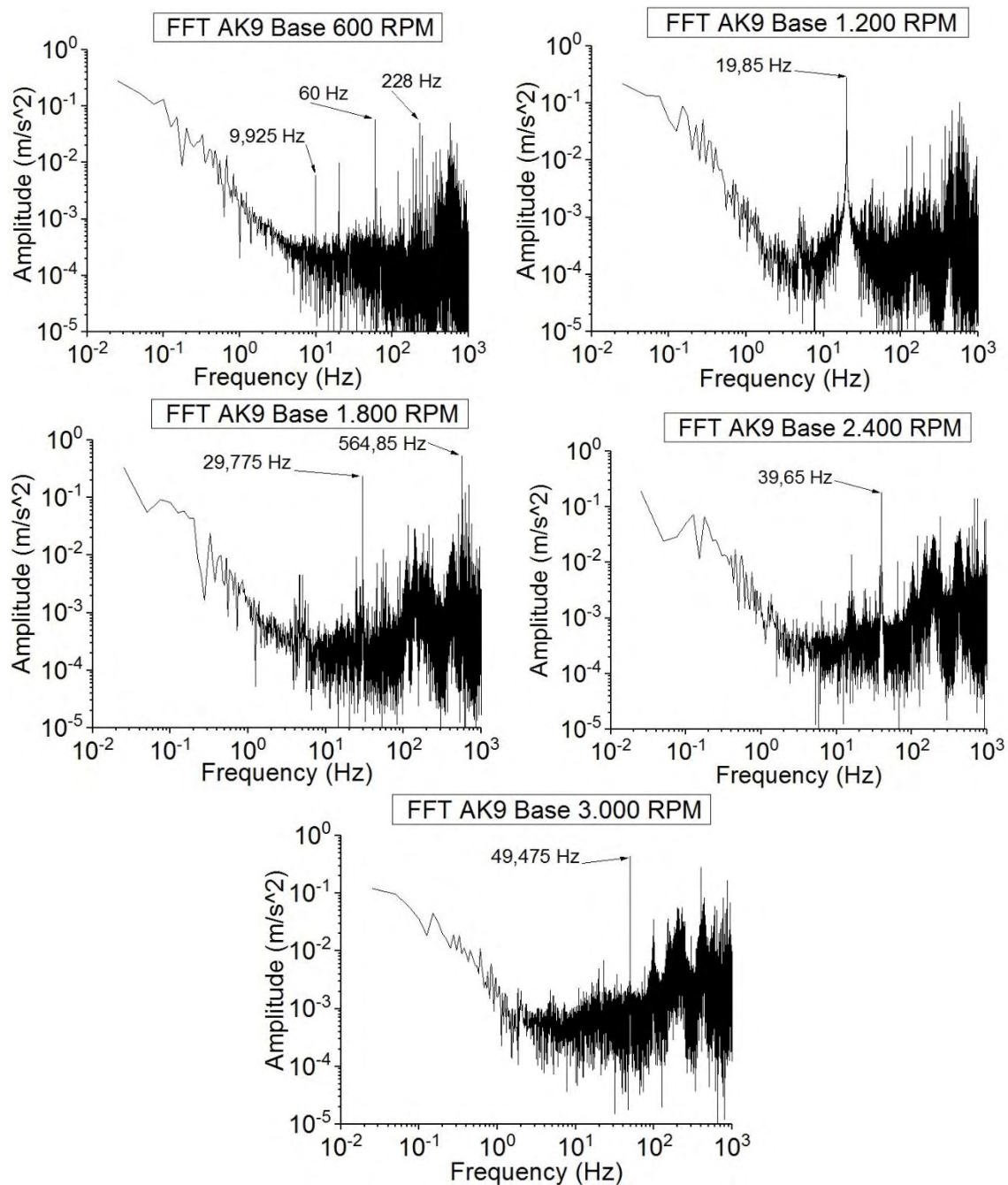
7.9 Μετρήσεις με δοκίμιο (9)



Σχήμα 7.19 Επιτάχυνση σε συνάρτηση με τη συχνότητα από μετασχηματισμό FFT (σημείο μέτρησης: άκρη δοκιμίου)

Στο σχήμα 7.19 φαίνεται ο μετασχηματισμός FFT από τη μέτρηση στην άκρη του δοκιμίου για όλες τις στροφές λειτουργίας. Έτσι και εδώ στις 600 rpm παρατηρούνται οι περισσότερες αστάθειες με μεγάλες διακυμάνσεις τιμών και τρεις συχνότητες εμφάνισης μέγιστης επιτάχυνσης. Στις υπόλοιπες στροφές λειτουργίας (εκτός από τις 3000 rpm)

επισημαίνονται δύο σημεία, όπου εμφανίζεται η μέγιστη τιμή της επιτάχυνσης και όσο αυξάνονται οι στροφές λειτουργίας μειώνεται το εύρος των διακυμάνσεων.

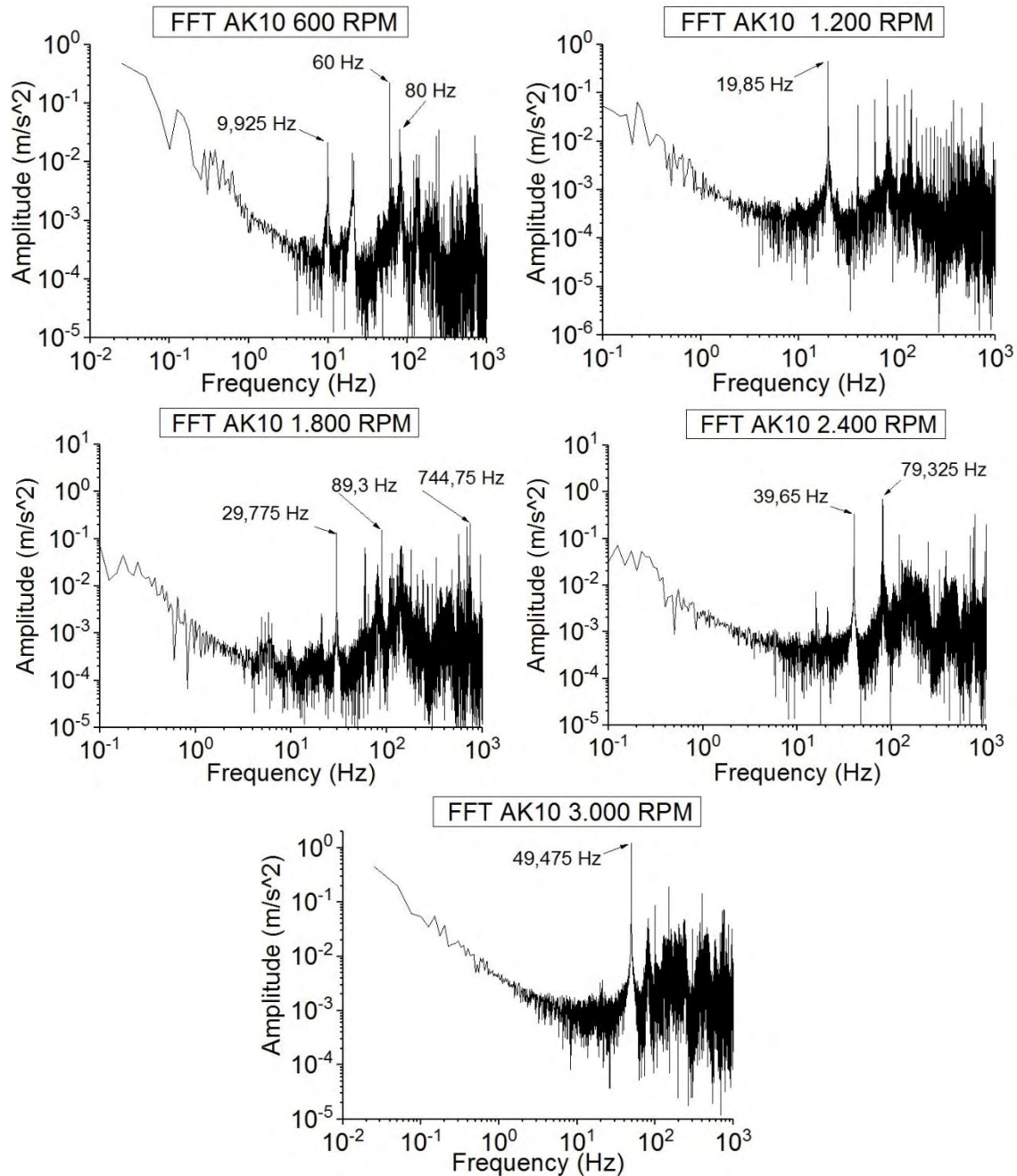


Σχήμα 7.20 Επιτάχυνση σε συνάρτηση με τη συχνότητα από μετασχηματισμό FFT (σημείο μέτρησης: βάση συμπιεστή)

Στο σχήμα 7.20 φαίνεται ο μετασχηματισμός FFT από τη μέτρηση στη βάση του συμπιεστή για όλες τις στροφές λειτουργίας. Στις 600 rpm παρατηρούνται οι περισσότερες αστάθειες με μεγάλες διακυμάνσεις τιμών και τρεις συχνότητες εμφάνισης μέγιστης επιτάχυνσης. Στις 1800 rpm επισημαίνονται δύο σημεία, όπου εμφανίζεται η μέγιστη τιμή

της επιτάχυνσης και όσο αυξάνονται οι στροφές λειτουργίας μειώνεται το εύρος των διακυμάνσεων.

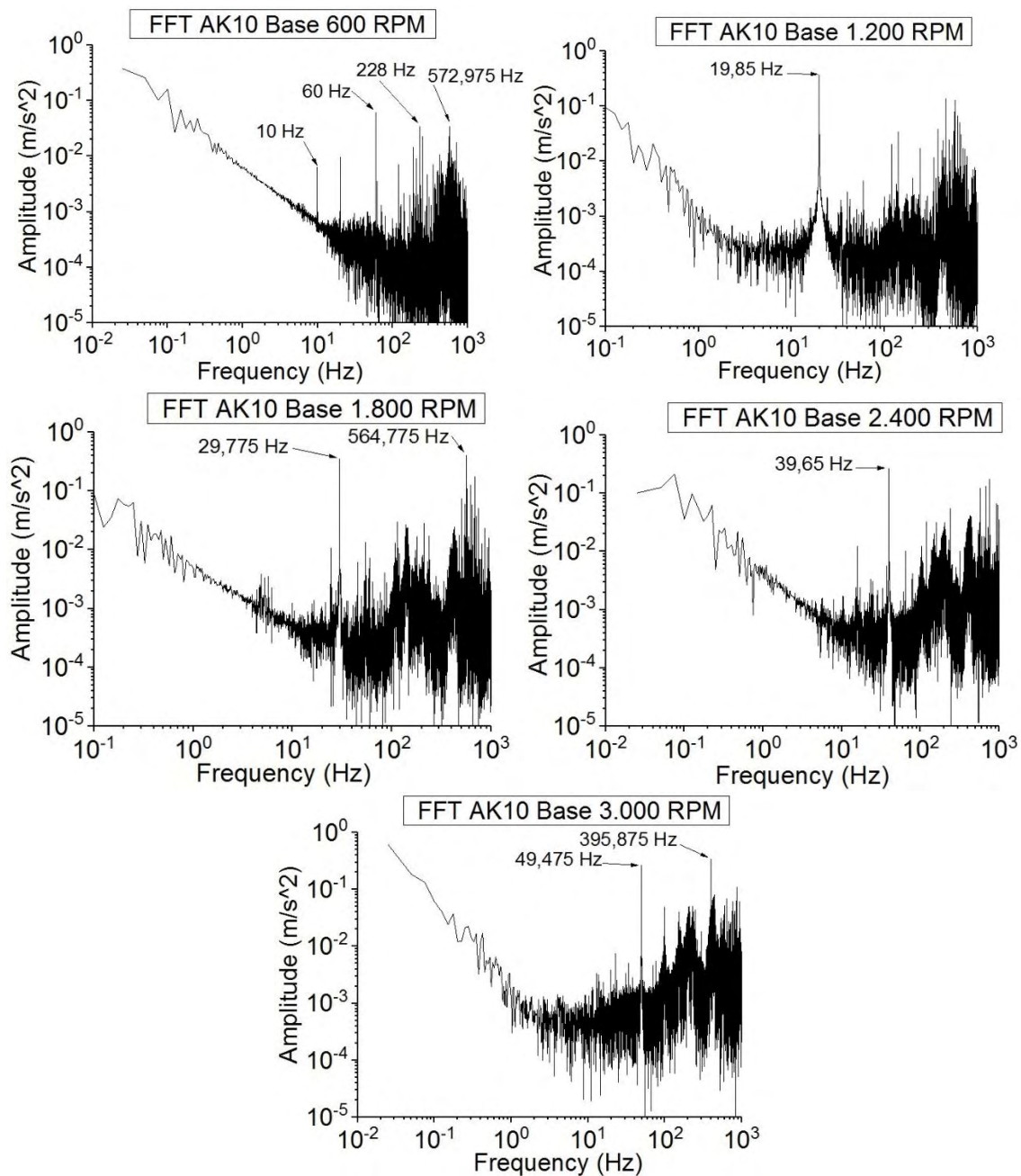
7.10 Μετρήσεις με δοκίμιο (10)



Σχήμα 7.21 Επιτάχυνση σε συνάρτηση με τη συχνότητα από μετασχηματισμό FFT (σημείο μέτρησης: άκρη δοκιμίου)

Στο σχήμα 7.21 φαίνεται ο μετασχηματισμός FFT από τη μέτρηση στην άκρη του δοκιμίου για όλες τις στροφές λειτουργίας. Στις 1800 rpm παρατηρούνται τρεις συχνότητες

εμφάνισης μέγιστης επιτάχυνσης. Οι διακυμάνσεις των τιμών είναι πιο έντονες στις χαμηλότερες στροφές λειτουργίας (600, 1200, 1800 rpm).

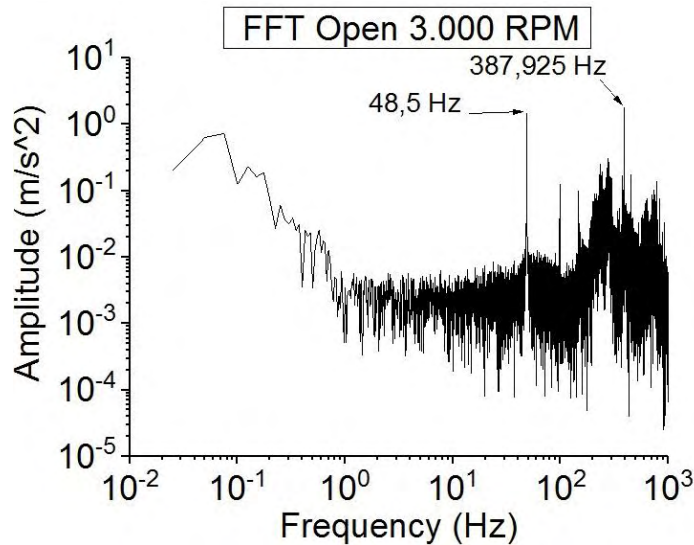


Σχήμα 7.22 Επιτάχυνση σε συνάρτηση με τη συχνότητα από μετασχηματισμό FFT (σημείο μέτρησης: βάση συμπιεστή)

Στο σχήμα 7.22 φαίνεται ο μετασχηματισμός FFT από τη μέτρηση στη βάση του συμπιεστή για όλες τις στροφές λειτουργίας. Στις 600 rpm παρατηρούνται οι περισσότερες αστάθειες με μεγάλες διακυμάνσεις τιμών και τρεις συχνότητες εμφάνισης μέγιστης επιτάχυνσης. Στις 1800 και στις 3000 rpm επισημαίνονται δύο σημεία, όπου εμφανίζεται

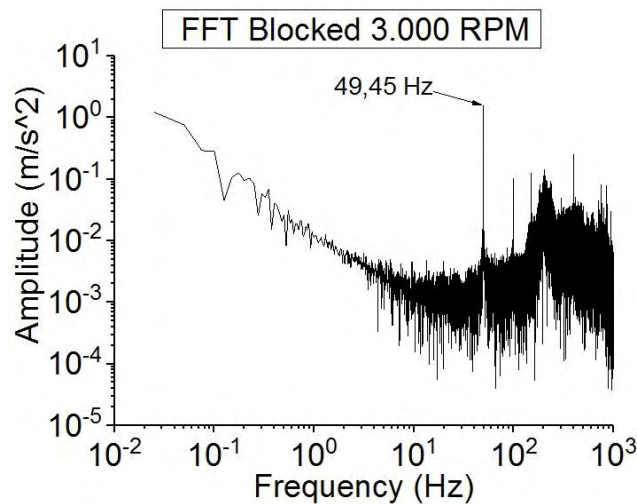
η μέγιστη τιμή της επιτάχυνσης και όσο αυξάνονται οι στροφές λειτουργίας μειώνεται το εύρος των διακυμάνσεων.

7.11 Μετρήσεις χωρίς δοκίμιο



Σχήμα 7.23 Μεταβολή της επιτάχυνσης σε συνάρτηση με τη συχνότητα από μετασχηματισμό FFT

Στο διάγραμμα φαίνεται το εύρος της ταλάντωσης του συμπιεστή στο πεδίο των συχνοτήτων, ο οποίος λειτουργεί στις 3000 rpm. Η ταλάντωση είναι αρμονική, χωρίς έντονες διακυμάνσεις στις τιμές των δεδομένων. Επίσης, επισημαίνονται δύο σημεία εμφάνισης της μέγιστης επιτάχυνσης.



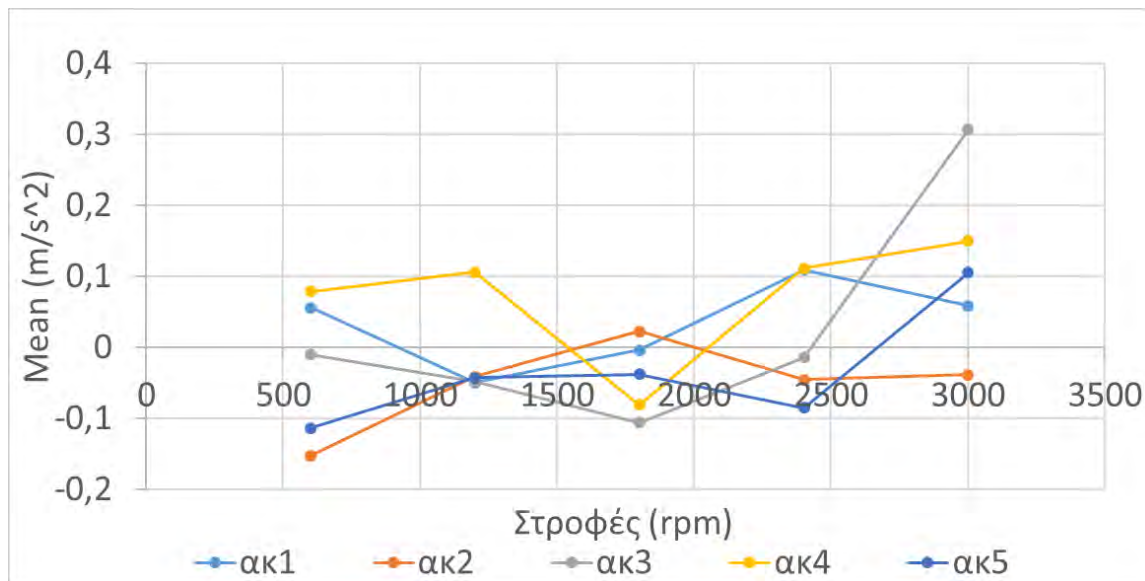
Σχήμα 7.24 Μεταβολή της επιτάχυνσης σε συνάρτηση με τη συχνότητα από μετασχηματισμό FFT, μπλοκάροντας την έξοδο της ροής

Στο σχήμα 7.24 απεικονίζεται το εύρος της ταλάντωσης του συμπιεστή στο πεδίο των συχνοτήτων, στον οποίο έχει μπλοκαριστεί η έξοδος της ροής. Η συμπεριφορά σε αυτή την περίπτωση είναι καλύτερη συγκριτικά με την περίπτωση, όπου δεν μπλοκάρεται η έξοδος, γιατί παρατηρείται ότι οι τιμές των δεδομένων συγκλίνουν περισσότερο (μικρότερες διακυμάνσεις). Επίσης, μπορούμε να δούμε ότι υπάρχει μία συχνότητα εμφάνισης κορυφής της απόκρισης.

7.12 Μέση τιμή, τυπική απόκλιση

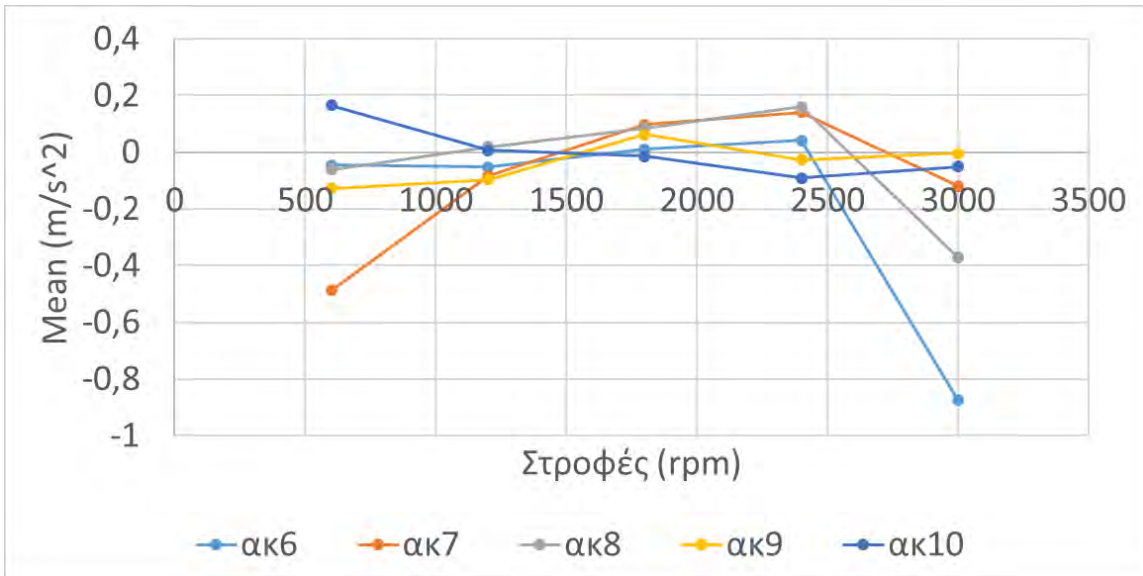
Οι τιμές της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης για όλες τις περιπτώσεις δίνονται αναλυτικά στο Παράρτημα. Εδώ παρουσιάζονται δύο συγκριτικά διαγράμματα για όλα τα δοκίμια (θέση αισθητήρα πάνω στο δοκίμιο), με σκοπό την καλύτερη κατανόηση των αποτελεσμάτων.

Τα σχήματα 7.25 και 7.26 δείχνουν τη μεταβολή των μέσων τιμών των επιταχύνσεων σε κάθε δοκίμιο, στις πέντε συχνότητες λειτουργίας του συμπιεστή. Οι τιμές του διαγράμματος για κάθε δοκίμιο αντικατοπτρίζουν επακριβώς την συμπεριφορά του συμπιεστή με χρήση του, όπως αυτή παρουσιάστηκε από τα διαγράμματα FFT⁶. Σε όλες τις στροφές λειτουργίας τα μικρότερα δοκίμια εμφανίζουν υψηλότερες μέσες τιμές από ότι τα μεγαλύτερα. Πιο συγκεκριμένα, στις 3000 rpm τα δοκίμια (1) – (5) εμφανίζουν θετική μέση τιμή, ενώ τα μεγαλύτερα δοκίμια φαίνεται ότι εμφανίζουν αρνητική μέση τιμή.



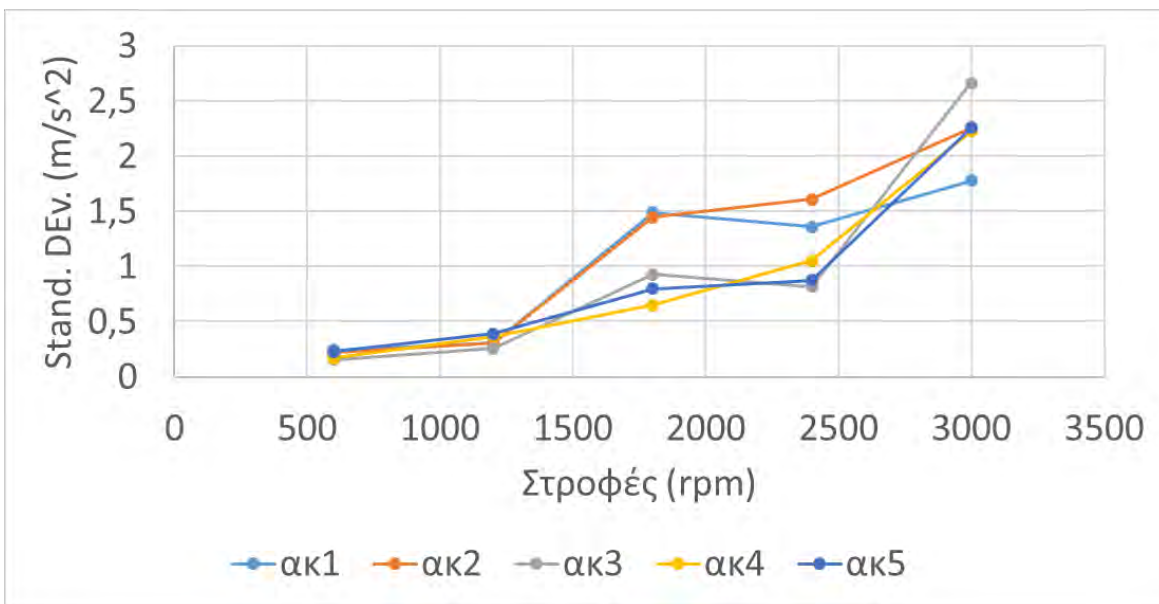
Σχήμα 7.25 Μεταβολή μέσης τιμής με τις στροφές λειτουργίας

⁶ Αναφορά σε Κεφ. 7.1 – 7.10

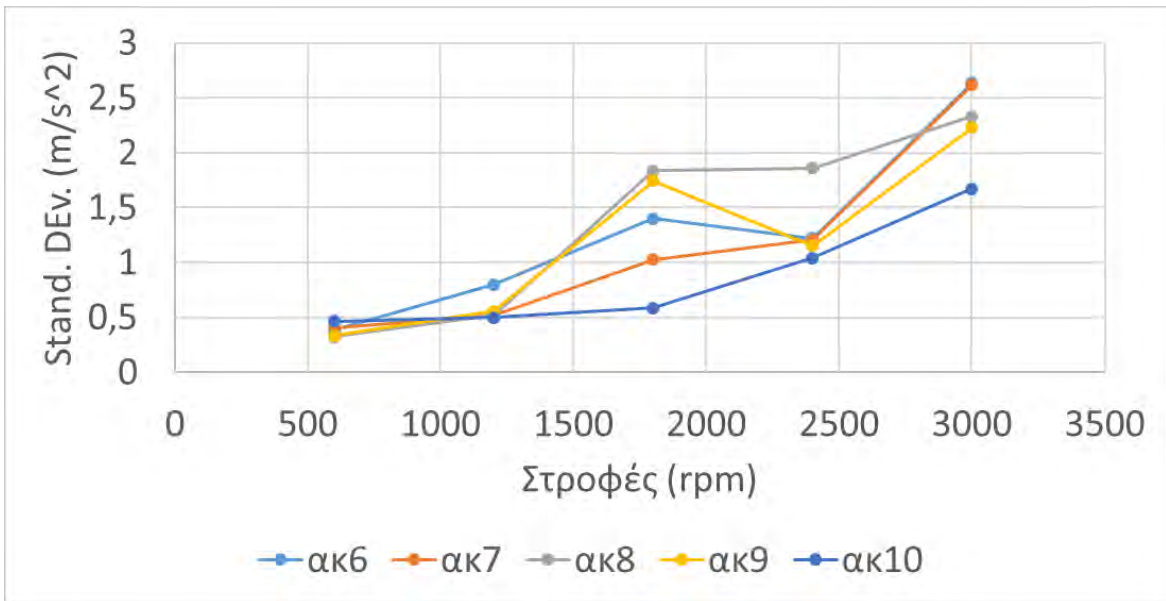


Σχήμα 7.26 Μεταβολή μέσης τιμής με τις στροφές λειτουργίας

Στα σχήματα 7.27 και 7.28 φαίνεται η μεταβολή της τυπικής απόκλισης σε συνάρτηση με τις στροφές λειτουργίας του συμπιεστή, με χρήση κάθε δοκιμίου. Όσο αυξάνονται οι στροφές λειτουργίας, ταυτόχρονα αυξάνονται και οι τιμές της τυπικής απόκλισης για όλα τα δοκίμια, κάτι που είναι λογικό, γιατί αν παρατηρήσουμε τα αντίστοιχα διαγράμματα με τους μετασχηματισμούς FFT, θα δούμε ότι τα δεδομένα απλώνονται σε μεγαλύτερο φάσμα τιμών. Πιο συγκεκριμένα οι μεγαλύτερες τιμές της τυπικής απόκλισης εμφανίζονται στις 3000 rpm με χρήση των δοκιμίων (3), (6) και (7).



Σχήμα 7.27 Μεταβολή τυπικής απόκλισης με τις στροφές λειτουργίας



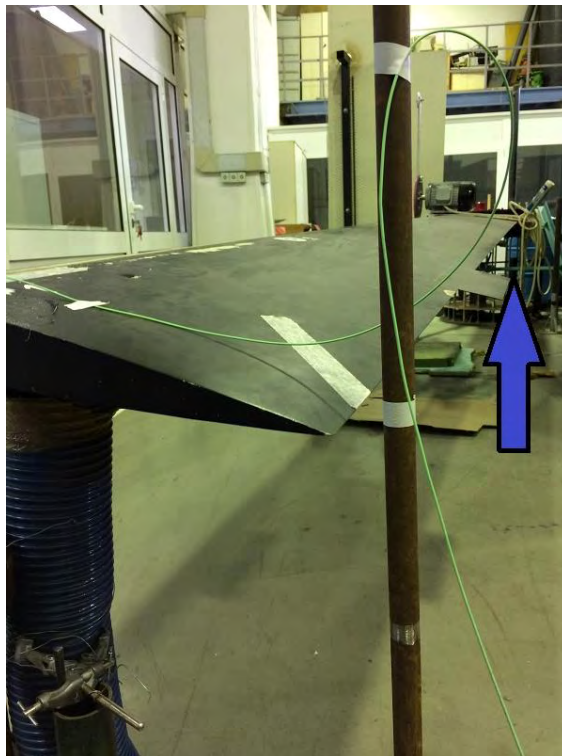
Σχήμα 7.28 Μεταβολή τυπικής απόκλισης με τις στροφές λειτουργίας

Κεφάλαιο 8

Μετρήσεις ταλαντώσεων πτέρυγας

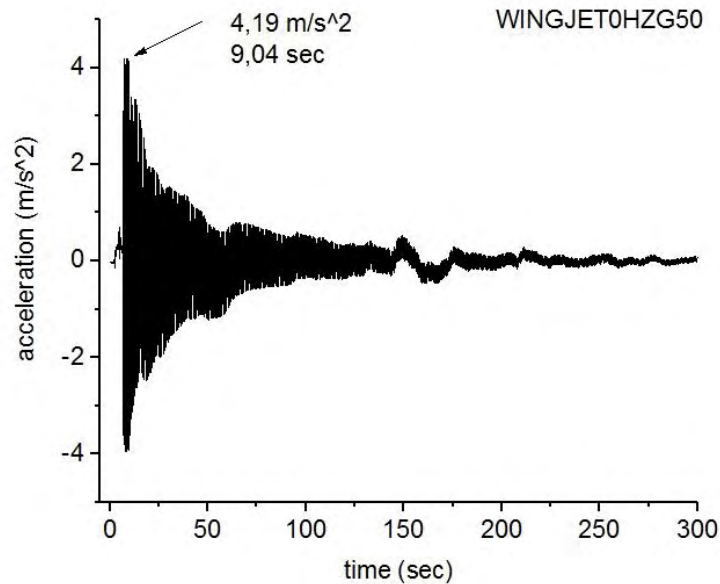
Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις των ταλαντώσεων στην πτέρυγα. Αρχικά, παρατίθενται διαγράμματα επιτάχυνσης με το χρόνο για να κατανοηθεί καλύτερα ο χρόνος απόσβεσης της ταλάντωσης της πτέρυγας σε κάθε περίπτωση. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται και αναλύονται τα διαγράμματα, που προέκυψαν από το μετασχηματισμό FFT. Στο τέλος, γίνεται παρουσίαση της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης σε κάθε περίπτωση.

Στο σχήμα 8.1 φαίνεται το αρχικό βέλος εκκίνησης της ταλάντωσης της πτέρυγας. Σε αυτήν ασκήθηκε μια στιγμιαία δύναμη και στη συνέχεια αφέθηκε να κάνει ελεύθερη ταλάντωση. Το σημείο στο οποίο απελευθερώνεται η πτέρυγα από την εφαρμογή της δύναμης είναι όταν αυτή έχει έρθει σε επαφή με τον σωλήνα PVC, που βρίσκεται ακριβώς από κάτω της.



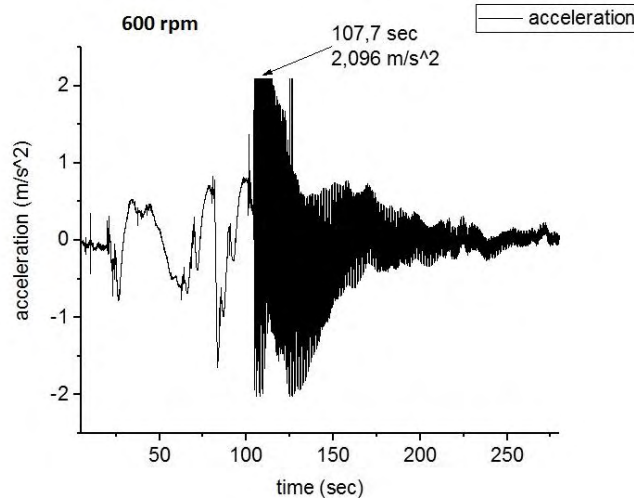
Σχήμα 8.1 Κατεύθυνση εκκίνησης της ταλάντωσης

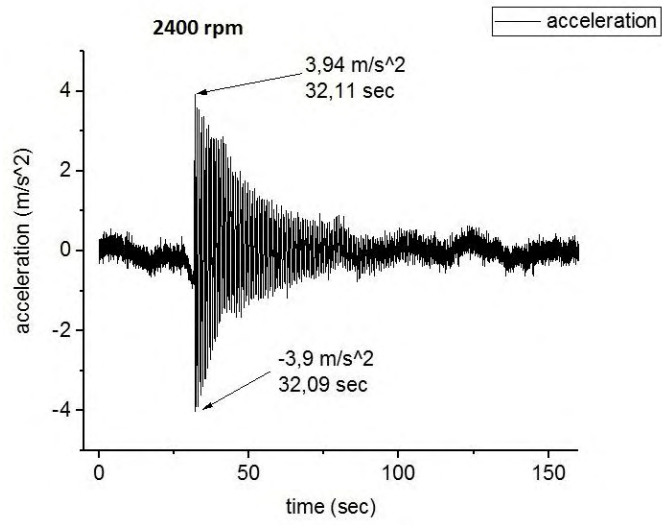
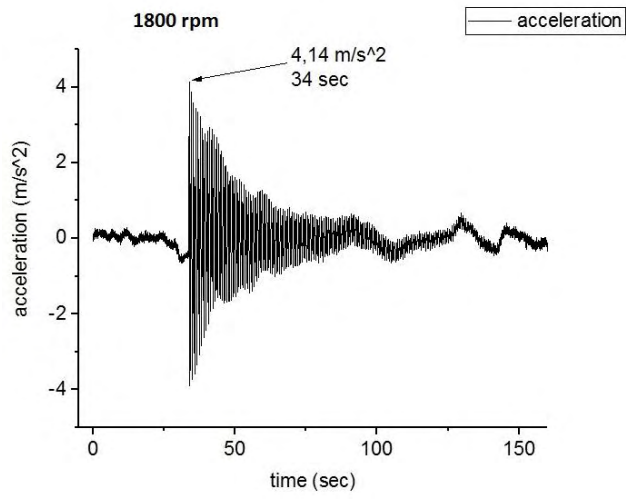
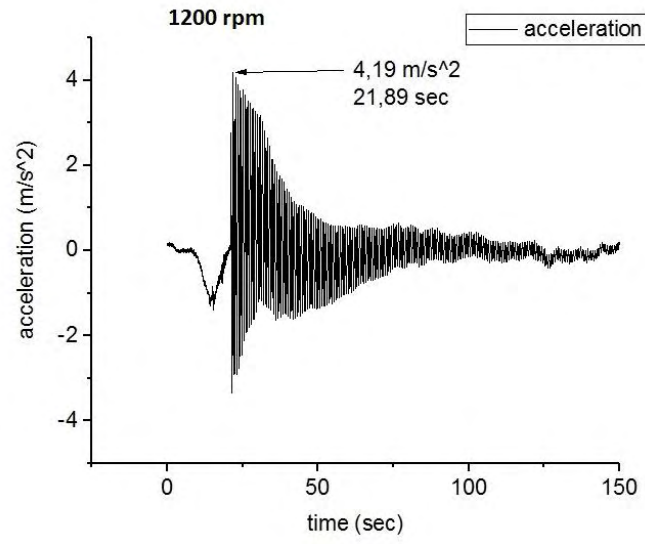
8.1 Χρόνοι απόσβεσης

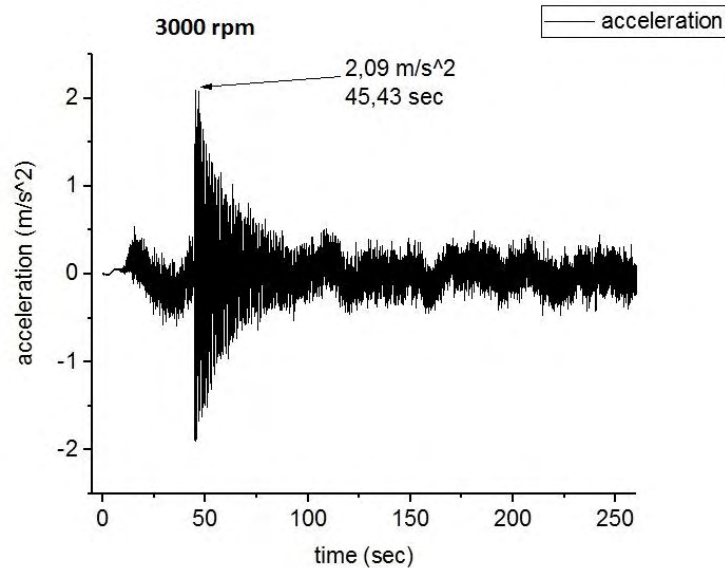


Σχήμα 8.2 Μεταβολή επιτάχυνσης με το χρόνο για ταλάντωση χωρίς λειτουργία συμπιεστή

Στο διάγραμμα απεικονίζεται η μεταβολή της επιτάχυνσης σε συνάρτηση με το χρόνο της ταλάντωσης της πτέρυγας, χωρίς τη λειτουργία του συμπιεστή να παρεμποδίζει την ταλάντωση. Είναι προφανές ότι τη στιγμή που απελευθερώνεται η πτέρυγα (ελεύθερη ταλάντωση) για να ξεκινήσει την ταλάντωση (9,04 sec) εμφανίζεται η μέγιστη επιτάχυνση. Η ταλάντωση ξεκινάει με μεγάλο εύρος κίνησης, το οποίο φθίνει πολύ γρήγορα με την πάροδο του χρόνου. Όμως η ταλάντωση αποσβένει πολύ αργότερα, όπως φαίνεται, στα 6 λεπτά μετά από το ξεκίνημα της μέτρησης.

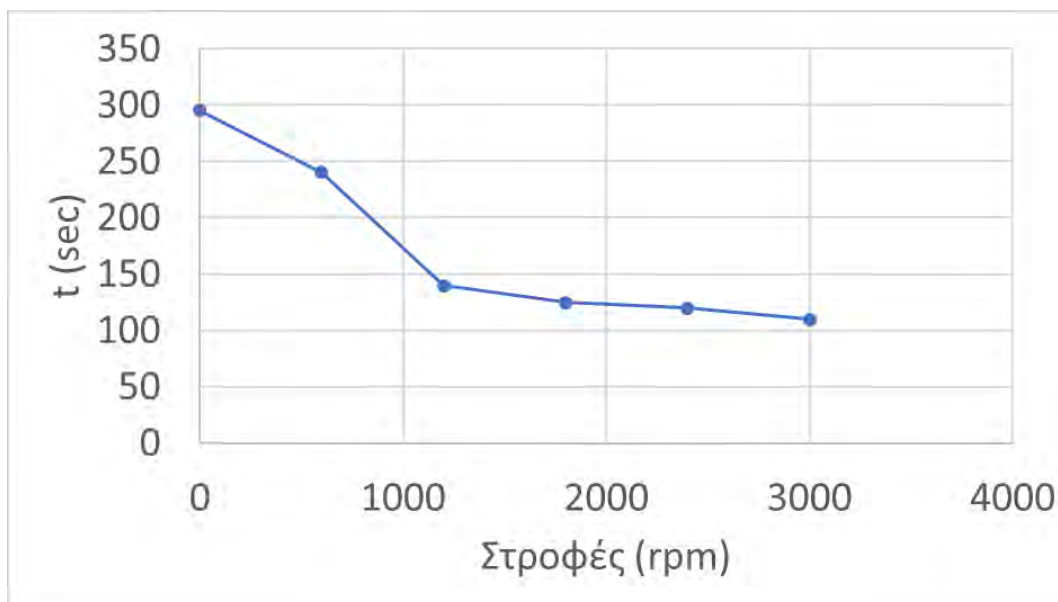






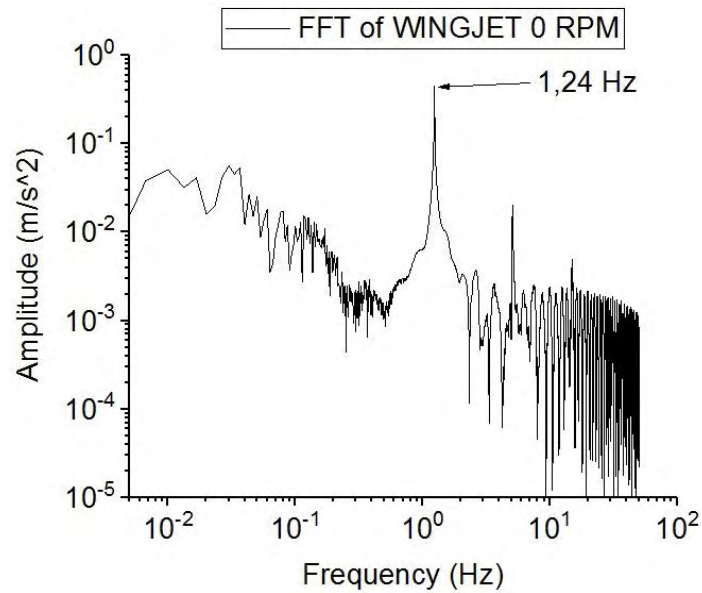
Σχήμα 8.3 Μεταβολή επιτάχυνσης με το χρόνο για ταλάντωση

Στο σχήμα 8.3 απεικονίζεται η μεταβολή της επιτάχυνσης της ταλάντωσης σε συνάρτηση με το χρόνο για πέντε διαφορετικές συχνότητες λειτουργίας του συμπιεστή. Στις 600 rpm παρατηρείται μια άστατη συμπεριφορά της ταλάντωσης στην αρχή, η οποία οφείλεται στις τυρβώδεις ροές που αναπτύσσονται. Έτσι το εύρος ταλάντωσης φαίνεται να μειώνεται σημαντικά, σε σχέση με την ταλάντωση χωρίς παρεμπόδιση από το συμπιεστή, παρόλο που η αντίσταση δεν είναι τόσο σημαντική. Επίσης, λόγω του ότι η αντίσταση δεν είναι τόσο σημαντική βλέπουμε ότι μειώθηκε ελάχιστα ο χρόνος απόσβεσης της ταλάντωσης. Αντίθετα στις υψηλότερες στροφές λειτουργίας του συμπιεστή υπάρχει μια μείωση του χρόνου απόσβεσης περίπου στο μισό. Σε όλες τις περιπτώσεις η ταλάντωση έχει αποσβέσει μετά τα 3 λεπτά.



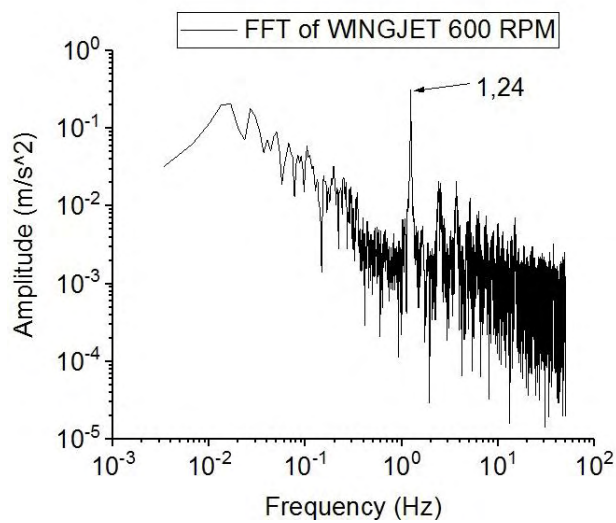
Σχήμα 8.4 Χρόνος απόσβεσης της ταλάντωσης σε συνάρτηση με τις στροφές λειτουργίας

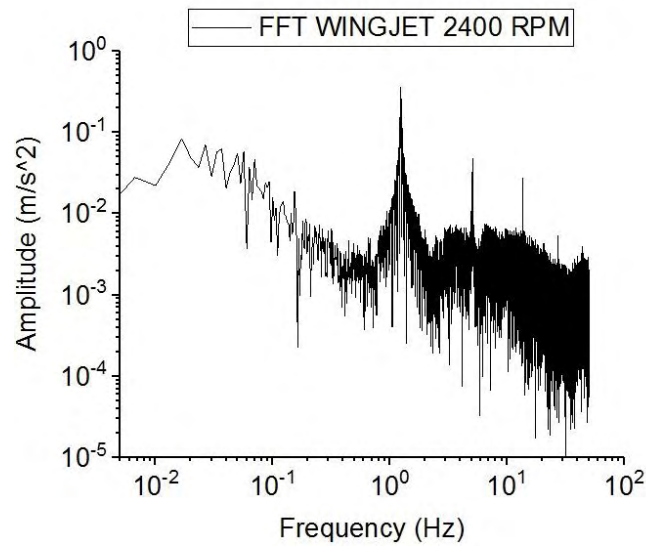
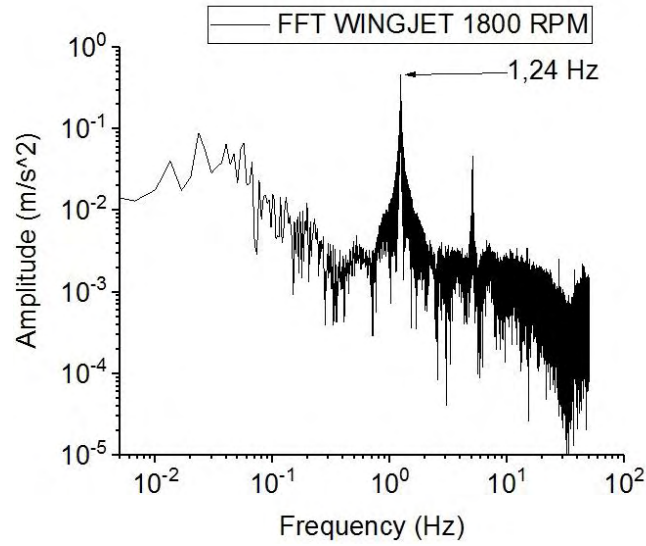
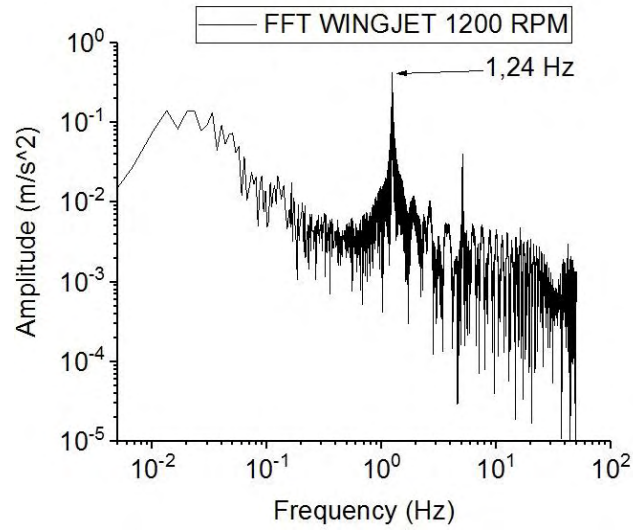
8.2 Μετασχηματισμοί FFT

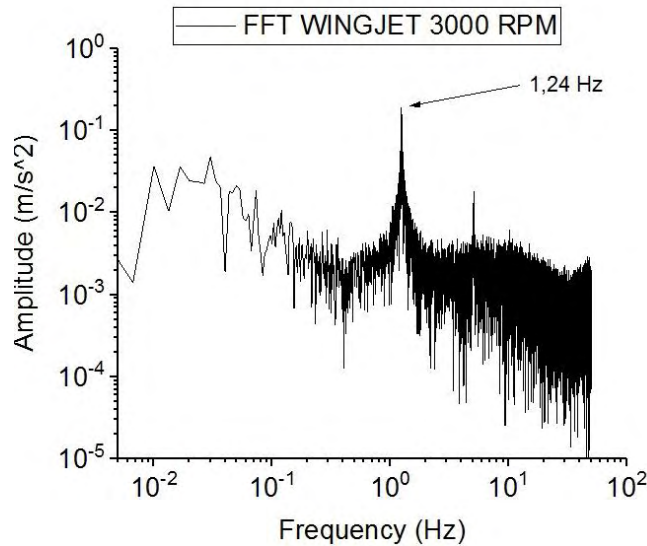


Σχήμα 8.5 Επιτάχυνση σε συνάρτηση με την συχνότητα (από μετασχηματισμό FFT) χωρίς λειτουργία συμπιεστή

Το διάγραμμα δείχνει τη μεταβολή της επιτάχυνσης σε συνάρτηση με την συχνότητα (μετασχηματισμός FFT) για την ταλάντωση χωρίς αντίσταση από το συμπιεστή. Το διάγραμμα είναι σε λογαριθμική κλίμακα για να ξεχωρίζεται καλύτερα η συμπεριφορά. Η συχνότητα που επισημαίνεται είναι αυτή, στην οποία εμφανίζεται η μέγιστη επιτάχυνση, είναι στα 1,24 Hz (ιδιοσυχνότητα της πτέρυγας σε κατακόρυφη ταλάντωση).





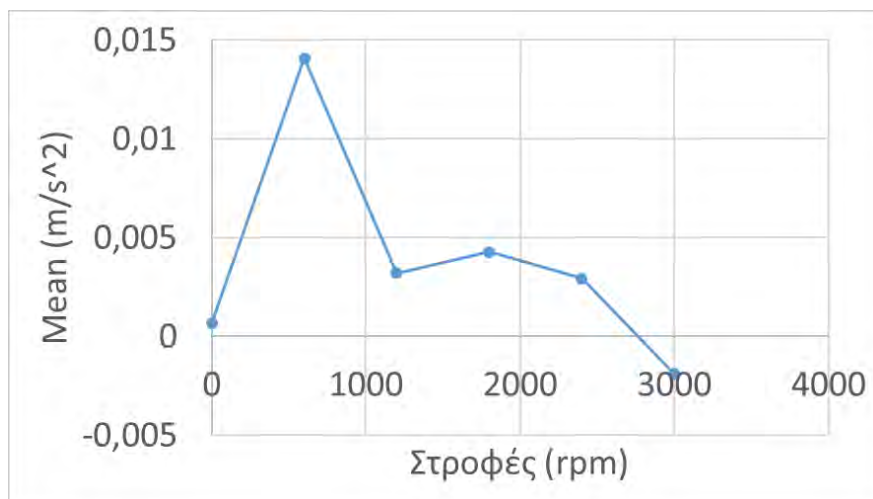


Σχήμα 8.6 Επιτάχυνση σε συνάρτηση με την συχνότητα (από μετασχηματισμό FFT) σε πέντε διαφορετικές στροφές λειτουργίας του συμπιεστή

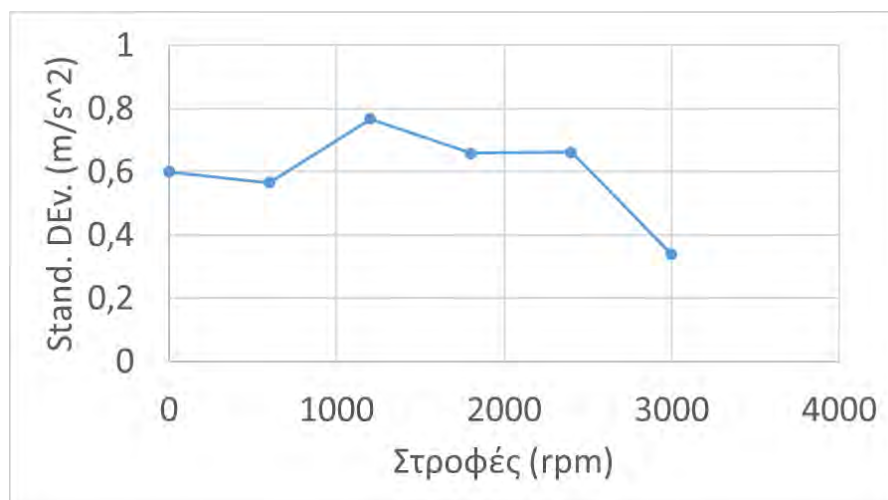
Στα παραπάνω διαγράμματα φαίνεται η επιτάχυνση σε συνάρτηση με την συχνότητα (μετασχηματισμός FFT) με παρεμπόδιση της ταλάντωσης από τη λειτουργία του συμπιεστή στις 600, 1200, 1800, 2400 και 3000 rpm. Παρατηρείται, όπως είναι λογικό, ότι η ιδιοσυχνότητα της πτέρυγας σε κατακόρυφη ταλάντωση, είναι η ίδια σε όλες τις περιπτώσεις. Η συχνότητα αυτή (1,24 Hz) είναι ίση επίσης με τη συχνότητα εμφάνισης κορυφής στην περίπτωση, όπου η ταλάντωση εξελίσσεται χωρίς την εμπόδιση από τη λειτουργία του συμπιεστή. Τέλος, παρατηρείται ότι όσο αυξάνονται οι στροφές λειτουργίας, οι διακυμάνσεις εμφανίζονται πιο πυκνές και συμπυκνωμένες, ενώ στις χαμηλότερες στροφές λειτουργίας, όπως και στην πρώτη περίπτωση (σχήμα 8.5) οι διακυμάνσεις των τιμών είναι μεγαλύτερες.

8.3 Μέση τιμή, τυπική απόκλιση

Στο σχήμα 8.7 φαίνεται η μέση τιμή της επιτάχυνσης σε κάθε περίπτωση σε συνάρτηση με τις στροφές λειτουργίας του συμπιεστή. Η άστατη συμπεριφορά της πτέρυγας στις 600 rpm λειτουργίας του συμπιεστή παρατηρείται και εδώ, με τη μέση τιμή να λαμβάνει σημαντικά μεγαλύτερη τιμή σε σύγκριση με τις υπόλοιπες περιπτώσεις. Οι υπόλοιπες τιμές είναι πιο λογικές, με τη μέση τιμή στις 3000 rpm να λαμβάνει αρνητικό πρόσημο. Αυτό είναι επίσης, λογικό γιατί η ροή του αέρα εξέρχεται με μεγαλύτερη ένταση, η οποία επιδρά σημαντικά στην ταλάντωση της πτέρυγας και μειώνει αισθητά τον χρόνο απόσβεσης.



Σχήμα 8.7 Μεταβολή μέσης τιμής με στροφές λειτουργίας



Σχήμα 8.8 Μεταβολή τυπικής απόκλισης με τις στροφές λειτουργίας

Το σχήμα 8.8 δείχνει τη μεταβολή της τυπικής απόκλισης σε συνάρτηση με τις στροφές λειτουργίας του συμπιεστή. Οι τιμές των τυπικών αποκλίσεων αντικατοπτρίζουν απόλυτα τη συμπεριφορά σε κάθε συνθήκη λειτουργίας του συμπιεστή, την οποία παρατηρούμε στα σχήματα 8.5 και 8.6. Η χαμηλότερη τυπική απόκλιση παρατηρείται στις 3000 rpm, κάτι το οποίο είναι απόλυτα λογικό, γιατί όπως είδαμε και στο σχήμα 8.6 οι τιμές των δεδομένων σε αυτές τις στροφές λειτουργίας είναι πολύ πιο συμπυκνωμένες (τείνουν στο μέσο όρο) συγκριτικά με τις υπόλοιπες περιπτώσεις. Αντίθετα η υψηλότερη τυπική απόκλιση είναι αυτή στις 1200 rpm υποδηλώνει ότι τα στοιχεία απλώνονται σε ένα ευρύτερο φάσμα τιμών, κάτι το οποίο παρατηρείται στο σχήμα 8.6.

Κεφάλαιο 9

Συμπεράσματα και συζήτηση αποτελεσμάτων

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα των κεφαλαίων 4,5,6,7 και 8 με σκοπό τη διευκόλυνση του αναγνώστη.

Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις των ταχυτήτων εξόδου της ροής και της διαφοράς πίεσης στο συμπιεστή και έγινε υπολογισμός της παροχής και της μέσης ταχύτητας. Αρχικά παρατηρήθηκε ότι όσο αυξάνεται το μέγεθος της διατομής της εξόδου (ανάλογα με τοποθέτηση δοκιμίου), αυξάνεται η παροχή αερίου ανά ώρα. Συγκεκριμένα, στα δοκίμια (1) και (2) η παροχή αυξάνεται σχεδόν κατακόρυφα με μετάβαση σε υψηλότερες στροφές λειτουργίας, με τη μέγιστη παροχή, που παρατηρείται προφανώς στις 3000 rpm να ξεπερνάει τα 300 m³/h και για τα δύο δοκίμια. Οι παροχές των υπόλοιπων δοκιμίων αυξάνονται με πιο αργούς ρυθμούς με αύξηση των στροφών λειτουργίας και για τα δοκίμια (5), (6), (8), (9) και (10) η παροχές παραμένουν κάτω από τα 50 m³/h.

Από την άλλη πλευρά, η πτώση πίεσης μειώνεται με την αύξηση του μεγέθους της διατομής εξόδου. Πιο συγκεκριμένα, στα μικρότερα δοκίμια ((5), (6), (8), (9) και (10)) παρατηρούνται πολύ υψηλές πτώσεις πίεσης, η οποίες αυξάνονται κατακόρυφα με την αύξηση των στροφών λειτουργίας του συμπιεστή. Η μέγιστη πτώση πίεσης παρατηρείται στο δοκίμιο (9) στις 3000 rpm, με τιμή 1560 Pa. Τα δοκίμια (9) και (10) εμφανίζουν παρόμοια συμπεριφορά με ίδια πτώση πίεσης σε όλες τις συχνότητες λειτουργίας, εκτός από τη συχνότητα των 50 Hz. Παρόλο, που το δοκίμιο (10) έχει ελαφρώς μικρότερη διάμετρο από το (9), δεν εμφανίζει τη μέγιστη πτώση πίεσης γιατί είναι από διαφορετικό υλικό και μάλλον επηρεάζει την πτώση πίεσης γενικά, κάτι το οποίο παρατηρείται ξεκάθαρα μόνο σε υψηλές στροφές λειτουργίας, η τιμή του ΔP στις 3000 rpm για το δοκίμιο (10) είναι 1550 Pa.

Η μέση ταχύτητα, όπως είναι λογικό, αυξάνεται για όλα τα δοκίμια με αύξηση των στροφών λειτουργίας. Ωστόσο, δεν υπάρχει αναλογία της μέσης ταχύτητας με τη διατομή εξόδου της ροής, δηλαδή δεν υπάρχει αντιστοιχία, όπως στις παροχές, όταν αυξάνεται η διατομή αυξάνεται και η παροχή. Οι υπολογισμοί έδωσαν κάπως 'μπλεγμένα' αποτελέσματα. Αυτό συνέβη μάλλον λόγω του τρόπου μέτρησης των ταχυτήτων της ροής, δηλαδή ο αισθητήρας του ανεμόμετρου επειδή έχει κάποιο μέγεθος και παρεμβάλλεται στη ροή, σε μικρότερες διατομές την επηρεάζει. Έτσι τις μεγαλύτερες μέσες ταχύτητες σε όλες τις στροφές λειτουργίας εμφανίζει το δοκίμιο (5), ενώ δεύτερο έρχεται το δοκίμιο (4). Τα υπόλοιπα δοκίμια εμφανίζουν παρόμοια συμπεριφορά ως προς τις μέσες ταχύτητες, με το δοκίμιο (10) να εμφανίζει τις χαμηλότερες μέσες ταχύτητες από όλα.

Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις του θορύβου στην είσοδο και στην έξοδο του συμπιεστή. Ο θόρυβος στην είσοδο του συμπιεστή έχει παρόμοιες τιμές με χρήση όλων των δοκιμίων. Αυτό σημαίνει ότι η τοποθέτηση των δοκιμίων στην έξοδο δεν επηρεάζει αισθητά την είσοδο του συμπιεστή. Ίσως οι τιμές στην είσοδο να ήταν ίδιες σε όλες τις περιπτώσεις αν οι μετρήσεις πραγματοποιούνταν σε πιο μονωμένο και ήσυχο μέρος και δεν υπήρχαν εξωτερικοί θόρυβοι, οι οποίοι σαφώς επηρέασαν λίγο τη συνολική μέτρηση. Στην έξοδο του συμπιεστή οι τιμές του θορύβου αυξάνονταν με αύξηση της διατομής εξόδου.

Στο κεφάλαιο 6 έγινε παρουσίαση των αποτελεσμάτων από τη μέτρηση των στροφών του συμπιεστή με οπτικό μέσο. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων οι στροφές που μετρήθηκαν ήταν ακριβώς οι ίδιες με αυτές του μετατροπέα συχνοτήτων, που έδινε κίνηση στον συμπιεστή. Μόνο στα 50 και 40 Hz λειτουργίας με χρήση του δοκιμίου (3), παρατηρήθηκαν κάποιες διαφορές στον αριθμό των στροφών, με 2960 και 2380 rpm αντίστοιχα. Ίσως, αν γίνονταν περισσότερες μετρήσεις σε αυτό το κομμάτι θα υπήρχαν ακριβέστερα αποτελέσματα.

Στο κεφάλαιο 7 παρουσιάζονται αποτελέσματα από τις μετρήσεις των ταλαντώσεων του συμπιεστή. Λόγω χρήσης πιεζοηλεκτρικού επιταχυνσιόμετρου για τις μετρήσεις, εμφανίστηκε αρκετός ηλεκτρικός θόρυβος στα αποτελέσματα των ταλαντώσεων. Το γενικό συμπέρασμα που προκύπτει από αυτήν τη μελέτη είναι ότι οι ταλαντώσεις στο συμπιεστή δεν επηρεάζονται σημαντικά από τη διατομή εξόδου της ροής και έτσι οι συχνότητες ταλάντωσης, όπου εμφανίζεται η μέγιστη τιμή της επιτάχυνσης, είναι ίδιες σε κάθε συχνότητα λειτουργίας. Σε κάποιες περιπτώσεις εμφανίζονται πάνω από μια συχνότητα ταλάντωσης, όπου παρατηρείται η μέγιστη επιτάχυνση, αλλά αυτό αποδίδεται στο θόρυβο που υπάρχει στην ταλάντωση. Ο θόρυβος επηρεάζει πιο πολύ τις ταλαντώσεις στις 600 rpm λειτουργίας. Η συμπεριφορά των ταλαντώσεων του συμπιεστή εμφανίζεται διαφορετική με μέτρηση στη βάση του σε σχέση με τη μέτρηση στην ελεύθερη άκρη των δοκιμίων. Ωστόσο, οι συχνότητες εμφάνισης μέγιστων επιταχύνσεων παραμένουν οι ίδιες για όλες τις στροφές λειτουργίας.

Στο κεφάλαιο 8 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις των ταλαντώσεων της πτέρυγας. Το συμπέρασμα που προκύπτει από αυτό το πείραμα, είναι ότι η ταλάντωση επηρεάζεται από τη λειτουργία του συμπιεστή με τη ροή να είναι μια εξωτερική δύναμη απόσβεσης. Αυτό το συμπέρασμα εξάγεται από το γεγονός ότι η ταλάντωση της πτέρυγας αποσβένει μετά από 5 λεπτά (από την άσκηση της στιγμιαίας δύναμης) χωρίς τη λειτουργία του συμπιεστή και τη ροή να αντιστέκεται στην κίνηση. Ενώ με λειτουργία του συμπιεστή ο χρόνος απόσβεσης πέφτει στο μισό, μετά από 3 λεπτά από την άσκηση της στιγμιαίας δύναμης η ταλάντωση έχει αποσβέσει τελείως. Το μέγιστο εύρος της ταλάντωσης επηρεάζεται σημαντικά στις 600 και στις 3000 rpm λειτουργίας του συμπιεστή σε σχέση με την ελεύθερη ταλάντωση. Στις 600 rpm λόγω της τυρβώδους ροής που αναπτύσσεται παρατηρούνται πολλές αστάθειες στην ταλάντωση της πτέρυγας και το μέγιστο εύρος πέφτει στο μισό. Στις 3000 rpm η ροή εξέρχεται με μεγάλη ταχύτητα από το συμπιεστή και έτσι αυτό έχει εμφανή αποτελέσματα στην ταλάντωση της πτέρυγας, όπου το μέγιστο εύρος πέφτει επίσης στη μισή τιμή σε σύγκριση με την ελεύθερη ταλάντωση.

Βιβλιογραφία

- [1] Royce N. Brown, '*Compressors Selection and Sizing 2nd ed.*', Butterworth-Heinemann, 1997
- [2] Boyce, Meherwan P., '*Centrifugal Compressors - A Basic Guide*', PennWell, 2003
- [3] Boyce, Meherwan P, '*PRINCIPLES OF OPERATION AND PERFORMANCE ESTIMATION OF CENTRIFUGAL COMPRESSORS*'
- [4] Kangsoo Im, '*DEVELOPMENT OF A DESIGN METHOD FOR CENTRIFUGAL COMPRESSORS*', 2012
- [5] Prof. Q.H. Nagpurwala, *Centrifugal Compressors*
- [6] Ερρίκος Σταπουντζής, *Σημειώσεις Αεροδυναμικής*, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, Βόλος 2013.
- [7] <http://www.aerospaceweb.org/question/airfoils/q0100.shtml>
- [8] <https://sites.google.com/site/1o306darylchionh/contemporary-science-research/aerodynamics>
- [9] *FLOW IN PIPES* από <https://www.uio.no/>, University of Oslo, 2011
- [10] Anders Brandt, '*NOISE AND VIBRATION ANALYSIS, SIGNAL ANALYSIS AND EXPERIMENTAL PROCEDURES*', Department of Industrial and Civil Engineering University of Southern Denmark, 2011
- [11] Σ. Νατσιάβας, '*ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΙΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ*', Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2001
- [12] Δαμασκηνός, '*Ποιο είναι το χαρακτηριστικό της απλής αρμονικής ταλάντωσης; Εάν ένα σύστημα αφού εκτραπεί από τη θέση ισορροπίας, δέχεται δύναμη επαναφοράς $F = -kx$* ', στο <http://slideplayer.gr/>, 2016
- [13] Heinz P. Bloch, '*A PRACTICAL GUIDE TO COMPRESSOR TECHNOLOGY*', John Wiley & Sons, 2006
- [14] Siemens, '*MICROMASTER 420, 0.12 kW - 11 kW: Operating Instructions*', 2006
- [15] TSI, '*Model 8350 VELOCICALC Air Velocity Meter, Operation and service manual*', 1989
- [16] CLEAN AIR, '*Furness FCO 510 Micromanometer*'
- [17] '*Sound Level Meter / Noise Level Meter*' στο <https://www.pce-instruments.com/>
- [18] LUTRON ELECTRONIC, '*SOUND LEVEL METER Model: SL-4011*'

- [19] KISTLER, *'Accelerometers Providing quick, accurate and reliable motion data'*, 2005
- [20] LEADER ELECTRONICS CORP., *'DUAL TRACE OSCILLOSCOPE INSTRUCTION MANUAL'*
- [21] NATIONAL INSTRUMENTS, *'DEVICE SPECIFICATIONS NI USB-6009 Bus Powered Multifunction DAQ USB Device'*, 2015
- [22] Marybeth G. Nored, Dennis Tweten, Klaus Brun, Ph.D., *'COMPRESSOR STATION PIPING NOISE: NOISE MECHANISMS AND PREDICTION METHODS'*, Gas Machinery Research Council Southwest Research Institute, 2011

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Αποτελέσματα μετρήσεων θορύβου

	Δοκίμιο (1)		Δοκίμιο (2)		Δοκίμιο (3)		Δοκίμιο (4)		Δοκίμιο (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

	Δοκίμιο (6)		Δοκίμιο (8)		Δοκίμιο (9)		Δοκίμιο (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

Αποτελέσματα μετρήσεων στροφών συμπιεστή με οπτικό μέσο

F Inverter	Έξοδος	Φορές περάσματος	Στροφές Συμπιεστή
(Hz)	συμπιεστή	(Hz)	(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

Αποτελέσματα μετρήσεων ταλαντώσεων συμπιεστή

Μέση τιμή (μέτρηση πάνω σε δοκίμιο)

RPM	Δοκίμιο (1)	Δοκίμιο (2)	Δοκίμιο (3)	Δοκίμιο (4)	Δοκίμιο (5)
600	0,05564	-0,15295	-0,0105	0,07832	-0,11407
1200	-0,05009	-0,04173	-0,04863	0,10527	-0,04334
1800	-0,00436	0,02233	-0,10605	-0,08118	-0,0382
2400	0,10906	-0,04594	-0,01483	0,11092	-0,08544
3000	0,05833	-0,03871	0,30656	0,14922	0,10513

RPM	Δοκίμιο (6)	Δοκίμιο (7)	Δοκίμιο (8)	Δοκίμιο (9)	Δοκίμιο (10)
600	-0,04652	-0,48693	-0,0621	-0,12734	0,16582
1200	-0,05353	-0,08451	0,01918	-0,09635	0,00639
1800	0,01075	0,09654	0,08488	0,06287	-0,01513
2400	0,04167	0,14107	0,15986	-0,02706	-0,09132
3000	-0,87288	-0,11912	-0,37071	-0,00478	-0,05071

Μέση τιμή (μέτρηση σε βάση συμπιεστή)

RPM	Δοκίμιο (1)	Δοκίμιο (2)	Δοκίμιο (3)	Δοκίμιο (4)	Δοκίμιο (5)
600	-0,19769	0,07028	0,04755	0,03792	0,01574
1200	0,08317	0,08931	0,01368	0,00864	-0,02063
1800	0,02379	0,1003	-0,0123	0,08798	0,00479
2400	-0,03851	0,10396	0,04376	0,09617	0,00439
3000	-0,0392	0,00228	0,00166	-0,02558	-0,08927

RPM	Δοκίμιο (6)	Δοκίμιο (7)	Δοκίμιο (8)	Δοκίμιο (9)	Δοκίμιο (10)
600	0,02994	-0,04018	-0,11652	-0,01453	0,00339
1200	-0,01478	0,07329	0,0519	-0,00636	0,12778
1800	0,11457	0,10021	-0,02734	0,08459	0,05077
2400	0,0062	-0,03405	-0,06066	0,10171	0,09481
3000	-0,00477	-2,42E-04	-0,06965	-0,05228	0,13008

Τυπική Απόκλιση (μέτρηση πάνω σε δοκίμιο)

RPM	Δοκίμιο (1)	Δοκίμιο (2)	Δοκίμιο (3)	Δοκίμιο (4)	Δοκίμιο (5)
600	0,2412	0,21768	0,15562	0,17187	0,22877
1200	0,3047	0,30654	0,25748	0,36858	0,39109
1800	1,48941	1,44454	0,93072	0,64902	0,80135
2400	1,3588	1,60836	0,81934	1,05244	0,87773
3000	1,77613	2,25887	2,66547	2,22939	2,25577

RPM	Δοκίμιο (6)	Δοκίμιο (7)	Δοκίμιο (8)	Δοκίμιο (9)	Δοκίμιο (10)
600	0,38502	0,406	0,32665	0,33612	0,4638
1200	0,79763	0,51944	0,51627	0,55561	0,50077
1800	1,40178	1,02559	1,8379	1,74543	0,58607
2400	1,22138	1,2064	1,86198	1,15507	1,04359
3000	2,63626	2,61695	2,33172	2,22689	1,66962

Τυπική απόκλιση (μέτρηση σε βάση συμπίεστη)

RPM	Δοκίμιο (1)	Δοκίμιο (2)	Δοκίμιο (3)	Δοκίμιο (4)	Δοκίμιο (5)
600	0,33242	0,28202	0,26712	0,2366	0,14652
1200	0,35199	0,30283	0,34505	0,39522	0,34326
1800	0,67958	0,64073	0,67562	0,60565	0,61342
2400	1,01923	0,89051	0,92593	0,89581	0,77849
3000	1,6367	1,37541	1,51894	1,54147	1,32273

RPM	Δοκίμιο (6)	Δοκίμιο (7)	Δοκίμιο (8)	Δοκίμιο (9)	Δοκίμιο (10)
600	0,32217	0,29114	0,48342	0,30727	0,19584
1200	0,41316	0,45399	0,47112	0,40489	0,51584
1800	0,65852	0,62901	0,62748	0,65165	0,69896
2400	0,79974	0,76734	0,76996	0,73587	0,77623
3000	1,28419	1,24337	1,26436	1,23204	1,35654