

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ

Διπλωματική Εργασία

**ΜΕΤΡΗΣΗ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΟΥ
ΘΟΡΥΒΟΥ ΠΟΥ ΠΑΡΑΓΕΤΑΙ ΑΠΟ ΤΥΡΒΩΔΗ ΑΕΡΙΑ ΔΕΣΜΗ**

υπό

ΙΩΑΝΝΗ ΤΟΥΦΕΞΗ

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των

απαιτήσεων για την απόκτηση του

Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού Βιομηχανίας

2010



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 8272/1
Ημερ. Εισ.: 23-03-2010
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜ
2010
ΤΟΥ

© 2010 Ιωάννης Τουφεξής

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: Δρ. Ερρίκος Σταπουντζής
(Επιβλέπων) Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

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

Τρίτος Εξεταστής: Δρ. Σταμάτης Αναστάσιος
Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Π Ρ Ο Λ Ο Γ Ο Σ

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Ερρίκο Σταπουντζή, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου. Επίσης, είμαι ευγνώμων στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητές κκ. Τάσο Σταματέλλο και Σταμάτη Αναστάσιο για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους. Οφείλω ακόμη να ευχαριστήσω τη φίλη μου Ελένη Δαλαμπίρα για την πολύτιμη βοήθειά της στη διόρθωση της εργασίας αλλά και για την υποστήριξη και την κατανόηση της όλα αυτά τα χρόνια. Πάνω απ' όλα, είμαι ευγνώμων στους γονείς μου, Νικόλαο και Μαρία Τουφεξή, και στον αδερφό μου Ιάσων, για την ολόψυχη αγάπη και υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια.

Ιωάννης Τουφεξής

ΜΕΤΡΗΣΗ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ ΠΟΥ ΠΑΡΑΓΕΤΑΙ ΑΠΟ ΤΥΡΒΩΔΗ ΑΕΡΙΑ ΔΕΣΜΗ

ΙΩΑΝΝΗΣ ΤΟΥΦΕΞΗΣ

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, 2010

Επιβλέπων Καθηγητής : Δρ. Ερρίκος Σταπουντζής Αναπληρωτής
Καθηγητής Μηχανικής Ρευστών, Μηχ. Συμπιεστών
& Ασυμπίεστων Ρευστών, Εφ. Υδροδυναμικής
Θεωρίας & Κατασκευής Δυναμικών Μηχανών

Π Ε Ρ Ι Λ Η Ψ Η

Το πρόβλημα του θορύβου που παράγεται από μία αέρια τυρβώδη δέσμη, άρχισε να γίνεται αισθητό στον άνθρωπο από τα μέσα του προηγούμενου αιώνα. Ήταν η δημιουργία των πρώτων αεροπορικών κινητήρων, που έδωσε την ώθηση για περαιτέρω μελέτη του αεροδυναμικού θορύβου. Σήμερα, χρησιμοποιούνται ελεύθερες δέσμες αερίων πολλή συχνά τόσο στην βιομηχανία όσο και στην λειτουργία των αεροκινητήρων. Ο θόρυβος που παράγεται οφείλεται, κατά κύριο λόγο στην δημιουργία μεγάλων δινών μέσα στην δέσμη. Είναι ευθύνη της αεροακουστικής να μελετήσει την φυσική του προβλήματος και να δώσει λύσεις για την μείωσή του.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να:

- παρουσιαστούν οι βασικές αρχές της ακουστικής, όπως ο ορισμός και ο υπολογισμός των βασικών μεγεθών που προκύπτουν κατά την ανάλυση του θορύβου,
- να εφαρμοστούν οι αρχές αυτές για τον υπολογισμό του θορύβου που παράγεται από τυρβώδη δέσμη και να δημιουργηθεί ένα μαθηματικό μοντέλο για τον υπολογισμού του,

- να μετρηθεί ο θόρυβος που παράγεται από την δέσμη με χρήση ηχομέτρου και να γίνει αναφορά στις βασικές ρυθμίσεις που πρέπει να γίνουν ώστε να γίνει σωστά η μέτρηση,
- να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν για το επίπεδο της στάθμης του θορύβου και να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα.

Ακολούθως περιγράφεται αδρομερώς το περιεχόμενο έκαστου κεφαλαίου της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Στο **1^ο κεφάλαιο** γίνεται μία εισαγωγή στην έννοια του θορύβου και στις επιπτώσεις του. Επίσης αναφέρεται ο ρόλος του μηχανικού στον έλεγχο του θορύβου (noise control) αλλά και μερικές μέθοδοι περιορισμού του. Τέλος γίνεται αναφορά στην φυσική του ήχου και παρουσιάζονται μερικές βασικές αρχές της Ακουστικής, όπως ο υπολογισμός των βασικών ηχητικών μεγεθών, οι διάφορες ηχητικές πηγές που υπάρχουν καθώς επίσης και τα πεδία που δημιουργούνται από αυτές, η φασματική ανάλυση του ήχου και οι καμπύλες διόρθωσης της ηχητικής στάθμης.

Στο **2^ο κεφάλαιο** εισάγεται η έννοια του αεροδυναμικού θορύβου. Γίνεται μία σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση στις πιο σημαντικές εργασίες που εκδόθηκαν, για την παραγωγή αεροδυναμικού θορύβου από δέσμη, από τα μέσα του προηγούμενου αιώνα μέχρι και σήμερα και παρουσιάζεται συνοπτικά η γραμμική ακουστική θεωρία και η ακουστική αναλογία του Lighthill. Τέλος αναφέρεται, αρκετά αναλυτικά, η μέθοδος υπολογισμού του θορύβου δέσμης που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Στο **3^ο κεφάλαιο** περιγράφεται ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση των μετρήσεων του αεροδυναμικού θορύβου δέσμης. Αρχικά, παρουσιάζονται τα πιο συνηθισμένα που χρησιμοποιούνται σε τέτοιου είδους μετρήσεις. Στην συνέχεια, γίνεται μία περιγραφή της πειραματικής διάταξης και των μετρητικών οργάνων που χρησιμοποιήθηκαν. Τέλος, παρουσιάζονται μερικά τεχνικά χαρακτηριστικά του ηχομέτρου, το οποίο είναι και το πιο σημαντικό όργανο μέτρησης που χρησιμοποιήθηκε για την αποπεράτωση του πειράματος.

Στο **4^ο κεφάλαιο** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων, για το επίπεδο της στάθμης της ηχητικής πίεσης του αεροδυναμικού θορύβου δέσμης, που υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας το ηχόμετρο Mediator 2238. Στην συνέχεια υπολογίζεται η στάθμη της ηχητικής πίεσης, για τις ίδιες συνθήκες, χρησιμοποιώντας την μέθοδο των Bien & Hansen και συγκρίνονται τα αποτελέσματα της με τις τιμές που υπολογίστηκαν με το ηχόμετρο. Τέλος, εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα τόσο για το ηχητικό πεδίο που δημιουργείται, όσο και για την ακρίβεια της αριθμητικής μεθόδου που χρησιμοποιήθηκε.

Στο **5^ο κεφάλαιο** γίνεται μία ανακεφαλαίωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Επίσης, παρατίθενται ορισμένες προτάσεις για επιπρόσθετη μελέτη.

Π ε ρ ι ε χ ό μ ε ν α

Πρόλογος	i
Περίληψη	ii
Περιεχόμενα	iii
Κατάλογος Πινάκων	iv
Κατάλογος Διαγραμμάτων	v
Βιβλιογραφία	vi

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ

1.1 Ο θόρυβος στην καθημερινότητα μας	1
1.2 Ορισμός του ήχου και του θορύβου	2
1.3 Ταξινόμηση του θορύβου	2
1.3.1 Με βάση την κυματομορφή του	2
1.3.2 Με βάση της διάδοση του	3
1.3.3 Με βάση τη φασματική του σύνθεση	3
1.4 Ταξινόμηση των ηχητικών πηγών	4
1.4.1 Πηγές θορύβου στη βιομηχανία	4
1.5 Θόρυβος και επιπτώσεις	5
1.5.1 Επιπτώσεις του θορύβου στην εργασία	5
1.5.2 Επιπτώσεις του θορύβου στον ανθρώπινο οργανισμό	7
1.5.2.1. Ακουστικές επιδράσεις	7
1.5.2.2 Μη ακουστικές επιδράσεις	8
1.5.3 Επιπτώσεις του θορύβου στην ανθρώπινη επικοινωνία	8
1.6 Ο ρόλος του μηχανικού	8
1.7 Μέθοδοι περιορισμού του θορύβου	9
1.7.1 Μέτρα περιορισμού του θορύβου στην πηγή	9
1.7.2 Μέτρα περιορισμού στη διάδοσή του θορύβου	11
1.7.3 Μέτρα περιορισμού στο δέκτη του θορύβου	11
1.8 Ορισμός του ήχου	12
1.9 Η κυματική εξίσωση	12
1.10 Φυσικά χαρακτηριστικά του ήχου	15
1.10.1 Η συχνότητα του ήχου	15
1.10.2. Το μήκος κύματος του ήχου	16
1.10.3 Η ταχύτητα μετάδοσης του ήχου	17
1.11 Βασικά ηχητικά μεγέθη και μονάδες	18
1.11.1 Μέση τετραγωνική τιμή	18
1.11.2 Ηχητική ένταση	18
1.11.3 Ηχητική ισχύς	20
1.11.4 Ηχητική πίεση	21
1.11.5 Χρήσιμες σχέσεις μεταξύ των L_p , L_w και L_I	21
1.11.6 Ισοδύναμη Στάθμη Ηχητικής Πίεσης	22
1.11.7 Decibel [dB]	23
1.11.8 Μετατροπή Pa σε dB	24
1.11.8.1 Με χρήση της εξίσωσης του L_p	24

1.11.8.2 Με χρήση διαγραμμάτων	24
1.11.8.3 Με χρήση πινάκων	25
1.12 Ηχητικές πηγές και Ηχητικά πεδία	25
1.12.1 Τύποι ηχητικών πηγών	25
1.12.1 Σημειακή πηγή (Point Source)	25
1.12.2 Γραμμική πηγή (Line source)	26
1.12.3 Επιφανειακή πηγή (Plane source)	27
1.13 Ανηχοϊκός και αντηχητικός θάλαμος	27
1.13.1 Ανηχοϊκός θάλαμος (Anechoic chamber)	27
1.13.2 Αντηχητικός θάλαμος (Reverberant chamber)	27
1.14 Ηχητικά πεδία	28
1.15 Φασματική ανάλυση του ήχου	29
1.15.1 Εισαγωγή	29
1.15.2 Μετασχηματισμός Fourier	30
1.15.3 Ανάλυση σε ζώνες συχνότητας	30
1.16 Καμπύλες συντελεστών βαρύτητας στάθμης ηχητικής πίεσης	34

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΘΟΡΥΒΟΣ

2.1 Εισαγωγή	36
2.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση	37
2.3 Γραμμική ακουστική θεωρία	38
2.4 Το ακουστικό ανάλογο του Lighthill	39
2.5 Θόρυβος Δέσμης	40
2.5.1 Υπολογισμός της ακουστικής ισχύς της δέσμης	40
2.5.2 Υπολογισμός της στάθμης της ηχητικής πίεσης L_p της δέσμης	42
2.5.3 Υπολογισμός του φάσματος του θορύβου δέσμης	43
2.5.4 Διόρθωση των τιμών του L_p με χρήση συντελεστών βαρύτητας	44

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ

3.1 Μετρητικά όργανα	46
3.1.1 Ηχόμετρο	46
3.1.2 Ο στατιστικός αναλυτής	48
3.1.3 Μετρητής δόσεων θορύβου	48
3.1.4 Αναλυτής θορύβου	49
3.2 Περιγραφή του μετρητικού εξοπλισμού και της πειραματικής διάταξης	49
3.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά του ηχομέτρου	51
3.3.1 Εισαγωγή	51
3.3.2 Μεταβλητές που υπολογίζονται κατά την μέτρηση	51
3.3.3 Σειριακή Ανάλυση Συχνοτήτων	52
3.3.4 T_{dwell}	53
3.3.4.1 Optimized Dwell Time	53
3.3.4.2 Fixed Dwell Time	53
3.3.5 T_{Filter}	53

3.3.6 $T_{Fast/Slow}$	53
3.3.7 Συνολικός Χρόνος Μέτρησης.....	54

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

4.1 Εισαγωγή.....	56
4.2 1 ^η Ομάδα μετρήσεων.....	57
4.2.1 Ταχύτητα δέσμης στην έξοδο $U = 13.8$ (m/s).....	58
4.2.2 Ταχύτητα δέσμης στην έξοδο $U = 21.4$ (m/s).....	60
4.2.3 Ταχύτητα δέσμης στην έξοδο $U = 28.6$ (m/s).....	63
4.3 2 ^η Ομάδα μετρήσεων.....	66
4.3.1 Ταχύτητα δέσμης στην έξοδο $U = 13.8$ (m/s).....	67
4.3.2 Ταχύτητα δέσμης στην έξοδο $U = 21.4$ (m/s).....	69
4.3.3 Ταχύτητα δέσμης στην έξοδο $U = 28.6$ (m/s).....	72
4.4 3 ^η Ομάδα μετρήσεων.....	75
4.4.1 Ταχύτητα δέσμης στην έξοδο $U = 14.5$ (m/s).....	76
4.4.2 Ταχύτητα δέσμης στην έξοδο $U = 23$ (m/s).....	79
4.4.3 Ταχύτητα δέσμης στην έξοδο $U = 33.2$ (m/s).....	81
4.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων.....	83
4.5.1 Ομάδα 1 / Θέση 3.....	84
4.5.2 Ομάδα 1 / Θέση 5.....	85
4.5.3 Ομάδα 2 / Θέση 1.....	86
4.5.4 Ομάδα 2 / Θέση 3.....	88
4.5.4 Ομάδα 3 / Θέση 3.....	89
4.5.5 Ομάδα 3 / Θέση 5.....	90
4.6 Συμπεράσματα.....	92

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ & ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

5.1 Ανακεφαλαίωση.....	96
5.2 Προτάσεις για περαιτέρω μελέτη.....	96

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ 1.1 / Επίπεδα αντίληψης των εναλλαγών της στάθμης του θορύβου.....	24
ΠΙΝΑΚΑΣ 1.2 / Πίνακας μετατροπής της ηχητικής πίεσης dB με χρήση του λόγου πίεσης.....	25
ΠΙΝΑΚΑΣ 1.3 / Όρια ζωνών συχνοτήτων και κεντρικές συχνότητες.....	33
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1 / Τιμές του DI για διάφορες τιμές της γωνίας θ	43
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.2 / Τιμές του συντελεστή μετατροπής, CF_7 για όλες τις ζώνες συχνοτήτων, ($f_0 = f_p$).....	44
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.3 / Τιμές των συντελεστών στάθμησης CFA και CFC για κάθε κεντρική συχνότητα (ANSI S1.4, 1971).....	45
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.1 / Ρυθμίσεις του ηχομέτρου.....	50
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.2 / Τιμές των τριών χρονικών μεταβλητών για κάθε ζώνη συχνότητας, ανάλογα με το επιλεγμένο φίλτρο (1/1 ή 1/3).....	55
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1 / Οι τιμές της ηχητικής πίεσης της 1 ^{ης} ομάδας μετρήσεων και για ταχύτητα δέσμης $U=13.8$ (m/s).....	58
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.2 / Οι τιμές της ηχητικής πίεσης της 1 ^{ης} ομάδας μετρήσεων και για ταχύτητα δέσμης $U=21.4$ (m/s).....	61
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.3 / Οι τιμές της ηχητικής πίεσης της 1 ^{ης} ομάδας μετρήσεων και για ταχύτητα δέσμης $U=28.6$ (m/s).....	63
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.4 / Οι τιμές της ηχητικής πίεσης της 2 ^{ης} ομάδας μετρήσεων και για ταχύτητα δέσμης $U=13.8$ (m/s).....	67
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.5 / Οι τιμές της ηχητικής πίεσης της 2 ^{ης} ομάδας μετρήσεων και για ταχύτητα δέσμης $U=21.4$ (m/s).....	70
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.6 / Οι τιμές της ηχητικής πίεσης της 2 ^{ης} ομάδας μετρήσεων και για ταχύτητα δέσμης $U=28.6$ (m/s).....	72
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.7 / Οι τιμές της ηχητικής πίεσης της 3 ^{ης} ομάδας μετρήσεων και για ταχύτητα δέσμης $U=14.5$ (m/s).....	76
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.8 / Οι τιμές της ηχητικής πίεσης της 3 ^{ης} ομάδας μετρήσεων και για ταχύτητα δέσμης $U=23$ (m/s).....	79

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.9 / Οι τιμές της ηχητικής πίεσης της 3 ^{ης} ομάδας μετρήσεων και για ταχύτητα δέσμης $U=33.2$ (m/s).....	81
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.10 / Πίνακας τιμών των μεταβλητών για την περίπτωση O.1Θ.3.....	84
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.11 / Πίνακας τιμών των μεταβλητών για την περίπτωση O.1Θ.5.....	85
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.12 / Πίνακας τιμών των μεταβλητών για την περίπτωση O.2Θ.1.....	86
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.13 / Πίνακας τιμών των μεταβλητών για την περίπτωση O.2Θ.3.....	88
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.14 / Πίνακας τιμών των μεταβλητών για την περίπτωση O.3Θ.3.....	89
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.15 / Πίνακας τιμών των μεταβλητών για την περίπτωση O.3Θ.5.....	90
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.16 / Πίνακας αποτελεσμάτων της συνολικής ηχητικής πίεσης.....	92

Κ Α Τ Α Λ Ο Γ Ο Σ Δ Ι Α Γ Ρ Α Μ Μ Α Τ Ω Ν

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 1.1 / Διάγραμμα μετατροπής Pa σε dB, με πίεση αναφοράς, $p_0=20\mu\text{Pa}$	25
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 1.2 / Καμπύλες διόρθωσης (A, B, C, ,D και Lin) των τιμών της ηχητικής πίεσης για κάθε συχνότητα του φάσματος	34
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 2.1 / Διάγραμμα υπολογισμού του συντελεστή ακουστικής ικανότητας του θορύβου που παράγεται από κύμα υπερπίεσης (Heitner, 1968)	42
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 2.2 / Διάγραμμα υπολογισμού του φάσματος του θορύβου δέσμης	43
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.1 / Ταχύτητα Δέσμης $U = 13.8 \text{ m/s}$ [O.1Θ.3]	84
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.2 / Ταχύτητα Δέσμης $U = 21.4 \text{ m/s}$ [O.1Θ.3]	84
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.3 / Ταχύτητα Δέσμης $U = 28.6 \text{ m/s}$ [O.1Θ.3]	85
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.4 / Ταχύτητα Δέσμης $U = 13.8 \text{ m/s}$ [O.1Θ.5]	85
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.5 / Ταχύτητα Δέσμης $U = 21.4 \text{ m/s}$ [O.1Θ.5]	86
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.6 / Ταχύτητα Δέσμης $U = 28.6 \text{ m/s}$ [O.1Θ.5]	86
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.7 / Ταχύτητα Δέσμης $U = 13.8 \text{ m/s}$ [O.2Θ.1]	87
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.8 / Ταχύτητα Δέσμης $U = 21.4 \text{ m/s}$ [O.2Θ.1]	87
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.9 / Ταχύτητα Δέσμης $U = 28.6 \text{ m/s}$ [O.2Θ.1]	87
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.10 / Ταχύτητα Δέσμης $U = 13.8 \text{ m/s}$ [O.2Θ.3]	88
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.11 / Ταχύτητα Δέσμης $U = 21.4 \text{ m/s}$ [O.2Θ.3]	88
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.12 / Ταχύτητα Δέσμης $U = 28.6 \text{ m/s}$ [O.2Θ.3]	89
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.13 / Ταχύτητα Δέσμης $U = 14.5 \text{ m/s}$ [O.3Θ.3]	89
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.14 / Ταχύτητα Δέσμης $U = 23 \text{ m/s}$ [O.3Θ.3]	90
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.15 / Ταχύτητα Δέσμης $U = 33.2 \text{ m/s}$ [O.3Θ.3]	90
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.16 / Ταχύτητα Δέσμης $U = 14.5 \text{ m/s}$ [O.3Θ.5]	91
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.17 / Ταχύτητα Δέσμης $U = 23 \text{ m/s}$ [O.3Θ.5]	91

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.18 / Ταχύτητα Δέσμης $U = 33.2 \text{ m/s}$ [O.3Θ.5].....	91
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.19 / Εξάρτηση της στάθμης της ηχητικής πίεσης από την ταχύτητα εξόδου της δέσμης (1 ^η ομάδα μετρήσεων).....	93
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.20 / Εξάρτηση της στάθμης της ηχητικής πίεσης από την ταχύτητα εξόδου της δέσμης (2 ^η ομάδα μετρήσεων).....	93
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.20 / Εξάρτηση της στάθμης της ηχητικής πίεσης από την απόσταση του ηχομέτρου από το κέντρο της δέσμης.....	94

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μία εισαγωγή στην έννοια του θορύβου και στις επιπτώσεις του. Επίσης αναφέρεται ο ρόλος του μηχανικού στον έλεγχο του θορύβου (noise control) αλλά και μερικές μέθοδοι περιορισμού του θορύβου. Τέλος γίνεται αναφορά στην φυσική του ήχου και παρουσιάζονται οι βασικές αρχές της Ακουστικής, όπως ο υπολογισμός των βασικών ηχητικών μεγεθών, οι διάφορες ηχητικές πηγές που υπάρχουν καθώς και τα ηχητικά πεδία που δημιουργούνται από αυτές, η φασματική ανάλυση του ήχου και οι καμπύλες διόρθωσης της ηχητικής στάθμης.

1.1 Ο θόρυβος στην καθημερινότητα μας.

Η καθημερινή ζωή χαρακτηρίζεται από πολλούς ήχους όπως, το ξυπνητήρι το πρωί, η μηχανή του αυτοκινήτου να ξεκινά, το αμάξι να επιταχύνει, οι ήχοι των μηχανών να λειτουργούν στη δουλειά, ο ήχος του αέρα στα παράθυρα των κτιρίων κ.α. Από την πρώτη εμφάνιση του ανθρώπου στη γη ο ήχος ήταν και εξακολουθεί να είναι το κυριότερο μέσο επικοινωνίας και να εμφανίζεται σε κάθε εκδήλωση της ζωής του ανθρώπου. Μερικοί από τους ήχους έχουν κάποιο νόημα, ενώ πολλοί από αυτούς αποτυγχάνουν να μεταφέρουν χρήσιμες πληροφορίες στον λήπτη. Εδώ είναι το σημείο που ο ήχος γίνεται θόρυβος. Σε κάθε περιβάλλον υπάρχουν σίγουρα ποσά θορύβου, τα οποία μπορούν να επηρεάσουν την απόδοση των εργαζομένων, να καταστρέψουν ένα ευχάριστο εργασιακό περιβάλλον, να κάνουν τη δουλειά ανυπόφορη και να περιορίσουν την ικανότητα προς εργασία. Το θορυβώδες εργασιακό περιβάλλον θεωρείται βλαβερό για την υγεία του εργαζόμενου.

Οι επιπτώσεις του θορύβου στους εργαζόμενους οι οποίοι εκτίθενται σε υψηλές στάθμες θορύβου κάθε μέρα επί πολλά χρόνια, στις σύγχρονες βιομηχανικές κοινωνίες, είναι αρκετά δυσάρεστες. Είναι θα λέγαμε το τίμημα της τεχνολογικής προόδου. Το γεγονός ότι ο θόρυβος ήταν ενοχλητικός για το ανθρώπινο αυτί, αναγνωρίστηκε εδώ και 2500 χρόνια. Ήδη το 600 π.Χ. η Σύβαρις, ελληνική αποικία στην Ιταλία, για πρώτη φορά απομόνωσε τους μεταλλουργούς σε ένα τμήμα της πόλης για να μην ενοχλούν με τα σφυροκοπήματά τους, τους κατοίκους της υπόλοιπης πόλης.

Στην αρχή του 20ου αιώνα ένας από τους πατέρες της σύγχρονης υγιεινολογίας, ο Robert Koch, έγραφε σχετικά με το θόρυβο ότι **“μια μέρα ο άνθρωπος θα αγωνίζεται ενάντια στο θόρυβο με την ίδια επιμονή που παλεύει με τη χολέρα και την πανώλη”**. Δυστυχώς για τον άνθρωπο, αυτή η μέρα έφθασε και δεν είναι μόνο το αποτέλεσμα της μη ορθολογικής οργάνωσης της βιομηχανικής παραγωγής, αλλά και της χαώδους πολεοδομικής ανάπτυξης. Η βιομηχανική παραγωγικότητα αναπτύχθηκε παράλληλα με την αύξηση της ταχύτητας των μηχανών, κάτι που οδήγησε και σε μεγαλύτερη παραγωγή θορύβου.

1.2 Ορισμός του ήχου και του θορύβου.

Ως ήχος ορίζεται κάθε μεταβολή της πίεσης του ατμοσφαιρικού αέρα ή άλλου μέσου, η οποία είναι ικανή να ερεθίσει το αισθητήριο όργανο της ακοής και να γίνει αντιληπτή από τον άνθρωπο. Για να γίνει αντιληπτός ένας ήχος, πρέπει να υπάρχουν :

- α. Ηχητική πηγή,
- β. Ελαστικό μέσο μεταφοράς (ηχητικά κύματα),
- γ. Ικανοποιητική λειτουργία του οργάνου της ακοής.

Ο ανεπιθύμητος, ενοχλητικός ή και απλά ο δυσάρεστος για τον άνθρωπο ήχος λέγεται **θόρυβος**. Εναλλακτικά, ο θόρυβος μπορεί να οριστεί και ως ένα σύνολο ήχων χωρίς αρμονία ή ανάμικτων κρότων. Από φυσική άποψη θόρυβος είναι ένα σύμπλεγμα ηχητικών κυμάτων με ελάχιστη ή καμιά περιοδικότητα.

Αξίζει να αναφερθεί ότι οι φυσικές έννοιες δεν επαρκούν για να καθορίσουν τη διαφορετική αίσθηση που προκαλεί ένας ήχος από ένα θόρυβο. Η διαφορά αυτή καθορίζεται από υποκειμενικούς παράγοντες που προσδίδουν σε κάθε ηχητικό ερέθισμα που γίνεται αντιληπτό, έναν επιθυμητό ή ανεπιθύμητο χαρακτήρα.

1.3 Ταξινόμηση του θορύβου.

Ο θόρυβος ταξινομείται σε διάφορες κατηγορίες με βάση:

- την κυματομορφή του
- τον τρόπο και το μέσο διάδοσής του και
- τη φασματική του σύνθεση

1.3.1 Με βάση την κυματομορφή του.

Με βάση την κυματομορφή του ο θόρυβος διακρίνεται σε τέσσερις κατηγορίες:

- **Σταθερός θόρυβος:**

Είναι ο θόρυβος που παρουσιάζει πολύ μικρές διακυμάνσεις της στάθμης κατά τη διάρκεια της παρατήρησης.

- **Μεταβλητός θόρυβος:**

Είναι κάθε θόρυβος που δεν είναι σταθερός. Ο μεταβλητός θόρυβος χωρίζεται σε τρεις υποκατηγορίες:

- **Κυμαινόμενος θόρυβος:**

Είναι ο μεταβλητός θόρυβος που η στάθμη του αλλάζει συνεχώς και σε σημαντικό βαθμό κατά τη διάρκεια της παρατήρησης.

- **Διακοπτόμενος θόρυβος:**

Είναι ο μεταβλητός θόρυβος που παρουσιάζει απότομες πτώσεις της στάθμης, στην τιμή της στάθμης θορύβου βάθους, αρκετές φορές κατά τη διάρκεια της παρατήρησης. Ο χρόνος στον οποίο η στάθμη παραμένει σε μια σταθερή τιμή διαφορετική από την τιμή της στάθμης θορύβου περιβάλλοντος είναι της τάξεως του 1 sec ή περισσότερο.

- **Παλμικός θόρυβος:**

Είναι ο μεταβλητός θόρυβος που αποτελείται από μια ή περισσότερες εξάρσεις ηχητικής ενέργειας(ηχητικοί παλμοί) με διάρκεια μικρότερη από 1 sec η καθεμιά.

1.3.2 Με βάση την διάδοσή του.

Με βάση τον τρόπο και το μέσο διάδοσης του ο θόρυβος χωρίζεται στις εξής κατηγορίες:

- **Αερόφερτος θόρυβος:**

Είναι ο θόρυβος για τον οποίο η πηγή, η διάδοση και η λήψη είναι μέσα στον αέρα.

- **Στερεόφερτος θόρυβος:**

Είναι ο θόρυβος για τον οποίο η πηγή, η διάδοση και η λήψη είναι μέσα στο στερεό μέσο.

1.3.3 Με βάση την φασματική του σύνθεση.

Με βάση το φάσμα ηχητικής ισχύος ο θόρυβος ταξινομείται ως εξής:

- **Απλός θόρυβος:**

Είναι ο θόρυβος του οποίου το γραμμικό φάσμα αποτελείται από μια φασματική γραμμή. Ουσιαστικά αποτελείται από μία συχνότητα.

•Σύνθετος θόρυβος:

Πρόκειται για επαλληλία γραμμικού και συνεχούς φάσματος το οποίο αποτελείται από πολλές συχνότητες. Διακρίνεται σε περιοδικό σύνθετο θόρυβο και σε μη περιοδικό σύνθετο θόρυβο.

- **Περιοδικός σύνθετος θόρυβος:** Έχει γραμμικό φάσμα με πολλές φασματικές γραμμές που εμφανίζονται με περιοδικό τρόπο.

- **Μη Περιοδικός σύνθετος θόρυβος:** Έχει συνεχές φάσμα μη υποκείμενο σε οποιαδήποτε μορφή περιοδικότητας. Διακρίνεται σε ροζ και λευκό θόρυβο.

1.4 Ταξινόμηση των ηχητικών πηγών.

Οι ηχητικές πηγές γενικά μπορούν να ταξινομηθούν στις εξής κατηγορίες:

- Εκτονώσεις αερίων
- Κρουστικά φαινόμενα
- Μεταβατικά φαινόμενα μηχανικής ή ηλεκτρικής φύσεως (π.χ. κεραυνός)
- Στερεά που δονούνται
- Στήλες αέρα που δονούνται (π.χ. ηχητικοί σωλήνες)
- Αντικείμενα που κινούνται με μεγάλες ταχύτητες σε ρευστά (π.χ. έλικα αεροπλάνου)

1.4.1 Πηγές θορύβου στη βιομηχανία.

Οι πηγές θορύβου στη βιομηχανία είναι αρκετές. Μερικές από αυτές δημιουργούνται από σύγκρουση, από ροή καυσαερίων, από τριβή, από περιστροφή, από εκτόνωση αερίων κ.α.

Η παραγωγή θορύβου που σχετίζεται με τη σύγκρουση επέρχεται όταν δύο επιφάνειες επαφίενται μεταξύ τους. Μερικοί κοινοί τύποι μηχανών που προκαλούν θόρυβο σύγκρουσης, περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων και σφυριά. Άλλες μηχανές μπορούν να εκπέμπουν θόρυβο ακούσια, λόγω συγκρούσεων, εξαιτίας λανθασμένης εγκατάστασης ή ανεπαρκούς συντήρησης.

Ο θόρυβος που προέρχεται από τον αέρα ή τη ροή καυσαερίων, μπορεί να παραχθεί από τη διαφυγή υδρατμών ή από μια αλλαγή στη ροή του καυσαερίου (μετάβαση από στρωτή σε τυρβώδη ροή).

Οι θόρυβοι τριβής είναι παρόμοιοι με τους θορύβους συγκρούσεως στο ότι δύο ή περισσότερα αντικείμενα μπορούν να γλιστρήσουν και να χτυπήσουν μεταξύ τους απελευθερώνοντας θορυβώδη ενέργεια. Μια κοινή πηγή τριβής που παράγει θόρυβο δημιουργείται από μηχανικές συμπεριφορές λόγω κακής λίπανσης.



Εικόνα 1.1 / Ο θόρυβος που προκαλείται από μία βιομηχανική μονάδα αποτελεί πρόβλημα και για τους εργαζόμενους στην μονάδα αλλά και για τα σπίτια γύρω από αυτήν.

Τέλος, πηγές βιομηχανικού θορύβου, που έχουν σχέση με την τριβή δημιουργούνται συχνά όταν περιστρέφονται μέρη που δεν ισορροπούν ή δε συντηρούνται κατάλληλα.



Εικόνα 1.2 / Κλασική πηγή θορύβου στην βιομηχανία είναι οι τόρνοι που χρησιμοποιούνται για την κατεργασία διάφορων μετάλλων.

1.5 Θόρυβος και επιπτώσεις

Οι δυσμενείς επιπτώσεις του θορύβου στις σύγχρονες βιομηχανικές κοινωνίες είναι έντονες και αποτελούν ένα τεράστιο πρόβλημα.

Γενικά, οι επιδράσεις του θορύβου χωρίζονται στις εξής κατηγορίες :

- Επιπτώσεις του θορύβου στην εργασία
- Επιπτώσεις στον ανθρώπινο οργανισμό
- Επιπτώσεις στην ανθρώπινη επικοινωνία.

1.5.1 Επιπτώσεις του θορύβου στην εργασία

Δεν είναι απόλυτα εξακριβωμένο, από εργαστηριακά πειράματα που έχουν γίνει, για το αν ο θόρυβος μειώνει αισθητά την αποδοτικότητα των εργαζομένων ή όχι. Ένα πείραμα από αυτά είναι και η μελέτη των Bowden και

Wang το 2004. Το πείραμα αυτό με έντεκα υποκείμενα είχε σκοπό να εξετάσει τη σχέση μεταξύ ενός φάσματος δώδεκα ατονικών και μη κυμαινόμενων θορύβων, την εκτίμηση των υποκειμένων για τα κριτήρια του εσωτερικού θορύβου, την παραγωγικότητα και την υποκειμενική αντίληψη του θορύβου. Έντεκα εργαζόμενοι συμμετείχαν στο πείραμα ολοκληρώνοντας εργασίες σχετικά με την δακτυλογράφηση και την διόρθωση κειμένου, αλλά και την υποκειμενική εκτίμηση της έντασης, της ενόχλησης και του ποιοτικού φάσματος. Οι δώδεκα διαφορετικοί θόρυβοι που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτήν την μελέτη και στους οποίους εκτέθηκαν οι έντεκα εργαζόμενοι προσομοιάζουν θορύβους εξαερισμού. Οι εκθέσεις των εργαζομένων στους θορύβους μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τρία διαφορετικά επίπεδα (χαμηλό, μέσο και υψηλό) και σε τέσσερα διαφορετικά ποιοτικά φάσματα (ουδέτερο, υπόκωφο, βουητό, σφύριγμα). Τα αποτελέσματα της εξέτασης των εκθέσεων αυτών των υποκειμένων σε δώδεκα διαφορετικούς θορύβους έδειξαν ότι δεν υπάρχουν σημαντικές διαφορές στην παραγωγικότητα. Παρόλα αυτά πρέπει να σημειωθεί ότι με ένα δείγμα μόλις έντεκα υποκειμένων τα αποτελέσματα του πειράματος είναι πιθανό να μην είναι ενδεικτικά του συνολικού πληθυσμού. Σημαντικές όμως σχέσεις βρέθηκαν για τα έντεκα υποκείμενα ανάμεσα στο επίπεδο της εκτίμησης των κριτηρίων εσωτερικού θορύβου και της υποκειμενικής αντίληψης της έντασης και της ενόχλησης.

Γίνεται επομένως φανερό ότι τα αποτελέσματα έκθεσης σε θόρυβο ποικίλουν, ανάλογα με τις περιστάσεις. Πιθανές πηγές θορύβου στο χώρο εργασίας μπορεί να θεωρηθούν οι διάφορες μηχανές και κάθε είδους μηχανολογικός εξοπλισμός, τηλέφωνα, εργαλειομηχανές, κλιματιστικά και τέλος η ανθρώπινη επικοινωνία. Ωστόσο, ένα είναι σίγουρο, το γεγονός ότι ένα περιβάλλον όχι ιδιαίτερα άνετο, μπορεί να επηρεάσει όχι μόνο την ικανότητα του εργαζομένου αλλά και την υποκίνησή του να εργαστεί. Ειδικότερα μπορούμε να αναφέρουμε τα εξής:

- Ο θόρυβος στο εργασιακό περιβάλλον προκαλεί διάσπαση της προσοχής των εργαζομένων και άρα μείωση της συγκέντρωσής τους.
- Αυξάνονται οι πιθανότητες πρόκλησης ατυχημάτων.
- Επηρεάζεται η ικανότητα άρα και ο βαθμός αποδοτικότητας των εργαζομένων στα καθήκοντά τους.
- Αυξάνεται η σωματική κόπωση, η συχνότητα εμφάνισης πονοκεφάλων και ημικρανιών και συναισθημάτων όπως ανησυχία και αβεβαιότητα.
- Αυξάνεται ο κίνδυνος απώλειας της ακουστικής ικανότητας των εργαζομένων λόγω της μακροχρόνιας έκθεσης του σε υψηλές στάθμες θορύβου.
- Λαμβάνοντας τα δυο τελευταία υπόψη προκύπτει και ο λόγος των συχνών απουσιών από τα εργασιακά καθήκοντα και αναρρωτικών αδειών των εργαζομένων.

Βέβαια, ο βαθμός του αντιληπτού κινδύνου για το άτομο εξαρτάται από τα όρια έκθεσης σε θόρυβο, όπου η συνολική έκθεση κατά τη διάρκεια ενός 24ώρου δε θα πρέπει να υπερβαίνει την μέση τιμή των 80 (dB). Επιπλέον

εξαρτάται και από το μέγεθος των διακυμάνσεων και τη συχνότητα των ήχων. Η συχνότητα επηρεάζει όχι μόνο την αντιληπτότητα του ύψους του ήχου αλλά και την ένταση και δυναμικότητά του να προκαλέσει βλάβη.

1.5.2 Επιπτώσεις του θορύβου στον ανθρώπινο οργανισμό.

Η έκθεση των εργαζομένων σε έντονο θόρυβο στο εργασιακό περιβάλλον έχει σαν αποτέλεσμα την πρόκληση μιας μόνιμης ή προσωρινής μείωσης της ακουστικής ικανότητας. Ο βαθμός σημαντικότητας των πιθανών επιπτώσεων είναι συνάρτηση παραγόντων όπως η διάρκεια έκθεσης, η ένταση-συχνότητα ήχων, αλλά και το είδος της έκθεσης (συνεχής ή κατά διαστήματα). Επιπλέον εξαρτάται από παράγοντες όπως το φύλο και την ηλικία των εργαζομένων. Από αυτήν την άποψη δεν πρέπει να εκτιμώνται μόνο οι ακουστικές επιδράσεις του θορύβου στους εκτιθέμενους, αλλά όλα τα στοιχεία που συνθέτουν το εργασιακό περιβάλλον. Οι επιδράσεις του θορύβου στον άνθρωπο χωρίζονται σε ακουστικές και μη ακουστικές.

1.5.2.1. Ακουστικές επιδράσεις.

Οι επιδράσεις στην ακοή σχετίζονται με το όργανο της ακοής και αφορούν βλάβες που μπορεί να έχουν μόνιμο ή προσωρινό χαρακτήρα. Αν και οι περισσότεροι πιστεύουν ότι η ακοή τους κινδυνεύει μόνο από εξαιρετικά δυνατούς ήχους που θα προκαλέσουν ρήξη τύμπανου, στην πραγματικότητα κώφωση μπορεί να επέλθει και με πιο «ύπουλο» τρόπο. Η μακροχρόνια έκθεση σε περιβάλλον με θορύβους που θεωρούνται ανεκτοί, βλάπτει το ακουστικό όργανο και συγκεκριμένα τις αισθητικές του απολήξεις, με συνέπεια την απώλεια ακοής που αρχικά μπορεί να είναι ανεπαίσθητη, μπορεί όμως να οδηγήσει και σε κώφωση.



Εικόνα 1. 3 / Οι επιπτώσεις του θορύβου στον ανθρώπινο οργανισμό.

1.5.2.2 Μη ακουστικές επιδράσεις.

Οι μη ακουστικές επιδράσεις αφορούν στο νευρικό, κυκλοφοριακό, γαστρεντερικό και ενδοκρινικό σύστημα καθώς επίσης και στον ψυχισμό του ανθρώπου. Η συνεχής έκθεση του σε υψηλά επίπεδα θορύβου μπορεί να οδηγήσει σε ακραίες περιπτώσεις ακόμα και στην κατάθλιψη. Ενδεικτικά αναφέρουμε διαταραχές στην πέψη, τον ύπνο, τη συμπεριφορά, ταχυκαρδία, άγχος, υπέρταση, σωματική κόπωση, υπέρταση, εκνευρισμό, πονοκεφάλους, καθώς και δυσκολία στη συγκέντρωση.

1.5.3 Επιπτώσεις του θορύβου στην ανθρώπινη επικοινωνία.

Τέλος πρέπει να αναφερθούν οι επιπτώσεις από την έκθεση στο θόρυβο, στην επικοινωνία των ατόμων. Η παρουσία θορύβου καλύπτει τους ήχους και δυσχεραίνει όχι μόνο την αναγνώριση αλλά και την κατανόηση των ήχων.

Η κατάσταση αυτή προκαλεί συναισθήματα όπως απογοήτευση, θυμό, παρεξηγήσεις αλλά και συμπτώματα όπως πονοκεφάλους και ημικρανίες. Έμμεση συνέπεια είναι η επίδραση στην αποδοτικότητα των εργαζομένων, η αύξηση πιθανών ατυχημάτων αλλά και απουσιών από την εργασία.

1.6 Ο ρόλος του μηχανικού.

Λόγω όλων των αρνητικών επιπτώσεων του θορύβου που αναφέρθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους, δημιουργήθηκε η ανάγκη για κατανόηση των αιτιών δημιουργίας θορύβου, μετρώντας την ένταση της στάθμης του και αναλύοντας την, με απώτερο σκοπό την μείωση της. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται έλεγχος του θορύβου (noise control) και απαραίτητη προϋπόθεση για την εφαρμογή της είναι η απόκτηση των απαιτούμενων τεχνικών γνώσεων σχετικά με τον ήχο και την εφαρμοσμένη ακουστική.

Για τον μηχανικό που ασχολείται με τον έλεγχο του θορύβου (noise control engineer), ισχύει το παρακάτω κλασικό μοντέλο:



Σε αυτό το μοντέλο, ο μηχανικός μπορεί να επέμβει, είτε μειώνοντας το θόρυβο στην πηγή, είτε εμποδίζοντας το θόρυβο στην διαδρομή, είτε απομονώνοντας το δέκτη από τον θόρυβο.

Ο μηχανικός πρέπει να είναι σε θέση να αντιληφθεί και να αξιολογήσει το θόρυβο σαν ένα παράγοντα σχεδιασμού. Ένα ιδιαίτερα θετικό και βοηθητικό στοιχείο είναι το γεγονός ότι η διεθνής εμπειρία πάνω στα θέματα καταπολέμησης του θορύβου συγκεντρώνεται σε ορισμένα πρότυπα με διεθνή ισχύ από τα οποία μπορεί να αντλήσει κανείς πάρα πολλά στοιχεία.

Πάντοτε υπάρχει και το θέμα της προσαρμογής των διεθνών προτύπων σύμφωνα με τα προβλήματα που προκύπτουν από τα διάφορα εθνικά χαρακτηριστικά.

Η δημιουργία, εξέλιξη και επιβολή προδιαγραφής και προτύπων αποτελούσε κι αποτελεί πάντοτε το βασικό μέσο για την καταπολέμηση του θορύβου. Η σύγχρονη τεχνολογία είναι σε θέση να παρέχει μείωση του θορύβου σε οποιονδήποτε βαθμό, αλλά και με κάποιο σημαντικό κόστος. Παράλληλα η ίδια η ύπαρξη του θορύβου δημιουργεί ένα πραγματικά οικονομικό και ένα κοινωνικό κόστος. Το πρόβλημα ήταν και είναι να αναλυθεί και να εκτιμηθεί το κόστος του θορύβου και το κόστος της καταπολέμησης του και να προσδιορισθεί μία χρυσή τομή η οποία συνήθως εκφράζεται με προδιαγραφές και πρότυπα.

Από την άποψη του μηχανικού, το πρώτο βήμα για την καταπολέμηση του θορύβου είναι η συλλογή στοιχείων σχετικά με την κατάσταση που επικρατεί από την άποψη του θορύβου στην εξεταζόμενη περιοχή.

Αρχικά, πρέπει να προσδιορισθούν οι πηγές θορύβου που υπάρχουν μέσα στην περιοχή και η στάθμη του θορύβου που εκπέμπει κάθε πηγή. Ο προσδιορισμός της στάθμης θορύβου της κάθε πηγής γίνεται είτε με τη βοήθεια κάποιας μεθόδου προβλέψεως, είτε με άμεσες μετρήσεις του θορύβου κοντά στην πηγή με κάποιο μετρητικό όργανο.

1.7 Μέθοδοι περιορισμού του θορύβου.

Τέλος, αξίζει να γίνει μνεία σε μερικές μεθόδους που εφαρμόζονται στην πράξη για την αντιμετώπιση του θορύβου. Βέβαια πρέπει να επισημανθεί ότι πριν την επιβολή αυτών των μεθόδων είναι αναγκαίο να έχει μετρηθεί πρώτα η στάθμη του θορύβου, με την χρήση κάποιου ηχομέτρου, αλλά και να έχει αναλυθεί ψηφιακά (φασματική ανάλυση) ώστε να εξαχθούν κάποια συμπεράσματα για την φύση του προβλήματος.

Τα μέτρα περιορισμού του θορύβου μπορούν να εφαρμοστούν:

- Στην πηγή.
- Στη διαδρομή.
- Στο δέκτη.

1.7.1 Μέτρα περιορισμού του θορύβου στην πηγή

Ο κατασκευαστής μιας μηχανής πρέπει να λαμβάνει σοβαρά υπόψη ότι η μηχανή θα επηρεάσει τα επίπεδα θορύβου μέσα στο εργασιακό περιβάλλον που θα τοποθετηθεί. Πρέπει να μετρήσει το θόρυβο που δημιουργεί η μηχανή, την κατεύθυνσή του και τις συχνότητές του, για να καθορίσει το βαθμό της απαιτούμενης μείωσης του θορύβου.

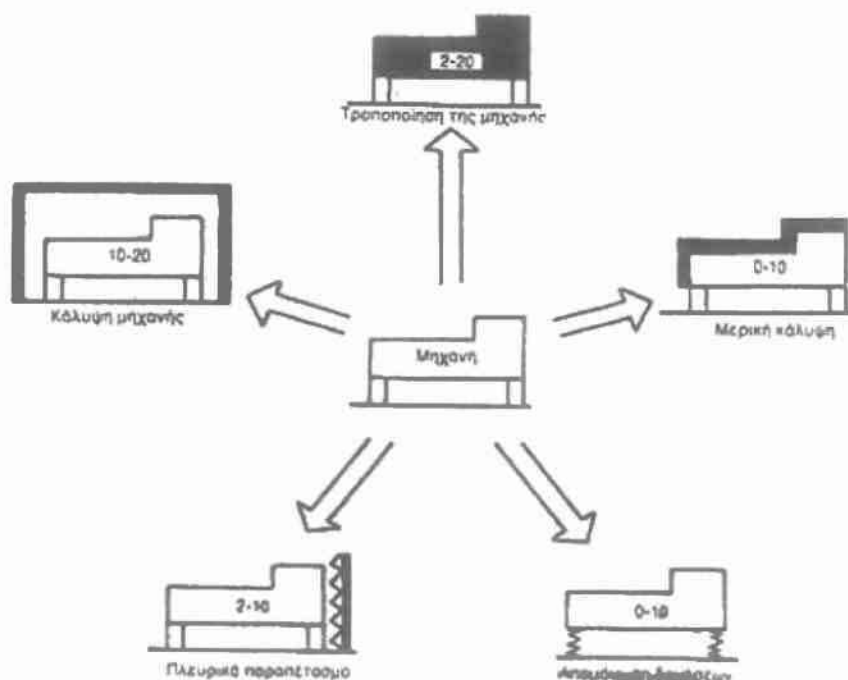
Θόρυβος δημιουργείται στο εργασιακό περιβάλλον σχεδόν σε κάθε περίπτωση:

- α) από εργαλεία χειρός,
- β) από κινούμενα μέρη μιας μηχανής,
- γ) από τα εγκατεστημένα συστήματα θέρμανσης, αερισμού-εξαερισμού, απαγωγής σκόνης, πεπιεσμένου αέρα κ.λπ.

Για να γίνει αντιληπτό τι ακριβώς συμβαίνει μέσα στο χώρο εργασίας, όπου υπάρχουν διάφορες πηγές θορύβου, πρέπει να γίνει ανάλυση του προβλήματος ώστε να προκύψουν οι πηγές του θορύβου και οι μηχανισμοί γένεσης του, καθώς και τα διάφορα μονοπάτια από τα οποία η ηχητική ενέργεια φτάνει στους εργαζομένους.

Πρέπει να σημειωθεί ότι χρειάζεται μεγάλη προσοχή στην περίπτωση κάλυψης των μηχανών, όταν αυτές είναι αερόψυκτες, π. χ. όταν καλυφθεί ένα κομπρεσέρ ή ένας πύργος ψύξεως. Όταν λοιπόν καλυφθεί με μπετόν ο πύργος, πρέπει να υπάρχουν ελεύθερες δίοδοι του αέρα που χρειάζεται για να ψύχεται. Στην περίπτωση που οι μηχανές παρουσιάζουν μεγάλες ανάγκες σε αέρα, η τροφοδοσία τους πρέπει να γίνεται αναγκαστικά με κατάλληλους ανεμιστήρες.

Η βασική προσπάθεια πάνω στις μηχανές είναι, να μειωθεί το εύρος των δυνάμεων που επενεργούν και δημιουργούν τους θορύβους. Έτσι γίνεται προσπάθεια ώστε να μειωθούν οι κρουστικοί θόρυβοι, να ζυγοσταθμιστούν τα κινούμενα στοιχεία, να μειωθούν οι τριβές με τη κατάλληλη λίπανση και την ευθυγράμμιση των τριβών. Επίσης πρέπει να μειωθεί η απόκριση των τμημάτων των μηχανών, να μεταβληθεί η φυσική συχνότητα δονήσεως αλλάζοντας τη μάζα και την σκληρότητα των στοιχείων που υφίστανται τις δονήσεις, να μεγαλώσει ο βαθμός σκεδάσεως της ενέργειας και να μειωθεί κατά το δυνατό η εκπέμπουσα περιοχή. Παράλληλα πρέπει να τηρούνται οι οδηγίες εγκατάστασης και συντήρησης τους ώστε να αποδίδουν το μέγιστο δυνατό με την ελάχιστη ηχορύπανση. Ορισμένες τεχνικές μείωσης του θορύβου φαίνονται στα παρακάτω σχήματα. Σε κάθε σχήμα δίνεται και η αναμενόμενη μείωση του ήχου.



Εικόνα 1.4 / Μέτρα για την μείωση του θορύβου.

Τέλος αξίζει να αναφερθούν μερικοί τρόποι μείωσης της μετάδοσης του ήχου:

- Χρήση αντιδονητικών βάσεων και αποσβέστων στα πλαίσια των μηχανών.
- Προστασία των ειδικών περιοχών χρησιμοποιώντας φραγμούς στους δρόμους μετάδοσης του θορύβου.
- Χρήση καλυμμάτων, όπου αυτό είναι δυνατό.
- Χρήση σιγαστήρων
- Χρήση υλικών με μεγάλη ικανότητα απόσβεσης.
- Τοποθέτηση, στο εσωτερικό του χώρου εργασίας, υλικών μεγάλης απορροφητικότητας, ώστε να αποφεύγεται η δημιουργία ανακλάσεων.

1.7.2 Μέτρα περιορισμού στη διάδοσή του θορύβου

Ορισμένα μέτρα τα οποία μπορούν να παρθούν για το περιορισμό του θορύβου στη διάδοσή του είναι τα παρακάτω:

- Κατασκευή καμπινών χειρισμού - όταν είναι τεχνικά δυνατό ηχομονωμένων, για τη προστασία του εργαζόμενου χρήστη.
- Μέτρα που στοχεύουν στην αύξηση της απόστασης ανάμεσα στη πηγή του θορύβου και του εργαζόμενου δέκτη, μέσω της αλλαγής της σχετικής θέσης τους.
- Μέτρα εφαρμογής κατάλληλων ηχοαπορροφητικών υλικών στα τοιχώματα, τις οροφές και τα δάπεδα των χώρων, με αυξημένο θόρυβο.
- Μέτρα που εξασφαλίζουν –όπου είναι τεχνικά δυνατό- ολική απομόνωση της πηγής του θορύβου με ηχοαπορροφητικά υλικά.
- Υπόδειξη χρήσης ατομικών προστατευτικών μέσων για τα αυτιά των εργαζομένων (ηχοαπορροφητικό βαμβάκι, βύσματα, ωτοασπίδες).

1.7.3 Μέτρα περιορισμού στο δέκτη του θορύβου

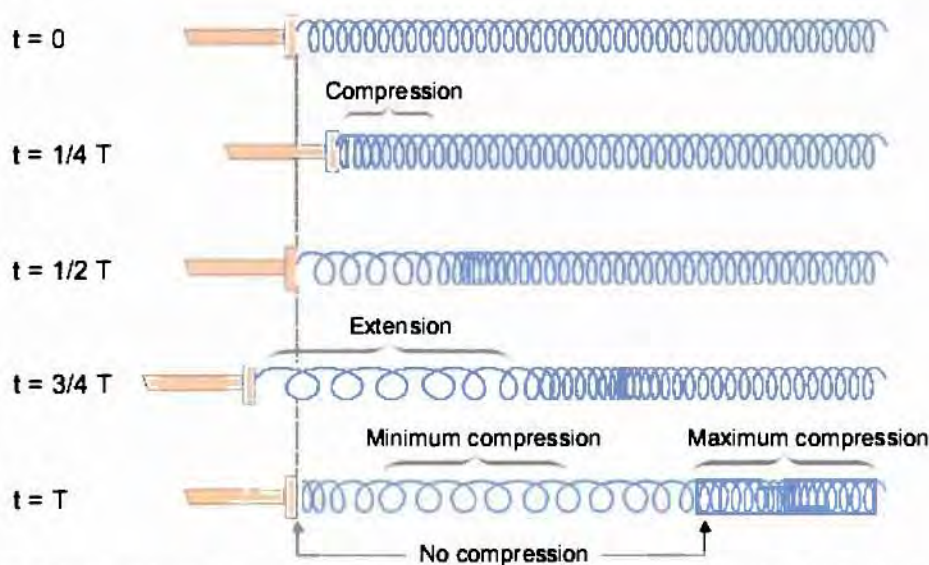
Υπάρχουν περιπτώσεις σε εργασιακούς χώρους όπου οι μέθοδοι μείωσης του θορύβου είναι ανεπαρκείς ή δαπανηρότατες. Όταν λοιπόν η ημερήσια ηχοέκθεση είναι μεγαλύτερη από 85dB και εφόσον δεν υπάρχει προς το παρόν εφικτός τρόπος μείωσης θορύβου, χρησιμοποιούνται τα Μέσα Ατομικής Προστασίας (Μ.Α.Π.) της ακοής. Τα Μ.Α.Π. είναι το τελευταίο μέσο άμυνας του θορύβου και έχει προσωρινό χαρακτήρα μέχρι να ληφθούν όλα τα απαραίτητα μέτρα, που θα συμβάλλουν στη μείωση της ηχοέκθεσης των εργαζομένων.

1.8 Ορισμός του ήχου.

Ο πιο γενικευμένος ορισμός, που περιλαμβάνει τους κραδασμούς, τους υπερήχους και τους ήχους είναι ο εξής :

«Κάθε διαταραχή της πίεσης, η οποία μεταδίδεται δια μέσου ενός στερεού (το οποίο έχει κάποια ελαστικότητα), υγρού ή αερίου με κύματα και διεγείρει την ανθρώπινη ακοή ονομάζεται ήχος.»

Ένα ηχητικό κύμα δημιουργείται συνήθως από κάποιο ταλαντευόμενο μέσο. Αν και αυτός είναι ο κανόνας, υπάρχουν περιπτώσεις, κατά τις οποίες παράγεται ήχος χωρίς την αρχική ταλάντωση της πηγής, όπως π.χ. ο θόρυβος ο οποίος παράγεται κατά την έξοδο των καυσαερίων από κινητήρα αεριοθωμένου αεροπλάνου.



Εικόνα 1.5 / Η διάδοση ενός ηχητικού κύματος είναι παρόμοια με την συμπίεση ενός ελατηρίου, έχουμε μεταφορά ενέργειας χωρίς μεταφορά μάζας.

Οι ταλαντώσεις δημιουργούν εναλλασσόμενες συμπίεσεις και αραιώσεις των μορίων του υλικού μέσου. Η ταλάντωση γίνεται γύρω από μία θέση ισορροπίας. Η κίνηση μεταδίδεται στα γειτονικά μόρια και στη συνέχεια σε ολόκληρο το μέσο. Έτσι ο ήχος, η ηχητική ταλάντωση, είναι μια κίνηση των μορίων ενός ελαστικού μέσου σε όλες τις κατευθύνσεις γύρω από μία θέση ισορροπίας. Επομένως, γίνεται μία μεταφορά ενέργειας, χωρίς αντίστοιχη μεταφορά μάζας.

1.9 Η κυματική εξίσωση.

Η διαταραχή, η οποία δημιουργεί τον ήχο, μεταδίδεται από την πηγή στον δέκτη που είναι ένα αισθητήριο όργανο (ανθρώπινο ή μηχανικό) δια ενός μέσου, στερεού ή ρευστού.

Για την περιγραφή ενός ηχητικού πεδίου, ως μεταβλητές συνήθως λαμβάνονται για τα μεν ρευστά η πίεση, επειδή είναι πιο εύκολο να μετρηθεί και για τα στερεά η επιτάχυνση, η οποία είναι διανυσματικό μέγεθος. Η ταχύτητα, η οποία είναι επίσης χρήσιμη για τον προσδιορισμό της έντασης του ηχητικού πεδίου, απαιτεί τρεις μετρήσεις για τον προσδιορισμό της, δεδομένου ότι είναι διανυσματικό μέγεθος.

Όσον αφορά την ταχύτητα των σωματιδίων, που είναι διαφορετική από τη μοριακή κίνηση Brown, και αυτή αναφέρεται σε μεταβολές γύρω από μία μόνιμη κατάσταση. Όταν διεγερθεί το ηχητικό κύμα, τα σωματίδια επανέρχονται στη μόνιμη κατάσταση.

Τα μεγέθη που εκφράζουν την ηχητική διαταραχή, δηλαδή το ηχητικό πεδίο, συνήθως αναλύονται σε ημιτονοειδείς συνιστώσες.

Στα ρευστά, μία μικρή συμπίεση, προκαλεί μία μικρή αύξηση της πυκνότητας (που ακολουθείται από μία μικρή μείωση τη πυκνότητας), μία μετατόπιση των σωματιδίων και ενδεχομένως μία μεταβολή της θερμοκρασίας.

Όλες αυτές οι μεταβλητές εκφράζονται με δύο όρους: Της μόνιμης κατάστασης και της διαταραχής, η οποία γενικά είναι μικρή σε σχέση με τη μόνιμη κατάσταση:

$$p_{total} = p_0 + p(\vec{r}, t)$$

$$\vec{v}_{total} = \vec{v}_0 + v(\vec{r}, t)$$

$$T_{total} = T_0 + T(\vec{r}, t)$$

$$\rho_{total} = \rho_0 + \rho(\vec{r}, t)$$

όπου:

$p_{total}, \vec{v}_{total}, T_{total}, \rho_{total} \dots$ οι ολικές τιμές της πίεσης, του διανύσματος της ταχύτητας των σωματιδίων, της θερμοκρασίας και της πυκνότητας,

$p_0, \vec{v}_0, T_0, \rho_0 \dots$ οι αντίστοιχες τιμές μόνιμης κατάστασης και

$p(\vec{r}, t), v(\vec{r}, t), T(\vec{r}, t), \rho(\vec{r}, t) \dots$ οι αντίστοιχες τιμές της διαταραχής ως συνάρτηση του διανύσματος θέσης και του χρόνου.

Το ιξώδες των ρευστών συνήθως είναι αρκετά χαμηλό και δεν παίζει ρόλο στην απόσβεση της μετάδοσης της ηχητικής διαταραχής.

Ιδιαίτερη σημασία αποκτά, τόσο στα ρευστά όσο και στα στερεά, η ύπαρξη στάσιμων κυμάτων.

Όταν οι μεταβολές είναι μικρές, για την μελέτη των ηχητικών κυμάτων είναι δυνατή η απλοποίηση των εξισώσεων, θεωρώντας ότι τα φαινόμενα είναι γραμμικά (γραμμική ακουστική). Σε περιπτώσεις όπως ισχυρών πεδίων, τυρβώδους ροής (π.χ. στην περίπτωση διάτρητου πλαισίου και σε εκείνη διέλευσης του κύματος από δίοδο μικρής διατομής) δεν ισχύει πλέον η γραμμικότητα.

Οι μεταβολές της πίεσης ενός αερίου, που προκαλούνται από ένα ηχητικό σήμα, γενικά είναι τόσο γρήγορες, ώστε να μην γίνονται ανταλλαγές θερμότητας μεταξύ του αερίου και των γειτονικών στοιχείων. Κατά συνέπεια,

ένα ηχητικό κύμα προκαλεί αδιαβατικές μεταβολές της θερμοκρασίας. Επομένως, η θερμοκρασία μπορεί να θεωρηθεί ως χαρακτηριστικό μέγεθος του ηχητικού κύματος.

Οι βασικοί νόμοι, οι οποίοι διέπουν τη μετάδοση του κύματος, είναι δυνατό να εκφραστούν με ένα αριθμό γενικών διαφορικών εξισώσεων:

Η διατήρηση της ορμής εκφράζεται από την σχέση,

$$\nabla p = -\rho_0 \frac{\partial \bar{v}}{\partial t}$$

όπου:

p ...η πίεση,

\bar{v} ...η ταχύτητα των σωματιδίων,

t ...ο χρόνος και

ρ_0 ...η πυκνότητα του αερίου μόνιμης κατάστασης.

Η διατήρηση της μάζας οδηγεί στην σχέση,

$$\rho_0 \operatorname{div}(\bar{v}) = -\frac{\partial \rho}{\partial t}$$

όπου:

ρ ...η πυκνότητα του αερίου, που είναι συνάρτηση του χρόνου.

Στις παραπάνω σχέσεις, έχει θεωρηθεί ότι οι μεταβολές της πίεσης και της πυκνότητας, που οφείλονται στο ηχητικό κύμα, είναι μικρές σε σχέση με τις τιμές της μόνιμης κατάστασης.

Αν ληφθεί υπόψη και η σχέση η οποία διέπει τη μεταβολή τη πίεσης, ως συνάρτηση των μεταβολών της θερμοκρασίας, σε συνδυασμό και με τις παραπάνω εξισώσεις, προκύπτει η εξίσωση,

$$c^2 \Delta p = \frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2}$$

όπου:

$$c^2 = k \frac{P_0}{\rho} \text{ και,}$$

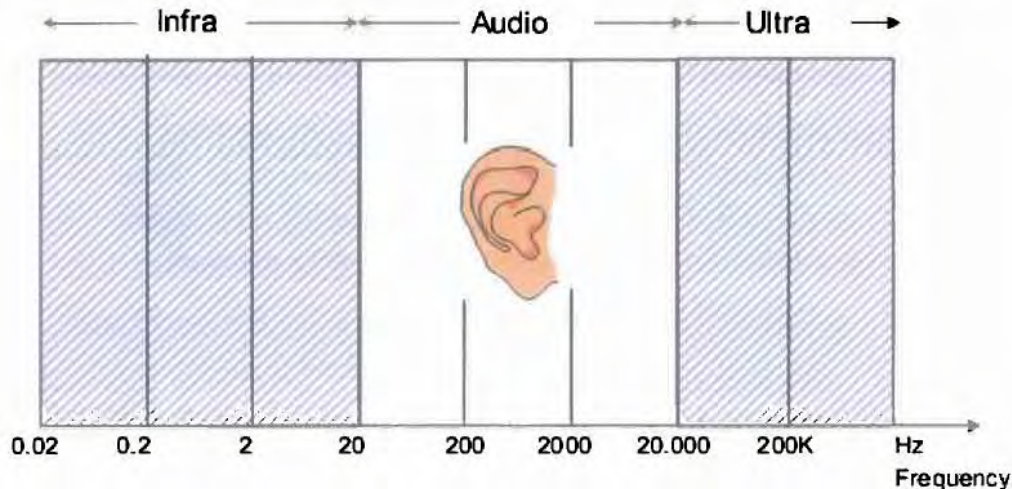
k ...ο συντελεστής αδιαβατικής μεταβολής ($k=1,4$ για τον αέρα).

Η διαφορική αυτή εξίσωση διέπει την μετάδοση του ηχητικού σήματος σε οποιαδήποτε γεωμετρική δομή και για το λόγο αυτό είναι πολύ σημαντική για όλα τα ηχητικά φαινόμενα. Ονομάζεται **κυματική εξίσωση** και καθορίζει όχι μόνο τις μεταβολές της πίεσης αλλά και εκείνες της πυκνότητας καθώς και της θερμοκρασίας.

1.10 Φυσικά χαρακτηριστικά του ήχου.

1.10.1 Η συχνότητα του ήχου

Η **συχνότητα** (f) ορίζει τον αριθμό των ολοκληρωμένων δονήσεων σε μια μονάδα χρόνου και μετράτε σε κύκλους ανά δευτερόλεπτο ή Hertz (Hz).



Εικόνα 1.6 / Ο άνθρωπος αντιλαμβάνεται συχνότητες από 20Hz έως 20kHz.

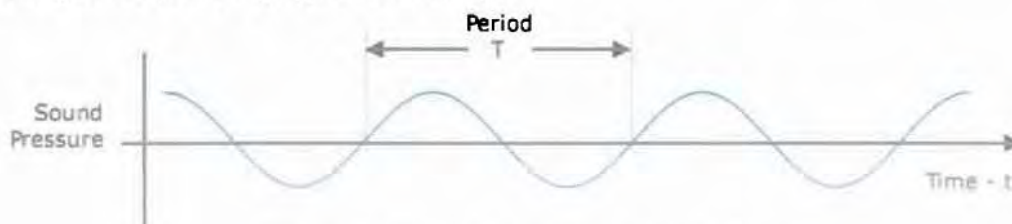
Ο άνθρωπος μπορεί να αντιληφθεί, να αφομοιώσει και κυρίως να ανεχθεί ένα ορισμένο φάσμα ήχων που βρίσκονται μέσα στην περιοχή συχνοτήτων από 16 έως 20.000 Hz (ακουστικό φάσμα). Οι ήχοι που έχουν συχνότητα μεγαλύτερη των 20.000 Hz ονομάζονται "υπέρηχοι" (ultra) ενώ εκείνοι με συχνότητα μικρότερη των 16 Hz "υπόηχοι" (infra). Οι υπόηχοι και οι υπέρηχοι, αν και δεν γίνονται αντιληπτοί από τον άνθρωπο, μπορεί να έχουν βλαπτική επίδραση στην υγεία του.

Διευκρινίζεται ωστόσο ότι οι περισσότεροι ήχοι δεν έχουν μια μόνο συχνότητα αλλά αποτελούνται από ένα φάσμα συχνοτήτων.

Τέλος περίοδος ενός κύματος (T) ονομάζεται ο αντίστροφος λόγος της συχνότητας.

$$T = \frac{2 \cdot \pi}{\omega} = \frac{1}{f}$$

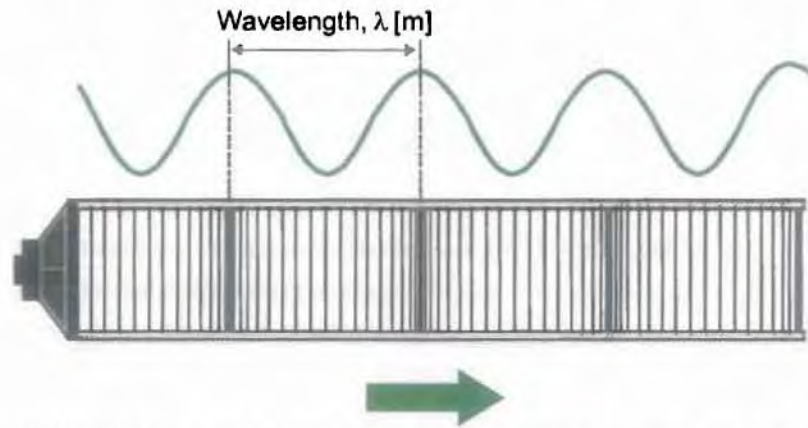
Η περίοδος ενός κύματος εκφράζει τον χρόνο που απαιτείται για ολοκληρωθεί μία πλήρης ταλάντωση.



Εικόνα 1.7 / Η περίοδος ενός επίπεδου κύματος.

1.10.2 Το μήκος κύματος του ήχου

Σαν **μήκος κύματος** (λ) ορίζεται η περίοδος της ταλάντωσης του ηχητικού κύματος στον χώρο.



Εικόνα 1.8 / Η διάδοση του κύματος στον χώρο και ο ορισμός του μήκους κύματος.

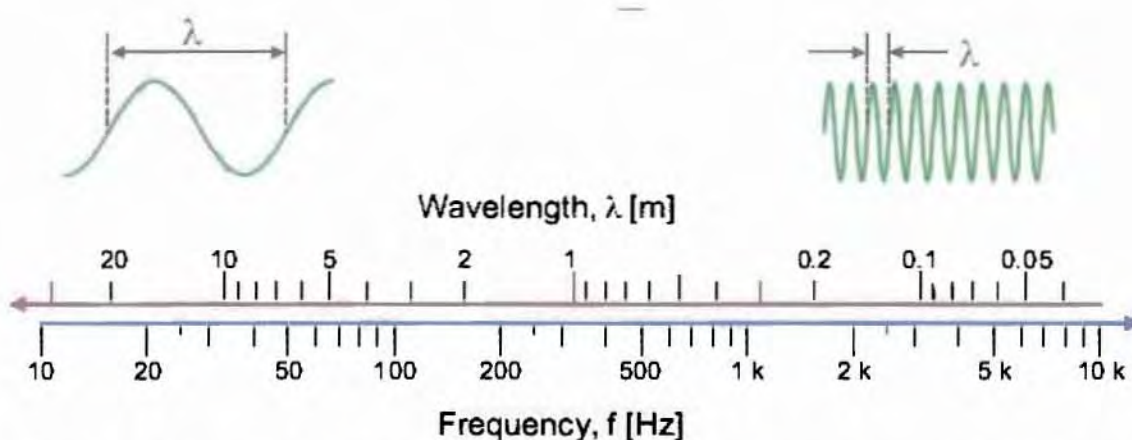
Μεταξύ του μήκους κύματος και της συχνότητας ισχύει η σχέση

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

όπου:

c ...είναι η ταχύτητα του ήχου (m/s).

Από την σχέση αυτή βλέπουμε ότι όσο πιο υψηλή είναι μία συχνότητα τόσο πιο μικρό είναι το μήκος του κύματος και το αντίστροφο.



Εικόνα 1.9 / Φαίνεται καθαρά ότι όσο πιο υψηλή είναι μία συχνότητα τόσο πιο μικρό είναι το μήκος του κύματος.

1.10.3 Η ταχύτητα μετάδοσης του ήχου.

Η **ταχύτητα** (c) μετάδοσης του ήχου είναι η ταχύτητα μετάδοσης της διαταραχής της πίεσης. Όταν ο ήχος μεταδίδεται σε διαμήκη κύματα σε οποιοδήποτε μέσο, αυτή εξαρτάται από την ακαμψία (D) και την πυκνότητα (ρ) του μέσου σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$c = \sqrt{\frac{D}{\rho}}$$

Η ταχύτητα αυτή είναι ανεξάρτητη από τη συχνότητα τη διαταραχής. Αυτό δεν ισχύει για τα στάσιμα κύματα.

Για τα διαμήκη κύματα στα στερεά, η ακαμψία εξαρτάται από το λόγο των διαστάσεων ως προς το μήκος κύματος. Αν οι διαστάσεις του στερεού είναι αρκετά μεγάλες, τότε η ακαμψία υπολογίζεται ανεξάρτητα από τις διαστάσεις και το μήκος κύματος. Αν είναι μικρές, σε σχέση με το μήκος κύματος, τότε η ταχύτητα διάδοσης του ήχου στα στερεά είναι,

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

όπου:

E ...το μέτρο του Young.

Στα ρευστά, η ακαμψία είναι το αντίστροφο της συμπιεστότητας. Για τα υγρά και τα αέρια ισχύει,

$$D = -\frac{V}{(\partial V / \partial p)}$$

Στην περίπτωση των αερίων η ταχύτητα του ήχου εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Με τη χρήση της εξίσωσης της αδιαβατικής μεταβολής, η ταχύτητα του ήχου στα αέρια υπολογίζεται από την σχέση,

$$c = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}}$$

όπου:

γ ...είναι ο συντελεστής ισεντροπικής μεταβολής ,

P ...η πίεση και

ρ ...η πυκνότητα.

1.11 Βασικά ηχητικά μεγέθη και μονάδες

1.11.1 Μέση τετραγωνική τιμή ^[18].

Η μέση τιμή των ημιτονοειδών συναρτήσεων του χρόνου είναι ίση με το μηδέν εφόσον ο χρόνος μέτρησης της μέσης τιμής είναι πολλαπλάσιο της περιόδου. Στα μεγέθη, που εκφράζονται από τις συναρτήσεις αυτές, συχνά λαμβάνεται υπόψη η μέση τετραγωνική τιμή, που συνδέεται και με την ισχύ. Η μέση τετραγωνική τιμή μιας συνάρτησης του χρόνου από t_1 έως t_2 είναι:

$$\overline{f^2} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} f(t) f(t) dt$$

και για ημιτονοειδή συνάρτηση της μορφής $f(t) = \alpha_0 \eta \mu(\omega t + \varphi)$ σε διάστημα πολλαπλάσιο της περιόδου υπολογίζεται :

$$F_0 = \alpha_0 / \sqrt{2}$$

Στα μεγέθη της ηχητική πίεσης και της ταχύτητας των σωματιδίων είναι σύνηθες να λαμβάνεται η μέση τετραγωνική τιμή κατά την διάρκεια του μέτρησης ή παρατήρησης.

Γενικότερα, ως μέση τιμή του γινομένου δύο συναρτήσεων του χρόνου κατά το χρονικό διάστημα από t_1 έως t_2 , ορίζεται το :

$$\overline{f^2} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} f_1(t) f_2(t) dt$$

Οι μέσες τετραγωνικές τιμές και οι μέσες τιμές των γινομένων χρησιμοποιούνται συχνά για τη μέτρηση των διαφόρων ηχητικών μεγεθών.

1.11.2 Ηχητική ένταση ^[18].

Ηχητική ένταση (sound intensity) σε ένα ορισμένο σημείο σε μία δεδομένη χρονική στιγμή είναι η πυκνότητα της ισχύος δια μέσου μιας στοιχειώδους επιφάνειας γύρω από το σημείο αυτό και κάθετης προς το διάνυσμα της ταχύτητας των σωματιδίων στο σημείο αυτό (δηλαδή ο λόγος της ισχύος προς το εμβαδόν της επιφάνειας). Για την πυκνότητα της ισχύος που μεταδίδεται προς άλλες κατευθύνσεις, λαμβάνεται η αντίστοιχη προβολή.

Αποδεικνύεται ότι, ως συνάρτηση του διανύσματος θέσης \mathbf{r} και του χρόνου \mathbf{t} , δίνεται από τη σχέση :

$$\bar{I}(\mathbf{r}, t) = p(\mathbf{r}, t) \cdot \bar{\mathbf{v}}(\mathbf{r}, t)$$

όπου:

p ...η πίεση,

v ...το διάνυσμα της ταχύτητας των σωματιδίων.

Η ένταση του ηχητικού πεδίου είναι μία διανυσματική ποσότητα, η οποία προσδιορίζεται ως το γινόμενο της ηχητικής πίεσης και της συνιστώσας της ταχύτητας των σωματιδίων στην κατεύθυνση του διανύσματος της έντασης. Είναι ένα μέτρο του ρυθμού με τον οποίο η ισχύς μεταδίδεται σε έναν μέσον δια του ηχητικού κύματος δια μίας επιφάνειας κάθετης προς το διάνυσμα της έντασης.

Στην ειδική περίπτωση ενός περιοδικού κύματος (και ακόμη ειδικότερα ημιτονοειδούς) η μετάδοση της ισχύς (και επομένως η ένταση) είναι επίσης περιοδική (ή αντίστοιχα ημιτονοειδής). Στην απλή αυτή περίπτωση κυμάτων, χρησιμοποιείται συνήθως η μέση τιμή του γινομένου και η μέση τετραγωνική τιμή (ως προς τον χρόνο), όπως ορίσθηκε στην παράγραφο 2.1.

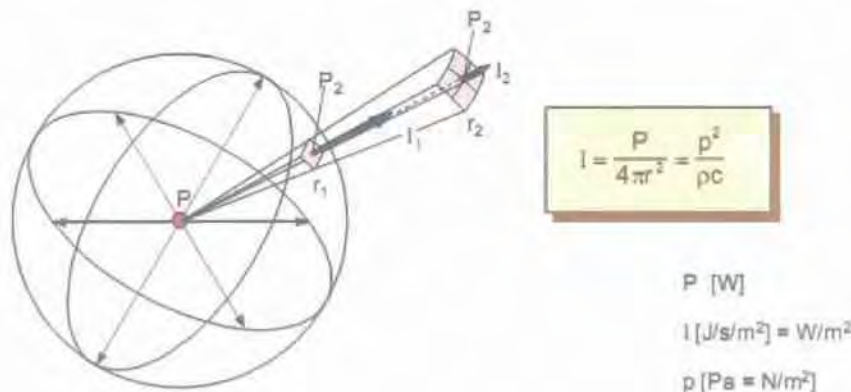
Οι ηχητικές πηγές οι οποίες εκπέμπουν σε ελεύθερο πεδίο, για αποστάσεις αρκετά μεγάλες (δηλαδή μεγαλύτερες από το δεκαπλάσιο του μεγαλύτερου μήκους κύματος του ήχου), το κύμα τους μπορεί να θεωρηθεί ως επίπεδο. Στην περίπτωση αυτή, είναι απόλυτα γνωστή η κατεύθυνσή του διανύσματος. Επομένως, εξετάζεται μόνο η αριθμητική τιμή του. Η τετραγωνική μέση (ως προς τον χρόνο) τιμή της ηχητικής έντασης του ήχου δίνεται από την σχέση :

$$I = \overline{p \cdot v} = \frac{\overline{p^2}}{\rho_0 c}$$

όπου:

$\overline{p \cdot v}$, $\overline{p^2}$ είναι οι αντίστοιχα τετραγωνικές μέσες τιμές, ρ_0 η πυκνότητα του αέρα και c η ταχύτητα του ήχου στον αέρα.

Η μονάδα μέτρησης της ηχητικής έντασης είναι το $[w/m^2]$.



Εικόνα 1.10 / Το διάνυσμα της ηχητικής έντασης, σε συνθήκες ελεύθερου πεδίου, περιγράφει την ποσότητα και την κατεύθυνση της ροής της ακουστικής ενέργειας σε ένα συγκεκριμένο σημείο του πεδίου.

Για την μέτρηση της, όμως, συνήθως χρησιμοποιείται ο λόγος I/I_0 όπου I_0 είναι μία ένταση αναφοράς, η οποία αντιστοιχεί περίπου στην ελάχιστη ένταση που γίνεται αντιληπτή από την ανθρώπινη ακοή και η τιμή της είναι $I_0 = 10^{-12} \text{ w/m}^2$.

Για την μέτρηση των ηχητικών εντάσεων χρησιμοποιείται το αδιάστατο μέγεθος:

$$L_I = 10 \log_{10} \left(\frac{I}{I_0} \right)$$

το οποίο ονομάζεται **Στάθμη Ηχητικής Έντασης** και η μονάδα μέτρησής της είναι το [dB].

1.11.3 Ηχητική ισχύς ^[18].

Όπως ήδη αναφέρθηκε, η μετάδοση ηχητικού σήματος συνεπάγεται και μετάδοση ηχητικής ισχύος. Η πυκνότητα ροής της ισχύος αυτής εκφράζεται από την ένταση. Σύμφωνα με τον ορισμό της ηχητικής έντασης, ηχητική ισχύς μιας πηγής είναι το επιφανειακό ολοκλήρωμα

$$W = \int_S \vec{I} \cdot \vec{n} \cdot dS$$

σε οποιαδήποτε κλειστή επιφάνεια η οποία περιβάλλει την πηγή, όπου \vec{n} το μοναδιαίο κάθετο διάνυσμα προς το στοιχείο dS της επιφάνειας.

Εάν η ηχητική πηγή εκπέμπει σφαιρικά κύματα (ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις), λαμβάνεται μία σφαιρική επιφάνεια S , οπότε η ηχητική ισχύς δίνεται από την σχέση

$$W = 4\pi r^2 I$$

Η μονάδα μέτρησης της ηχητικής ισχύος είναι το watt [w].

Για την μέτρηση της, όμως, συνήθως χρησιμοποιείται ο λόγος

$$W/W_0$$

όπου:

W_0 ...είναι η ισχύς αναφοράς, η οποία αντιστοιχεί στη I_0 και η τιμή της είναι, $W_0 = 10^{-12} \text{ w}$.

Όπως και για την μέτρηση των ηχητικών εντάσεων, χρησιμοποιείται το αδιάστατο μέγεθος:

$$L_w = 10 \log_{10} \left(\frac{W}{W_0} \right)$$

το οποίο ονομάζεται **Στάθμη Ηχητικής Ισχύος** και η μονάδα μέτρησής της είναι το [dB].

1.11.4 Ηχητική πίεση ^[18].

Από τις εξισώσεις που αναπτύχθηκαν στις δύο προηγούμενες παραγράφους μπορούμε να φτάσουμε στο συμπέρασμα ότι,

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{\bar{I}_1}{I_2} = \frac{P_1^2}{P_2^2}$$

Για τον ορισμό του αδιάστατου μεγέθους της **Στάθμης Ηχητικής Πίεσης** χρησιμοποιείται το τετράγωνο της μέσης τετραγωνικής τιμής της:

$$L_p = 10 \log_{10} \left(\frac{P_1^2}{P_0^2} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{P_1}{P_0} \right)$$

όπου:

$p_0 \dots$ είναι μία πίεση αναφοράς, $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ N/m}^2 = 20 \mu\text{Pa}$.

Μονάδα μέτρησής της είναι το [dB].

Αξίζει να σημειωθεί ότι στην υποβρύχια ακουστική χρησιμοποιείται η ίδια εξίσωση για τον υπολογισμό της ηχητικής πίεσης αλλά η τιμή της πίεσης αναφοράς είναι 1μPa.

1.11.5 Χρήσιμες σχέσεις για τον υπολογισμό των L_p , L_w και L_I ^[10].

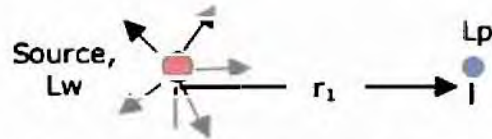
Δύο αρκετά χρήσιμες σχέσεις που αφορούν τα μεγέθη L_p , L_w και L_I , η απόδειξη των οποίων δεν εξυπηρετεί ιδιαίτερα τους σκοπούς της παρούσας διπλωματικής, είναι οι παρακάτω:

$$L_I = L_p + 26 - 10 \log_{10} (\rho_0 c)$$

&

$$L_w = L_p + 20 \log_{10} r + 11$$

Η πρώτη σχέση επιτρέπει τον υπολογισμό της στάθμης της ηχητικής έντασης γνωρίζοντας απλά την στάθμη της ηχητικής πίεσης, ενώ με χρήση της δεύτερης εξίσωσης προκύπτει η τιμή της στάθμης της ηχητικής ισχύος της πηγής γνωρίζοντας την στάθμη της ηχητικής πίεσης σε μία απόσταση r από την πηγή.



Εικόνα 1.11 / Η στάθμη της ηχητικής πίεσης σε απόσταση r_1 από την πηγή

Μερικές εξίσου χρήσιμες σχέσεις είναι οι εξής:

$$L_w = 10 \log_{10} W + 120$$

&

$$L_I = 10 \log_{10} I + 120$$

Τέλος, στην περίπτωση που υπάρχουν παραπάνω από μία πηγή θορύβου στον χώρο, για να υπολογίσουμε την τιμή της συνολικής ηχητικής πίεσης χρησιμοποιούμε τον παρακάτω τύπο:

$$L_{\text{π}} = 10 \log_{10} \left(10^{L_1/10} + 10^{L_2/10} \dots \dots \dots + 10^{L_N/10} \right)$$

όπου:

N ...είναι ο αριθμός των ανεξάρτητων πηγών θορύβου.

Η συγκεκριμένη σχέση είναι ιδιαίτερα χρήσιμη γιατί μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τον υπολογισμό της στάθμης του θορύβου φόντου (background noise level).

1.11.6 Ισοδύναμη Στάθμη Ηχητικής Πίεσης ^[18]

Επειδή η στάθμη της ηχητικής πίεσης δεν είναι, γενικά σταθερή κατά την διάρκεια ενός χρονικού διαστήματος, είναι απαραίτητη η γνώση της στατιστικής κατανομής της στάθμης κατά τη διάρκεια του διαστήματος αυτού. Το διάστημα αυτό μπορεί να είναι, π.χ. 1 λεπτό, 1 ώρα, 8 ώρες, διάρκεια νύχτας, διάρκεια μέρας, 24 ώρες.

Ένα μέγεθος που χρησιμοποιείται συχνά είναι η **Ισοδύναμη Στάθμη Ηχητικής Πίεσης** [L_{eq}] και είναι η μέση τετραγωνική τιμή για το εξεταζόμενο διάστημα. Η τιμή του δίνεται από την σχέση:

$$L_{eq} = 10 \log_{10} \frac{p_{eq}^2}{p_0^2} = 10 \log_{10} \frac{1}{p_0^2} \int_{t_1}^{t_2} p \cdot p dt = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} 10^{0.1L} dt \right)$$

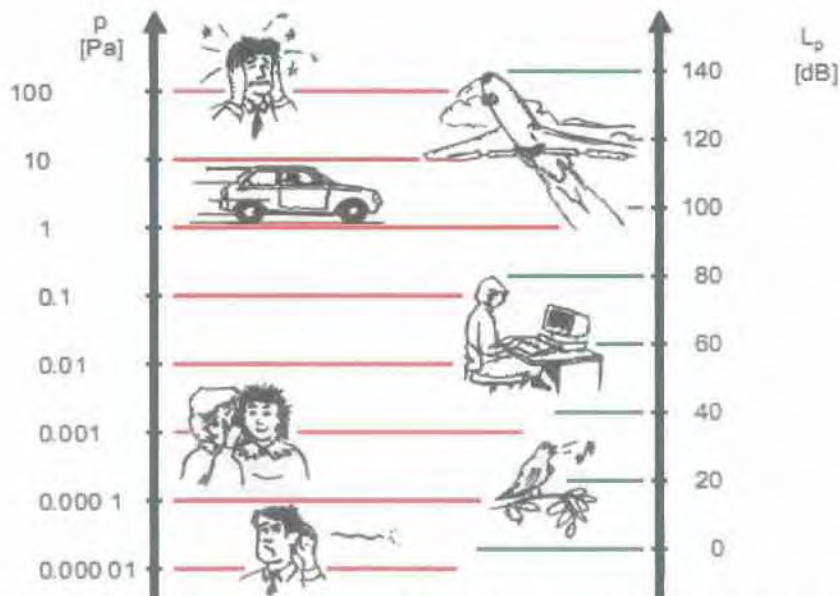
Ο υπολογισμός του είναι εξαιρετικά δυσχερής όμως υπάρχουν μετρητικά όργανα (ηχόμετρα), τα οποία υπολογίζουν απευθείας την τιμή του L_{eq} κατά το διάστημα της μέτρησης.

Το μέγεθος αυτό μπορεί να οριστεί και να μετρηθεί είτε σε ζώνες συχνοτήτων είτε συνολικά σε dB(A).

Η ισοδύναμη στάθμη ηχητικής πίεσης είναι ένα μέγεθος το οποίο δίνει μια σαφή εικόνα για την στάθμη του θορύβου και μετριέται εύκολα με απλές συσκευές. Επίσης, οι μετρήσεις αυτές έχουν αρκετά καλή επαναληψιμότητα. Για τους λόγους αυτούς χρησιμοποιείται πολύ στην πράξη όπως στις μετρήσεις και εκτιμήσεις μέσης στάθμης σε ένα χώρο, του κυκλοφοριακού θορύβου, του περιβαλλοντικού θορύβου, του αεροδυναμικού θορύβου κ.α. Αξιοσημείωτο είναι ότι πολλές προδιαγραφές ποιότητας, ευρωπαϊκές αλλά και αμερικάνικες, ορίζουν το ανώτατο όριο θορύβου βάση της ισοδύναμης στάθμης της ηχητικής πίεσης.

1.11.7 Decibel [dB]

Όπως ήδη έχει αναφερθεί, η βασική μονάδα μέτρησης του ήχου είναι το decibel (dB). Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα των decibel (dB) σε σχέση με το Pascal (Pa), που είναι μία άλλη μονάδα μέτρησης της ηχητικής πίεσης, φαίνεται στην εικόνα 1.12.



Εικόνα 1.12 / Στην αριστερή κλίμακα δίνονται οι τιμές της ηχητικής πίεσης σε Pascal ενώ στην δεξιά δίνονται οι αντίστοιχες σε Decibel.

Είναι φανερό ότι η τιμή της ηχητικής πίεσης, εκφρασμένη σε (Pa), είναι αρκετά μεγάλη με αποτέλεσμα να καθιστά δύσκολη οποιαδήποτε μαθηματική επεξεργασία της, ενώ όταν είναι εκφρασμένη (dB) είναι σαφώς πιο «κομψή» και μπορεί να επεξεργαστεί πιο εύκολα.

Αξιοπρόσεχτο είναι ότι η κλίμακα των decibel είναι λογαριθμική και έτσι δεν υπάρχει καμία γραμμική συσχέτιση μεταξύ της έντασης του θορύβου και της αντίληψής του από τον άνθρωπο. Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται καθαρά πως αντιλαμβάνεται ο άνθρωπος της αλλαγές στην ένταση του ήχου.

Αύξηση της έντασης του ήχου κατά dB	Επίπεδο αντίληψης της διαφοράς
+3 (dB)	Οριακά αντιληπτό
+5 (dB)	Αρκετά αντιληπτό
+10 (dB)	Διπλάσια δυνατό
+15 (dB)	Πάρα πολύ αντιληπτό
+20 (dB)	Τετραπλάσια δυνατό

ΠΙΝΑΚΑΣ 1.1 / Επίπεδα αντίληψης των εναλλαγών της στάθμης του θορύβου.

1.11.8 Μετατροπή Pa σε dB

1.11.8.1 Με χρήση της εξίσωσης του L_p

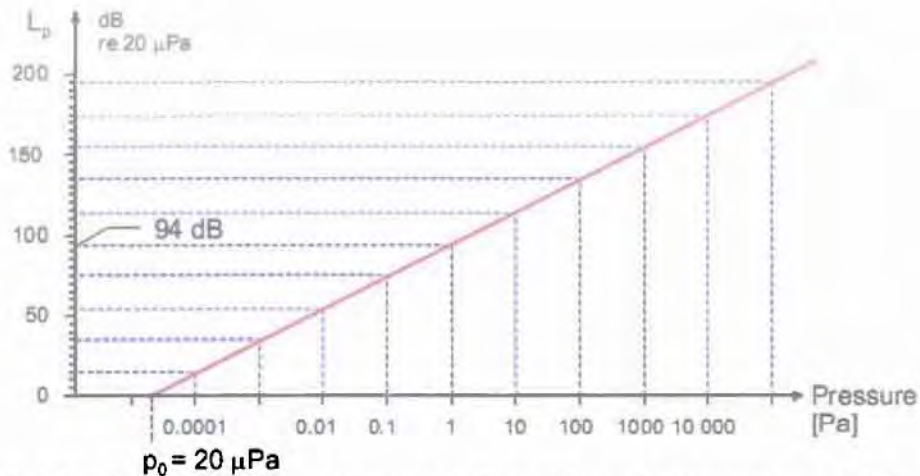
Η εξίσωση της L_p , στάθμη ηχητικής πίεσης, είναι η παρακάτω,

$$L_p = 20 \cdot \log_{10} \frac{P}{P_0}$$

στην οποία αντικαθιστώντας το p_0 με 20μPa και το p με την τιμή της ζητούμενης ηχητικής πίεσης σε (Pa), βρίσκουμε την αντίστοιχη τιμή σε decibel.

1.11.8.2 Με χρήση διαγραμμάτων

Υπάρχουν κατάλληλα διαγράμματα τα οποία μας βοηθάνε να κάνουμε την μετατροπή απευθείας χωρίς μαθηματικούς υπολογισμούς. Ένα από αυτά είναι και το διάγραμμα 1.1.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 1.1 / Διάγραμμα μετατροπής Pa σε dB, με πίεση αναφοράς, $p_0=20\mu\text{Pa}$.

1.11.8.3 Με χρήση πινάκων

Τέλος, η μετατροπή μπορεί να γίνει με την χρήση κατάλληλων πινάκων. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι συγκεκριμένοι πίνακες λειτουργούν εξίσου καλά και για θετικές αλλά και για αρνητικές μεταβολές της ηχητικής πίεσης σε (dB). Εάν το κλάσμα της πίεσης (p/p_0) είναι μικρότερο της μονάδας, οι τιμές είναι αρνητικές, ενώ αν είναι μεγαλύτερο της μονάδας, οι τιμές είναι θετικές. Ένας τέτοιος πίνακας φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.

Pressure Ratio	- db +	Pressure Ratio	Pressure Ratio	- db +	Pressure Ratio
1.00	0.0	1.000	0.501	6	1.995
0.989	0.1	1.012	0.447	7	2.239
0.977	0.2	1.023	0.398	7	2.512
0.966	0.3	1.035	0.355	9	2.818
0.955	0.4	1.047	0.316	10	3.162
0.944	0.5	1.059	0.251	12	3.981
0.933	0.6	1.072	0.200	14	5.012
0.923	0.7	1.084	1.158	16	6.310
0.912	0.8	1.096	0.126	18	7.943
0.902	0.9	1.109	0.100	20	10.000
0.891	1.0	1.122	0.0316	30	31.62
0.841	1.5	1.189	0.0100	40	100
0.794	2.0	1.259	0.0032	50	316.2
0.708	3.0	1.413	10^{-3}	60	10^3
0.631	4.0	1.585	10^{-4}	80	10^4
0.562	5.0	1.778	10^{-5}	100	10^5

ΠΙΝΑΚΑΣ 1.2 / Πίνακας μετατροπής της ηχητικής πίεσης dB με χρήση του λόγου πίεσης.

1.12 Ηχητικές Πηγές και Ηχητικά Πεδία ^[13]

1.12.1 Σημειακή πηγή (Point Source)

Πρόκειται για μία σφαιρική πηγή, μικρών διαστάσεων, η οποία εκπέμπει ομοιόμορφα την ακουστική ισχύ προς όλες τις κατευθύνσεις. Η τιμή της στάθμης της ηχητικής πίεσης δίνεται από την εξίσωση:

$$L_p = L_w - 20 \log_{10} r - 11 \text{ (dB)}$$

Παρατηρώντας την εξίσωση εύκολα προκύπτει το συμπέρασμα ότι, διπλασιασμός της απόστασης από την πηγή οδηγεί σε μείωση της στάθμης της ηχητικής πίεσης κατά 6 (dB).



Εικόνα 1.13 / Σημειακή Πηγή.

1.12.2 Γραμμική πηγή (Line source)

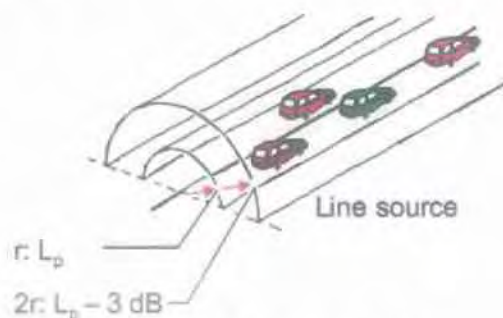
Πρόκειται για μία πηγή της οποίας οι δύο διαστάσεις της είναι πολύ μικρές ως προς την τρίτη της διάσταση, την απόσταση από το σημείο μέτρησης και ως προς τα μήκη κύματος του ήχου που εκπέμπει. Κλασικό παράδειγμα γραμμικής πηγής είναι ο αυτοκινητόδρομος πυκνής κυκλοφορίας.

Η μετάδοση του ήχου από την πηγή είναι κυλινδρική και η τιμή της στάθμης της ηχητικής πίεσης δίνεται από την εξίσωση:

$$L_p = L_{w0} - 10 \log_{10} r - 8 \text{ (dB)}$$

όπου L_{w0} : Η στάθμη ισχύος ανά μονάδα μήκους

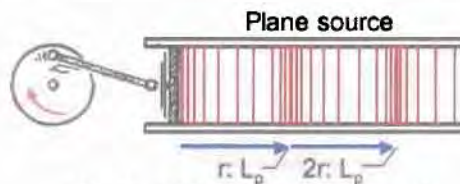
Παρατηρώντας την εξίσωση εύκολα προκύπτει το συμπέρασμα ότι, διπλασιασμός της απόστασης από την πηγή οδηγεί σε μείωση της στάθμης της ηχητικής πίεσης κατά 3 (dB).



Εικόνα 1.14 / Γραμμική πηγή.

1.12.3 Επιφανειακή πηγή (Plane source)

Μία επιφανειακή πηγή μπορεί κανείς να την παρομοιάσει με το σύστημα της εικόνας 2.3.3 όπου το πιστόνι συμπιέζει τον αέρα μέσα στον σωλήνα με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένα επίπεδο κύμα. Υποθέτοντας ότι δεν υπάρχουν απώλειες από τα τοιχώματα του σωλήνα, δηλαδή δεν υπάρχουν απώλειες στην ακουστική ενέργεια του κύματος, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η στάθμη της ηχητικής πίεσης του θορύβου που εκπέμπεται από μία επιφανειακή πηγή είναι ανεξάρτητη της απόστασης και παραμένει σταθερή κατά την διάδοσή του για μία μεγάλη επιφάνεια γύρω από την πηγή .



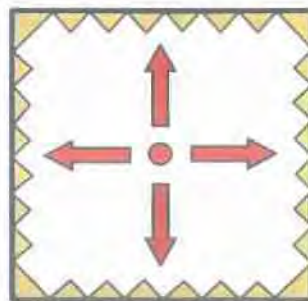
Εικόνα 1.15 / Επιφανειακή πηγή

1.13 Ανηχοϊκός και αντηχητικός θάλαμος

Η ηχητική ενέργεια δεν μεταδίδεται πάντα ελεύθερα από την πηγή της. Όταν ένα ηχητικό κύμα μεταδίδεται σε ένα δωμάτιο κατά την πρόσπτωσή του σε μία επιφάνεια, ένα τμήμα του μεταδίδεται δια μέσου της επιφάνειας, ένα τμήμα του απορροφάτε από αυτήν και ένα τμήμα του ανακλάται.

1.13.1 Ανηχοϊκός θάλαμος (Anechoic chamber)

Πρόκειται για ένα θάλαμο του οποίου όλες οι επιφάνειες έχουν υψηλή απορροφητικότητα, έτσι όταν ο ήχος μεταδίδεται μέσα σε αυτόν δεν υπάρχουν ανακλάσεις από τα τοιχώματα και μεταδίδεται από την πηγή όπως όταν η πηγή βρίσκεται στο ελεύθερο πεδίο (free field).

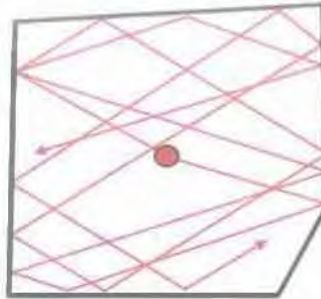


Εικόνα 1.16 / Μετάδοση του ήχου μέσα στον ανηχοϊκό θάλαμο

1.13.2 Αντηχητικός θάλαμος (Reverberant chamber)

Πρόκειται για ένα θάλαμο του οποίου όλες οι επιφάνειες έχουν μικρή απορροφητικότητα, έτσι όλη η ηχητική ενέργεια του ήχου που μεταδίδεται

μέσα στον θάλαμο αντήχησης, ανακλάται και κατανέμεται τυχαία στον χώρο δημιουργώντας ένα διάχυτο ηχητικό πεδίο (diffuse field).



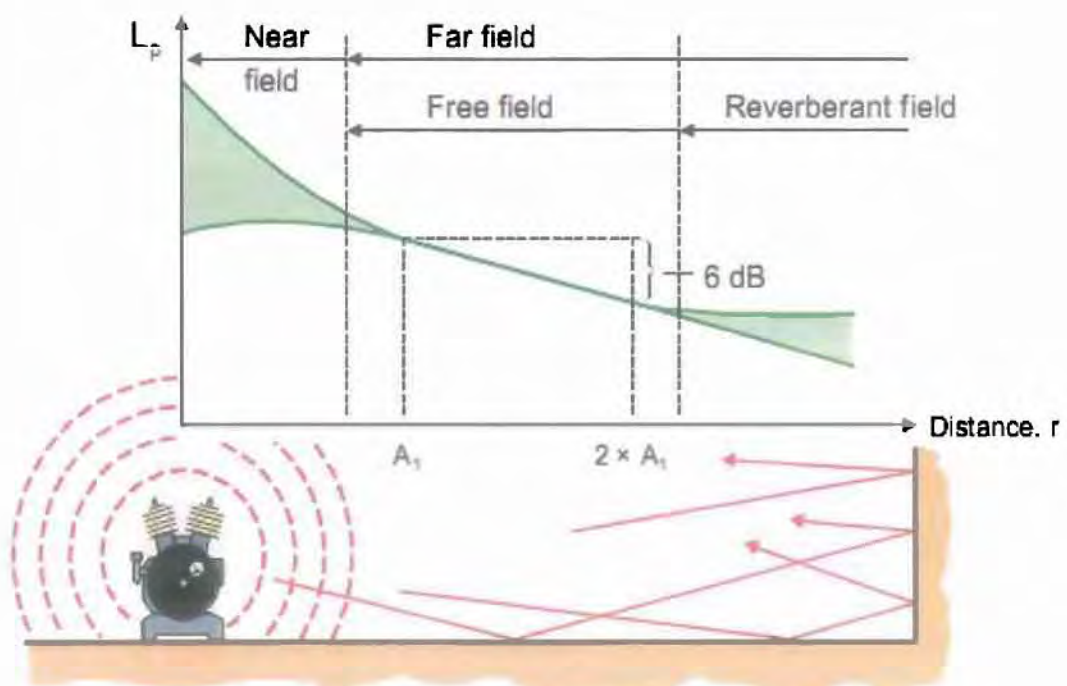
Εικόνα 1.17 / Μετάδοση του ήχου μέσα στον θάλαμο αντήχησης

1.14 Ηχητικά πεδία

Σε πρακτικές εφαρμογές οι μετρήσεις πραγματοποιούνται σε δωμάτια τα οποία δεν είναι ούτε ανηχοϊκά, ούτε αντηχητικά, αλλά κάτι ενδιάμεσο. Έτσι γίνεται δύσκολο να προβλέψουμε την θέση του ηχομέτρου από την ηχητική πηγή, της οποίας θέλουμε να μετρήσουμε τον θόρυβο που παράγει.

Ένας πρακτικός κανόνας που εφαρμόζεται για αυτές τις περιπτώσεις είναι να χωρίζεται η περιοχή γύρω από την ηχητική πηγή σε τέσσερα πεδία :

- Κοντινό πεδίο (Near field)
- Μακρινό πεδίο (Far field)
- Ελεύθερο πεδίο (Free field)
- Αντηχητικό πεδίο (Reverberant field)



Εικόνα 1.18 / Τα τέσσερα πεδία γύρω από την ηχητική πηγή.

Το **κοντινό πεδίο (near field)** δημιουργείται στην περιοχή πολύ κοντά στην μηχανή, όπου η τιμή της στάθμης της ηχητικής πίεσης για μεταβολές της απόστασης r μέσα στο πεδίο μειώνεται ελάχιστα. Το μήκος του πεδίου είναι μικρότερο από το μήκος κύματος της χαμηλότερης συχνότητας του ήχου που παράγεται από την μηχανή, ή μικρότερο από την διπλάσια τιμή της μεγαλύτερης διαμέτρου της μηχανής. Γενικά καλό είναι να αποφεύγονται οι μετρήσεις μέσα στο πεδίο αυτό.

Το **μακρινό πεδίο (far field)**, χωρίζεται σε δύο πεδία, το ελεύθερο και το αντηχητικό πεδίο.

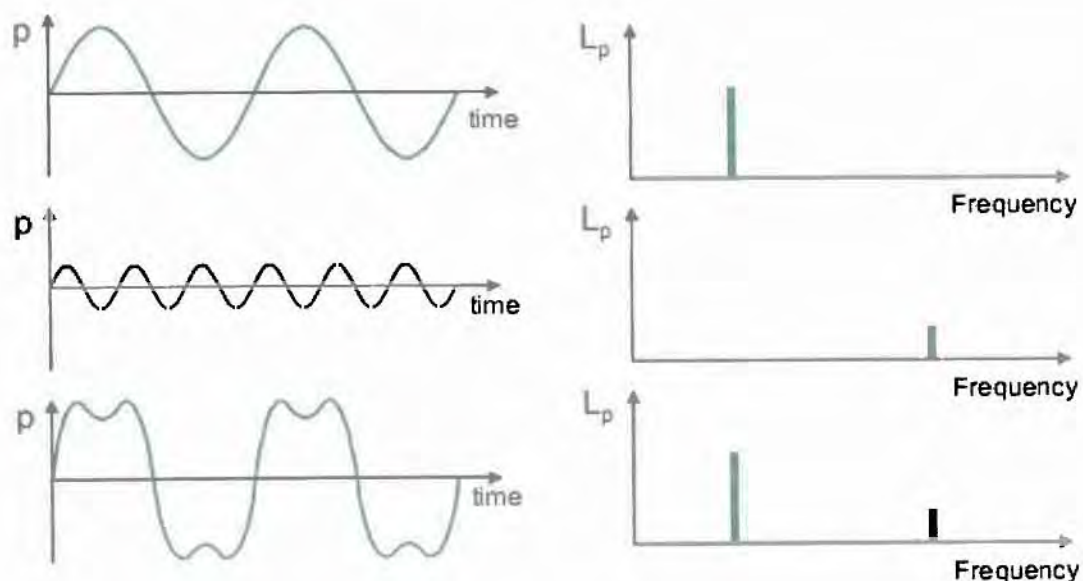
Στο **ελεύθερο πεδίο (free field)** ο ήχος μεταδίδεται σαν από σημειακή πηγή σε εξωτερικό χώρο, δηλαδή δεν υπάρχει κάποια επιφάνεια ώστε να έχουμε ανάκλαση του ήχου κατά την διάδοσή του. Άρα διπλασιασμός της απόστασης από την πηγή συνεπάγεται μείωση της στάθμης της ηχητικής πίεσης κατά 6 (dB).

Στο **αντηχητικό πεδίο (reverberant field)** κυριαρχούν ανακλάσεις του ήχου πάνω στον τοίχο του δωματίου ή και σε άλλα αντικείμενα, οι οποίες μπορεί να έχουν την ίδια ένταση με τον θόρυβο που παράγει η μηχανή.

1.15 Φασματική Ανάλυση του Ήχου ^[14 & 18]

1.15.1 Εισαγωγή

Οποιοσδήποτε ήχος, περιοδικός ή μη περιοδικός, μπορεί να θεωρηθεί ως αποτελούμενος από συνιστώσες διαφόρων συχνοτήτων. Είναι πρακτικά αδύνατο να δημιουργηθεί ένας καθαρός τόνος. Οι τόνοι χρησιμοποιούνται ως θεωρητικά εργαλεία για την μελέτη της συμπεριφοράς των φυσικών ηχητικών κυμάτων.

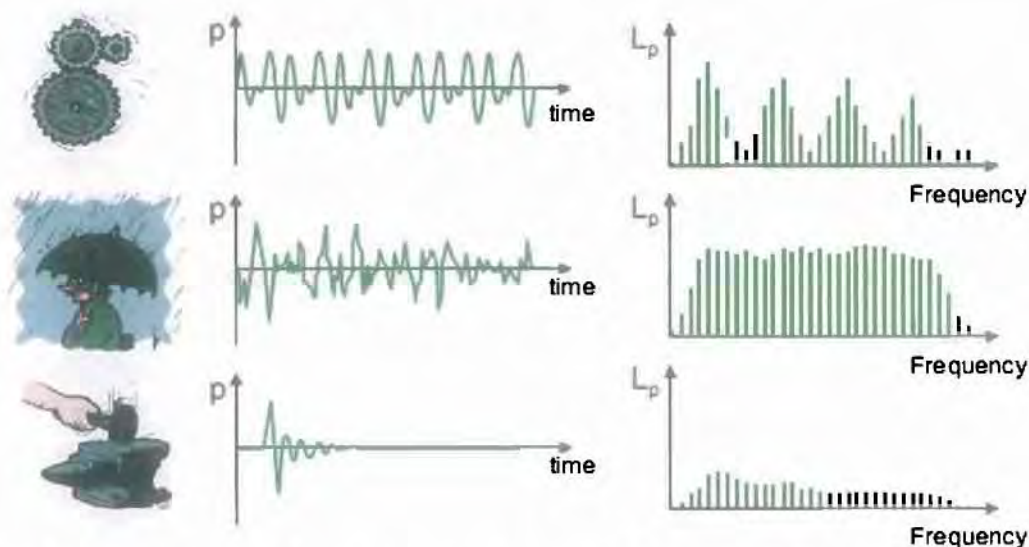


Εικόνα 1.19 / Τα δύο πρώτα σήματα είναι καθαροί τόνοι, ενώ το τρίτο είναι η σύνθεση αυτών των δύο τόνων. Στα δεξιά τα τρία σήματα έχουν αναλυθεί στο πεδίο των συχνοτήτων.

1.15.2 Μετασχηματισμός Fourier

Η μετάβαση από το επίπεδο του χρόνου στο επίπεδο των συχνοτήτων γίνεται με χρήση του μετασχηματισμού Fourier, και συνήθως χρησιμοποιείται ο ταχύς μετασχηματισμός Fourier, FFT (Fast Fourier Transform). Ο μετασχηματισμός αυτός γίνεται ψηφιακά από το εγκατεστημένο λογισμικό στο ηχόμετρο και δίνει μία σαφή εικόνα της φασματικής κατανομής του ήχου.

Η φασματική ανάλυση γίνεται σε ένα συγκεκριμένο σημείο του ηχητικού πεδίου και για ένα διάστημα παρατήρησης που καθορίζεται από τον χρήστη. Το εύρος του φάσματος που ενδιαφέρει, εξαρτάται από το ηχητικό μέγεθος, το οποίο εξετάζεται.



Εικόνα 1.20 / Η ανάλυση του θορύβου, που παράγουν τρεις διαφορετικές πηγές, στο πεδίο του χρόνου και στο πεδίο των συχνοτήτων αντίστοιχα.

1.15.3 Ανάλυση σε ζώνες συχνοτήτας

Κατά την φασματική ανάλυση το φάσμα του ήχου, διαιρείται σε ζώνες συχνοτήτων. Οι μετρήσεις και οι υπολογισμοί είναι ευχερέστεροι αν το φάσμα των συχνοτήτων διαιρεθεί σε ζώνες. Η διαίρεση σε ζώνες συχνοτήτων είναι συνήθως λογαριθμική

$$a = \log(f_1 / f_2)$$

όπου:

a ...ο συντελεστής που καθορίζει το εύρος της ζώνης

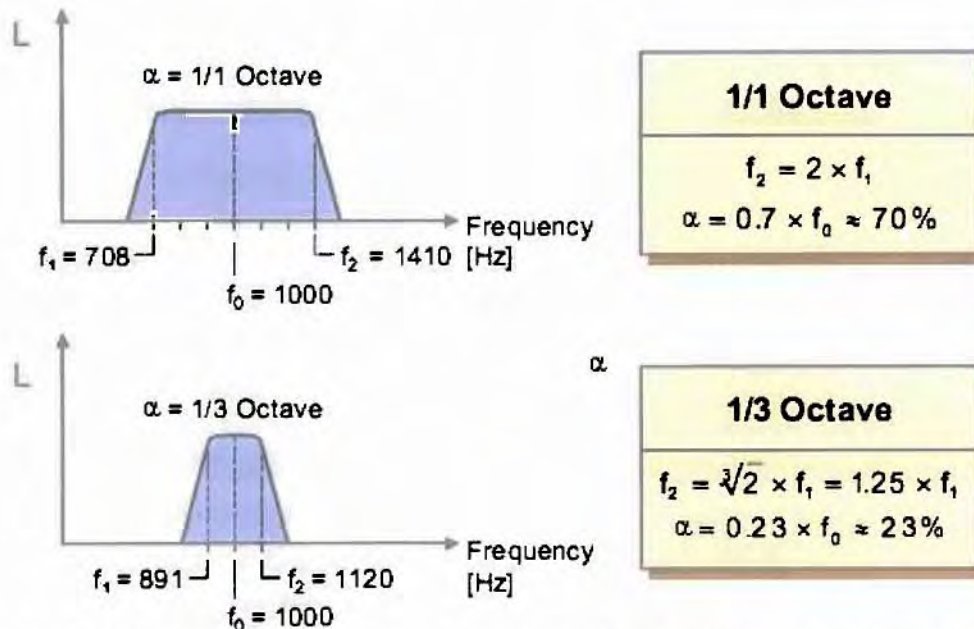
f_1 ...το κάτω όριο συχνοτήτων της ζώνης

f_2 ...το άνω όριο συχνοτήτων της ζώνης.

Η λογαριθμική αυτή διαίρεση σε ζώνες συχνοτήτων προσομοιώνει την ευαισθησία της ανθρώπινης ακοής, η οποία εκλαμβάνει τα λογαριθμικά διαστήματα ως ίσα μεταξύ τους.

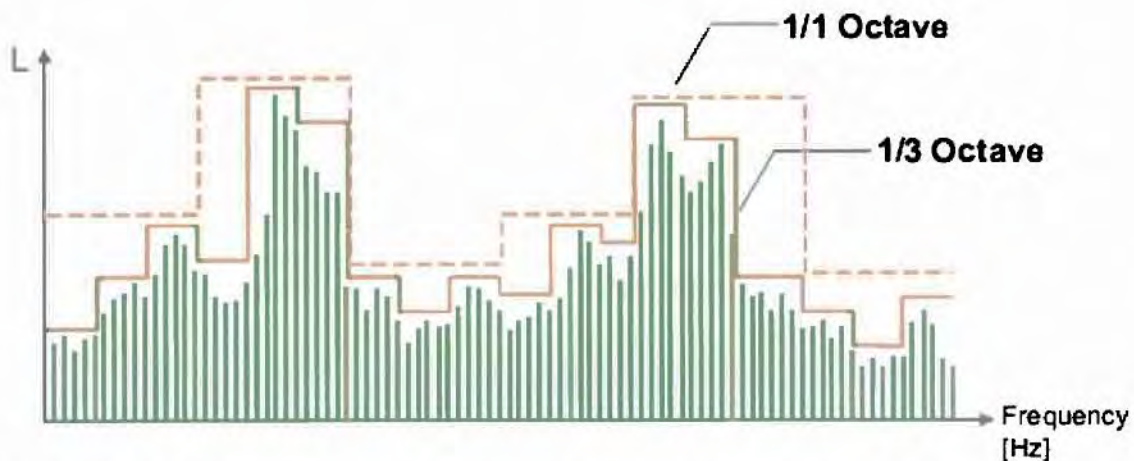
Συνηθέστερες περιπτώσεις διαίρεσης είναι:

- σε ζώνες οκτάβας (1/1), στις οποίες ισχύει $\alpha = 1$ και $f_2 = 2 f_1$,
- σε ζώνες ενός τρίτου οκτάβας (1/3), στις οποίες ισχύει $\alpha = 1/3$ και $f_2 = 1,25 f_1$.



Εικόνα 1.21 / Στο επάνω σχήμα φαίνεται η διαίρεση σε ζώνη οκτάβας της συχνότητας του 1 kHz (ονομάζεται κεντρική συχνότητα, f_0), ενώ στο κάτω σχήμα η ίδια συχνότητα διαιρείται σε ζώνη ενός τρίτου οκτάβας.

Η διαίρεση σε ζώνες ενός τρίτου οκτάβας προσφέρει καλύτερη ανάλυση του ηχητικού φάσματος και για αυτό χρησιμοποιείται στην παρούσα διπλωματική.



Εικόνα 1.22 / Με διακεκομμένες γραμμές παρουσιάζεται το ηχητικό φάσμα με διαίρεση σε ζώνες μίας οκτάβας (1/1), ενώ με την συνεχή γραμμή είναι το φάσμα με διαίρεση σε ζώνες ενός τρίτου οκτάβας (1/3). Εύκολα μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η διαίρεση σε 1/3 οκτάβας είναι πιο αναλυτική.

Οι συχνότητες των ζωνών από 20Hz έως 353Hz ονομάζονται χαμηλές, από 353Hz έως 1414Hz ονομάζονται μεσαίες και από 1414Hz και άνω ονομάζονται υψηλές συχνότητες.

Η φασματική ανάλυση και η διαίρεση σε ζώνες συχνοτήτων, γίνεται με το κατάλληλο λογισμικό και τα ειδικά φίλτρα (1/1 & 1/3 φίλτρο) που είναι εγκατεστημένα στο ηχόμετρο.

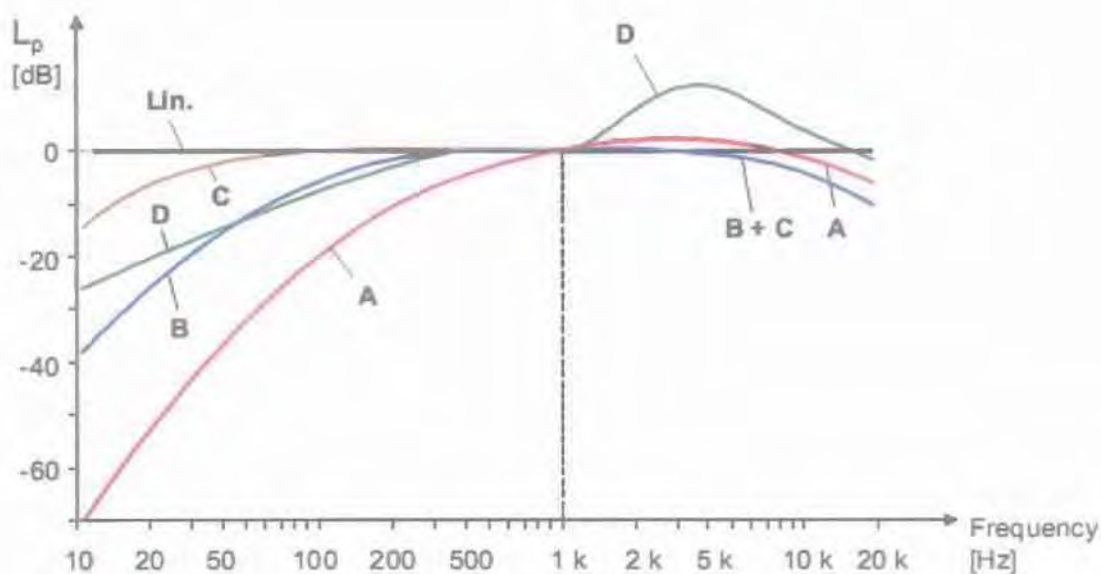
Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται οι κεντρικές συχνότητες f_0 και τα όρια των ζωνών f_1 και f_2 .

Κάτω όριο ζώνης (Hz)	Κεντρικές Συχνότητες (Hz)		Άνω όριο ζώνης (Hz)
	1/1 Οκτάβας	1/3 Οκτάβας	
22		25	28
28	31,5	31,5	35
35		40	44
44		50	57
57	63	63	71
71		80	88
88		100	113
113	125	125	141
141		160	176
176		200	225
225	250	250	283
283		315	353
353		400	440
440	500	500	565
565		630	707
707		800	880
880	1000	1000	1130
1130		1250	1414
1414		1600	1760
1760	2000	2000	2250
2250		2500	2825
2825		3150	3530
3530	4000	4000	4400
4400		5000	5650
5650		6300	7070
7070	8000	8000	8800
8800		10000	11300
11300		12500	14140
14140	16000	16000	17600
17600		20000	22500

ΠΙΝΑΚΑΣ 1.3 / Όρια ζωνών συχνότητων και κεντρικές συχνότητες.

1.16 Καμπύλες συντελεστών βαρύτητας στάθμης ηχητικής πίεσης¹¹¹ (Frequency Weighting Curves)

Προκειμένου να εκφραστεί η διαφορετική ευαισθησία της ανθρώπινης ακοής στις διάφορες συχνότητες αλλά και τις διαφορετικές στάθμες, προτάθηκαν καμπύλες διόρθωσης, με συντελεστές βαρύτητας, των τιμών της στάθμης ηχητικής πίεσης σε ζώνες οκτάβας ή σε ζώνες τρίτου οκτάβας. Οι τιμές των συντελεστών αυτών δίνονται σε dB και προστίθενται αλγεβρικά στις τιμές της στάθμης της αντίστοιχης συχνότητας. Για τους συντελεστές αυτούς κατασκευάστηκαν τα αντίστοιχα φίλτρα με τα οποία είναι εξοπλισμένο κάθε ηχόμετρο.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 1.2 / Καμπύλες διόρθωσης (A, B, C, ,D και Lin) των τιμών της ηχητικής πίεσης για κάθε συχνότητα του φάσματος.

Οι καμπύλες διόρθωσης ή οι συντελεστές διόρθωσης και το αντίστοιχο αποτέλεσμα χαρακτηρίζονται από τα γράμματα A, B, C, & D.

- Η A χρησιμοποιείται για στάθμες ακουστότητας κάτω από 55 (dB).
- Η B χρησιμοποιείται για στάθμες ακουστότητας μεταξύ 55 (dB) και 85 (dB).
- Η C χρησιμοποιείται για στάθμες ακουστότητας πάνω από 85 (dB).
- Η D χρησιμοποιείται για την ενόχληση που προκαλείται από τις υψηλές συχνότητες και χρησιμοποιείται κυρίως για τον αεροπορικό θόρυβο.

Το τελικό αποτέλεσμα της στάθμης του ήχου, αλλά και για τις στάθμες από τις επιμέρους ζώνες συχνοτήτων, δίνεται σε dB(P), όπου P είναι το αντίστοιχο γράμμα της καμπύλης διόρθωσης που χρησιμοποιήθηκε.

Σήμερα, έχει καθιερωθεί η χρήση του φίλτρου (A), ανεξάρτητα από τη στάθμη ακουστότητας. Στην παρούσα διπλωματική τα αποτελέσματα των μετρήσεων πραγματοποιήθηκαν με χρήση του φίλτρου (A).

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί, πως σε ορισμένες περιπτώσεις υπολογίζεται η τιμή της συνολικής στάθμης χωρίς διόρθωση με κάποιο φίλτρο. Αυτή ονομάζεται γραμμική συνολική στάθμη (L_{Lin}).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΘΟΡΥΒΟΣ

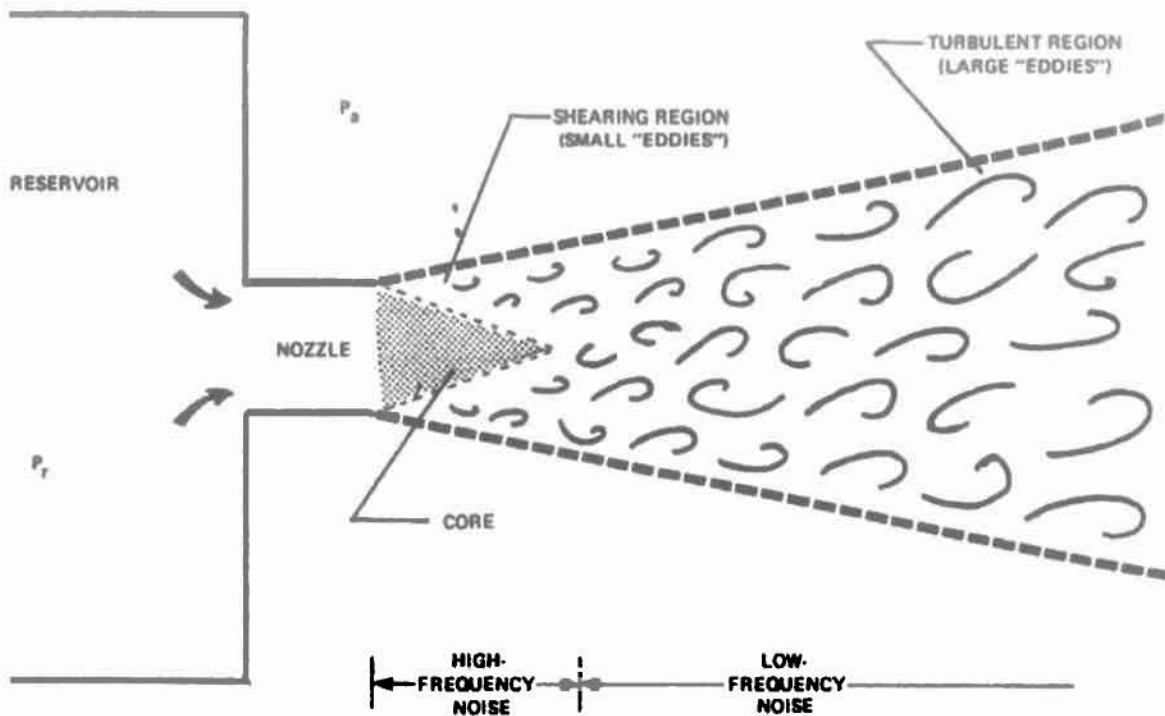
Στο κεφάλαιο αυτό εισάγεται η έννοια του αεροδυναμικού θορύβου. Γίνεται μία σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση στις πιο σημαντικές εργασίες που εκδόθηκαν, για την παραγωγή αεροδυναμικού θορύβου από δέσμη, από τα μέσα του προηγούμενου αιώνα μέχρι και σήμερα και παρουσιάζεται συνοπτικά η γραμμική ακουστική θεωρία και η ακουστική αναλογία του Lighthill. Τέλος αναφέρεται, αρκετά αναλυτικά, η μέθοδος υπολογισμού του θορύβου δέσμης που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία.

2.1 Εισαγωγή

Ο θόρυβος που προκαλείται από μία αέρια δέσμη (jet) προβλημάτισε τον άνθρωπο από τα μέσα του προηγούμενου αιώνα. Η ανακάλυψη του αεροκινητήρα turbojet, κατά την διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, κατέστησε σαφές ότι ο θόρυβος υψηλής στάθμης που προκαλούταν από αυτόν, έπρεπε να αναλυθεί και να μειωθεί σημαντικά ώστε να μπορέσει ο άνθρωπος να εκμεταλλευτεί τα οφέλη της συγκεκριμένης τεχνολογίας. Η ανακάλυψη των κινητήρων υψηλού λόγου παράκαμψης (turbofan), στα μέσα της δεκαετίας του '70 επέφερε ριζική μείωση στην εκπομπή θορύβου από τα πολιτικά αεροσκάφη. Η μείωση του θορύβου στους turbofan κινητήρες οφείλεται στην χαμηλή ταχύτητα εξόδου της δέσμης.

Μία δέσμη δημιουργείται όταν το ρευστό εκρέει από ένα στόμιο. Η περίπτωση που εξετάζεται στην παρούσα διπλωματική είναι μία δέσμη αέρα που εκρέει από μία κυκλική οπή σε ένα χώρο όπου υπάρχει αέρας σε ηρεμία. Οι δέσμες είναι ασταθείς ακόμα και για χαμηλούς αριθμούς Reynolds, βασιζόμενος στην ταχύτητα του αέρα κοντά στο στόμιο εξόδου και την διάμετρο του στομίου. Για $Re < 30$ η δέσμη θεωρείται στρωτή ενώ για μεγαλύτερες τιμές η δέσμη μεταβαίνει στην τυρβώδη περιοχή και έχουμε την παραγωγή θορύβου.

Ο θόρυβος αυτός ονομάστηκε "**αεροδυναμικός θόρυβος**" και για την κατανόηση του έπρεπε να βρεθεί ένας τρόπος να συνδυαστεί η επιστήμη της ακουστικής με την αεροδυναμική. Η κύρια πηγή αεροδυναμικού θορύβου είναι οι τυρβώδεις δίνες (turbulent eddies) που δημιουργούνται μέσα στην δέσμη. Η επιστήμη που ασχολείται με την μελέτη του αεροδυναμικού θορύβου ονομάζεται, **αεροακουστική** (Aeroacoustics).



Εικόνα 2.1 / Δυσδιάστατη απεικόνιση ελεύθερης δέσμης και αναπαράσταση των δινών.

2.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Μέχρι το 1949 υπήρξε ελάχιστη έρευνα δημοσιευμένη σχετικά με τον θόρυβο δέσμης, εκτός από κάποιες πρώιμες μετρήσεις της έντασης του θορύβου που προερχόταν από μία τυρβώδη αέρια δέσμη σε μακρινό πεδίο, τις οποίες πραγματοποίησε ο Morley (Morley A.W.: Estimation of Airplane Noise Level, May 1939). Παρόλα αυτά από αυτές τις μετρήσεις φάνηκε ότι η ακουστική ισχύς μίας τυρβώδης δέσμης είναι ανάλογη της ταχύτητας εξόδου της δέσμης.

Η πρώτη επίσημη μελέτη και δημοσίευση, η οποία έθεσε τα θεμέλια για την κατανόηση του αεροδυναμικού θορύβου, προέρχεται από τον **James Lighthill** (Lighthill J.: On Sound Generated Aerodynamically, Mar 1952). Ο Lighthill απέδειξε αυτό που είχε φανεί από τις πρώτες μετρήσεις, δηλαδή ότι η ακουστική ισχύς, μίας τυρβώδης αέριας δέσμης (απουσία στερεών συνόρων), είναι ανάλογη της 8^{ης} δύναμης της ταχύτητας εξόδου της δέσμης. Αυτή η σχέση ονομάστηκε «νόμος του V^8 » και αποτελεί θεμελιώδη αρχή για τον υπολογισμό του αεροδυναμικού θορύβου που παράγεται από μία τυρβώδη δέσμη. Την δουλειά του Lighthill ακολούθησαν κάποιες πειραματικές μελέτες στις οποίες εξετάστηκε, όχι μόνο ο μηχανισμός παραγωγής αεροδυναμικού θορύβου, αλλά και πώς μπορεί να μειωθεί η στάθμη του (Westley R. And Lillley G.M.: An Investigation of the Noise Field From a Small Jet and Methods for Its Reduction, Jan 1953), (Greatrex F.B.: Engine Noise, Apr. 1955) και (Greatrex F.B.: Jet Noise, Jun. 1955). Από το 1970 και έπειτα, η

επιστήμη της αεροακουστικής προόδευσε σημαντικά τόσο σε θεωρητικό, όσο και σε πρακτικό επίπεδο. Οι πιο σημαντικές μελέτες έγιναν από τους Lilley (Lilley, Geoffrey M., Warren C.: The Generation and Radiation of Supersonic Jet Noise, Volume IV - Theory of Turbulence Generated Jet Noise, Noise Radiated From Upstream Sources and Combustion Noise, Jul. 1972), (Lilley G.M.: On the Noise From Jets Noise Mechanisms, Mar. 1974), και Goldstein (Goldstein M.E.: Aeroacoustics, 1976). Μέχρι και σήμερα έχουν δημοσιευθεί αρκετές μελέτες για τον αεροδυναμικό θόρυβο δέσμης είτε από ιδιωτικές εταιρίες, είτε από κρατικούς φορείς.

2.3 Γραμμική ακουστική θεωρία

Η γένεση και διάδοση του αεροδυναμικού θορύβου, όπου ο όρος "αεροδυναμικός θόρυβος" χρησιμοποιείται για να περιγράψει τις διαταραχές ακουστικής πίεσης που οφείλονται σε μη μόνιμες αεροδυναμικές δυνάμεις που ασκούνται στο ρευστό από κινούμενα στερεά σύνορα ή από τυρβώδεις ροές με ή χωρίς στερεά σύνορα, εντός ενός ρευστού μέσου διέπεται από τους βασικούς νόμους διατήρησης των ρευστών δηλαδή της διατήρησης της μάζας, της ορμής και της ενέργειας.

Συγκεκριμένα θεωρώντας ένα μη συνεκτικό ρευστό η εξίσωση της συνέχειας και της ορμής είναι:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0$$

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial p}{\partial x_i} = 0$$

Θεωρώντας την χρονική παράγωγο της πρώτης και την απόκλιση της δεύτερης από τις παραπάνω εξισώσεις και αφαιρώντας την δεύτερη από την πρώτη προκύπτει:

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} - \frac{\partial^2(\rho u_i u_j)}{\partial x_i \partial x_j} - \frac{\partial^2 p}{\partial x_i^2} = 0$$

Η πίεση p , η πυκνότητα ρ και η ταχύτητα u_i ορίζονται ως διαταραχές γύρω από μια κατάσταση ηρεμίας και ομοιόμορφης πίεσης p_0 , πυκνότητας ρ_0 και μηδενικής ταχύτητας δηλαδή:

$$p = p_0 + p', \rho = \rho_0 + \rho', u_i = 0 + u'$$

Εισάγοντας τον παραπάνω ορισμό προκύπτει η εξίσωση:

$$\frac{\partial^2 \rho'}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 \rho'}{\partial x_j^2} = 0$$

και θεωρώντας πως το ρευστό είναι ισεντροπικό $\rho' = c_0^2 \rho'$, όπου c_0 είναι η ταχύτητα του ήχου, προκύπτει η ομογενή εξίσωση ακουστικού κύματος:

$$\frac{\partial^2 \rho'}{\partial t^2} - c_0^2 \frac{\partial^2 \rho'}{\partial x_j^2} = 0 \rightarrow \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 \rho'}{\partial t^2} - \nabla^2 \rho' = 0$$

2.4 Το ακουστικό ανάλογο του Lighthill

Στην παράγραφο αυτή θα παρουσιαστεί συνοπτικά η θεωρία του ακουστικού ανάλογου του Lighthill. Δηλαδή θα παρουσιαστεί η εξίσωση Lighthill, καθώς και η επίλυσή της, απουσία στερεών συνόρων.

Η θεωρία του ακουστικού αναλόγου εισήχθη από τον Lighthill (Lighthill, 1952), (Lighthill, 1954) για τον υπολογισμό της ακουστικής ακτινοβολίας από σχετικά μικρές περιοχές τυρβώδους ροής που βρίσκονται εντός άπειρου ομογενούς ρευστού στο οποίο η ταχύτητα του ήχου c_0 και η πυκνότητα ρ_0 θεωρούνται σταθερές. Θεωρώντας πως η διαταραχή στην πυκνότητα $\rho' = \rho - \rho_0$ σε μεγάλες αποστάσεις από τις τυρβώδεις περιοχές συμπεριφέρεται ως ακουστικό κύμα ο Lighthill αναδιάταξε την εξίσωση της ορμής και της συνέχειας έτσι ώστε να ανάγονται στην ομογενή εξίσωση ακουστικού κύματος σε μεγάλη απόσταση από τις τυρβώδεις περιοχές. Συγκεκριμένα θεωρώντας μια φραγμένη περιοχή τυρβώδους ροής, έξω από την οποία το ρευστό θεωρείται σε ηρεμία με σταθερή πίεση και πυκνότητα, καθώς επίσης και ότι δεν υπάρχουν πηγές ρευστού ή εξωτερικές δυνάμεις, από την εξίσωση της συνέχειας και την εξίσωση της ορμής προκύπτει η εξίσωση του Lighthill:

$$\frac{\partial^2 \rho'}{\partial t^2} - c_0^2 \nabla^2 \rho' = - \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j}$$

όπου:

$$T_{ij} = \rho u_i u_j + \delta_{ij} [(p - p_0) - c_0^2 (\rho - \rho_0)] - e_{ij}$$

T_{ij}είναι ο τανυστής τάσεων του Lighthill,

δ_{ij}το δέλτα του Kroenecker,

e_{ij}είναι η (i, j) συνιστώσα του συνεκτικού τανυστή των τάσεων.

Θεωρώντας τον όρο T_{ij} γνωστό η επίλυση της εξίσωσης του Lighthill βασίζεται (Goldstein, 1976) στην συνάρτηση Green και τελικά δίνει στην περιοχή μακριά από την περιοχή των πηγών:

$$\begin{aligned} \rho(\bar{x}, t) - \rho_0 &= \frac{1}{4\pi c_0^2} \int_V \frac{r_i r_j}{c_0^2 r^3} \frac{\partial^2 T_{ij} \left(\bar{y}, t - \frac{r}{c_0} \right)}{\partial t^2} d\bar{y} \\ &= \frac{1}{4\pi c_0^2} \frac{x_i x_j}{|\bar{x}|^3} \int_V \frac{\partial^2 T_{ij} \left(\bar{y}, t - \frac{r}{c_0} \right)}{\partial t^2} d\bar{y} \end{aligned}$$

Οι εξισώσεις αυτές παρέχουν την δυνατότητα υπολογισμού των διαταραχών της πυκνότητας στην μακρινή περιοχή του ακουστικού πεδίου.

2.5 Θόρυβος Δέσμης (Jet Noise) ^[10]

Η μέθοδος που θα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της στάθμης της ηχητικής πίεσης του θορύβου που παράγεται από μία αέρια δέσμη υψηλής πίεσης βασίζεται στην θεωρία των Bies & Hansen (Bies & Hansen: Engineering Noise Control Theory and Practice, 1988).

2.5.1 Υπολογισμός της ακουστικής ισχύς της δέσμης

Σύμφωνα λοιπόν με την θεωρία αυτή η ακουστική ισχύς W_a που παράγεται από μία υποηχητική δέσμη που εκρέει σε ελεύθερο πεδίο ισούται με το γινόμενο της μηχανικής ενέργειας του ρεύματος W_m και ενός συντελεστή ακουστικής ικανότητας της δέσμης η .

$$W_a = \eta W_m \quad (2.1)$$

Η μηχανική ενέργεια του ρεύματος W_m είναι η κινητική ενέργεια του ρεύματος:

$$W_m = \frac{1}{2} \dot{m} U^2 = \frac{\rho A U^3}{2} \quad (2.2)$$

και επειδή η δέσμη εκρέει από κυκλική διατομή:

$$A = \pi R^2 = \frac{\pi D^2}{4} \quad (2.2.1)$$

Άρα με αντικατάσταση της σχέσης (2.2.1) στην (2.2) προκύπτει η τιμή της μηχανική ενέργειας της δέσμης η οποία είναι:

$$W_m = \frac{\rho U^3 \pi D^2}{8} \quad (2.3)$$

όπου:

ρείναι η πυκνότητα της δέσμης (kg/m^3)

Uείναι η ταχύτητα εξόδου της δέσμης (m/s)

Dείναι η διάμετρος του στομίου εξόδου

Ο συντελεστής ακουστικής ικανότητας της δέσμης προκύπτει από τον εμπειρικό τύπο:

$$\eta = \left(\frac{T}{T_0}\right)^2 \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right) K_a M^5 \quad (2.4)$$

όπου:

ρ, ρ_0είναι η πυκνότητα της δέσμης (kg/m^3) και του περιβάλλοντος αέρα αντίστοιχα

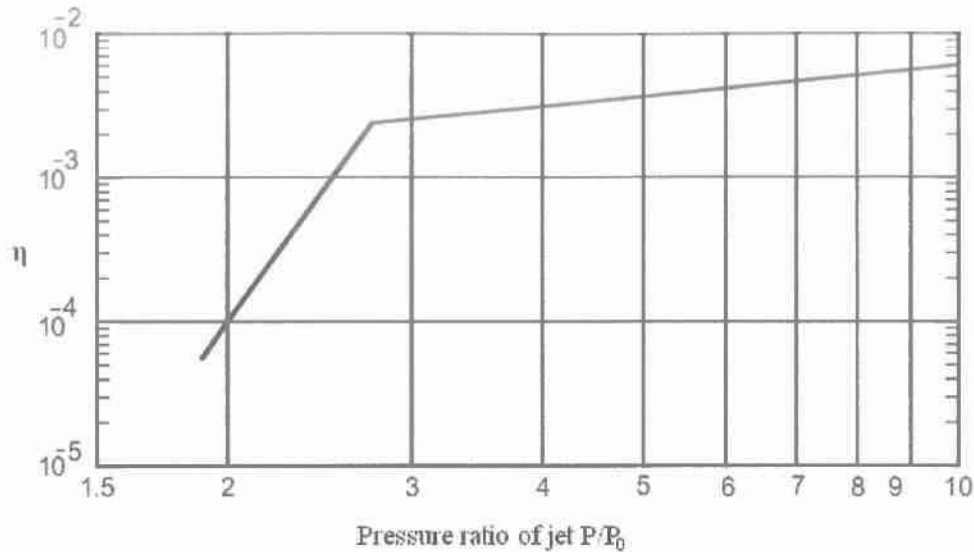
T, T_0είναι η θερμοκρασία της δέσμης ($^\circ\text{K}$) και του περιβάλλοντος αέρα αντίστοιχα

K_aείναι η σταθερά ακουστικής ενέργειας του ρεύματος η οποία παίρνει τιμές από 2×10^{-2} έως 5×10^{-5} (ανάλογα με την ταχύτητα της δέσμης)

Mείναι ο αδιάστατος αριθμός Mach της δέσμης και ισούται με τον λόγο της ταχύτητας εξόδου της δέσμης, U , προς την ταχύτητα του ήχου στον περιβάλλοντα αέρα, στην περίπτωση μας είναι $c = 343 \text{ m/s}$.

Οι τιμές των (T/T_0) και (ρ/ρ_0) , συναρτήσει του αριθμού Mach (M) υπάρχουν στον πίνακα C.4 του βιβλίου "Μηχανική των Ρευστών" (V. Streeter/ E.B. Wylie).

Η εξίσωση υπολογισμού της ακουστικής ικανότητας της δέσμης ισχύει για τον υπολογισμό του θορύβου που παράγεται λόγω της τύρβης. Ισχύει είτε για υποηχητικές δέσμες ($M < 1$) είτε για υπερηχητικές δέσμες ($M > 1$) και για ένα εύρος τιμών της ποσότητας $(T/T_0)^2 (\rho/\rho_0)$ από 0.1 έως 10. Υπάρχει περίπτωση όμως, να δημιουργηθεί και θόρυβος στην δέσμη λόγω κάποιου κύματος υπερπίεσης (shock wave generated noise). Στην περίπτωση αυτή υπολογίζεται ξεχωριστά ο συντελεστής ακουστικής ικανότητας λόγω της τύρβης όπως ήδη αναφέρθηκε και προστίθεται σε αυτόν μία τιμή που προκύπτει από το διάγραμμα 2.1. και αντιστοιχεί στον θόρυβο που προκαλεί το κύμα υπερπίεσης.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 2.1 / Διάγραμμα υπολογισμού του συντελεστή ακουστικής ικανότητας του θορύβου που παράγεται από κύμα υπερπίεσης (Heitner, 1968)

Για να χρησιμοποιηθεί το διάγραμμα πρέπει να υπολογιστεί ο λόγος πίεσης της δέσμης (πίεση στην έξοδο P προς την πίεση του περιβάλλοντος αέρα P_0). Το διάγραμμα ισχύει για λόγο πίεσης μεγαλύτερο από 1.89.

Αντικαθιστώντας την σχέση (2.4) και την σχέση (2.3) στην (2.1) αλλά και τον αριθμό Mach προκύπτει η εξίσωση υπολογισμού της ακουστικής ισχύς της δέσμης:

$$W_m = \left(\frac{T}{T_0}\right)^2 \frac{\rho^2 U^8 \pi D^2}{8 \rho_0 c^5} \quad (2.5)$$

Παρατηρώντας την εξίσωση (2.5) είναι φανερό ότι ισχύει ο κλασικός νόμος του V^8 του Lighthill.

2.5.2 Υπολογισμός της στάθμης της ηχητικής πίεσης L_p της δέσμης

Η στάθμη της ηχητικής ισχύς της δέσμης υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τον τύπο:

$$L_w = 10 \log_{10} W_\alpha + 120$$

ενώ η στάθμη της ηχητικής πίεσης της δέσμης είτε κοντά στο στόμιο είτε στο ελεύθερο πεδίο υπολογίζεται με χρήση του τύπου:

$$L_p = L_w + DI - 10 \log_{10}(4\pi r^2)$$

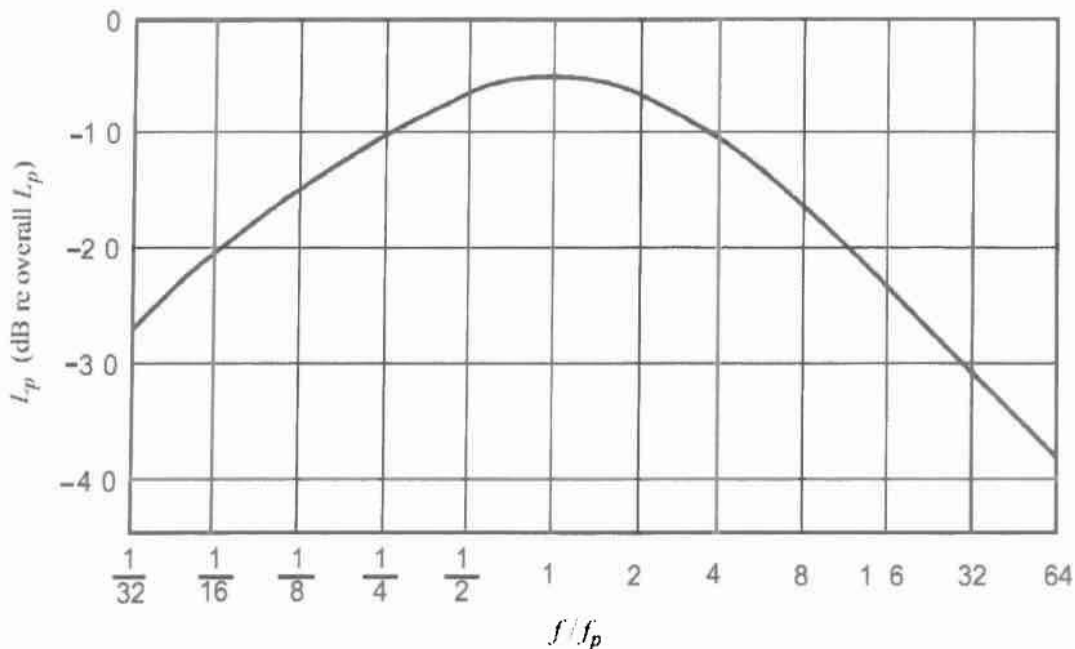
Η ποσότητα $DI=10\log(Q_\theta)$ (directivity index) ονομάζεται συντελεστής κατευθυντικότητας της δέσμης και η τιμή του βρίσκεται από πίνακες συναρτήσει της γωνίας θ που σχηματίζει το σημείο, που υπολογίζεται η στάθμη της ηχητικής πίεσης, με τον κάθετο άξονα της δέσμης και r είναι η απόσταση του σημείου αυτού από το κέντρο του στομίου εξόδου της δέσμης.

θ^a	Q_θ	DI, dB	θ^a	Q_θ	DI, dB
0°	1.00	0.0	60°	0.80	-1.0
10°	1.80	2.6	75°	0.447	-3.5
15°	2.16	3.3	80°	0.381	-4.2
20°	2.52	4.0	90°	0.282	-5.5
30°	3.00	4.8	105°	0.200	-7.0
40°	2.50	4.0	120°	0.158	-8.0
45°	2.00	3.0	150°	0.118	-9.3
50°	1.53	1.8	180°	0.100	-10

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1 / Τιμές του DI για διάφορες τιμές της γωνίας θ

2.5.3 Υπολογισμός του φάσματος του θορύβου δέσμης

Ο θεωρητικός υπολογισμός του ακουστικού φάσματος του αεροδυναμικού θορύβου που παράγεται από μία αέρια δέσμη γίνεται με χρήση του παρακάτω διαγράμματος (Ingard, 1959):



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 2.2 / Διάγραμμα υπολογισμού του φάσματος του θορύβου δέσμης.

Για να υπολογιστεί το φάσμα του θορύβου πρέπει να βρεθεί πρώτα η συχνότητα κορυφής f_p (frequency peak). Η συχνότητα κορυφής βρίσκεται από την σχέση:

$$S = \frac{f_p D}{U}$$

όπου:

Sείναι ο αδιάστατος αριθμός Strouhal η τιμή του οποίου για υποχητικές δέσμες είναι περίπου 0.2

Dείναι η διάμετρος του στομίου εξόδου της δέσμης

Uείναι η ταχύτητα εξόδου της δέσμης στο στόμιο

Για πιο ακριβή υπολογισμό του των ηχητικών πιέσεων όλων των συχνοτήτων του ακουστικού φάσματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί η παρακάτω σχέση^[9] :

$$L_p(f) = L_p - CF_7$$

όπου:

CF_7είναι ένας συντελεστής μετατροπής η τιμή του οποίου για κάθε συχνότητα δίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Frequency	CF_7	Frequency	CF_7	Frequency	CF_7
$f_0/32$	26	$f_0/2$	7	$8f_0$	17
$f_0/16$	21	f_0	5	$16f_0$	25
$f_0/8^a$	15	$2f_0$	7	$32f_0$	31
$f_0/4$	10	$4f_0$	10	$64f_0$	37

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.2 / Τιμές του συντελεστή μετατροπής, CF_7 για όλες τις ζώνες συχνοτήτων, ($f_0 = f_p$).

2.5.4 Διόρθωση των τιμών του L_p με χρήση συντελεστών βαρύτητας

Όπως ήδη αναφέρθηκε στο πρώτο κεφάλαιο, πλέον έχουν καθιερωθεί καμπύλες διόρθωσης της ηχητική πίεσης.

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι τιμές του συντελεστή CFA και CFC για όλες τις κεντρικές συχνότητες. Οι συντελεστές αυτοί ονομάζονται συντελεστές στάθμισης (ή βαρύτητας) και χρησιμοποιούνται, ανάλογα με το ποια καμπύλη διόρθωσης έχει επιλεγεί στις μετρήσεις μας A, B, C ή D, για να σταθμιστεί η τιμή της ηχητικής πίεσης της κάθε συχνότητας.

Octave band center frequency, Hz	A-scale CFA	C-scale CFC
31.5	-39.4	-3.0
63	-26.2	-0.8
125	-16.1	-0.2
250	-8.9	0.0
500	-3.2	0.0
1,000	0.0	0.0
2,000	+1.2	-0.2
4,000	+1.0	-0.8
8,000	-1.1	-3.0
16,000	-6.6	-8.5

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.3 / Τιμές των συντελεστών στάθμισης CFA και CFC για κάθε κεντρική συχνότητα (ANSI S1.4, 1971)

Για πιο ακριβή υπολογισμό των συντελεστών στάθμισης μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι παρακάτω σχέσεις:

- για τον υπολογισμό του συντελεστή στάθμισης CFA οποιασδήποτε συχνότητας f ισχύει:

$$R_A(f) = \frac{12200^2 f^4}{(f^2 + 20.6^2) \sqrt{(f^2 + 737.9^2)(f^2 + 12200^2)}}$$

$$CFA = 2 + 20 \log_{10} R_A(f)$$

$$L_p(f) = L_p + CFA$$

- για τον υπολογισμό του συντελεστή στάθμισης CFC οποιασδήποτε συχνότητας f ισχύει:

$$R_C(f) = \frac{12200^2 f^2}{(f^2 + 20.6^2)(f^2 + 12200^2)}$$

$$CFC = 0.06 + 20 \log_{10} R_C(f)$$

$$L_p(f) = L_p + CFC$$

Η τιμή της συνολικής στάθμης της ηχητικής πίεσης, σταθμισμένη κατά A, προκύπτει από την παρακάτω σχέση:

$$L_p(A) = 10 \log_{10} \left[\sum 10^{(L_p(f) + CFA)/10} \right]$$

και η μονάδα μέτρησης της είναι dB(A).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση των μετρήσεων του αεροδυναμικού θορύβου δέσμης. Αρχικά, παρουσιάζονται τα πιο συνηθισμένα που χρησιμοποιούνται σε τέτοιου είδους μετρήσεις. Στην συνέχεια, γίνεται μία περιγραφή της πειραματικής διάταξης και των μετρητικών οργάνων που χρησιμοποιήθηκαν. Τέλος, παρουσιάζονται μερικά τεχνικά χαρακτηριστικά του ηχομέτρου, το οποίο είναι και το πιο σημαντικό όργανο μέτρησης που χρησιμοποιήθηκε για την αποπεράτωση του πειράματος.

3.1 Μετρητικά Όργανα

Η μέτρηση και η ανάλυση του θορύβου πραγματοποιείται με τη βοήθεια οργάνων και συσκευών γενικής και ειδικής χρήσεως.

Πλέον, με την σημερινή ανάπτυξη της τεχνολογίας στην αγορά υπάρχουν πάρα πολλά μετρητικά όργανα και λογισμικά, όμως παρόλα αυτά η εκλογή του κατάλληλου εξοπλισμού, αλλά και η σωστή χρήση του είναι ένα πολύ σημαντικό θέμα.

3.1.1 Το Ηχόμετρο

Σε κάθε μέτρηση ή ανάλυση θορύβου το κύριο και πιο απαραίτητο όργανο είναι το ηχόμετρο (sound level meter, SLM). Το ηχόμετρο, που ονομάζεται και μετρητής της στάθμης του ήχου, είναι ένα όργανο που μετατρέπει τις εναλλαγές της πίεσεως του ηχητικού πεδίου σε μεταβολές τάσεως οι οποίες με την βοήθεια ενός ενδεικτικού οργάνου δίνονται απευθείας σε dB.

Οι προδιαγραφές λειτουργίας και αποκρίσεως των ηχομέτρων περιγράφονται στη Δημοσίευση I.E.C. 179 που αποτελεί αναγνωρισμένο διεθνές πρότυπο.

Συνήθως τα ηχόμετρα έχουν ενσωματωμένα φίλτρα αξιολογήσεως, όπως το φίλτρο A που είναι το πιο κοινό, άρα δίνουν ενδείξεις της ηχοστάθμης σε dB(A). Για την ανάλυση του θορύβου υπάρχουν σειρές φίλτρων εύρους

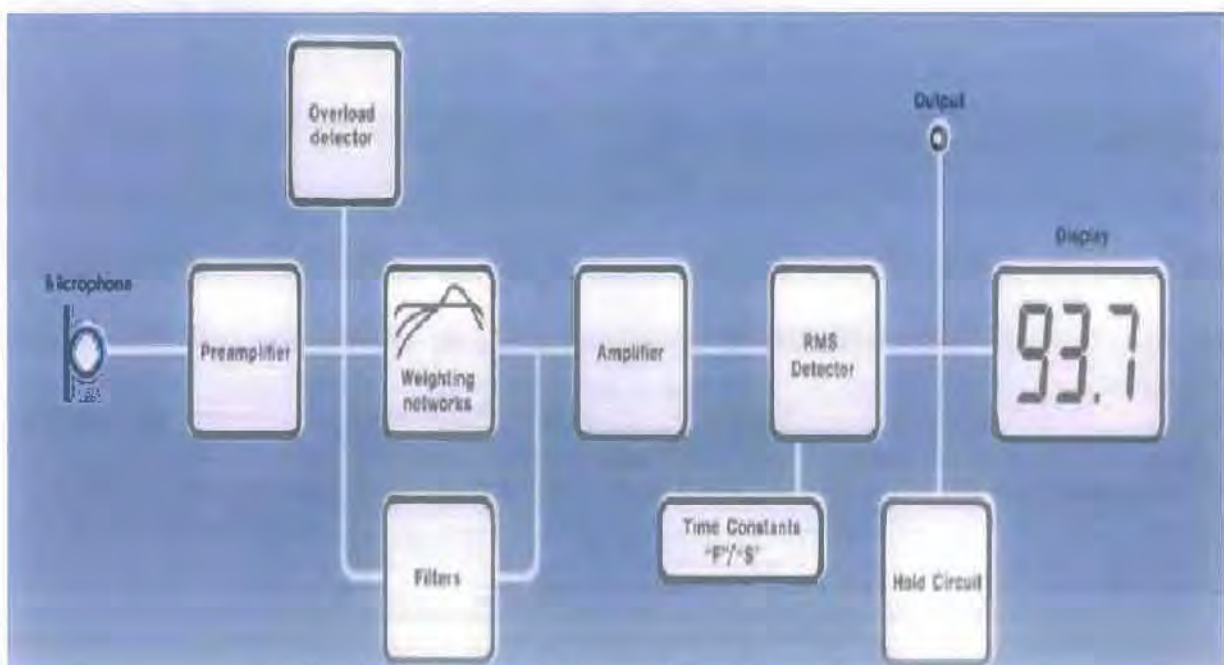
συχνοτήτων οκτάβας (1/1 octave filter), ενός τρίτου της οκτάβας (1/3 octave filter) ή και μικρότερου τα οποία συνδέονται με το ηχόμετρο δημιουργώντας έτσι έναν αναλυτή φάσματος ή ένα σύνθετο όργανο με το οποίο μπορεί να μετρηθεί η στάθμη του θορύβου στις διάφορες περιοχές συχνοτήτων.



Εικόνα 4.1 / Το ηχόμετρο Mediator 2238 της εταιρίας Bruel & Kjaer.

Με τη μέτρηση της ηχητικής στάθμης και την ανάλυση συχνοτήτων προσδιορίζονται σημαντικά στοιχεία του ηχητικού πεδίου. Με τις πληροφορίες που συλλέγουμε μπορούμε να βγάλουμε χρήσιμα συμπεράσματα, όπως :

- Αναγνώριση της βασικής πηγής θορύβου
- Βελτίωση της επιλογής των υλικών ή των μεθόδων που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο του θορύβου, αλλά και τον σχεδιασμό μιας μηχανής
- Αξιολόγηση και σύγκριση των μετρήσεων του θορύβου μεταξύ τους
- Έλεγχο της συμβατότητας με τους διεθνείς κανονισμούς και τα διεθνή πρότυπα
- Υπολογισμός της ηχητικής δύναμης της πηγής, κ.α.



Εικόνα 4.2 / Το διάγραμμα λειτουργίας ενός ηχομέτρου.

Τα κύρια χαρακτηριστικά ενός ηχομέτρου, που καθορίζουν την απόδοση του αλλά και την ποιότητα των μετρήσεων είναι :

- **Η απόκριση συχνοτήτων** (frequency response), που αφορά το εύρος των συχνοτήτων που μπορεί να αναλύσει το ηχόμετρο.
- **Το δυναμικό του εύρος** (dynamic range), είναι ο λόγος ανάμεσα στην στάθμη του θορύβου που μετράμε και της στάθμης του εσωτερικού θορύβου του ηχομέτρου.
- **Ο χρόνος απόκρισης** (response time), είναι ο χρόνος που χρειάζεται το ηχόμετρο για να ανταποκριθεί στον εισερχόμενο θόρυβο. Οι επιλογές είναι, F (Fast, χρόνος απόκρισης 200msec) ή S (Slow, χρόνος απόκρισης 1 sec).

3.1.2 Ο στατιστικός αναλυτής

Πρόκειται για ένα όργανο που πραγματοποιεί μια δειγματοληψία, κατά την χρονική περίοδο της διακύμανσης του θορύβου και από τα αποτελέσματα του υπολογίζεται το ποσοστό χρόνου κατά το οποίο παρατηρήθηκε μία συγκεκριμένη στάθμη θορύβου. Είναι ένα όργανο που τον υπολογισμό της μεταβολής της στάθμης του θορύβου για μία συγκεκριμένη χρονική περίοδο.

3.1.3 Μετρητής δόσεων θορύβου

Πρόκειται για ένα όργανο το οποίο εργάζεται με την ίδια μέθοδο που λειτουργεί ο στατιστικός αναλυτής. Ο μετρητής δόσεων θορύβου με τη βοήθεια ηλεκτρονικών κυκλωμάτων υπολογίζει, με βάση τα στατιστικά στοιχεία που διαλέγει από τη διακύμανση του θορύβου, τις δόσεις θορύβου, μια βοηθητική μονάδα για τον υπολογισμό της Ισοδύναμης Ηχητικής Στάθμης (L_{eq}).



Εικόνα 4.3 / Μετρητής δόσεων θορύβου.

Το όργανο αυτό χρησιμεύει ιδιαίτερα στον υπολογισμό της έκθεσης σε θόρυβο των εργαζομένων ατόμων.

3.1.4 Αναλυτής θορύβου

Πρόκειται για ένα όργανο στο οποίο είναι ενσωματωμένες οι δυνατότητες του στατιστικού αναλυτή, του μετρητή δόσεων θορύβου, αλλά και πολλές άλλες σημαντικές λειτουργίες.

3.2 Περιγραφή του μετρητικού εξοπλισμού και της πειραματικής διάταξης

Για την πραγματοποίηση των μετρήσεων της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκε ο εξής εξοπλισμός:

- Το ηχόμετρο, **Mediator 2238**, με εγκατεστημένο το λογισμικό, **Frequency Analysis Software BZ7123**, το οποίο επιτρέπει στο ηχόμετρο, εκτός από την μέτρηση της στάθμης του θορύβου, να κάνει και φασματική ανάλυση του θορύβου.

- Το λογισμικό, **Noise Explorer Type 7815**, το οποίο επιτρέπει την εισαγωγή των αποτελεσμάτων των μετρήσεων στον Η/Υ (συνδέοντας σειριακά το ηχόμετρο με τον Η/Υ). Εισάγοντας τα αποτελέσματα στον υπολογιστή διευκολύνεται η διαδικασία σύγκρισης των πειραματικών τιμών που προέκυψαν, με αυτές που προέκυψαν από το μαθηματικό μοντέλο.

- Ένας φυγοκεντρικός ηλεκτροανεμιστήρας (φουσητήρας) της **Siemens** συνδεδεμένος με ένα δίκτυο σωληνώσεων διαμέτρου $D=0.12$ (m) και συνολικού μήκους $L=3.5$ (m).

- Ένα ψηφιακό ανεμόμετρο της εταιρίας **TSI** με το οποίο μετρήθηκε η ταχύτητα της δέσμης στην έξοδο.



Εικόνα 4.4 / Ο φυγοκεντρικός φουσητήρας που χρησιμοποιήθηκε για την δημιουργία τη δέσμης.

Όλες οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο Θερμο-Ρευστομηχανικής του πανεπιστημίου.



Εικόνα 4.5 / Μέτρηση της ταχύτητας της δέσμης στην έξοδο, με στόμιο εξόδου τύπου γωνίας 90°.

Οι ρυθμίσεις του ηχομέτρου δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Elapsed Time:	0:01:53
Bandwidth:	1/3 Octave
Range:	30,0-110,0 dB
No. of Scans:	1
Dwell Time:	Optimized 0,5 dB
Time	F
Spectrum:	20-12,5kHz
Broad-band:	A
Instrument Serial Number:	2315776
Microphone Serial Number:	2285442
Input:	Microphone
Windscreen Correction:	Off
S. I. Correction:	Frontal
Calibration Level:	94,0 dB
Sensitivity:	-30,0 dB
Microphone:	2285442

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.1 / Ρυθμίσεις του ηχομέτρου.

Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν τρία διαφορετικά στόμια εξόδου, ένα λείο, ένα διαγραμμισμένο και τέλος ένα τύπου γωνίας 90°. Για κάθε στόμιο μετρήθηκε ο θόρυβος για τρεις διαφορετικές ταχύτητες εξόδου και σε έξι διαφορετικές θέσεις γύρω από την δέσμη.

3.3 Τεχνικά Χαρακτηριστικά του Ηχομέτρου

3.3.1 Εισαγωγή

Το συγκεκριμένο ηχόμετρο που χρησιμοποιήθηκε συμβαδίζει με τις προδιαγραφές περί ηχομέτρων (I.E.C. 61672). Έχει εγκατεστημένα φίλτρα, για την διαίρεση σε ζώνες συχνότητας, οκτάβας (1/1) και ένα τρίτο οκτάβας (1/3), αλλά και τα κατάλληλα φίλτρα διόρθωσης, τα οποία επιτρέπουν την διόρθωση των τιμών των μετρήσεων με βάση τις καμπύλες συντελεστών βαρύτητας της στάθμης της ηχητικής πίεσης, A, C και Lin. Η εγκατάσταση του λογισμικού Frequency Analysis BZ 7123 επιτρέπει την φασματική ανάλυση του θορύβου. Ουσιαστικά πραγματοποιείται μία σειριακή ανάλυση για κάθε ζώνη συχνότητας, και έτσι προκύπτουν καλύτερα συμπεράσματα για τον εξεταζόμενο θόρυβο.

3.3.2 Μεταβλητές που υπολογίζονται κατά την μέτρηση

Κατά την διάρκεια μιας μέτρησης υπολογίζονται οι εξής παράμετροι του ηχητικού φάσματος :

- **L_{eq}**: Συμβολίζει την τιμή της ισοδύναμης στάθμης ηχητικής πίεσης, για την παρούσα ζώνη συχνότητας, π.χ. **L_{1kHzzeq}**
- **L_{YMax}**: Συμβολίζει την μέγιστη τιμή της ισοδύναμης στάθμης ηχητικής πίεσης που ανιχνεύεται για την παρούσα ζώνη συχνότητας, π.χ. **L_{1kHzFMax}**
- **L_{YMin}**: Συμβολίζει την ελάχιστη τιμή της ισοδύναμης στάθμης ηχητικής πίεσης ανιχνεύεται για την παρούσα ζώνη συχνότητας π.χ. **L_{1kHzFMin}**

Η μεταβλητή Y, στις παραπάνω παραμέτρους, αναφέρεται στην επιλεγμένη χρονική σταθερά (F ή S) του χρόνου απόκρισης.

Οι τιμές των παρακάτω παραμέτρων υπολογίζονται μετά το πέρας της μέτρησης :

- **L_{Xeq}**: Συμβολίζει την τιμή της ισοδύναμης στάθμης ηχητικής πίεσης για την συνολική διάρκεια της μέτρησης όπως αυτό ορίζεται από το I.E.C. 1672.
- **L_{XYMax}**: Συμβολίζει την μέγιστη τιμή της ισοδύναμης στάθμης ηχητικής πίεσης που ανιχνεύεται για την συνολική διάρκεια της μέτρησής.
- **L_{XYMin}**: Συμβολίζει την ελάχιστη τιμή της ισοδύναμης στάθμης ηχητικής πίεσης που ανιχνεύεται για την συνολική διάρκεια της μέτρησής.
- **Overload %**: Είναι το ποσοστό του χρόνου όπου υπήρχε υπερφόρτωση, κατά την μέτρηση.

Τέλος κατά την διάρκεια της μέτρησης υπολογίζονται δύο στιγμιαίες παράμετροι οι οποίες είναι οι εξής :

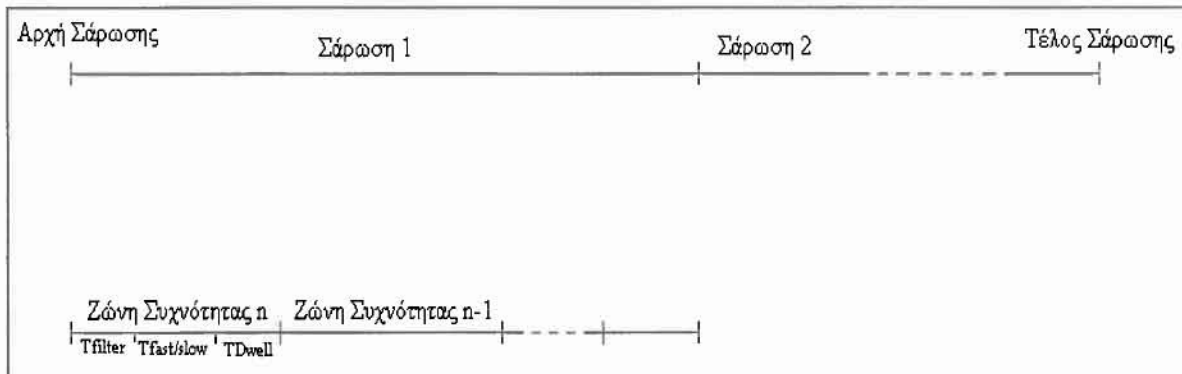
- **-L_{XYInst}**: Συμβολίζει την στιγμιαία τιμή του επιπέδου του RMS (Root Mean Square).
- **-L_{XYp}**: Συμβολίζει την στιγμιαία τιμή της στάθμης της ηχητικής πίεσης.

Οι μεταβλητές X & Y, στις παραπάνω παραμέτρους, αναφέρονται αντίστοιχα στην επιλεγμένη καμπύλη διόρθωσης (A, C, & Lin) και στην επιλεγμένη χρονική σταθερά, (F ή S) του χρόνου απόκρισης.

3.3.3 Σειριακή Ανάλυση Συχνοτήτων

Το Mediator 2238, με εγκατεστημένο το κατάλληλο φίλτρο, μπορεί να μετρήσει επίπεδα θορύβου σε 9, 1/1 ζώνες οκτάβας (από 31.5Hz μέχρι 8kHz) ή σε 29, 1/3 ζώνες οκτάβας (από 20Hz μέχρι 12.5kHz).

Η σειριακή ανάλυση συχνοτήτων είναι ένας αριθμός διαδοχικών μετρήσεων που πραγματοποιείται για κάθε επιλεγμένη ζώνη συχνότητας. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζεται σε ένα φάσμα το οποίο αντιστοιχεί στον χρόνο που χρειάστηκε για να πραγματοποιηθεί η μέτρηση (measurement time ή elapsed time).



Εικόνα 4.6 / Σειριακή Ανάλυση Συχνοτήτων

Η χρονική ακολουθία για μία μέτρηση αποτελείται από έναν αριθμό σαρώσεων. Κάθε σάρωση είναι μία σειριακή ανάλυση συχνοτήτων η οποία αποτελείται από έναν αριθμό (n) από ζώνες συχνότητας. Ο χρόνος που χρειάζεται για κάθε ζώνη συχνότητας είναι το άθροισμα τριών χρονικών διαστημάτων, των:

$$T_{\text{Filter}} + T_{\text{Fast/Slow}} + T_{\text{Dwell}} = T_{\text{total}}$$

Η ανάλυση γίνεται μετρώντας κάθε ζώνη συχνότητας σειριακά. Η μέθοδος αυτή είναι κατάλληλη για περιοδικά στάσιμα σήματα, π.χ. θόρυβος που παράγεται από περιστροφικές μηχανές. Για υψηλά κυμαινόμενα σήματα, π.χ. η απογείωση ενός αεροπλάνου, η μέθοδος δεν δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα (σε αντίθεση με την παράλληλη ανάλυση συχνοτήτων).

3.3.4 T_{dwell}

Πρόκειται για τον χρόνο που χρειάζεται το ηχόμετρο για να σαρωθεί μία ζώνη συχνότητας. Το Mediator 2238 παρέχει δύο διαφορετικούς τρόπους για τον έλεγχο της συγκεκριμένης μεταβλητής, επιλέγοντας ανάμεσα στα:

- **Optimized Dwell Time**...όπου υπάρχει η δυνατότητα επιλογής ανάμεσα σε τρία επίπεδα στατιστικού σφάλματος ή ανοχής
- **Fixed Dwell Time**...όπου ο χρήστης διαλέγει οποιαδήποτε τιμή θέλει για την μεταβλητή.

3.3.4.1 Optimized Dwell Time

Όταν επιλέγεται η μεταβλητή **Optimized Dwell Time** θεωρείται ότι η αξιοπιστία όλων των ζωνών συχνότητας είναι η ίδια.

Τα τρία επίπεδα στατιστικού σφάλματος ή ανοχής χρησιμοποιούνται είναι: **0.25 (dB) - 0.50 (dB) - 1.00 (dB)**.

Αξιοσημείωτο είναι ότι η επιλογή του επιπέδου ανοχής επηρεάζει σημαντικά τον συνολικό χρόνο της μέτρησης. Για παράδειγμα για να ανιχνευτούν όλες οι 1/3 ζώνες οκτάβας ενός σήματος με επιλεγμένη ανοχή 0.25dB χρειάζονται 5 λεπτά και 50 δευτερόλεπτα ενώ με επιλεγμένη ανοχή 1dB χρειάζονται 55 δευτερόλεπτα. Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι το μεγαλύτερο μέρος του χρόνου της μέτρησης καταναλώνεται για την ανίχνευση των χαμηλών συχνοτήτων (>625Hz).

3.3.4.2 Fixed Dwell Time

Όταν επιλέγεται η μεταβλητή **Fixed Dwell Time** η ίδια ποσότητα χρόνου χρησιμοποιείται για όλες τις 1/1 & 1/3 ζώνες οκτάβας. Η ποσότητα αυτή μπορεί να οριστεί από τον χρήστη από 1 δευτερόλεπτο έως 60 λεπτά.

3.3.5 T_{Filter}

Είναι ο χρόνος που χρειάζεται το ηχόμετρο για ενεργοποιήσει το κατάλληλο φίλτρο (1/1 ή 1/3 οκτάβας) και σιγουρευτεί ότι το συγκεκριμένο φίλτρο αλλά και ο ανιχνευτής είναι εγκατεστημένα.

3.3.6 $T_{\text{Fast/Slow}}$

Πρόκειται για τον χρόνο απόκρισης (response time) του ηχομέτρου. Η τιμή του καθορίζεται από την χρονική σταθερά που έχει επιλεγεί (F ή S). Το ηχόμετρο για κάθε ζώνη συχνότητας που σαρώνει κάνει έναν έλεγχο της τιμής της χρονικής σταθεράς. Ο χρόνος που απαιτείται, για τον έλεγχο αυτό, είναι συγκεκριμένος και έχει τιμή :

- 0.475 sec...αν η χρονική σταθερά είναι F
- 3.8 sec.....αν η χρονική σταθερά είναι S.

3.3.7 Συνολικός Χρόνος Μέτρησης (T_{total})

Ο συνολικός χρόνος που απαιτείται για να σαρωθεί μία ζώνη συχνότητας είναι το άθροισμα των τριών χρονικών μεταβλητών που παρουσιάστηκαν παραπάνω. Το άθροισμα των συνολικών χρόνων για κάθε ζώνη συχνότητας μας δίνει τον συνολικό χρόνο της μέτρησης.

Αξιοπρόσεκτο είναι ότι το μεγαλύτερο μέρος του συνολικού χρόνου μέτρησης καταναλώνεται στην σειριακή ανάλυση των χαμηλών συχνοτήτων του θορύβου. Ενδεικτικό παράδειγμα, για την συχνότητα των 12,5 kHz με 1/3 οκτάβας, χρόνο απόκρισης “F” και Optimized Dwell Time = 0,25 (dB) ο συνολικός χρόνος ανάλυσης είναι $T_{ολ} = 1.225$ sec, ενώ για την συχνότητα των 40 Hz με 1/3 οκτάβας, χρόνο απόκρισης “F” και Optimized Dwell Time = 0,25 (dB) ο συνολικός χρόνος ανάλυσης είναι $T_{ολ} = 34,285$ sec!

Στον πίνακα 3.2 παρουσιάζονται όλες οι τιμές των μεταβλητών που αναφέρθηκαν, για κάθε ζώνη συχνότητας.

Freq. (Hz)	Tfilter (sec)		Tfast/slow (sec)	Tdwell (optimized) (sec)					
	1/3 - oct.	1/1 - oct.		0.25 dB		0.50 dB		1.00 dB	
				1/3 - oct.	1/1 - oct.	1/3 - oct.	1/1 - oct.	1/3 - oct.	1/1 - oct.
12500	0.5	-	fast : 0.475 slow : 3.8	0.25	-	0.25	-	0.25	
10000	0.5			0.25		0.25		0.25	
8000	0.5			0.25		0.25		0.25	
6250	0.5	0.5		0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
5000	0.5			0.26		0.25		0.25	
4000	0.5			0.33		0.25		0.25	
3125	0.5	0.5		0.41	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
2500	0.5			0.52		0.25		0.25	
2000	0.5			0.65		0.25		0.25	
1600	0.5	0.5		0.82	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
1250	0.5			1.04		0.26		0.25	
1000	0.5			1.31		0.33		0.25	
800	0.5	0.5		1.64	0.43	0.41	0.25	0.25	0.25
625	0.5			2.07		0.52		0.25	
500	0.55			2.61		0.65		0.25	
400	0.5	0.5		3.28	0.86	0.82	0.25	0.25	0.25
315	0.5			4.13		1.04		0.26	
250	0.5			5.20		1.31		0.33	
200	0.5	0.7		6.55	1.71	1.64	0.43	0.41	0.25
160	0.5			8.24		2.06		0.52	
125	0.5		10.37		2.59		0.65		
100	0.5	0.7	13.06	3.42	3.27	0.86	0.82	0.25	
80	0.5		16.44		4.11		1.04		
62.5	0.63		20.70		5.18		1.29		
50	0.8	0.7	26.06	6.79	6.52	1.70	1.63	0.42	
40	1	0.7	32.81	13.58	8.20	3.39	2.05	0.85	

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.2 / Τιμές των τριών χρονικών μεταβλητών για κάθε ζώνη συχνότητας, ανάλογα με το επιλεγμένο φίλτρο (1/1 ή 1/3).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ & ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων, για το επίπεδο της στάθμης της ηχητικής πίεσης του αεροδυναμικού θορύβου δέσμης, που υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας το ηχώμετρο Mediator 2238. Στην συνέχεια υπολογίζεται η στάθμη της ηχητικής πίεσης, για τις ίδιες συνθήκες, χρησιμοποιώντας την μέθοδο των Bien & Hansen και συγκρίνονται τα αποτελέσματα της με τις τιμές που υπολογίστηκαν με το ηχώμετρο. Τέλος, εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα τόσο για το ηχητικό πεδίο που δημιουργείται, όσο και για την ακρίβεια της αριθμητικής μεθόδου που χρησιμοποιήθηκε.

4.1 Εισαγωγή

Οι μετρήσεις μπορούν να χωριστούν στις εξής ομάδες:

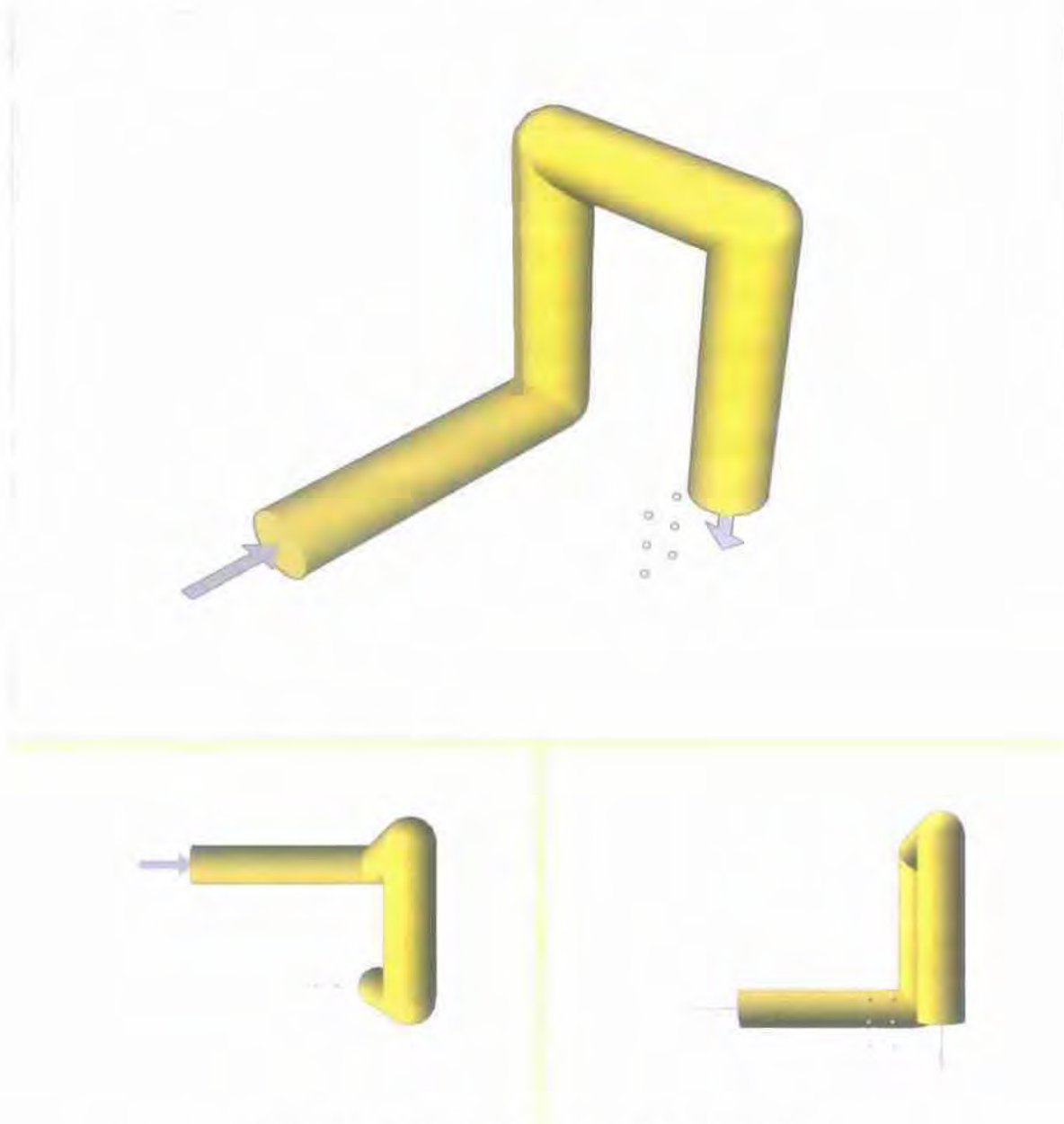
- **1^η Ομάδα Μετρήσεων:** Λείο στόμιο εξόδου.
 - για $U = 13.8$ (m/s) υπολογίστηκε το $Le_q(i)$, όπου $i=1, \dots, 6$.
 - για $U = 21.4$ (m/s) υπολογίστηκε το $Le_q(i)$, όπου $i=1, \dots, 6$.
 - για $U = 28.6$ (m/s) υπολογίστηκε το $Le_q(i)$, όπου $i=1, \dots, 6$.
- **2^η Ομάδα Μετρήσεων:** Διαγραμμισμένο στόμιο εξόδου.
 - για $U = 13.8$ (m/s) υπολογίστηκε το $Le_q(i)$, όπου $i=1, \dots, 6$.
 - για $U = 21.4$ (m/s) υπολογίστηκε το $Le_q(i)$, όπου $i=1, \dots, 6$.
 - για $U = 28.6$ (m/s) υπολογίστηκε το $Le_q(i)$, όπου $i=1, \dots, 6$.
- **3^η Ομάδα Μετρήσεων:** Στόμιο εξόδου τύπου γωνίας 90° .
 - για $U = 14.5$ (m/s) υπολογίστηκε το $Le_q(i)$, όπου $i=1, \dots, 6$.
 - για $U = 23.0$ (m/s) υπολογίστηκε το $Le_q(i)$, όπου $i=1, \dots, 6$.
 - για $U = 33.2$ (m/s) υπολογίστηκε το $Le_q(i)$, όπου $i=1, \dots, 6$.

όπου:

$Le_q(i)$, $i=1, \dots, 6$ είναι η στάθμη της ηχητικής πίεσης σε κάθε μία από τις έξι διαφορετικές θέσεις γύρω από τον κάθετο άξονα της δέσμης.

4.2 1^η Ομάδα Μετρήσεων

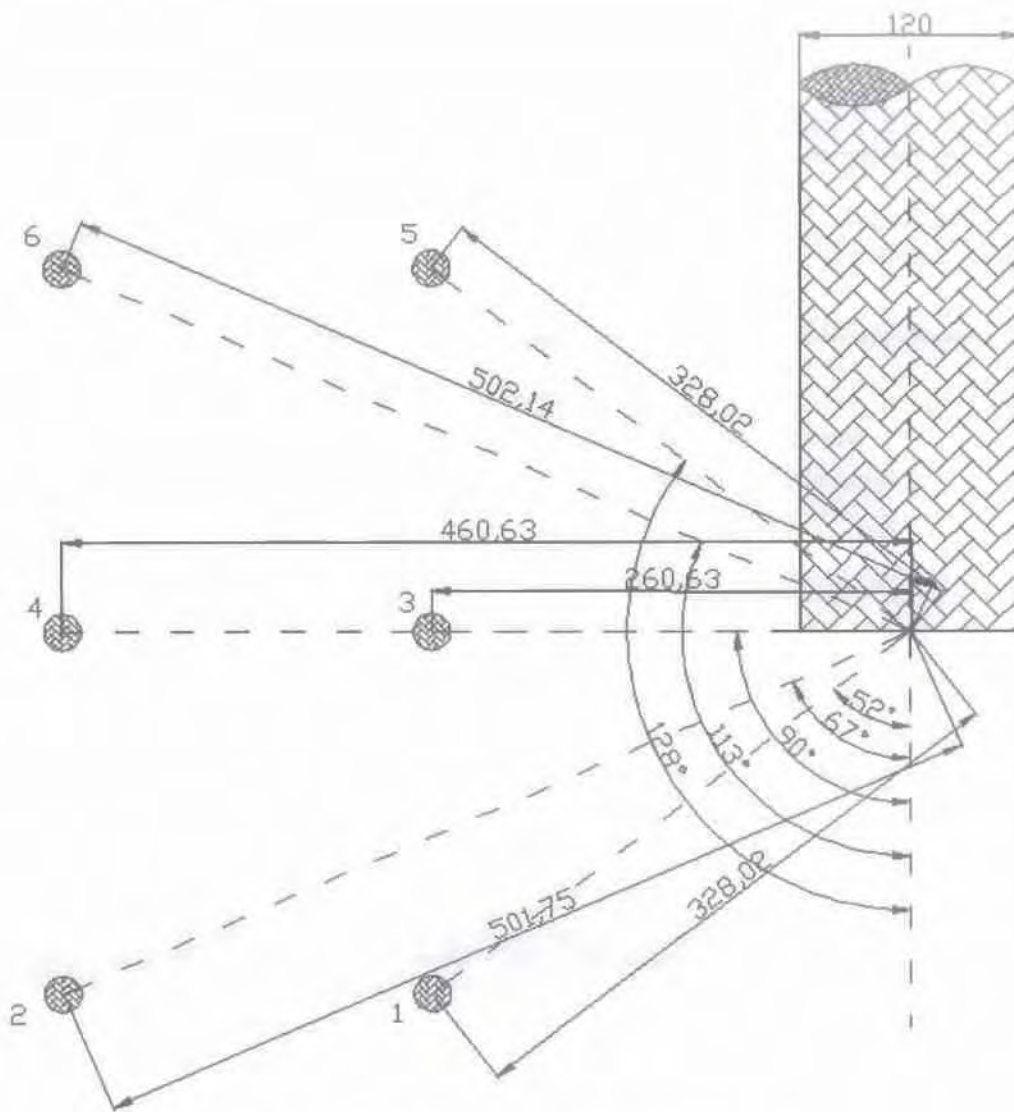
Για την ομάδα 1 έγιναν μετρήσεις της ηχητικής πίεσης με λείο στόμιο εξόδου. Στην παρακάτω εικόνα δίνεται μία τρισδιάστατη απεικόνιση του πειράματος.



Εικόνα 4.1 / Τρισδιάστατη απεικόνιση του πειράματος

Τα βέλη παριστάνουν την πορεία της δέσμης (είσοδος και έξοδος αέρα) ενώ οι έξι κύκλοι αριστερά της εξόδου συμβολίζουν τις έξι διαφορετικές θέσεις του μικροφώνου.

Η γεωμετρία του πειράματος φαίνεται στην παρακάτω εικόνα όπου αναγράφεται η τιμή της γωνίας θ_i ($i = 1, \dots, 6$) και η τιμή της απόστασης r_i ($i = 1, \dots, 6$).



Εικόνα 4.2 / Γεωμετρική ανάλυση του πειράματος

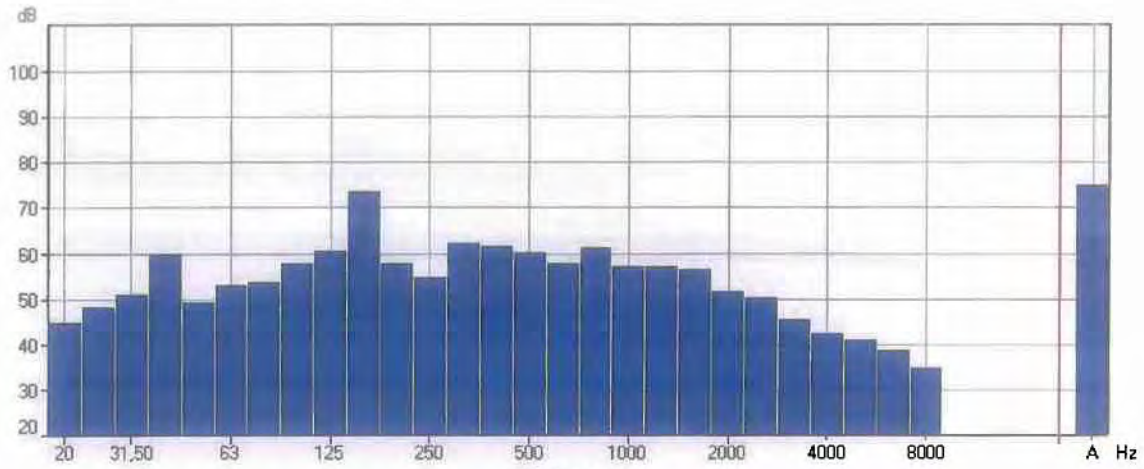
4.2.1 Ταχύτητα δέσμης στην έξοδο $U = 13.8$ (m/s)

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι τιμές της ισοδύναμης στάθμης ηχητικής πίεσης, καθώς επίσης και οι μέγιστη αλλά και ελάχιστη τιμή της ισοδύναμης στάθμης ηχητικής πίεσης, για τις έξι διαφορετικές θέσεις του ηχομέτρου.

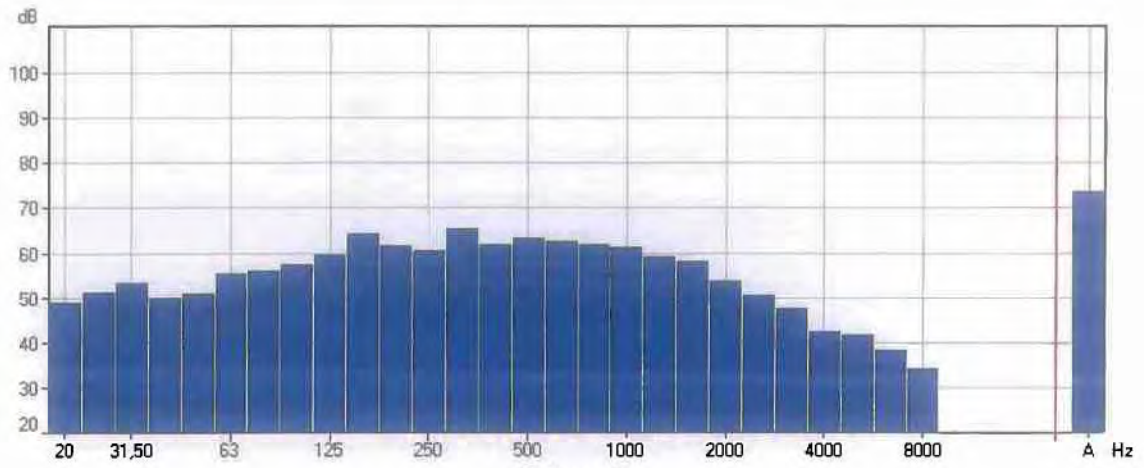
ΘΕΣΗ	Leq(A)	Leq(A)max	Leq(A)min
1	74,9	77,3	72,8
2	73,3	75	71,9
3	77,3	79,6	75
4	75,9	77,4	74,3
5	71,2	72,7	69,8
6	71,1	74,3	69,8

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1 / Οι τιμές της ηχητικής πίεσης της 1^{ης} ομάδας μετρήσεων και για ταχύτητα δέσμης $U=13.8$ (m/s)

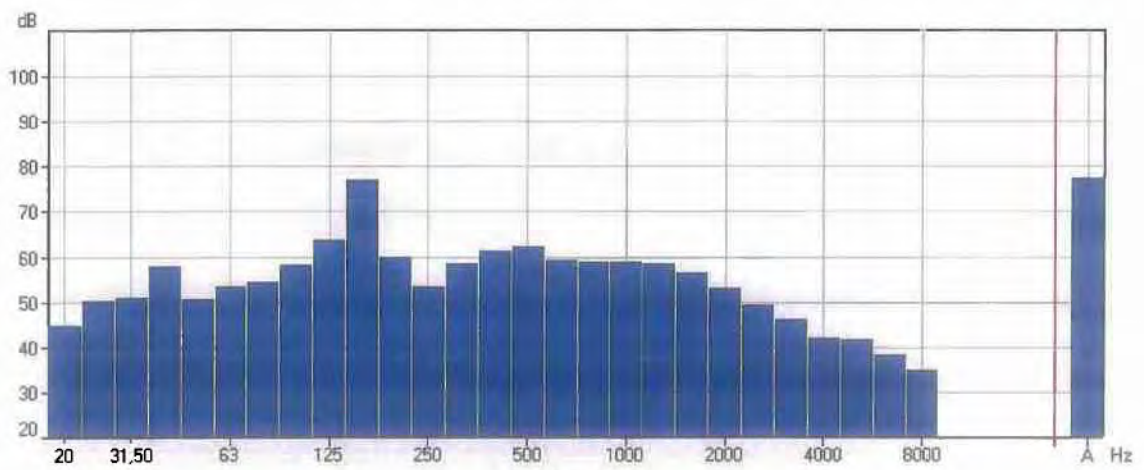
Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα φάσματα, του ήχου στην αντίστοιχη θέση, όπου μετρήθηκε ο ήχος.



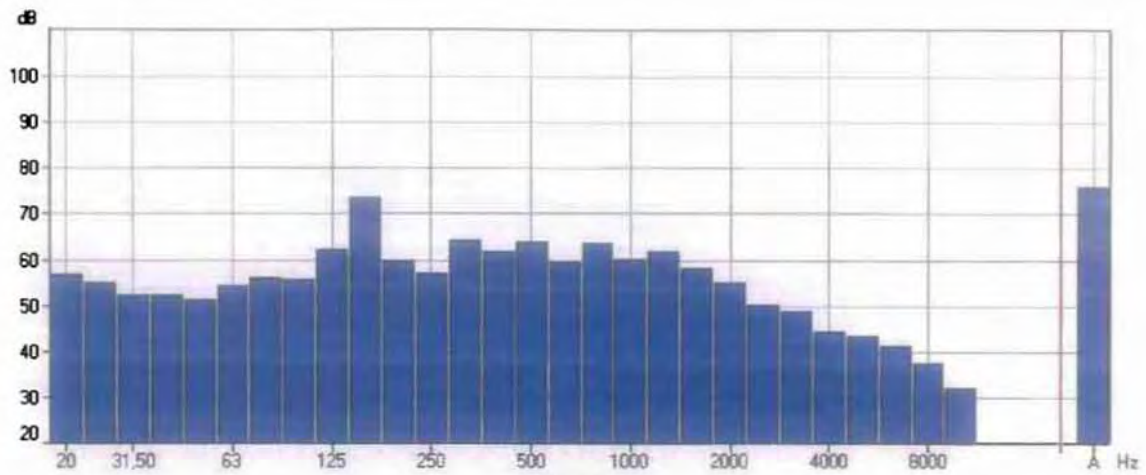
Θέση 1



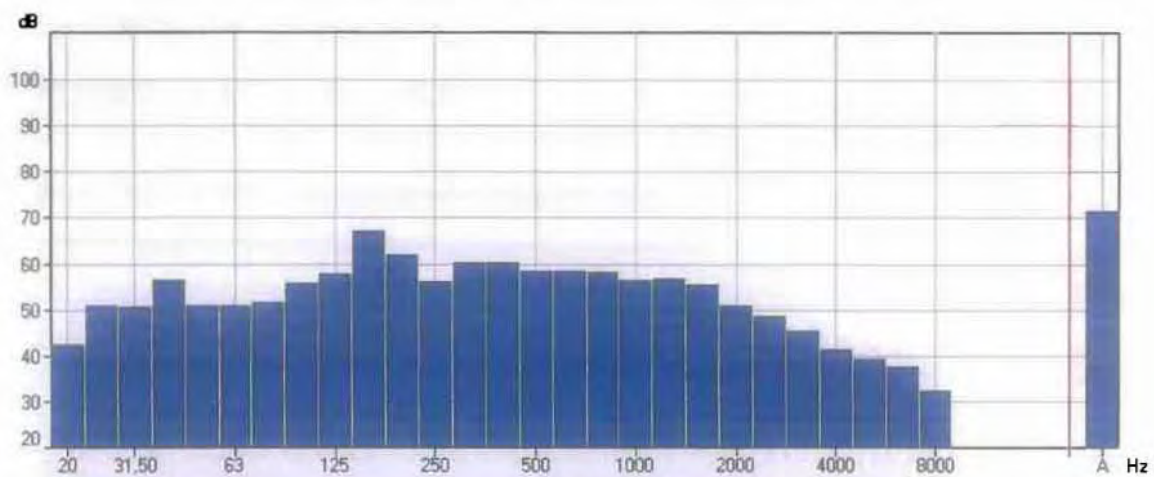
Θέση 2



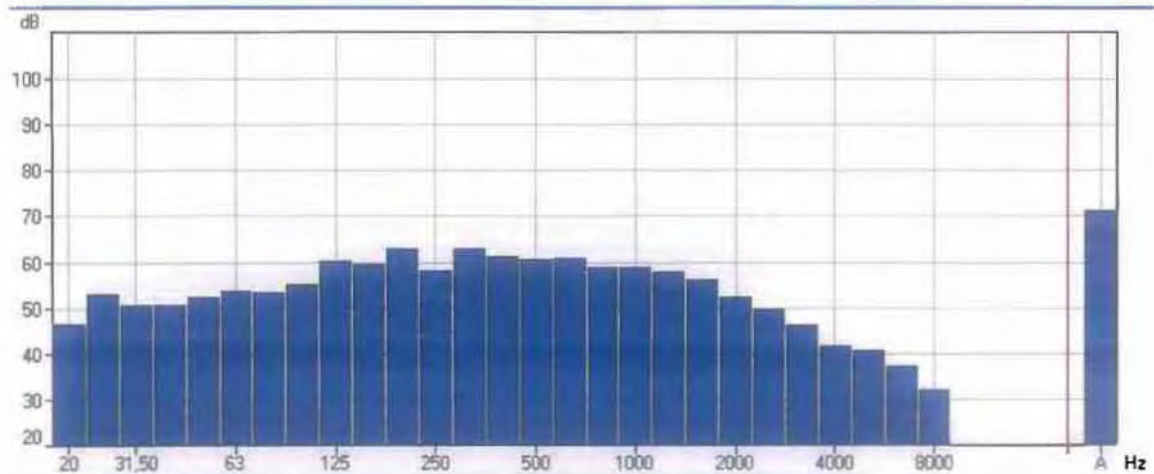
Θέση 3



Θέση 4



Θέση 5



Θέση 6

4.2.2 Ταχύτητα δέσμης στην έξοδο $U = 21.4$ (m/s)

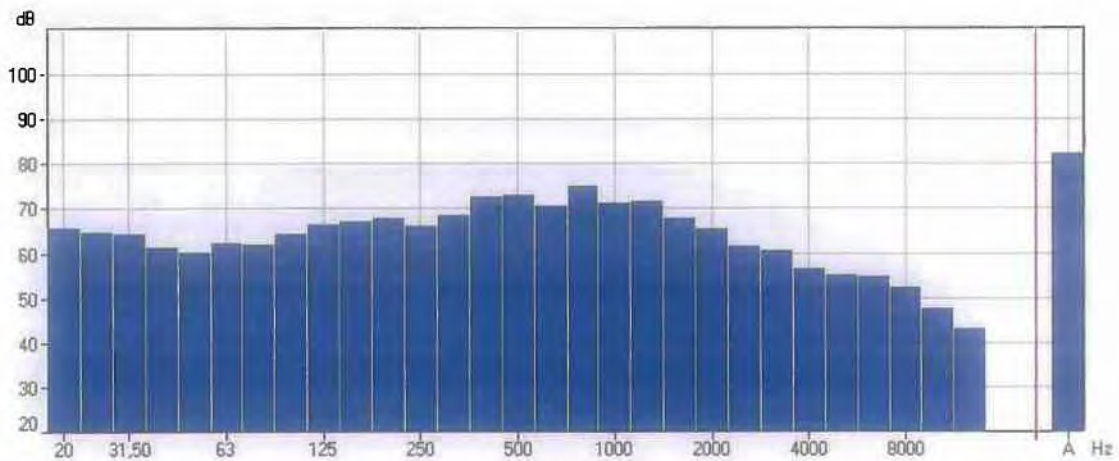
Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι τιμές της ισοδύναμης στάθμης ηχητικής πίεσης, καθώς επίσης και οι μέγιστη αλλά και ελάχιστη τιμή της

ισοδύναμης στάθμης ηχητικής πίεσης, για τις έξι διαφορετικές θέσεις του ηχομέτρου.

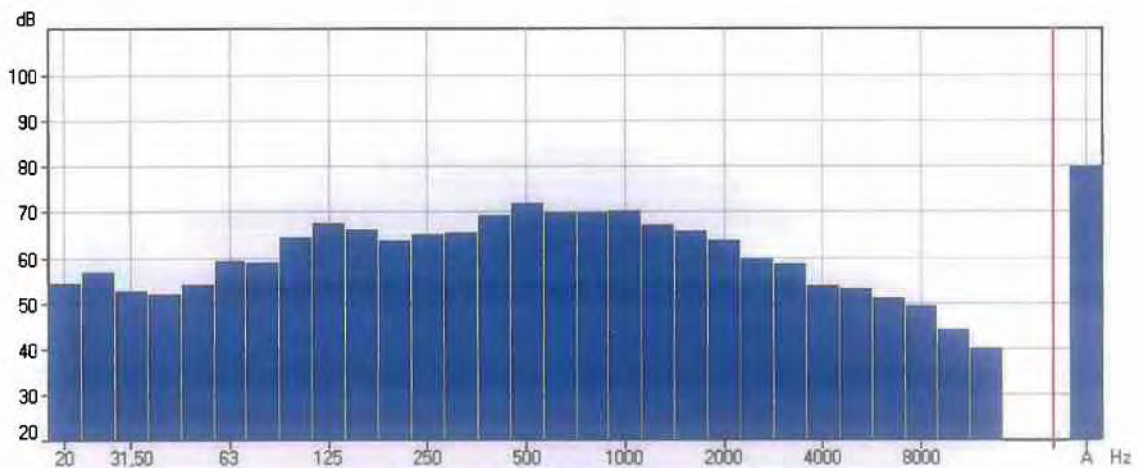
ΘΕΣΗ	L _{eq} (A)	L _{eq} (A) _{max}	L _{eq} (A) _{min}
1	81,8	83	80,8
2	79,4	80,8	78,4
3	82,1	83,2	81,1
4	79,5	80,7	78,3
5	80,6	81,8	79,7
6	78,6	80	77,7

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.2 / Οι τιμές της ηχητικής πίεσης της 1^{ης} ομάδας μετρήσεων και για ταχύτητα δέσμης U=21.4 (m/s)

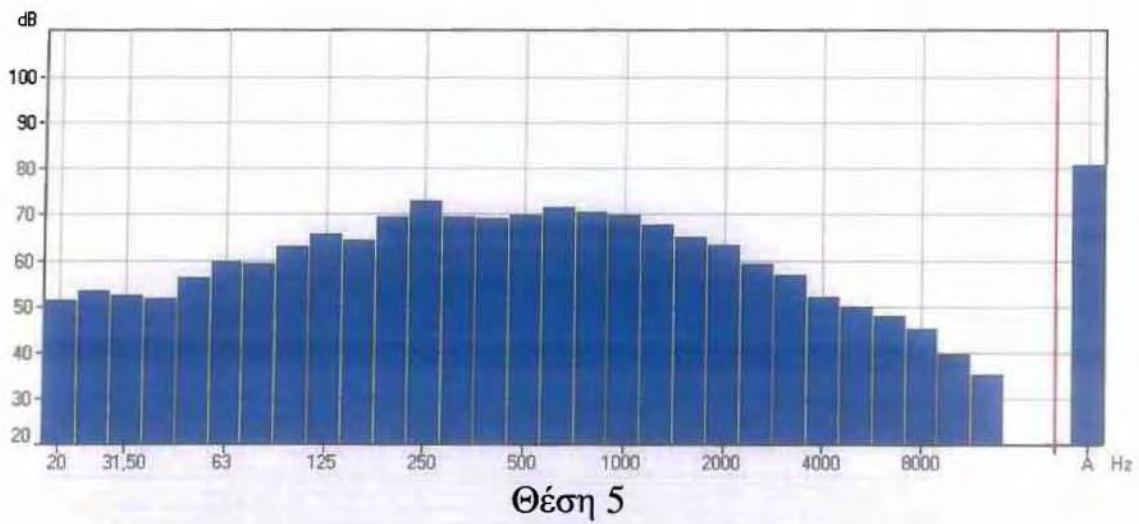
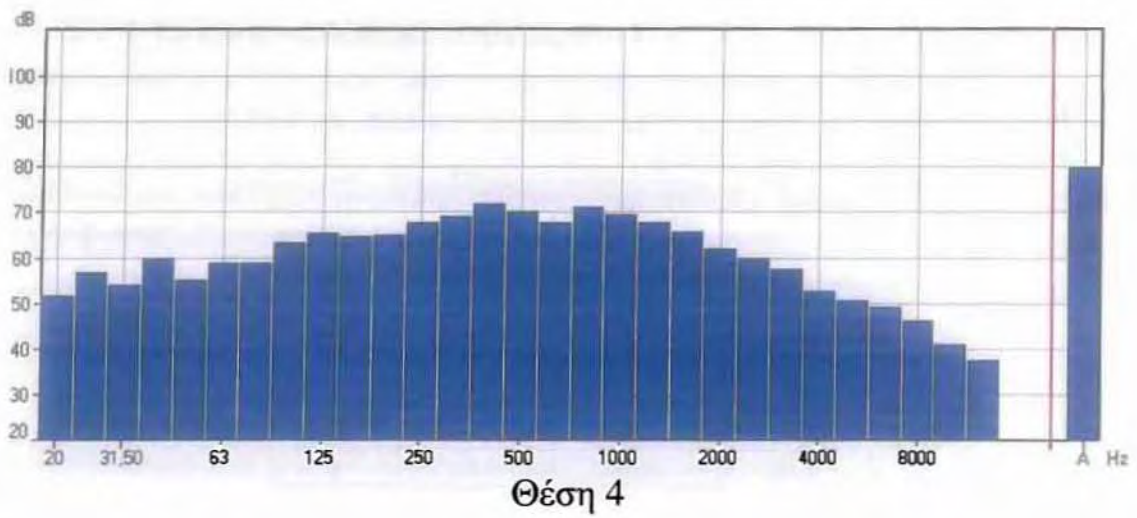
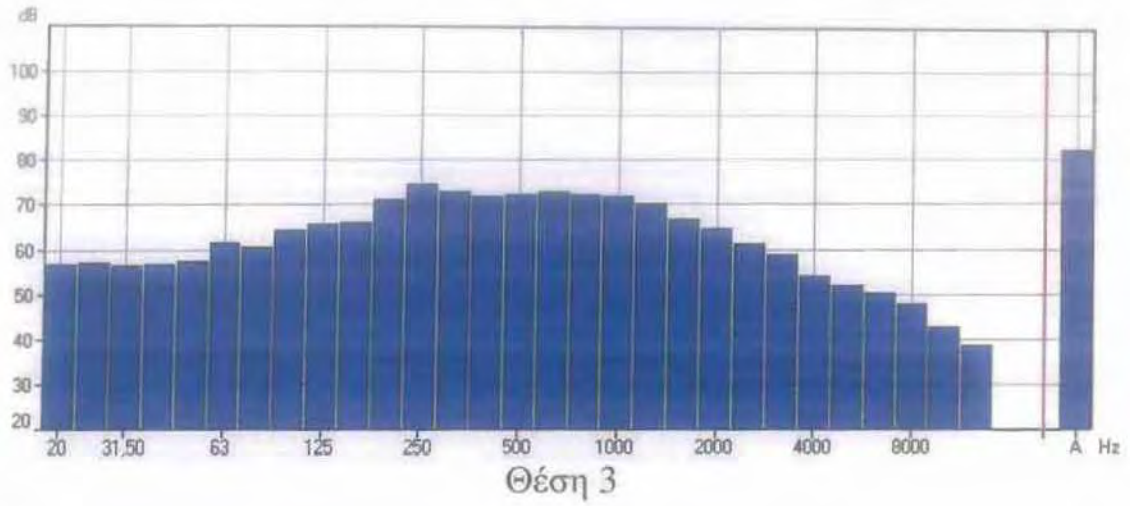
Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα φάσματα, του ήχου στην αντίστοιχη θέση, όπου μετρήθηκε ο ήχος.

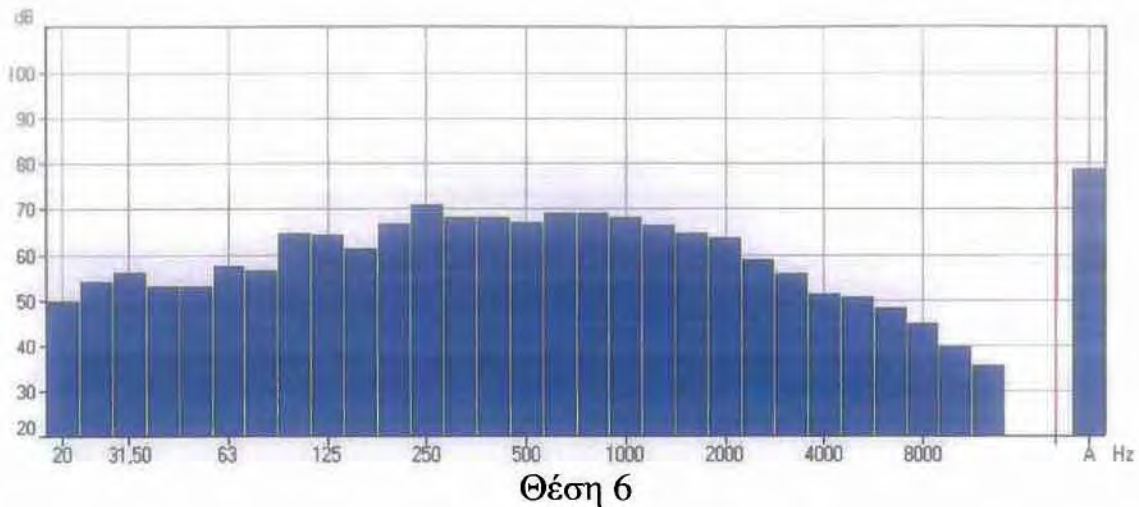


Θέση 1



Θέση 2





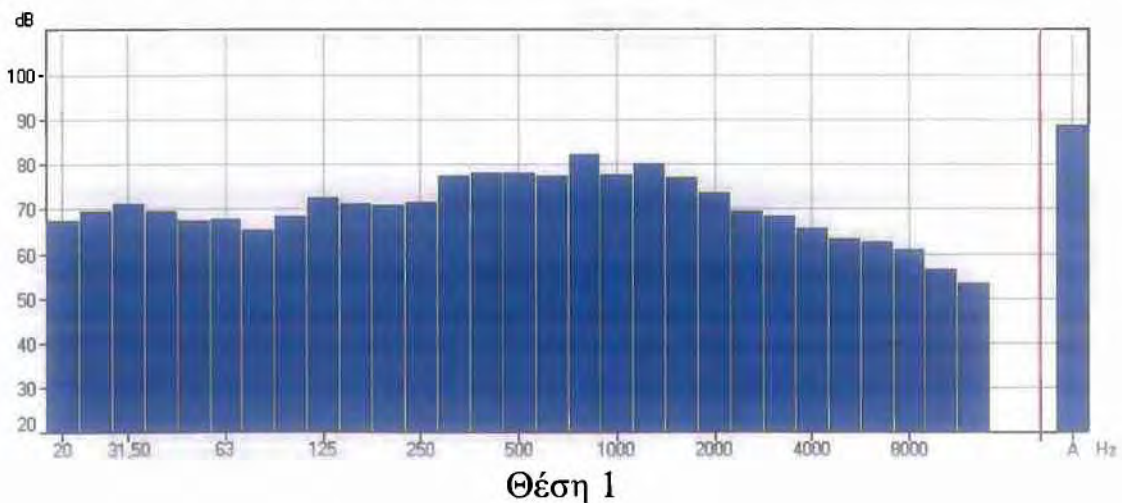
4.2.3 Ταχύτητα δέσμης στην έξοδο $U = 28.6$ (m/s)

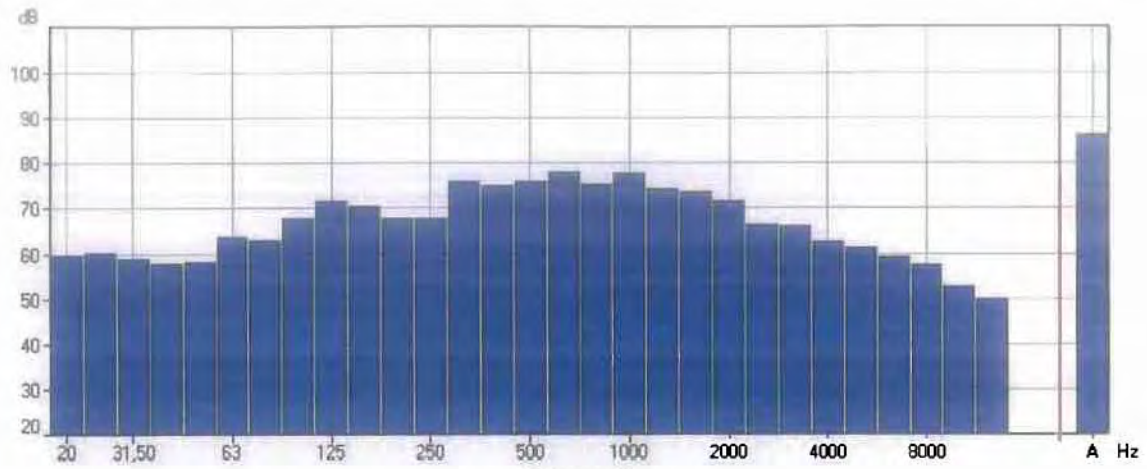
Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι τιμές της ισοδύναμης στάθμης ηχητικής πίεσης, καθώς επίσης και οι μέγιστη αλλά και ελάχιστη τιμή της ισοδύναμης στάθμης ηχητικής πίεσης, για τις έξι διαφορετικές θέσεις του ηχομέτρου.

ΘΕΣΗ	Leq(A)	Leq(A)max	Leq(A)min
1	88,5	89,4	87,7
2	86	87	85
3	88,6	90	87,4
4	85,8	86,9	84,7
5	86,4	87,4	85,3
6	84,5	85,6	83,6

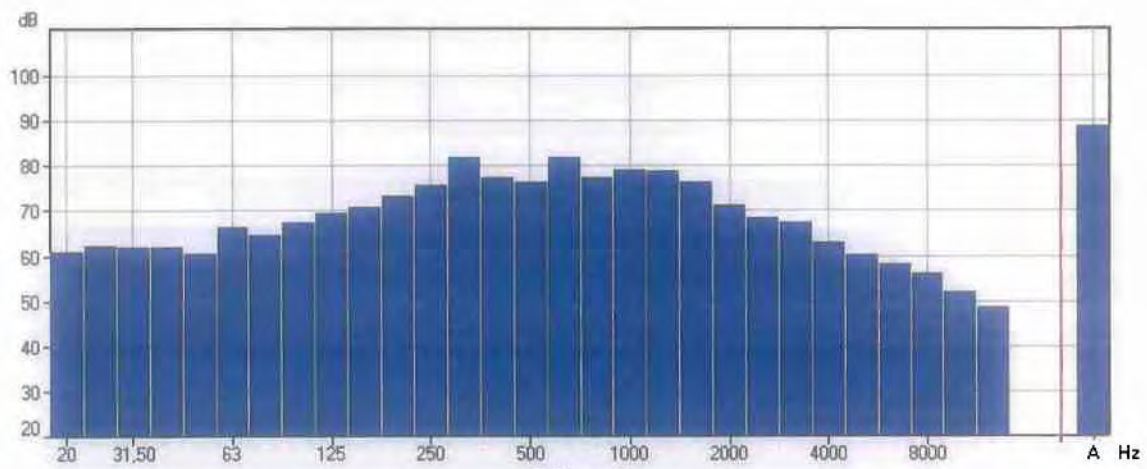
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.3 / Οι τιμές της ηχητικής πίεσης της 1^{ης} ομάδας μετρήσεων και για ταχύτητα δέσμης $U=28.6$ (m/s)

Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα φάσματα, του ήχου στην αντίστοιχη θέση, όπου μετρήθηκε ο ήχος.

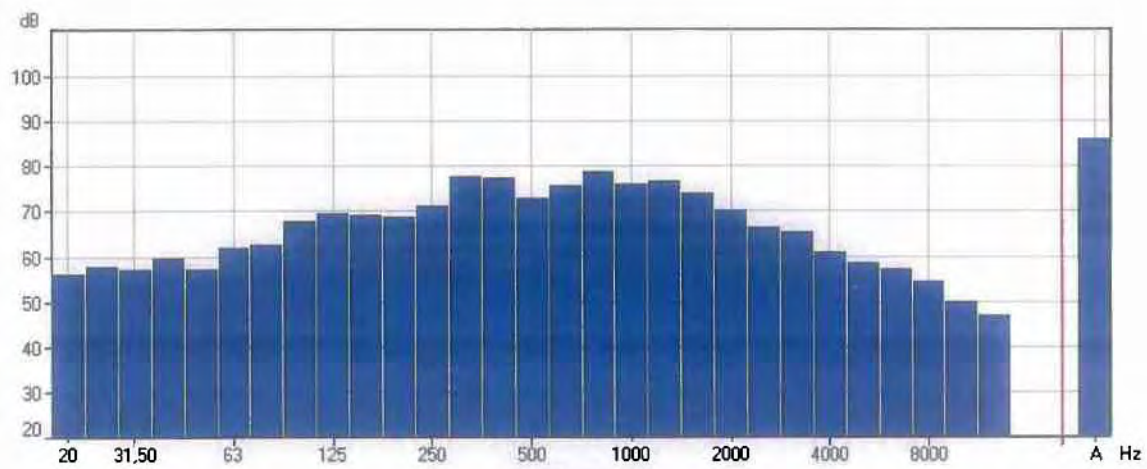




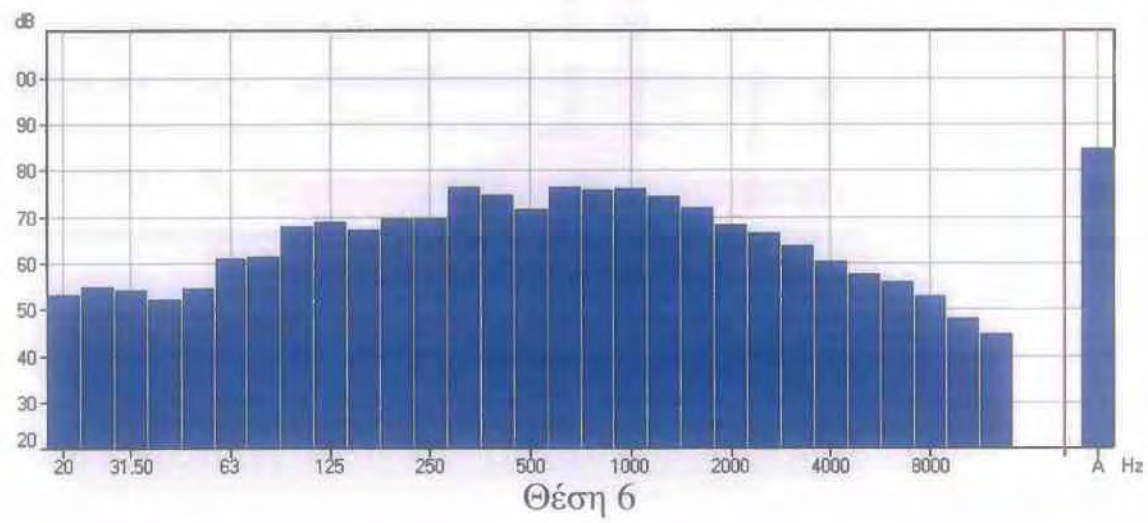
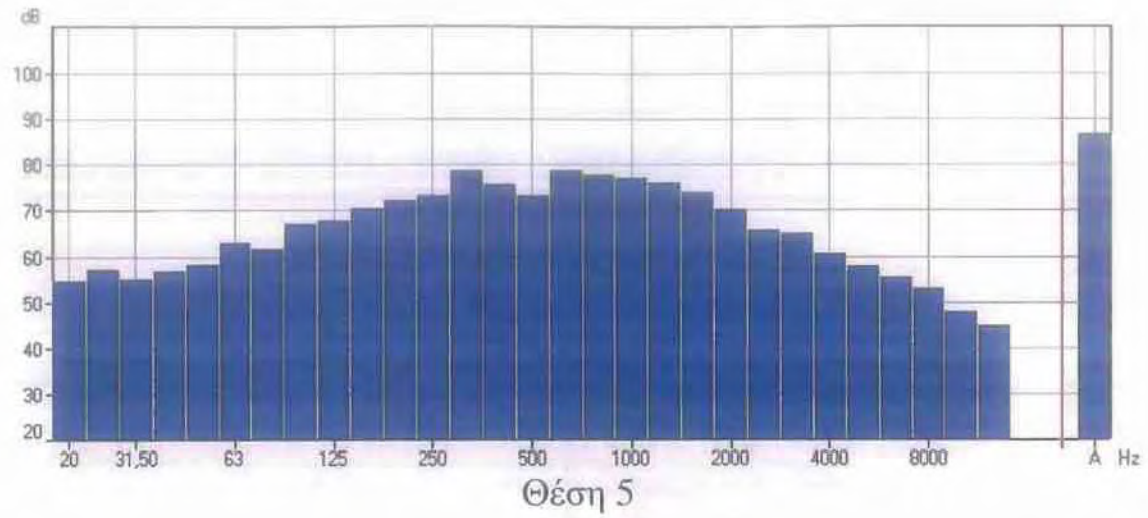
Θέση 2



Θέση 3

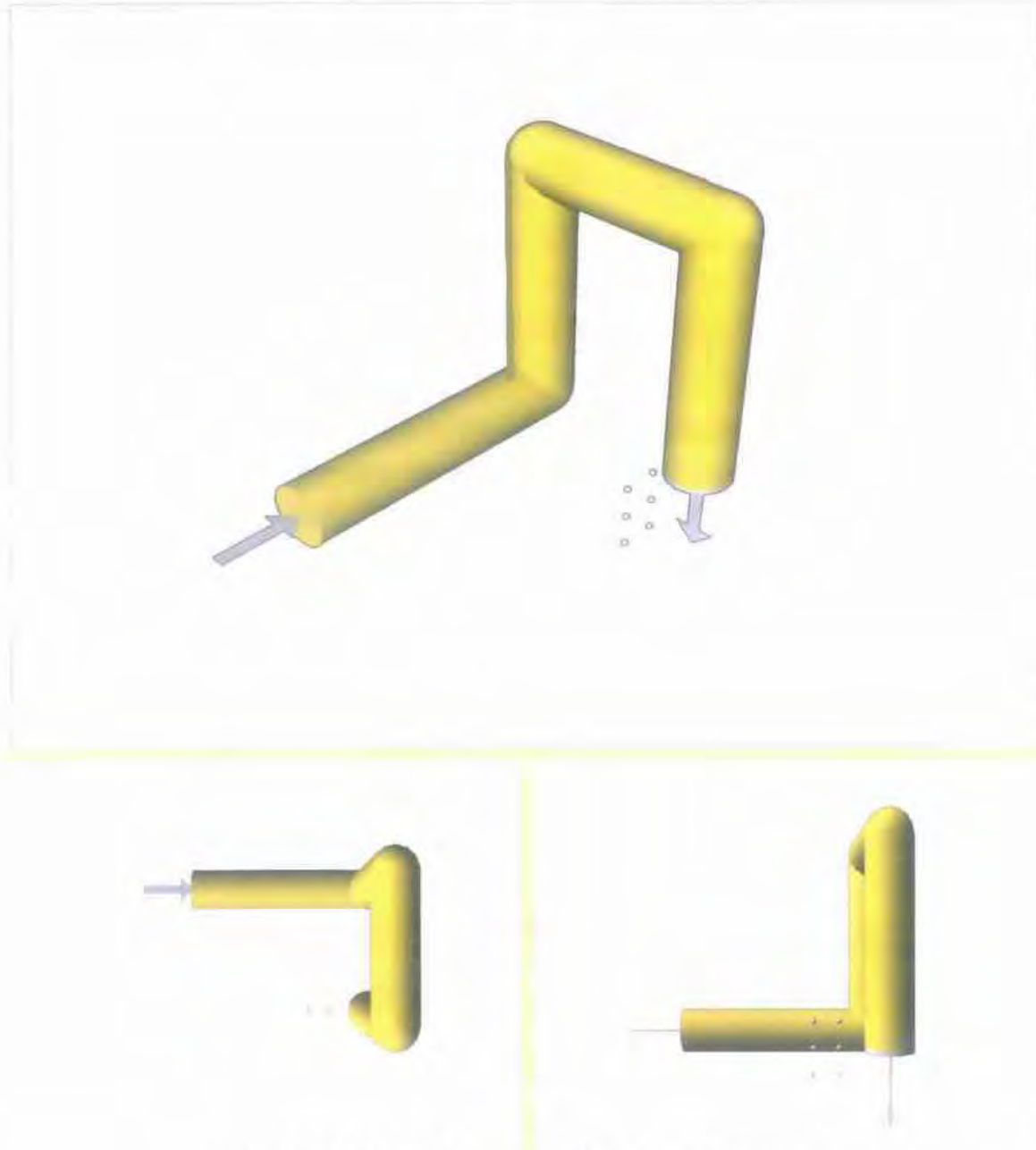


Θέση 4



4.3 2^η Ομάδα Μετρήσεων

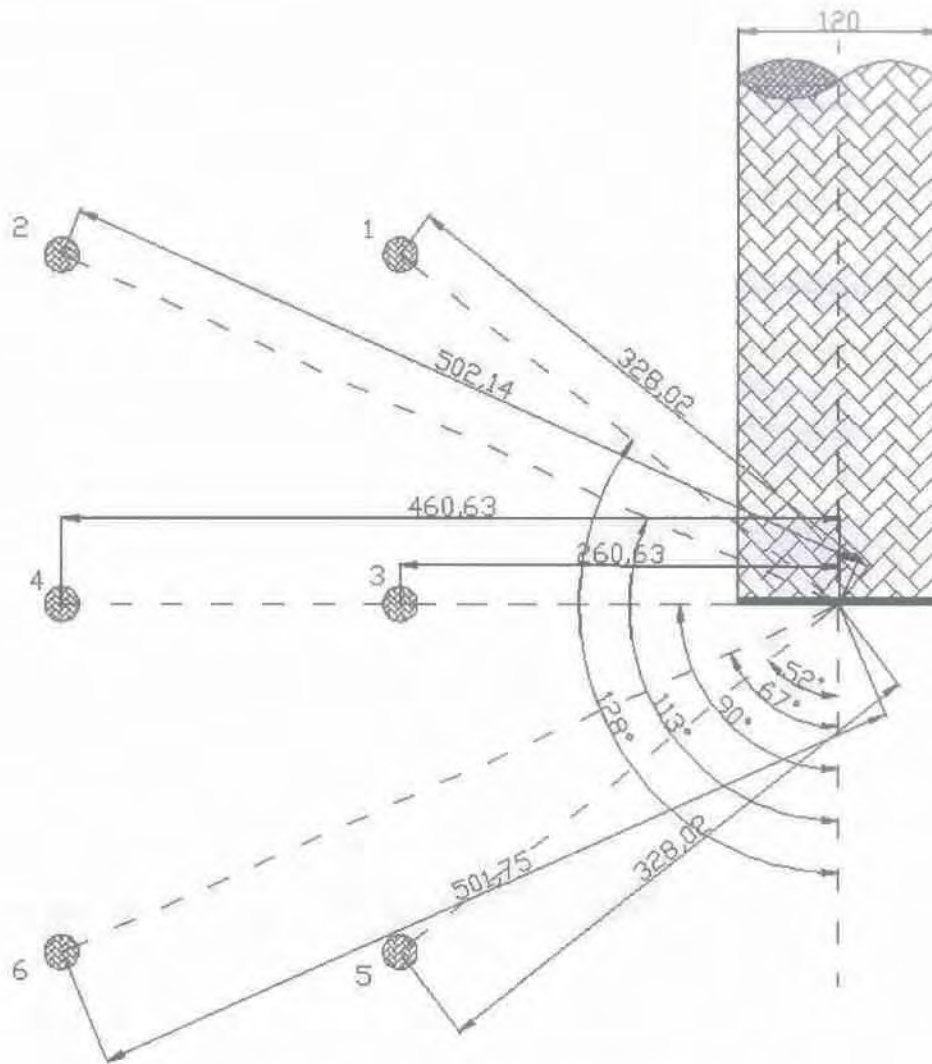
Για την ομάδα 2 έγιναν μετρήσεις της ηχητικής πίεσης με διαγραμμισμένο στόμιο εξόδου. Στην παρακάτω εικόνα δίνεται μία τρισδιάστατη απεικόνιση του πειράματος.



Εικόνα 4.4 / Τρισδιάστατη απεικόνιση του πειράματος

Τα βέλη παριστάνουν την πορεία της δέσμης (είσοδος και έξοδος αέρα) ενώ οι έξι κύκλοι αριστερά της εξόδου συμβολίζουν τις έξι διαφορετικές θέσεις του μικροφώνου.

Η γεωμετρία του πειράματος φαίνεται στην παρακάτω εικόνα όπου αναγράφεται η τιμή της γωνίας θ_i ($i = 1, \dots, 6$) και η τιμή της απόστασης r_i ($i = 1, \dots, 6$).



Εικόνα 4.5 / Γεωμετρική ανάλυση του πειράματος

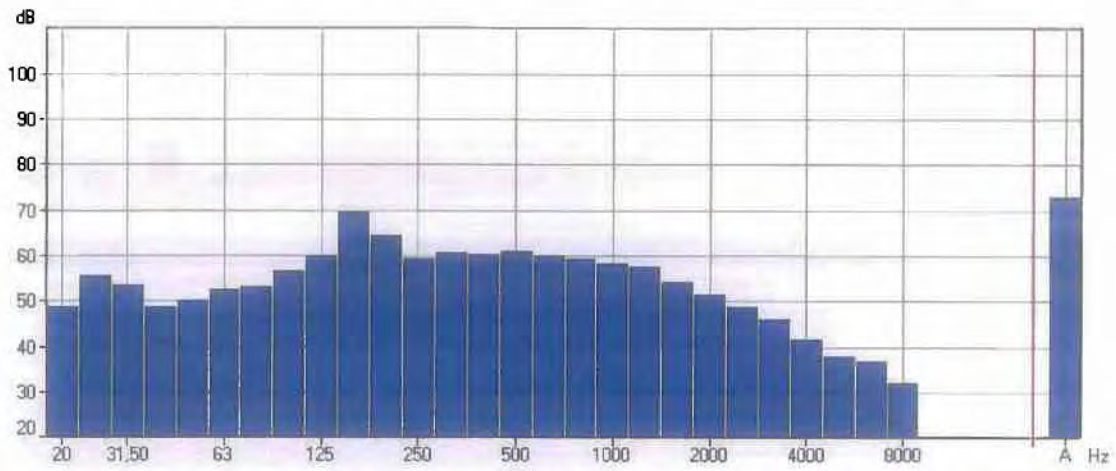
4.3.1 Ταχύτητα δέσμης στην έξοδο $U = 13.8$ (m/s)

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι τιμές της ισοδύναμης στάθμης ηχητικής πίεσης, καθώς επίσης και οι μέγιστη αλλά και ελάχιστη τιμή της ισοδύναμης στάθμης ηχητικής πίεσης, για τις έξι διαφορετικές θέσεις του ηχομέτρου.

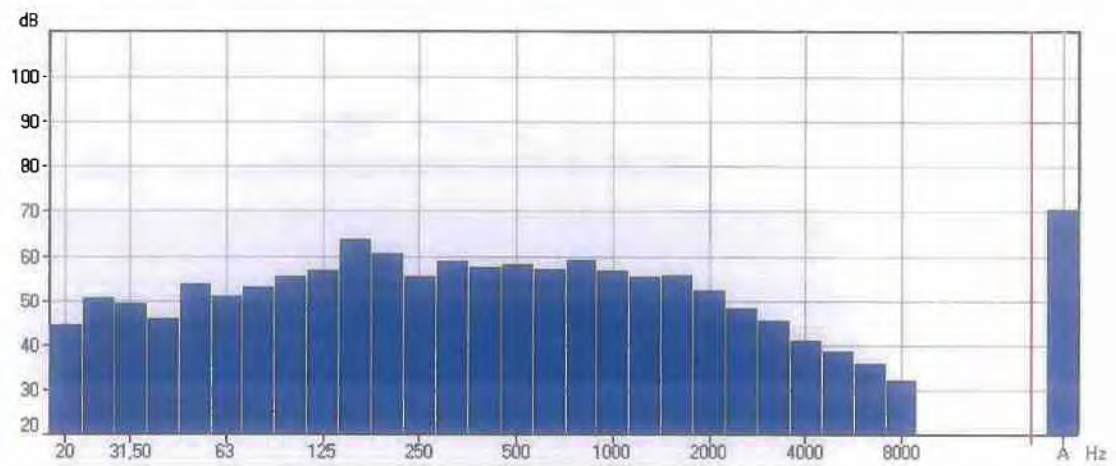
ΘΕΣΗ	$Leq(A)$	$Leq(A)_{max}$	$Leq(A)_{min}$
1	72,9	76,2	71,2
2	70,2	72,5	68,7
3	73,7	78,5	72,3
4	70,9	73	69,6
5	73,1	74,5	71,8
6	72,8	74,3	71,6

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.4 / Οι τιμές της ηχητικής πίεσης της 2^{ης} ομάδας μετρήσεων και για ταχύτητα δέσμης $U=13.8$ (m/s).

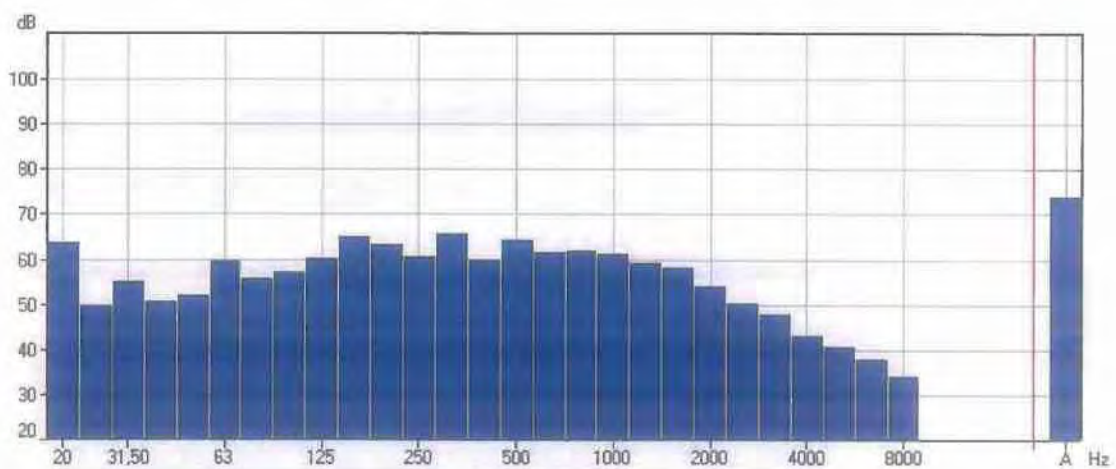
Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα φάσματα, του ήχου στην αντίστοιχη θέση, όπου μετρήθηκε ο ήχος.



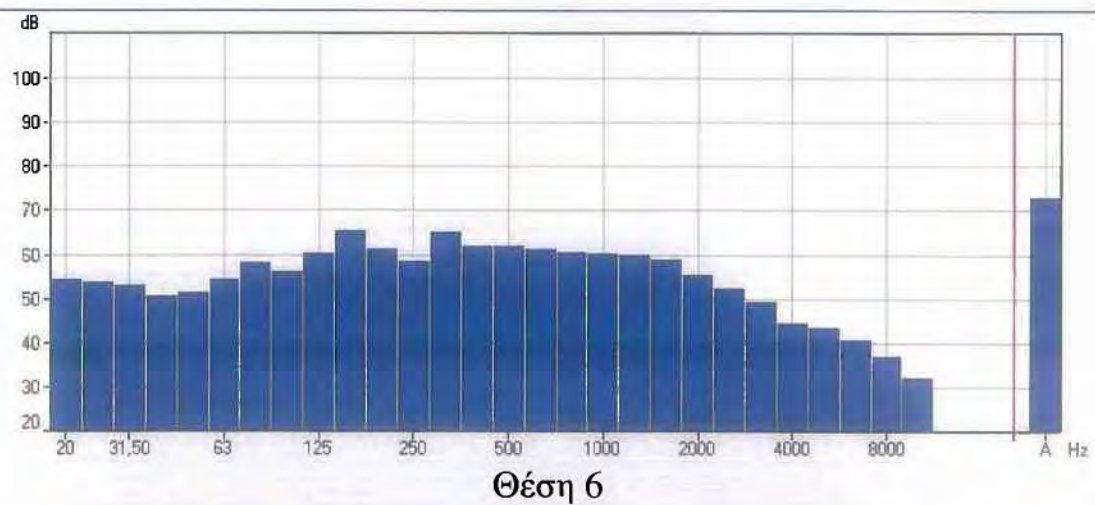
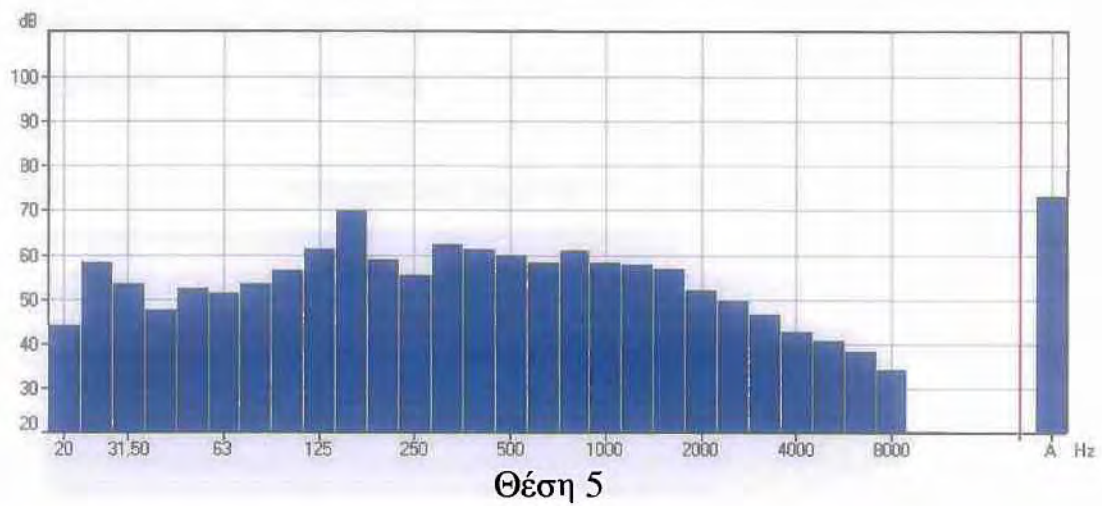
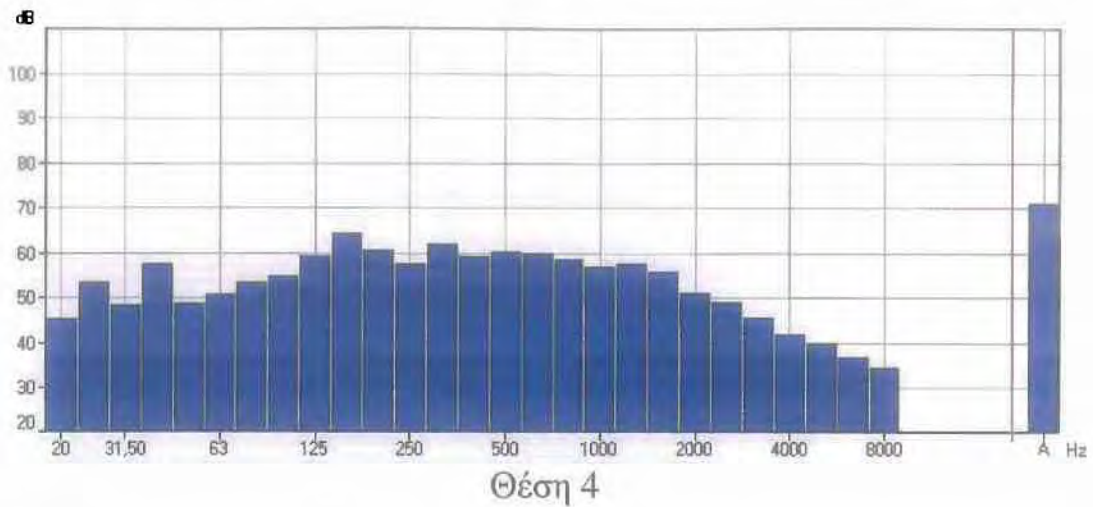
Θέση 1



Θέση 2



Θέση 3



4.3.2 Ταχύτητα δέσμης στην έξοδο $U = 21.4$ (m/s)

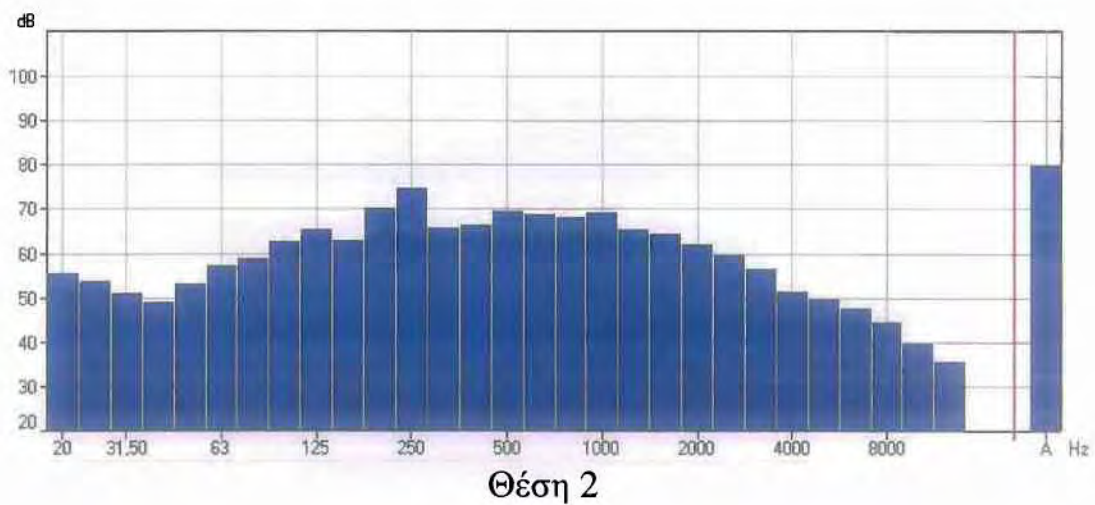
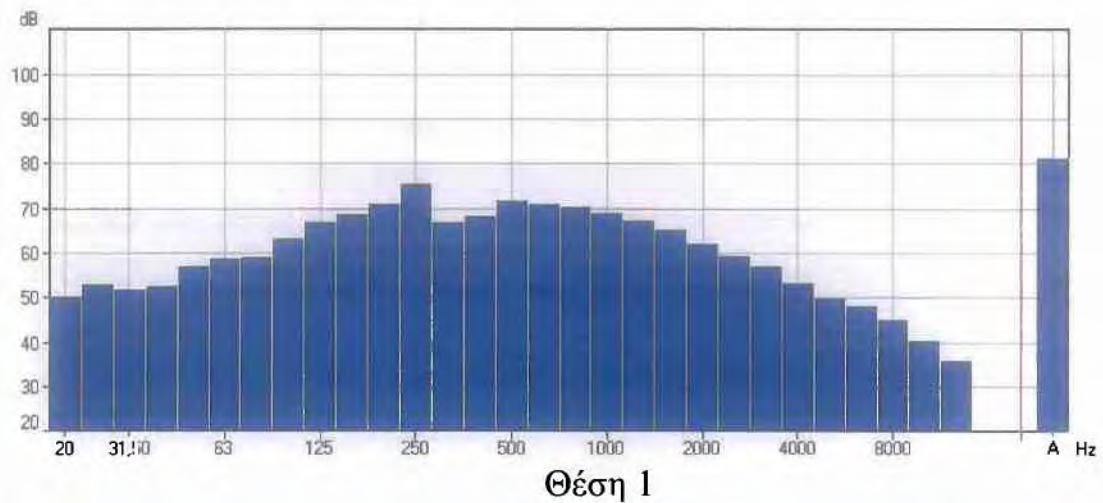
Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι τιμές της ισοδύναμης στάθμης ηχητικής πίεσης, καθώς επίσης και οι μέγιστη αλλά και ελάχιστη τιμή της

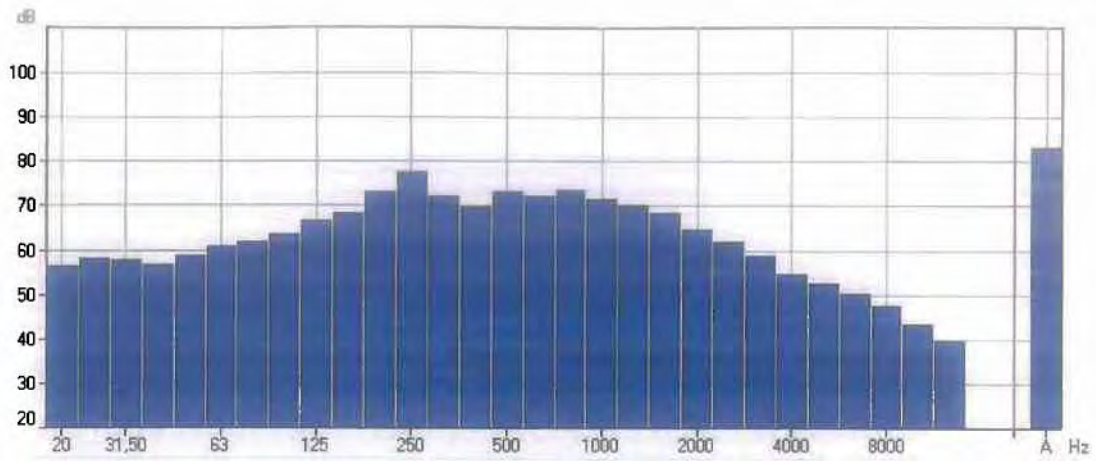
ισοδύναμης στάθμης ηχητικής πίεσης, για τις έξι διαφορετικές θέσεις του ηχομέτρου.

ΘΕΣΗ	Leq(A)	Leq(A)max	Leq(A)min
1	81	82,3	80
2	79,6	80,9	78,6
3	83,1	85,4	82
4	80	81,1	78,9
5	81,9	83	81,1
6	79,6	80,9	78,7

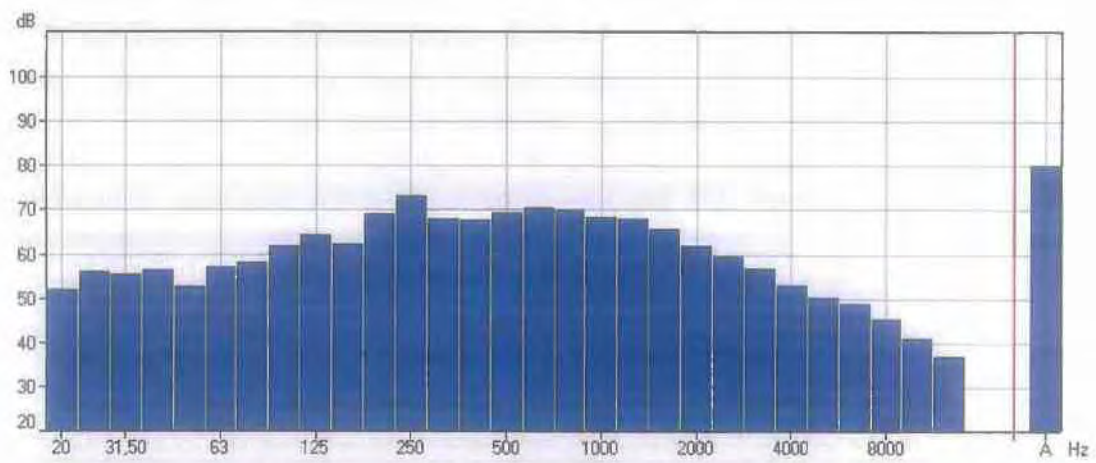
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.5 / Οι τιμές της ηχητικής πίεσης της 2^{ης} ομάδας μετρήσεων και για ταχύτητα δέσμης $U=21.4$ (m/s).

Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα φάσματα, του ήχου στην αντίστοιχη θέση, όπου μετρήθηκε ο ήχος.

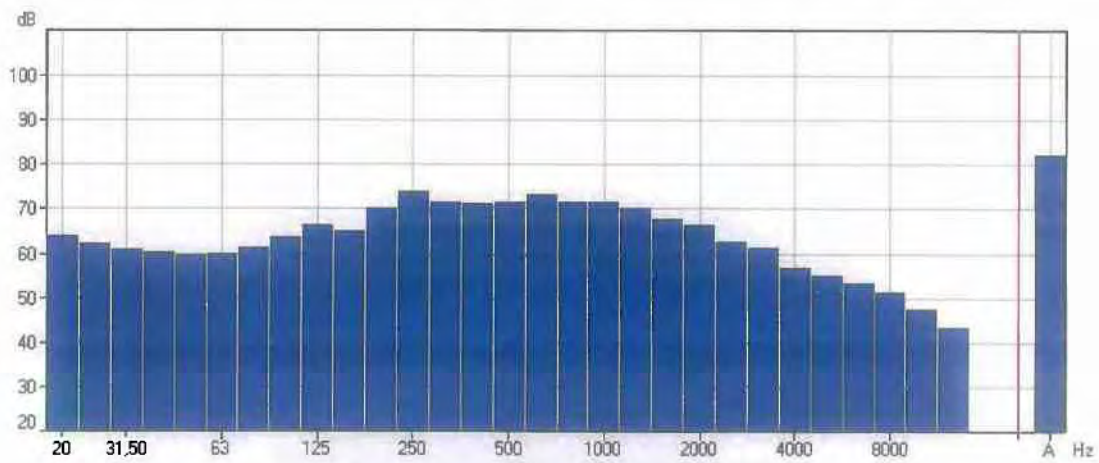




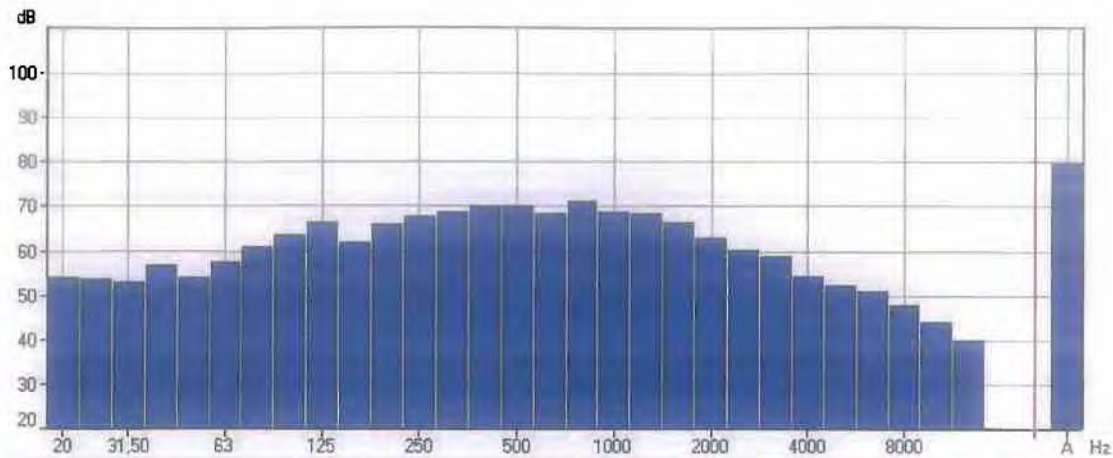
Θέση 3



Θέση 4



Θέση 5



Θέση 6

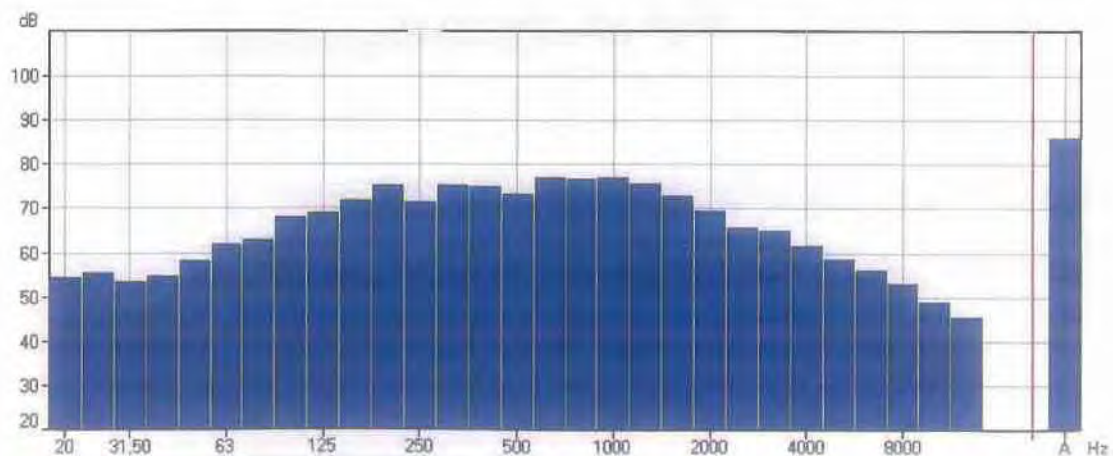
4.3.3 Ταχύτητα δέσμης στην έξοδο $U = 28.6$ (m/s)

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι τιμές της ισοδύναμης στάθμης ηχητικής πίεσης, καθώς επίσης και οι μέγιστη αλλά και ελάχιστη τιμή της ισοδύναμης στάθμης ηχητικής πίεσης, για τις έξι διαφορετικές θέσεις του ηχομέτρου.

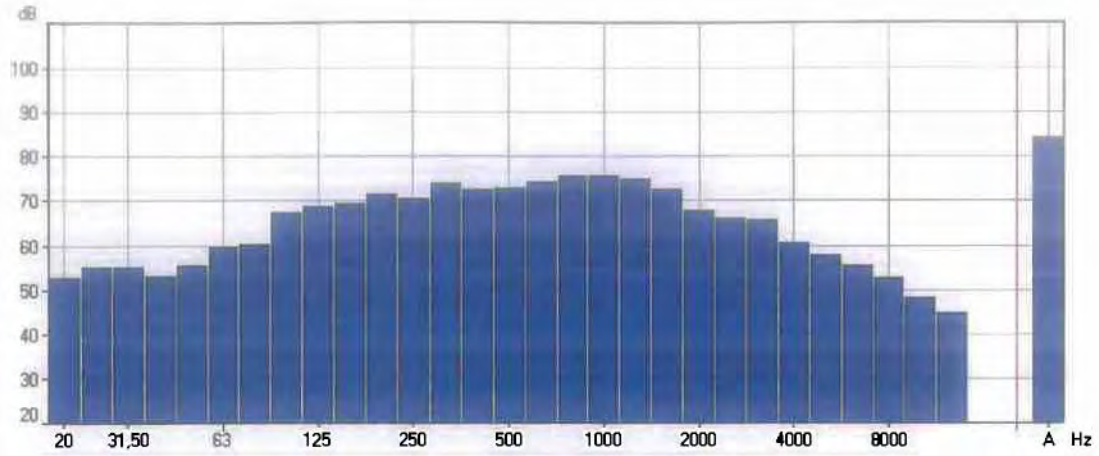
ΘΕΣΗ	Leq(A)	Leq(A)max	Leq(A)min
1	85,6	86,8	84,6
2	84,1	85,5	83,3
3	88,5	89,7	87,5
4	85,6	86,9	84,7
5	88,4	89,4	87,5
6	86,2	87,7	85,2

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.6 / Οι τιμές της ηχητικής πίεσης της 2^{ης} ομάδας μετρήσεων και για ταχύτητα δέσμης $U=28.6$ (m/s).

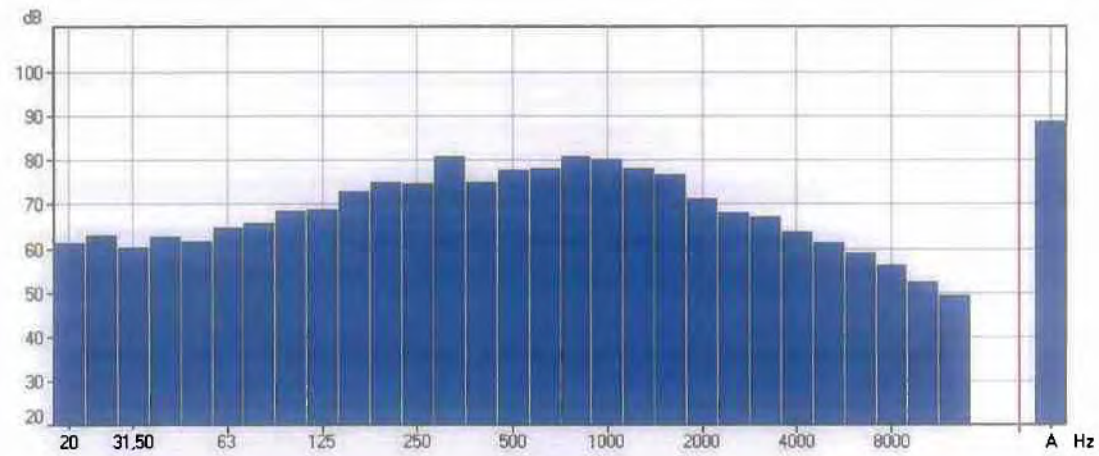
Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα φάσματα, του ήχου στην αντίστοιχη θέση, όπου μετρήθηκε ο ήχος.



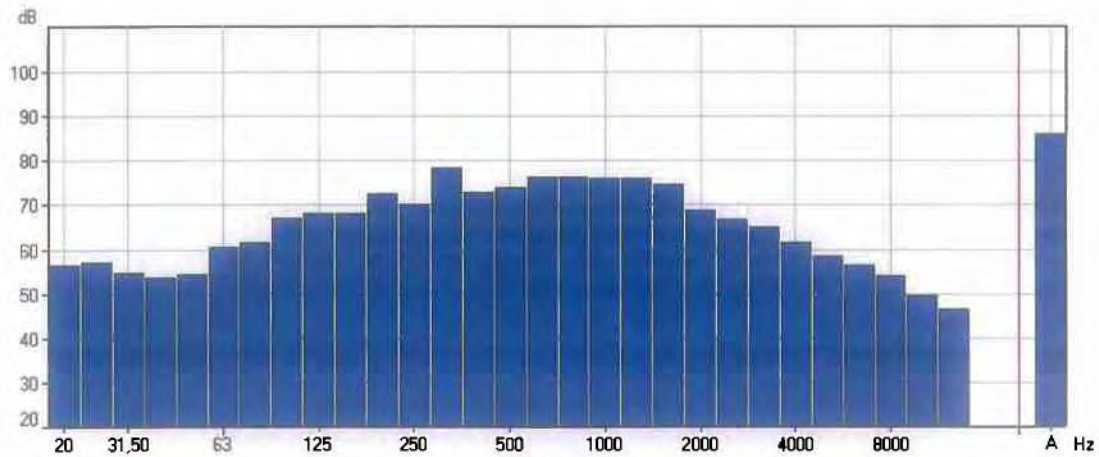
Θέση 1



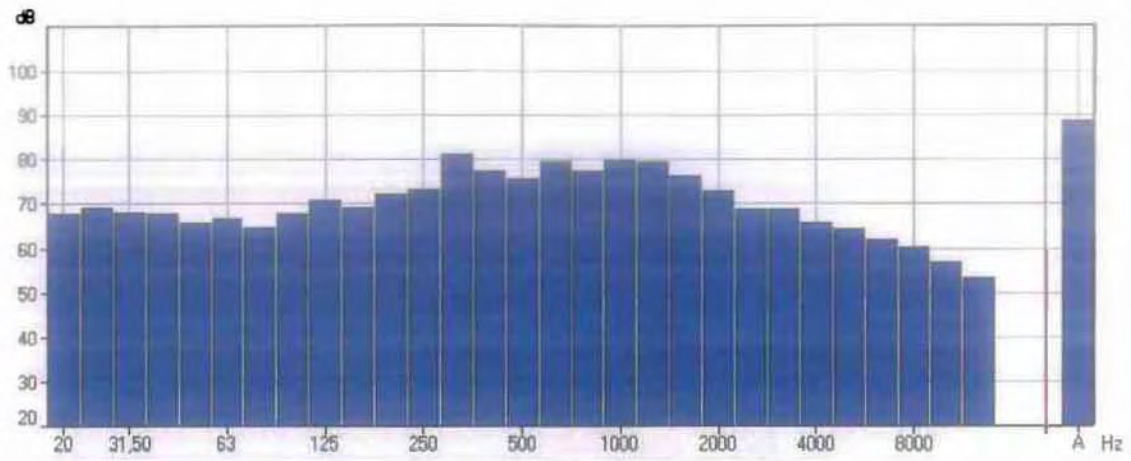
Θέση 2



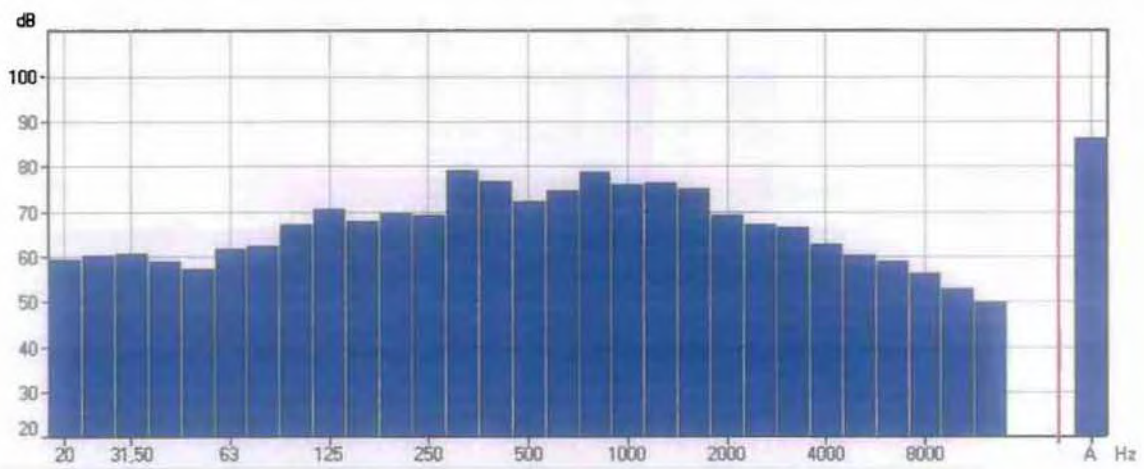
Θέση 3



Θέση 4



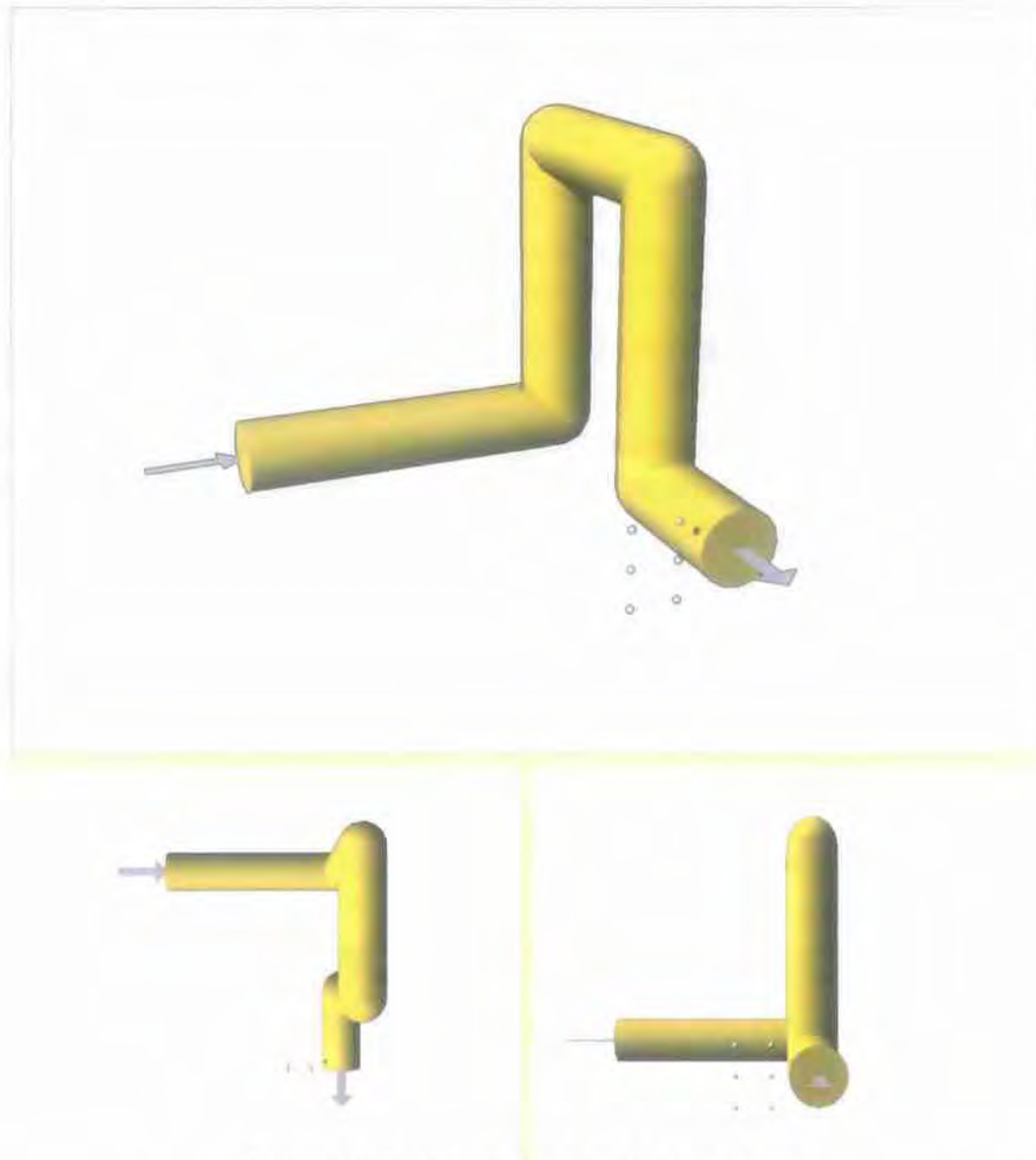
Θέση 5



Θέση 6

4.4 3^η Ομάδα Μετρήσεων

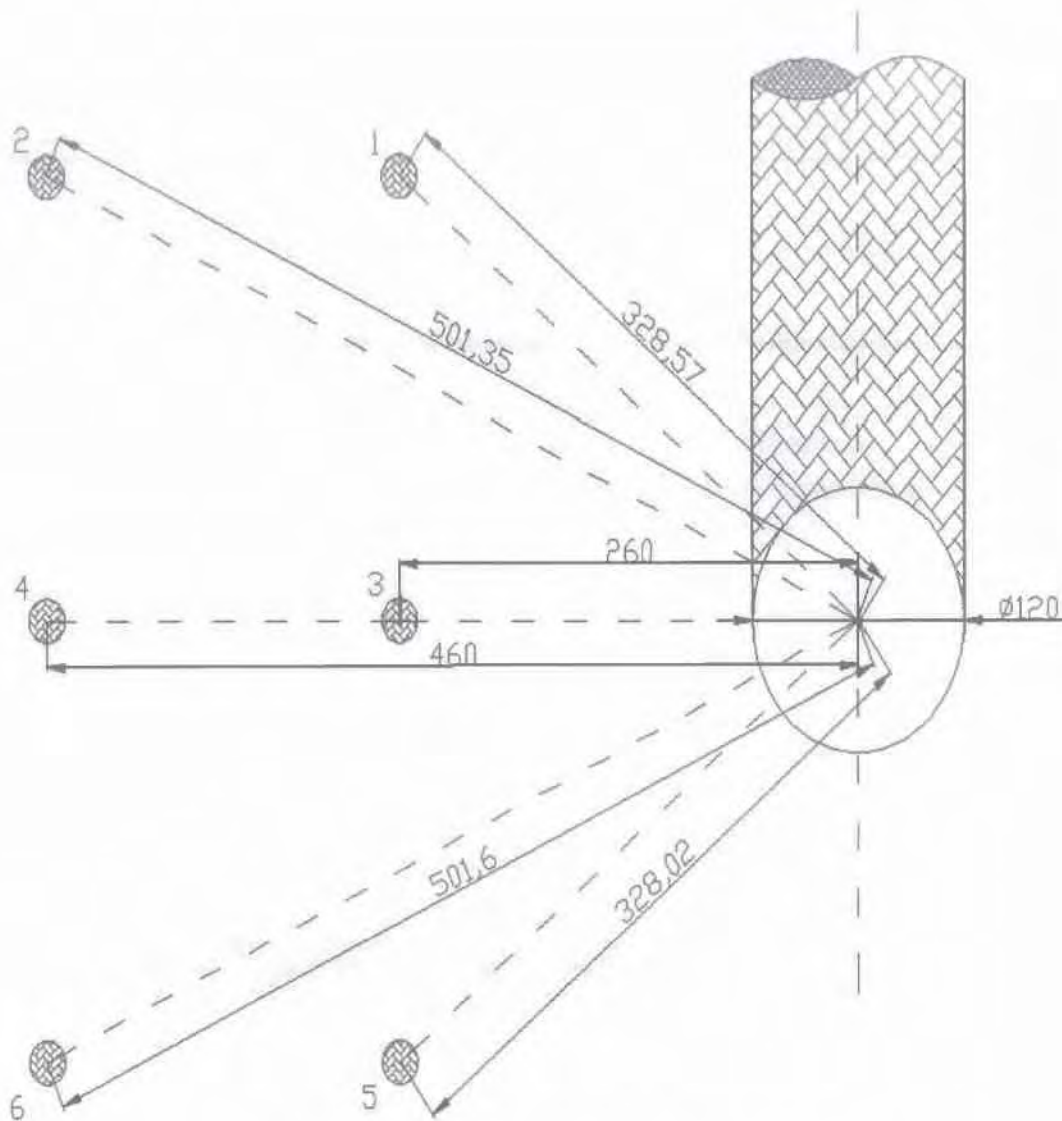
Για την ομάδα 3 έγιναν μετρήσεις της ηχητικής πίεσης με στόμιο εξόδου τύπου γωνίας 90°. Στην παρακάτω εικόνα δίνεται μία τρισδιάστατη απεικόνιση του πειράματος.



Εικόνα 4.6 / Τρισδιάστατη απεικόνιση του πειράματος

Τα βέλη παριστάνουν την πορεία της δέσμης (είσοδος και έξοδος αέρα) ενώ οι έξι κύκλοι αριστερά της εξόδου συμβολίζουν τις έξι διαφορετικές θέσεις του μικροφώνου.

Η γεωμετρία του πειράματος φαίνεται στην παρακάτω εικόνα όπου αναγράφεται η τιμή της απόστασης r_i ($i = 1, \dots, 6$) ενώ σε αυτή την περίπτωση, η τιμή της γωνίας θ παραμένει σταθερή και ίση με 90°.



Εικόνα 4.7 / Γεωμετρική ανάλυση του πειράματος

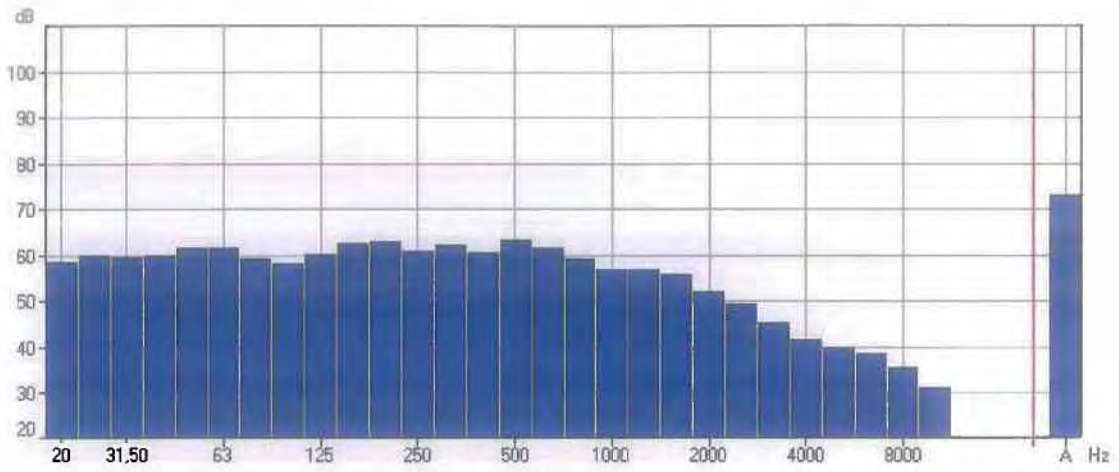
4.4.1 Ταχύτητα δέσμης στην έξοδο $U = 14.5$ (m/s)

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι τιμές της ισοδύναμης στάθμης ηχητικής πίεσης, καθώς επίσης και οι μέγιστη αλλά και ελάχιστη τιμή της ισοδύναμης στάθμης ηχητικής πίεσης, για τις έξι διαφορετικές θέσεις του ηχομέτρου.

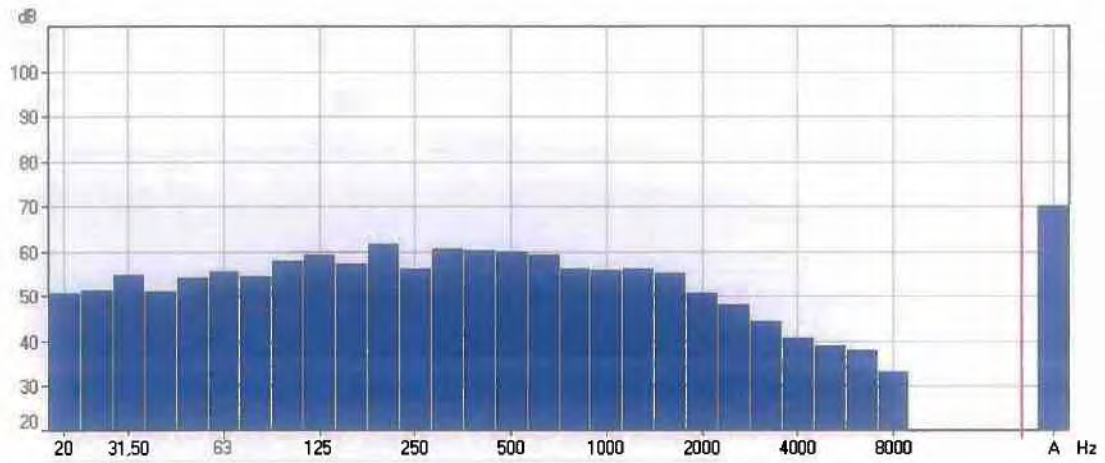
ΘΕΣΗ	Leq(A)	Leq(A)max	Leq(A)min
1	72,9	74,7	71,5
2	69,8	79,5	68,3
3	73,4	74,9	72
4	69,9	71,4	68,7
5	72,2	76,4	70,4
6	72,5	74,8	70,6

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.7 / Οι τιμές της ηχητικής πίεσης της 3^{ης} ομάδας μετρήσεων και για ταχύτητα δέσμης $U=14.5$ (m/s).

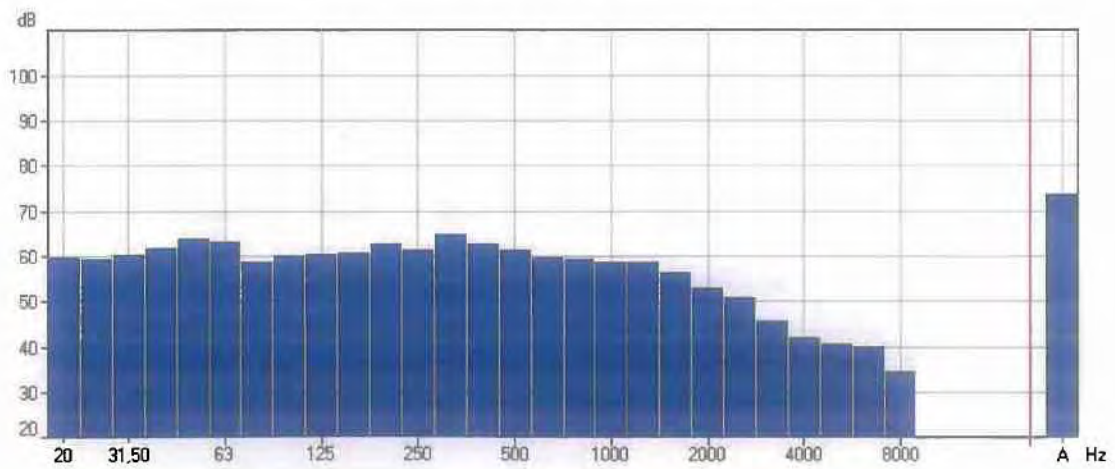
Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα φάσματα, του ήχου στην αντίστοιχη θέση, όπου μετρήθηκε ο ήχος.



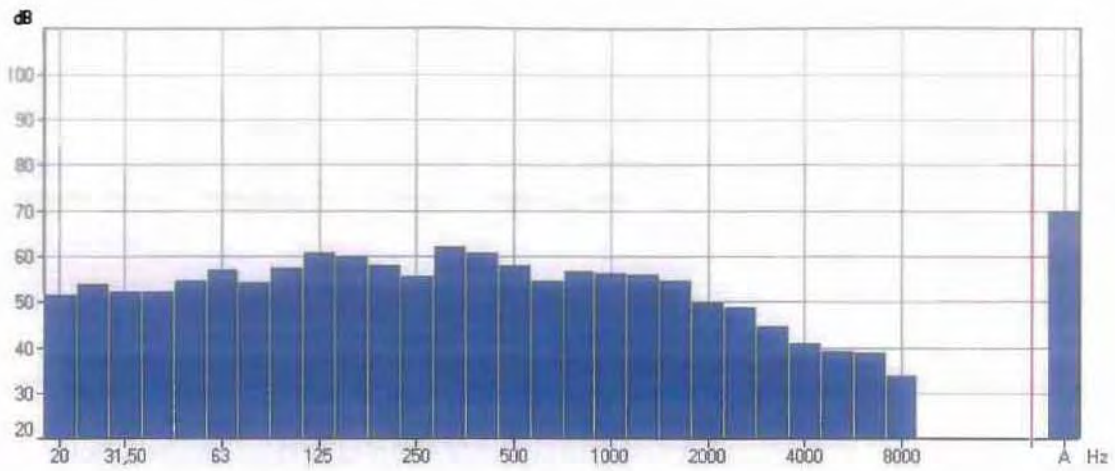
Θέση 1



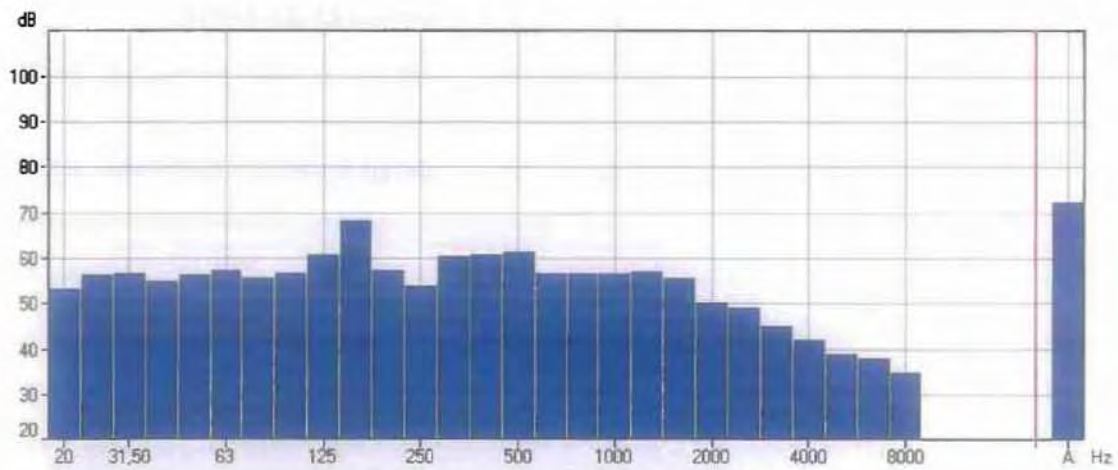
Θέση 2



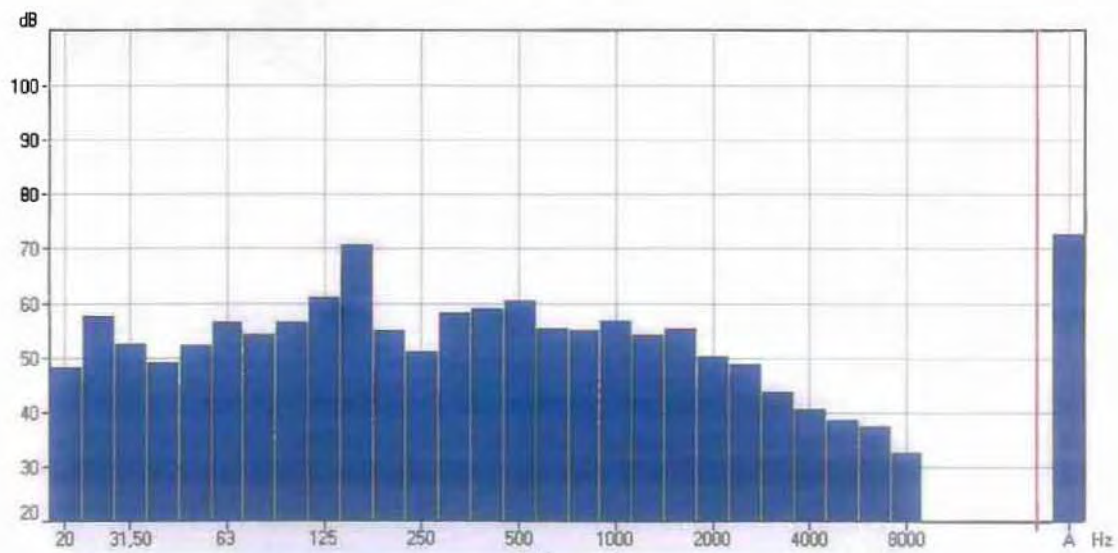
Θέση 3



Θέση 4



Θέση 5



Θέση 6

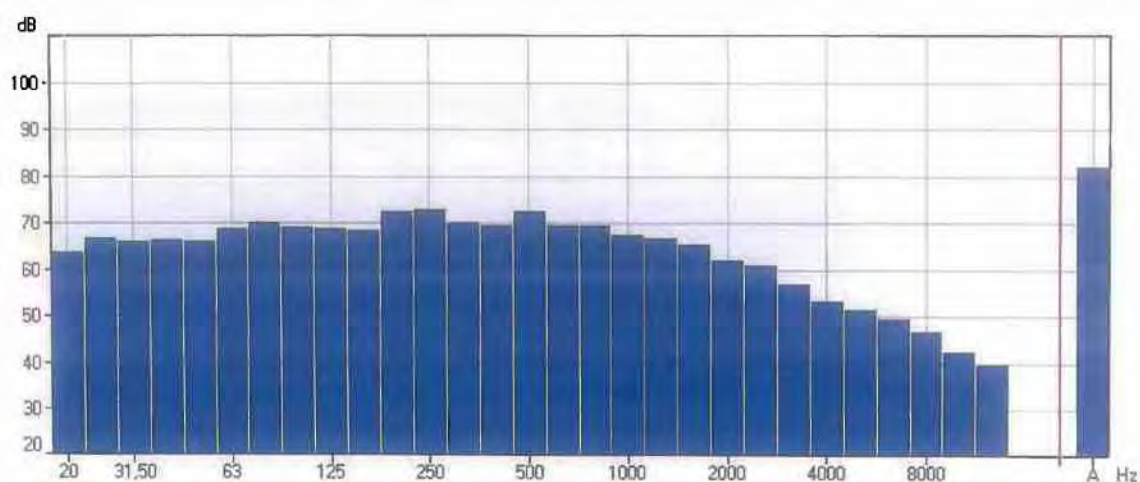
4.4.2 Ταχύτητα δέσμης στην έξοδο $U = 23$ (m/s)

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι τιμές της ισοδύναμης στάθμης ηχητικής πίεσης, καθώς επίσης και οι μέγιστη αλλά και ελάχιστη τιμή της ισοδύναμης στάθμης ηχητικής πίεσης, για τις έξι διαφορετικές θέσεις του ηχομέτρου.

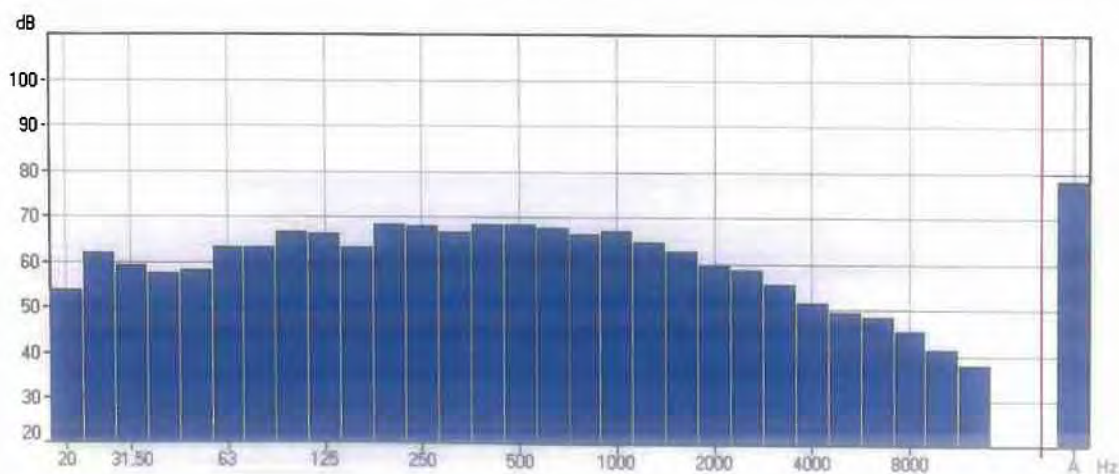
ΘΕΣΗ	Leq(A)	Leq(A)max	Leq(A)min
1	81,8	83,1	80,6
2	78,2	86,2	77
3	82,3	83,5	81,1
4	78,4	80,1	77,1
5	79,5	80,9	78,2
6	78,1	79,7	76,7

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.8 / Οι τιμές της ηχητικής πίεσης της 3^{ης} ομάδας μετρήσεων και για ταχύτητα δέσμης $U=23$ (m/s).

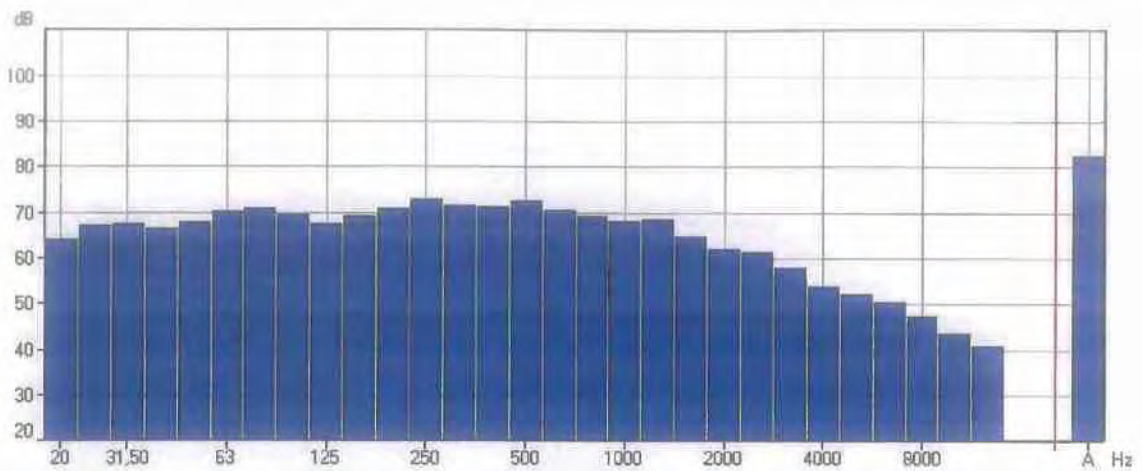
Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα φάσματα, του ήχου στην αντίστοιχη θέση, όπου μετρήθηκε ο ήχος.



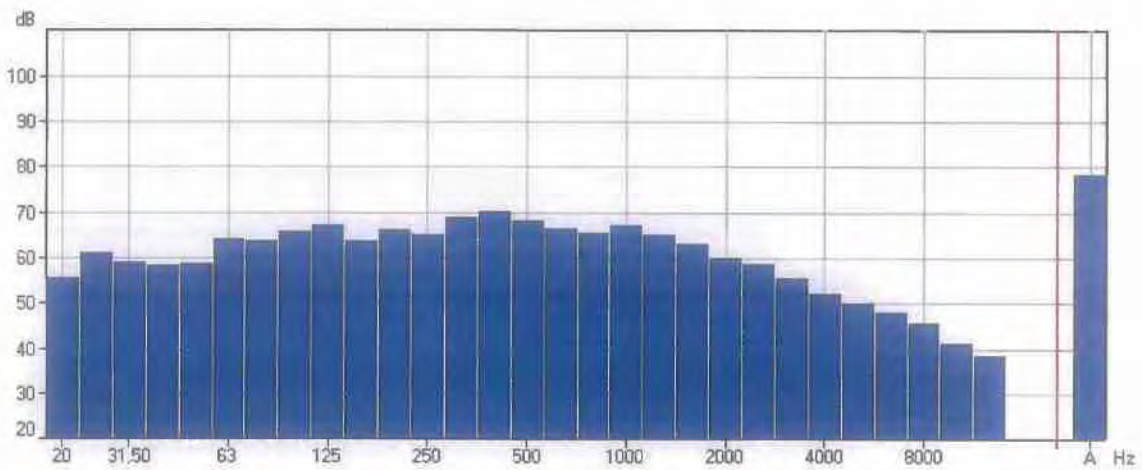
Θέση 1



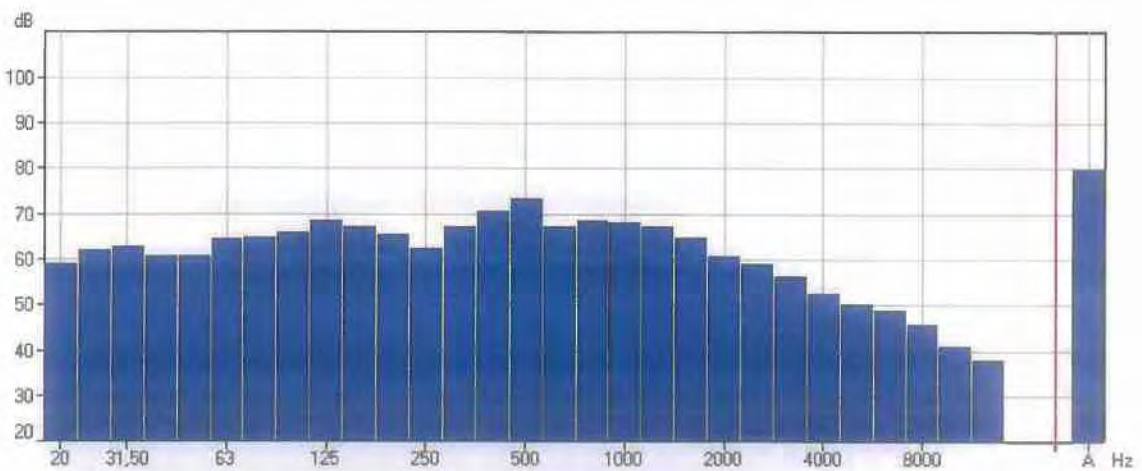
Θέση 2



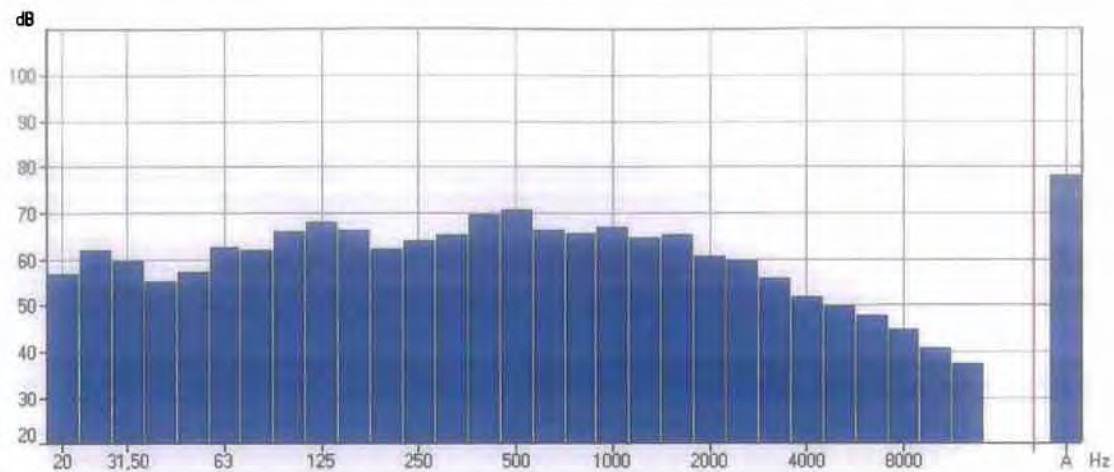
Θέση 3



Θέση 4



Θέση 5



Θέση 6

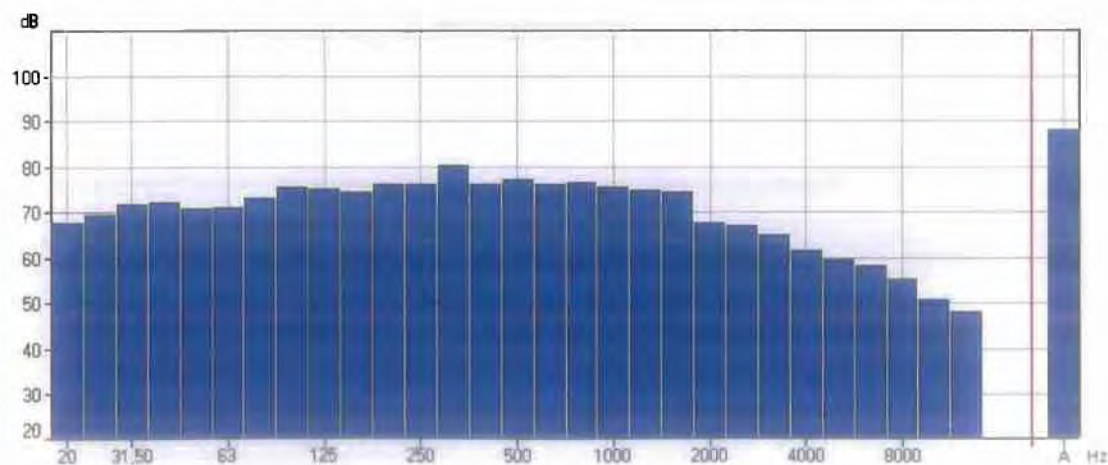
4.4.3 Ταχύτητα δέσμης στην έξοδο $U = 33.2$ (m/s)

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι τιμές της ισοδύναμης στάθμης ηχητικής πίεσης, καθώς επίσης και οι μέγιστη αλλά και ελάχιστη τιμή της ισοδύναμης στάθμης ηχητικής πίεσης, για τις έξι διαφορετικές θέσεις του ηχομέτρου.

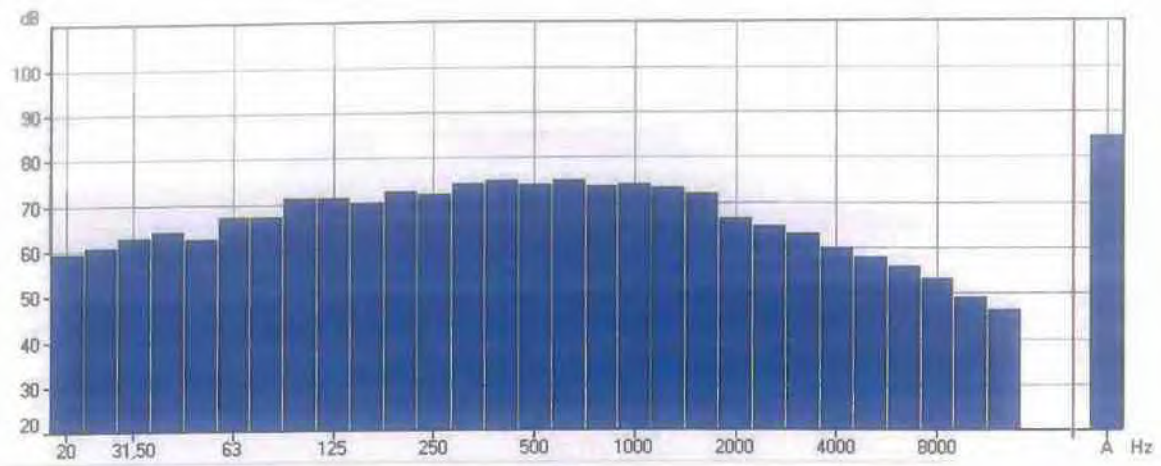
ΘΕΣΗ	Leq(A)	Leq(A)max	Leq(A)min
1	87,8	89,1	86,7
2	84,3	85,6	83,4
3	88,5	89,8	87,5
4	84,9	86,1	84
5	85,8	86,9	84,7
6	84,4	85,9	83,3

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.9 / Οι τιμές της ηχητικής πίεσης της 3^{ης} ομάδας μετρήσεων και για ταχύτητα δέσμης $U=33.2$ (m/s).

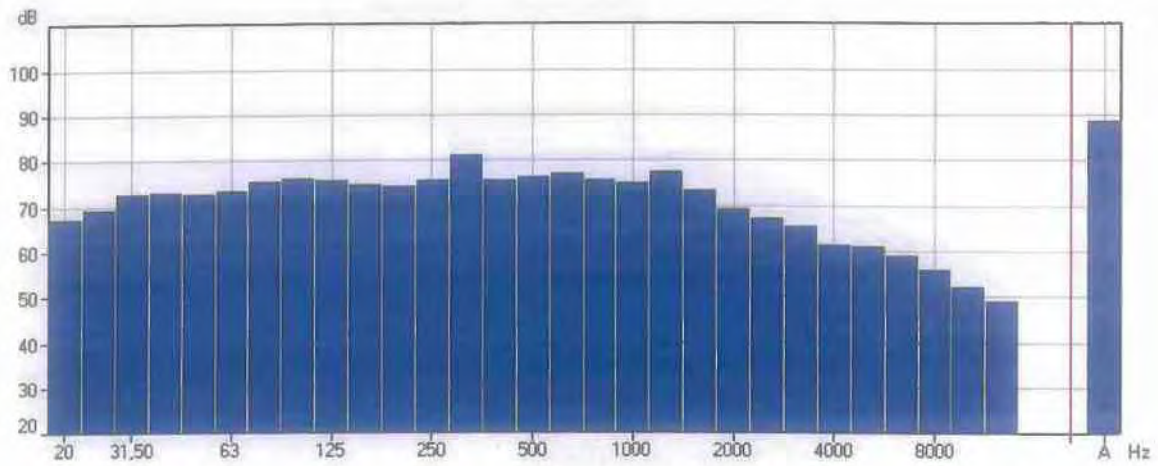
Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα φάσματα, του ήχου στην αντίστοιχη θέση, όπου μετρήθηκε ο ήχος.



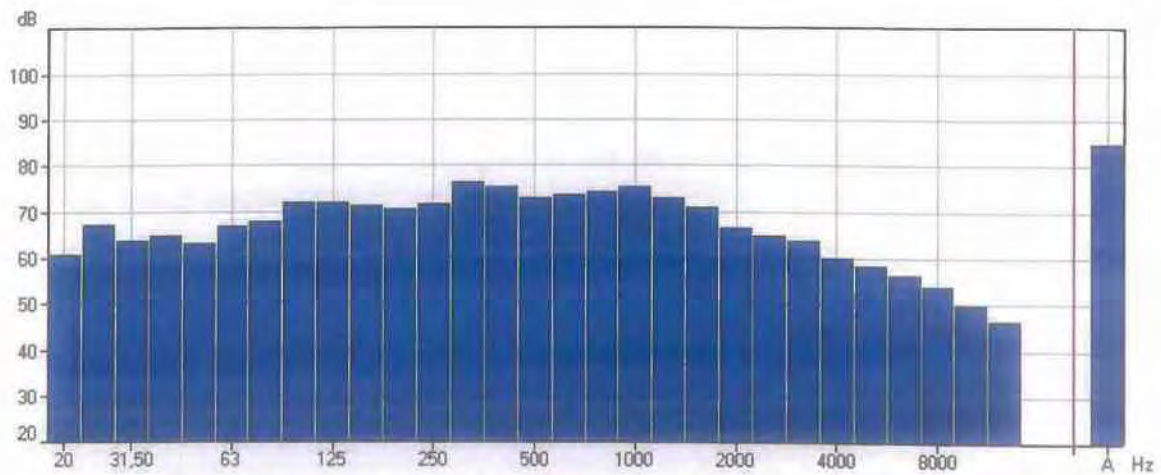
Θέση 1



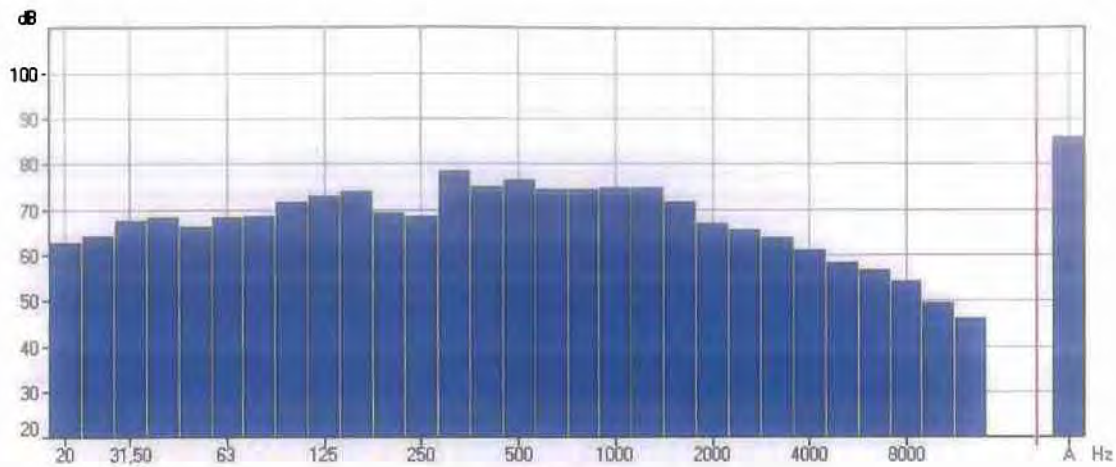
Θέση 2



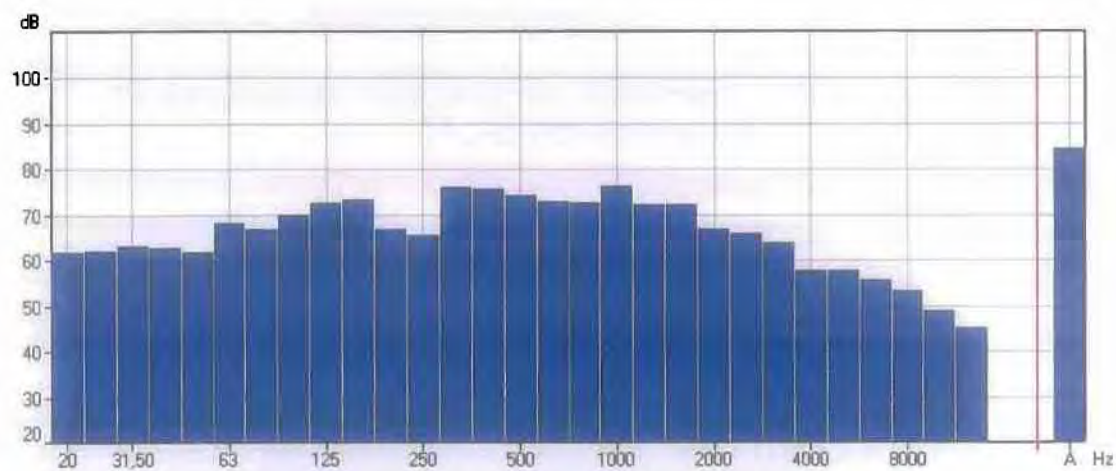
Θέση 3



Θέση 4



Θέση 5



Θέση 6

4.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων

Η θεωρητικές τιμές του L_{eq} υπολογίζονται σύμφωνα με τις εξισώσεις της ενότητας 2.5 του δευτέρου κεφαλαίου.

Οι τιμές του L_{eq} υπολογίζονται για συγκεκριμένες θέσεις στο χώρο και για τις τρεις διαφορετικές ταχύτητες εξόδου της δέσμης και συγκρίνονται με τις αντίστοιχες τιμές που προέκυψαν από τις μετρήσεις με το ηχόμετρο. Σκοπός αυτής της σύγκρισης είναι να διαπιστωθεί η ακρίβεια της μεθόδου.

Συγκεκριμένα υπολογίζονται και συγκρίνονται τα L_{eq} για τις παρακάτω περιπτώσεις:

- 1^η Ομάδα μετρήσεων / Θέσεις 3 & 5 [0.1Θ.3 & 0.1Θ.5]
- 2^η Ομάδα μετρήσεων / Θέσεις 1 & 3 [0.2Θ.1 & 0.2Θ.3]
- 3^η Ομάδα μετρήσεων / Θέσεις 3 & 5 [0.3Θ.3 & 0.3Θ.5]

Σε κάθε μία περίπτωση εξετάζονται οι τιμές του L_{eq} για τρεις διαφορετικές τιμές της ταχύτητας εξόδου της δέσμης.

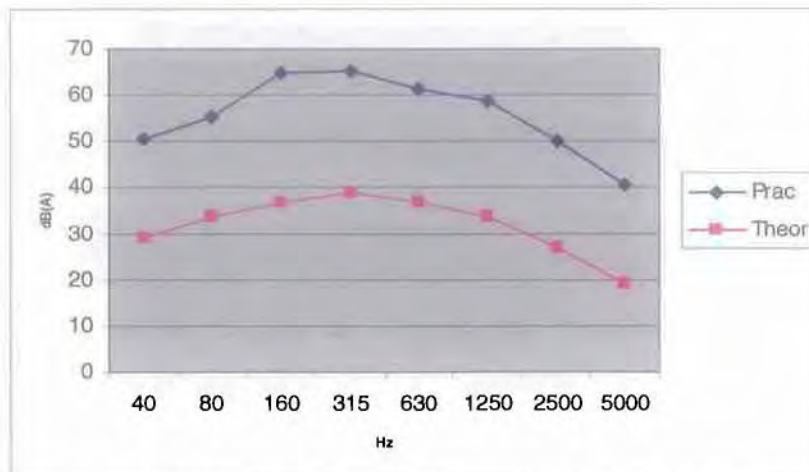
4.5.1 Ομάδα 1 / Θέση 3

Οι τιμές των μεταβλητών για τον υπολογισμό της ηχητικής πίεσης δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

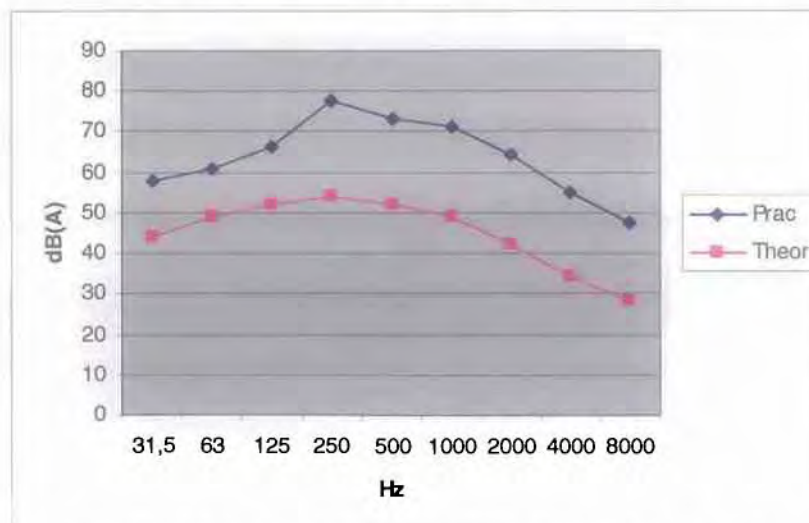
U =	13,8	21.4	28.6	(m/s)
D =	0,12	0,12	0,12	(m)
c =	343	343	343	(m/s)
T/T0 =	0,999	0,999	0,999	
$\rho/\rho_0 =$	0,999	0,998	0,997	
K =	0,05	0,05	0,05	
r =	0,26	0,26	0,26	(m)
$\theta =$	90	90	90	
DI =	-6	-6	-6	

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.10 / Πίνακας τιμών των μεταβλητών για την περίπτωση Ο.1Θ.3.

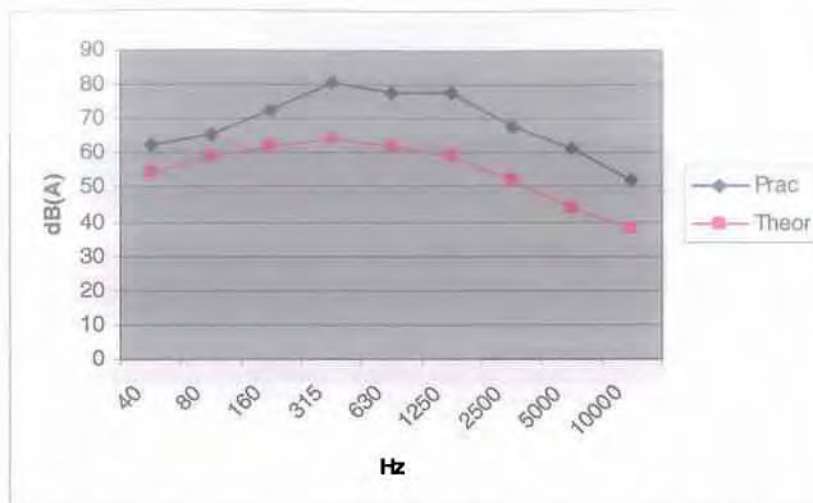
Τα διαγράμματα σύγκρισης της θεωρητικής τιμής (Theor) του L_{eq} με αυτήν που μετρήθηκε με το ηχόμετρο (Prac) είναι τα εξής:



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.1 / Ταχύτητα Δέσμης U = 13.8 m/s [Ο.1Θ.3]



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.2 / Ταχύτητα Δέσμης U = 21.4 m/s [Ο.1Θ.3]

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.3 / Ταχύτητα Δέσμης $U = 28.6 \text{ m/s}$ [O.1Θ.3]

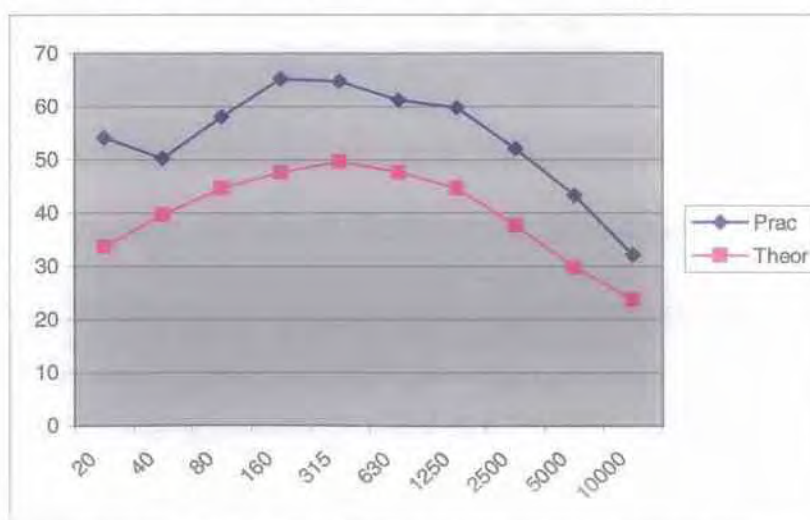
4.5.2 Ομάδα 1 / Θέση 5

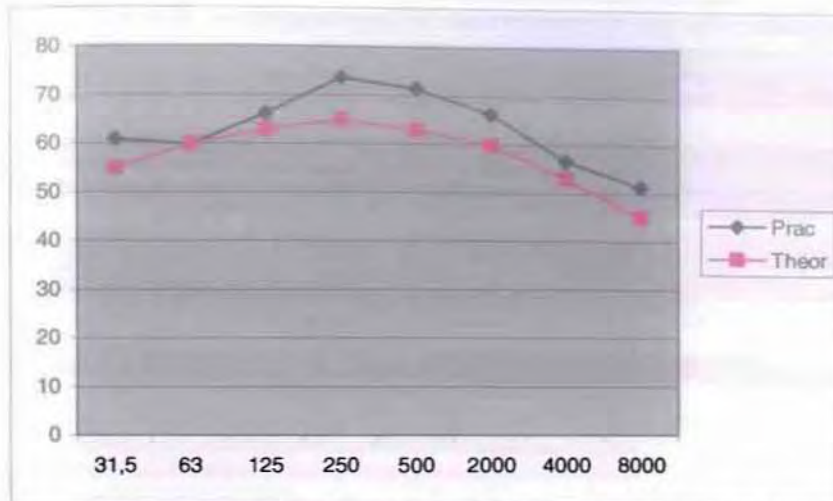
Οι τιμές των μεταβλητών για τον υπολογισμό της ηχητικής πίεσης δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

$U =$	13,8	21.4	28.6	(m/s)
$D =$	0,12	0,12	0,12	(m)
$c =$	343	343	343	(m/s)
$T/T_0 =$	0,999	0,999	0,999	
$\rho/\rho_0 =$	0,999	0,998	0,997	
$K =$	0,05	0,05	0,05	
$r =$	0,328	0,328	0,328	(m)
$\theta =$	52	52	52	
$DI =$	5	5	5	

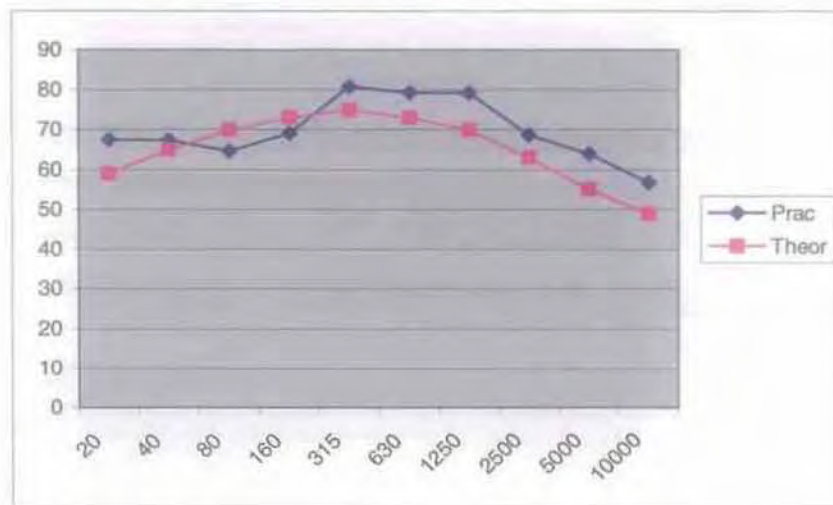
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.11 / Πίνακας τιμών των μεταβλητών για την περίπτωση O.1Θ.5.

Τα διαγράμματα σύγκρισης της θεωρητικής τιμής (Theor) του L_{eq} με αυτήν που μετρήθηκε με το ηχόμετρο (Prac) είναι τα εξής:

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.4 / Ταχύτητα Δέσμης $U = 13.8 \text{ m/s}$ [O.1Θ.5]



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.5 / Ταχύτητα Δέσμης $U = 21.4 \text{ m/s}$ [O.1Θ.5]



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.6 / Ταχύτητα Δέσμης $U = 28.6 \text{ m/s}$ [O.1Θ.5]

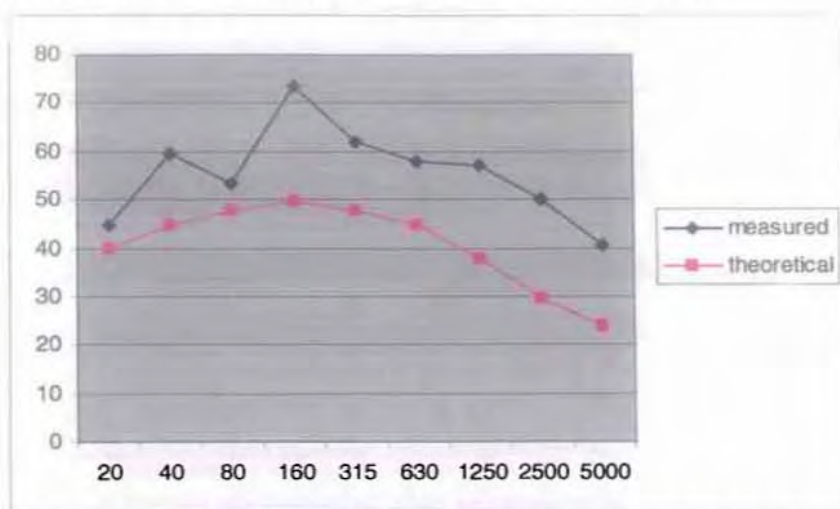
4.5.3 Ομάδα 2 / Θέση 1

Οι τιμές των μεταβλητών για τον υπολογισμό της ηχητικής πίεσης δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

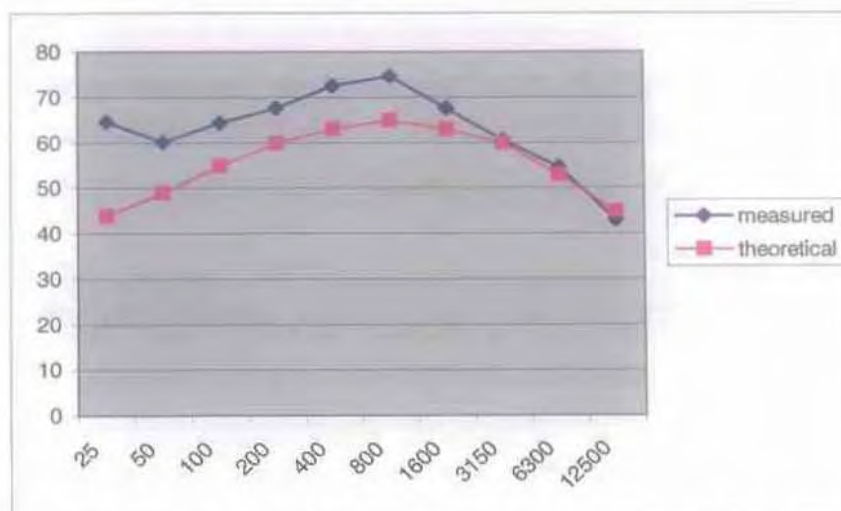
$U =$	13,8	21.4	28.6	(m/s)
$D =$	0,12	0,12	0,12	(m)
$c =$	343	343	343	(m/s)
$T/T_0 =$	0,999	0,999	0,999	
$\rho/\rho_0 =$	0,999	0,998	0,997	
$K =$	0,05	0,05	0,05	
$r =$	0,328	0,328	0,328	(m)
$\theta =$	52	52	52	
$DI =$	5	5	5	

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.12 / Πίνακας τιμών των μεταβλητών για την περίπτωση O.2Θ.1.

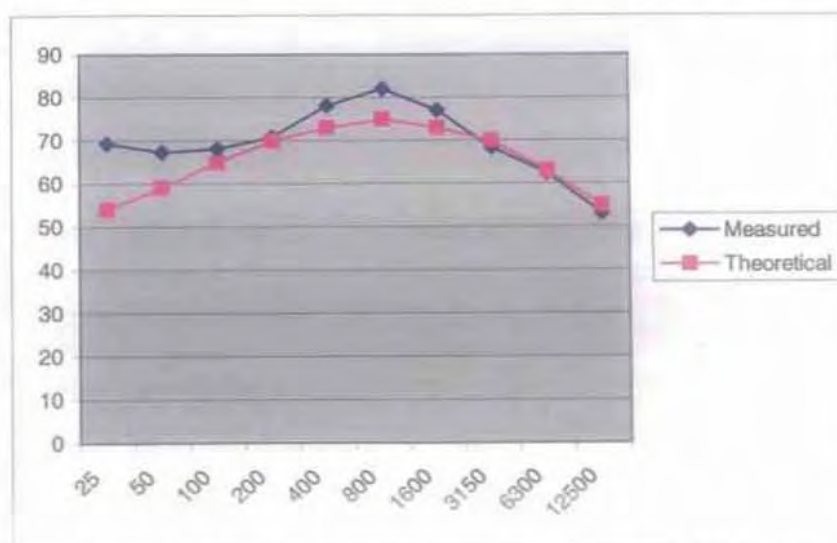
Τα διαγράμματα σύγκρισης της θεωρητικής τιμής (Theor) του L_{eq} με αυτήν που μετρήθηκε με το ηχόμετρο (Meas) είναι τα εξής:



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.7 / Ταχύτητα Δέσμης $U = 13.8$ m/s [O.2Θ.1]



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.8 / Ταχύτητα Δέσμης $U = 21.4$ m/s [O.2Θ.1]



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.9 / Ταχύτητα Δέσμης $U = 28.6$ m/s [O.2Θ.1]

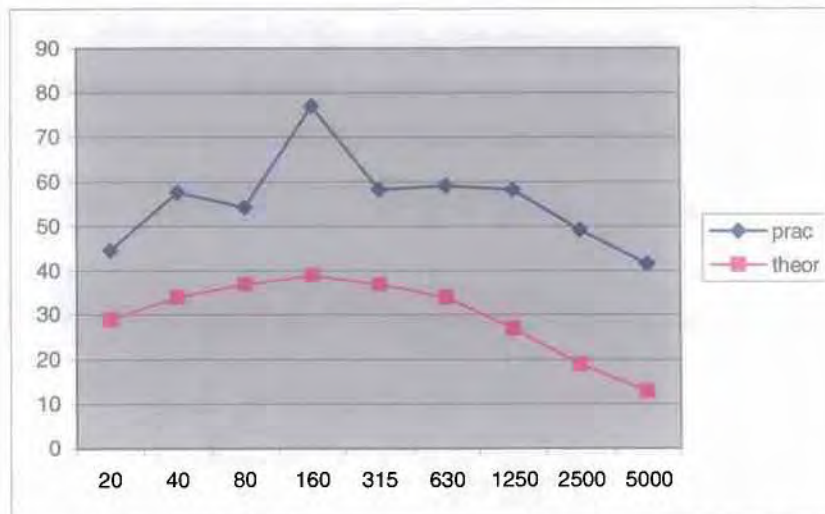
4.5.4 Ομάδα 2 / Θέση 3

Οι τιμές των μεταβλητών για τον υπολογισμό της ηχητικής πίεσης δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

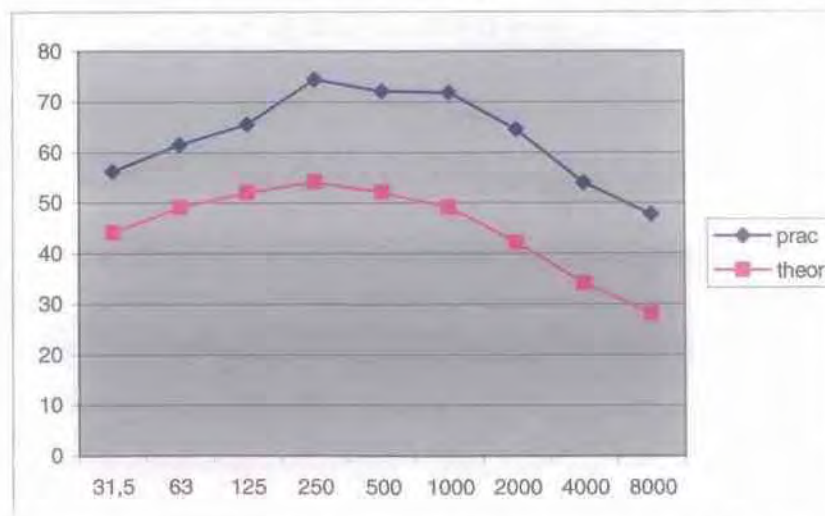
U =	13,8	21.4	28.6	(m/s)
D =	0,12	0,12	0,12	(m)
c =	343	343	343	(m/s)
T/T0 =	0,999	0,999	0,999	
$\rho/\rho_0 =$	0,999	0,998	0,997	
K =	0,05	0,05	0,05	
r =	0.260	0.260	0.260	(m)
$\theta =$	90	90	90	
DI =	-6	-6	-6	

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.13 / Πίνακας τιμών των μεταβλητών για την περίπτωση O.2Θ.3.

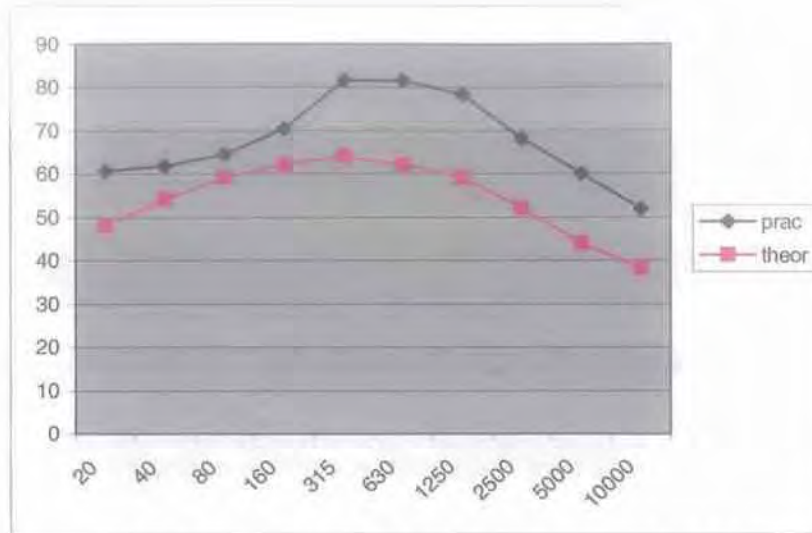
Τα διαγράμματα σύγκρισης της θεωρητικής τιμής (Theor) του L_{eq} με αυτήν που μετρήθηκε με το ηχόμετρο (Prac) είναι τα εξής:



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.10 / Ταχύτητα Δέσμης U = 13.8 m/s [O.2Θ.3]



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.11 / Ταχύτητα Δέσμης U = 21.4 m/s [O.2Θ.3]



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.12 / Ταχύτητα Δέσμης $U = 28.6 \text{ m/s}$ [O.2@.3]

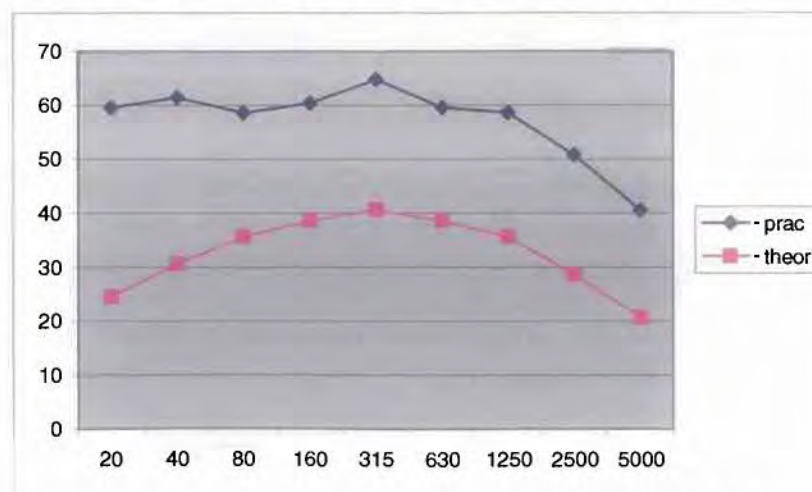
4.5.5 Ομάδα 3 / Θέση 3

Οι τιμές των μεταβλητών για τον υπολογισμό της ηχητικής πίεσης δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

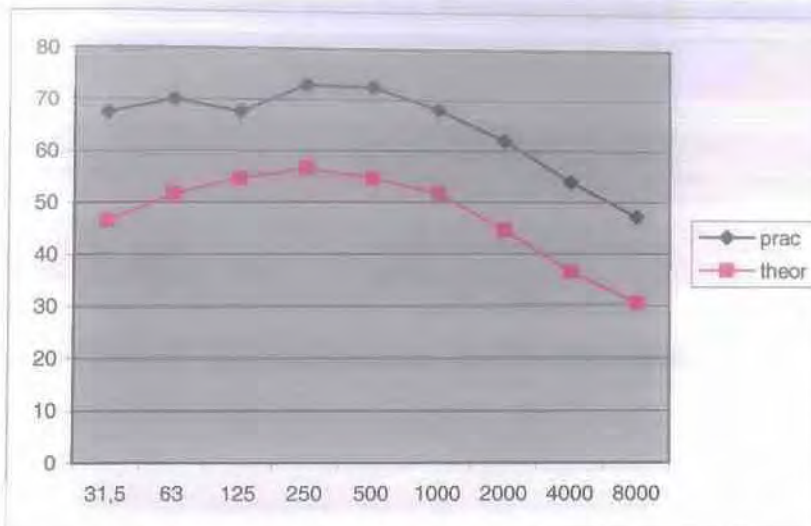
$U =$	13,8	21.4	28.6	(m/s)
$D =$	0,12	0,12	0,12	(m)
$c =$	343	343	343	(m/s)
$T/T_0 =$	0,999	0,999	0,999	
$\rho/\rho_0 =$	0,999	0,998	0,997	
$K =$	0,05	0,05	0,05	
$r =$	0.260	0.260	0.260	(m)
$\theta =$	90	90	90	
$DI =$	-6	-6	-6	

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.14 / Πίνακας τιμών των μεταβλητών για την περίπτωση O.3@.3.

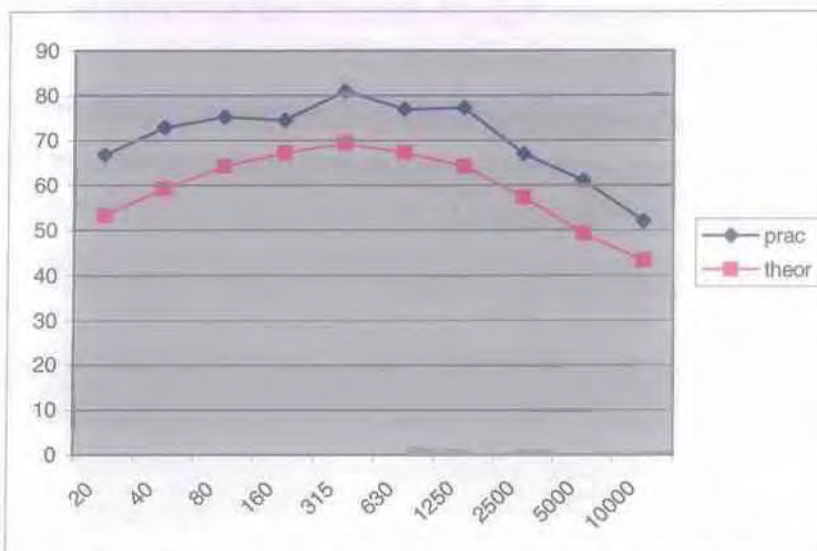
Τα διαγράμματα σύγκρισης της θεωρητικής τιμής (Theor) του L_{eq} με αυτήν που μετρήθηκε με το ηχώμετρο (Prac) είναι τα εξής:



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.13 / Ταχύτητα Δέσμης $U = 14.5 \text{ m/s}$ [O.3@.3]



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.14 / Ταχύτητα Δέσμης U = 23 m/s [O.3Θ.3]



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.15 / Ταχύτητα Δέσμης U = 33.2 m/s [O.3Θ.3]

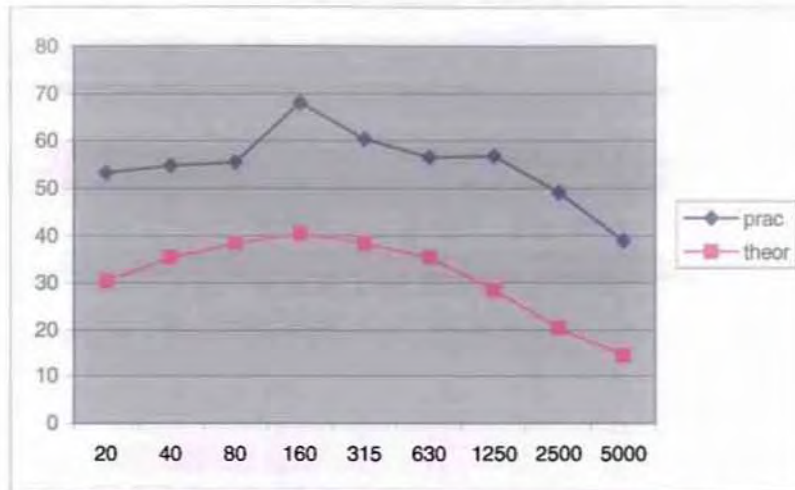
4.5.6 Ομάδα 3 / Θέση 5

Οι τιμές των μεταβλητών για τον υπολογισμό της ηχητικής πίεσης δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

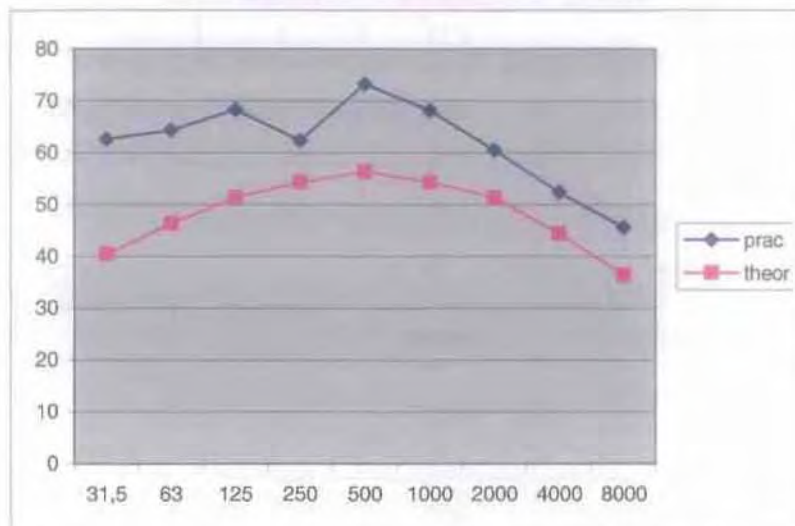
U =	13,8	21.4	28.6	(m/s)
D =	0,12	0,12	0,12	(m)
c =	343	343	343	(m/s)
T/T0 =	0,999	0,999	0,999	
ρ/ρ0 =	0,999	0,998	0,997	
K =	0,05	0,05	0,05	
r =	0.328	0.328	0.328	(m)
θ =	90	90	90	
DI =	-6	-6	-6	

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.15 / Πίνακας τιμών των μεταβλητών για την περίπτωση O.3Θ.5.

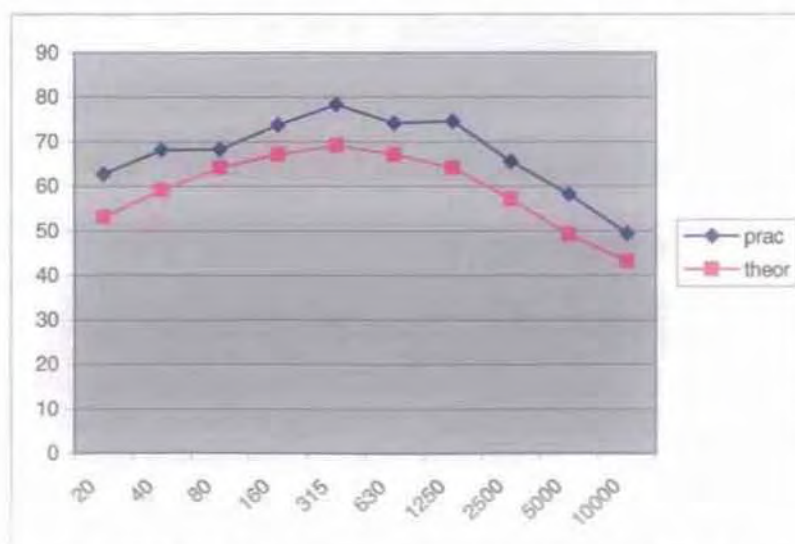
Τα διαγράμματα σύγκρισης της θεωρητικής τιμής (Theor) του L_{eq} με αυτήν που μετρήθηκε με το ηχώμετρο (Prac) είναι τα εξής:



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.16 / Ταχύτητα Δέσμης $U = 14.5$ m/s [O.3Θ.5]



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.17 / Ταχύτητα Δέσμης $U = 23$ m/s [O.3Θ.5]



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.18 / Ταχύτητα Δέσμης $U = 33.2$ m/s [O.3Θ.5]

4.6 Συμπεράσματα

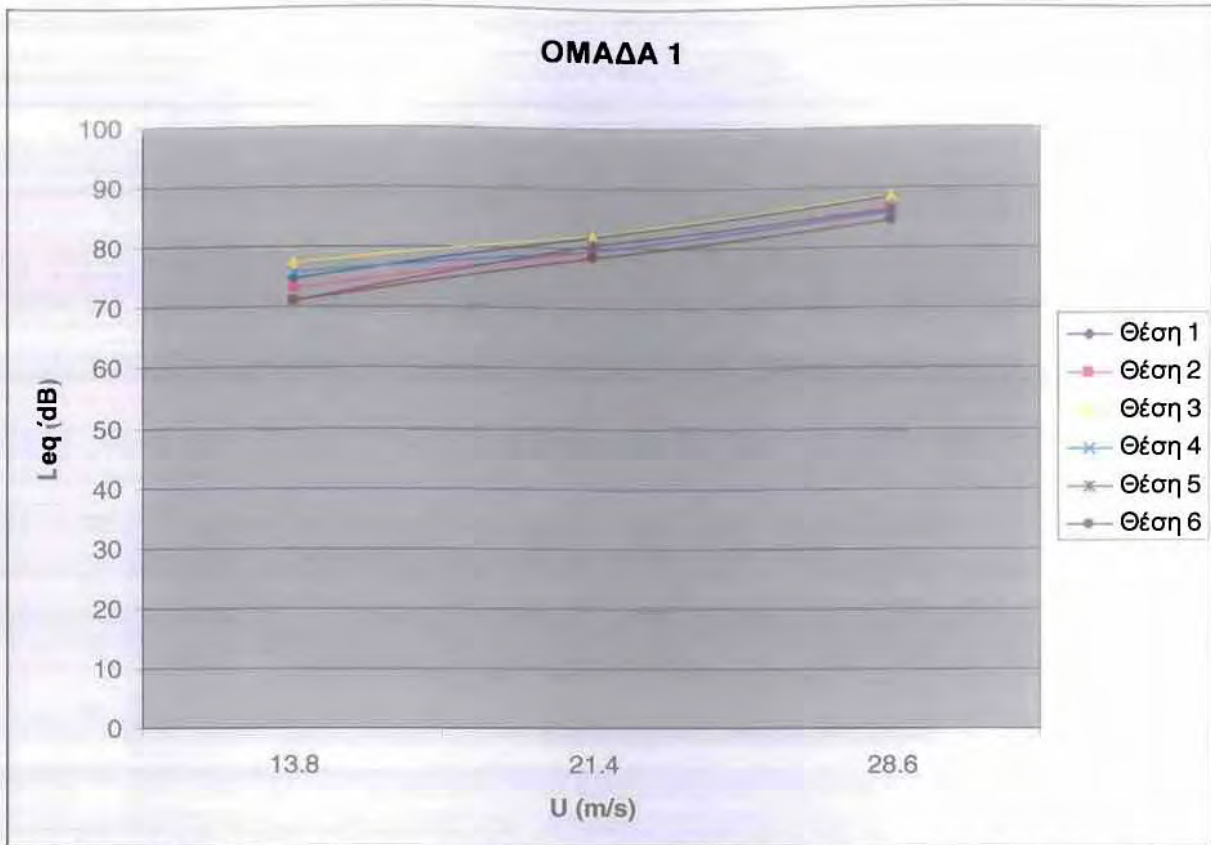
Ένα πρώτο συμπέρασμα που προκύπτει παρατηρώντας τα αποτελέσματα, για την τιμή της ηχητικής πίεσης, που προέκυψαν με το ηχόμετρο είναι η άμεση εξάρτησή της με την ταχύτητα της δέσμης.

ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΕΞΟΔΟΥ, U		13.8	21.4	28.6
ΟΜΑΔΑ 1	ΘΕΣΗ	Leq(A)	Leq(A)	Leq(A)
	1	74,9	81,8	88,5
	2	73,3	79,4	86
	3	77,3	82,1	88,6
	4	75,9	79,5	85,8
	5	71,1	80,6	86,4
	6	71,2	78,6	84,5
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΕΞΟΔΟΥ, U		13.8	21.4	28.6
ΟΜΑΔΑ 2	ΘΕΣΗ	Leq(A)	Leq(A)	Leq(A)
	1	72,9	81	85,6
	2	70,2	79,6	84,1
	3	73,7	83,1	88,5
	4	70,9	80	85,6
	5	72,8	81,9	88,4
	6	73,1	79,6	86,2
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΕΞΟΔΟΥ, U		14.5	23	33.2
ΟΜΑΔΑ 3	ΘΕΣΗ	Leq(A)	Leq(A)	Leq(A)
	1	72,9	81,8	87,8
	2	69,8	78,2	84,3
	3	73,4	82,3	88,5
	4	69,9	78,4	84,9
	5	72,2	79,5	85,8
	6	72,5	78,1	84,4

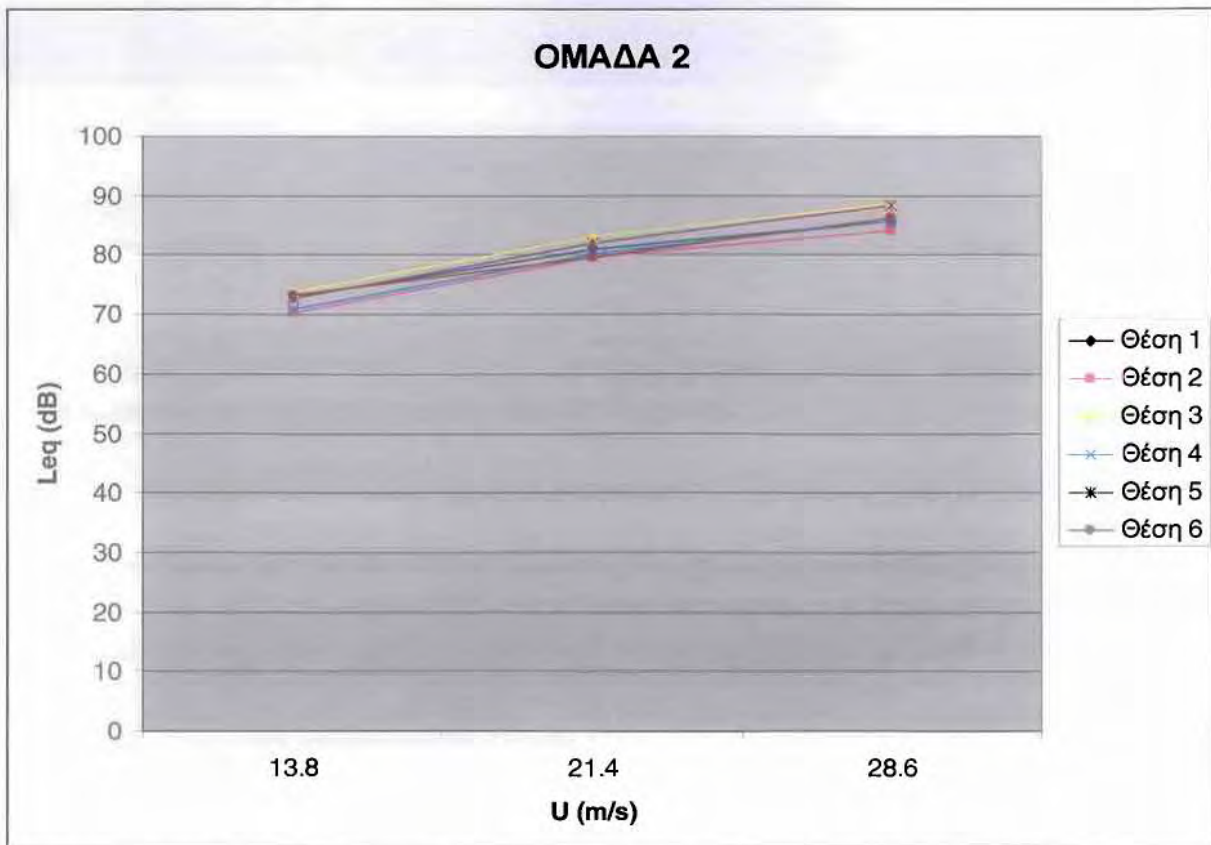
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.16 / Πίνακας αποτελεσμάτων της συνολικής ηχητικής πίεσης.

Από τις τιμές του παραπάνω πίνακα είναι εμφανές ότι διπλασιασμός της ταχύτητας της δέσμης επιφέρει αρκετά σημαντική άνοδο στη στάθμη της ηχητικής πίεσης από 10dB έως και 15dB. Το συμπέρασμα αυτό επιβεβαιώνει για άλλη μία φορά την θεωρία του Lighthill.

Στην συνέχεια δίνονται δύο διαγράμματα στα οποία φαίνεται ξεκάθαρα η εξάρτηση της ηχητικής πίεσης από την ταχύτητα εξόδου της δέσμης, για οποιαδήποτε θέση μέτρησης. Στο διάγραμμα 4.19 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πρώτης ομάδας (λείο στόμιο εξόδου), ενώ στο διάγραμμα 4.20 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της δεύτερης ομάδας (διαγραμμισμένο στόμιο εξόδου). Στον οριζόντιο άξονα δίνονται οι τιμές της ταχύτητας εξόδου της δέσμης, ενώ στον κάθετο άξονα οι τιμές της στάθμης της ηχητικής πίεσης. Κάθε γραμμή του διαγράμματος αναπαριστά την εκάστοτε θέση μέτρησης (θέση 1 έως 6).

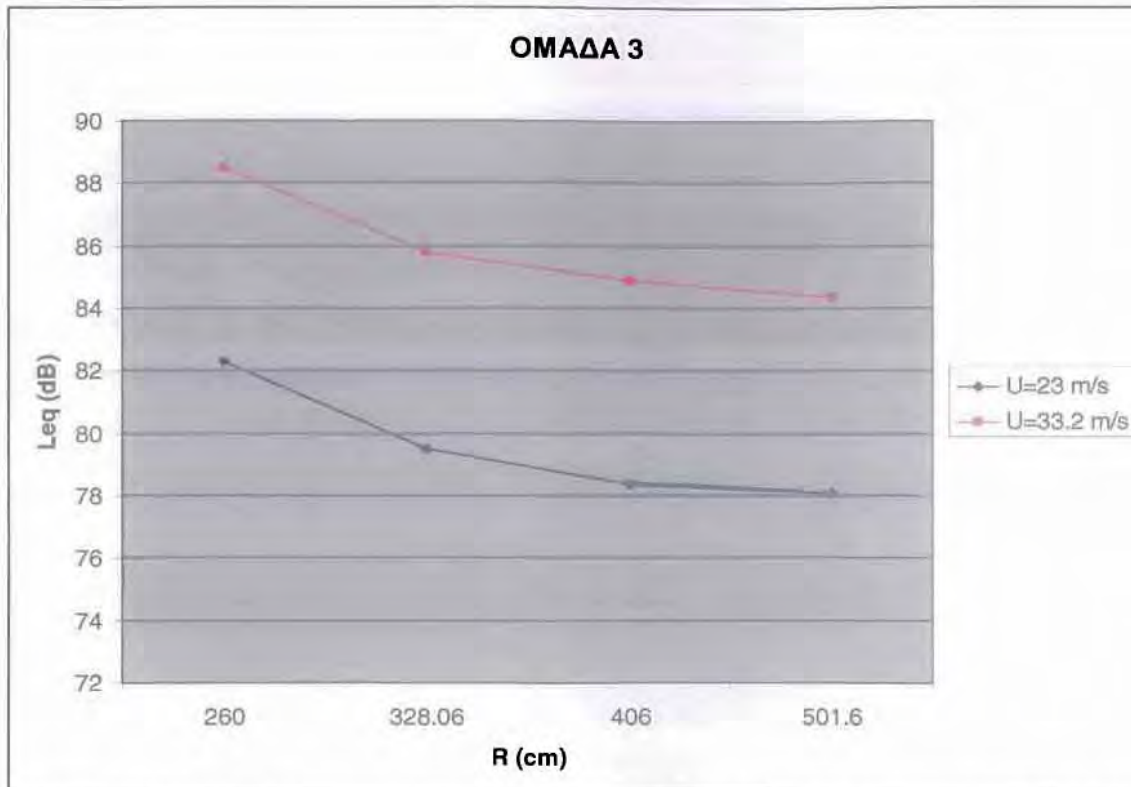


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.19 / Εξάρτηση της στάθμης της ηχητικής πίεσης από την ταχύτητα εξόδου της δέσμης (1^η ομάδα μετρήσεων).



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.20 / Εξάρτηση της στάθμης της ηχητικής πίεσης από την ταχύτητα εξόδου της δέσμης (2^η ομάδα μετρήσεων).

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα της μέτρησης ένα άλλο συμπέρασμα που προκύπτει είναι, ότι η στάθμη της ηχητικής πίεσης μειώνεται όσο αυξάνεται η απόσταση του ηχομέτρου από το κέντρο της ροής. Στο διάγραμμα 4.21 επιβεβαιώνεται ξεκάθαρα το συμπέρασμα αυτό. Στον οριζόντιο άξονα δίνονται οι τιμές της απόστασης από το κέντρο της ροής, ενώ στον κάθετο άξονα δίνονται οι τιμές της στάθμης της ηχητικής πίεσης. Χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές που προέκυψαν από την τρίτη ομάδα μετρήσεων, γιατί παραμένει σταθερή η τιμή της γωνίας θ . Κάθε γραμμή αντιστοιχεί στην εκάστοτε θέση μέτρησης και στην αντίστοιχη ταχύτητα εξόδου.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.20 / Εξάρτηση της στάθμης της ηχητικής πίεσης από την απόσταση του ηχομέτρου από το κέντρο της δέσμης.

Όσον αφορά την ακρίβεια της μαθηματικής μεθόδου που χρησιμοποιήθηκε, για να υπολογιστούν θεωρητικά οι τιμές της στάθμης της ηχητικής πίεσης, παρατηρώντας τα διαγράμματα (4.1 - 4.18) της προηγούμενης ενότητας, προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα.

Για χαμηλές ταχύτητες δέσμης υπάρχει αρκετά σημαντική απόκλιση από τις πραγματικές τιμές της πίεσης. Όσο αυξάνεται η ταχύτητα της δέσμης όμως, τα αποτελέσματα αρχίζουν και συγκλίνουν όλο και περισσότερο στις τιμές που προέκυψαν με το ηχόμετρο. Απόρροια όλων αυτών είναι ότι η μαθηματική μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε έχει αρκετά καλή ακρίβεια για υποηχητικές δέσμες μεγάλης ταχύτητας ($U > 35$).

Βέβαια, δεν πρέπει να αμεληθεί το γεγονός ότι και οι μετρήσεις που έγιναν με το ηχόμετρο δεν είναι και ιδανικές. Ο λόγος είναι ότι η έξοδος της δέσμης βρισκόταν στον ίδιο χώρο με τον φουσητήρα και όχι σε κάποιο ανηχοϊκό θάλαμο. Συνεπώς ενισχύθηκε το φάσμα του αεροδυναμικού θορύβου

της δέσμης από το θόρυβο του ηλεκτροκινητήρα, των πτερυγίων του ανεμιστήρα αλλά και από τυχόν ανακλάσεις του ήχου σε διάφορες επιφάνειες του εργαστηρίου. Το συμπέρασμα αυτό έχει ως επακόλουθο η συνολική ηχητική πίεση, που μετρήθηκε με το ηχόμετρο, να είναι υψηλότερης έντασης (3 ~ 4 dB) από την πραγματική.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μία ανακεφαλαίωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Επίσης, παρατίθενται ορισμένες προτάσεις για επιπρόσθετη μελέτη.

5.1 Ανακεφαλαίωση

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε ο αεροδυναμικός θόρυβος που παράγεται από αέρια τυρβώδη δέσμη.

Πρώτα μετρήθηκε η ένταση του με ένα ηχώμετρο σε συγκεκριμένες θέσεις στο χώρο, ενώ στη συνέχεια υπολογίστηκε η ένταση του για τις ίδιες θέσεις, χρησιμοποιώντας ένα μαθηματικό μοντέλο (Bies & Hansen) που χρησιμοποιείται σε πρακτικές εφαρμογές.

Στη συνέχεια κατασκευάστηκαν διαγράμματα με τις τιμές που προέκυψαν, από την κάθε μέθοδο, με σκοπό να συγκριθούν. Επίσης έγινε φασματική ανάλυση συχνοτήτων για κάθε μέτρηση και παρατέθηκαν τα αντίστοιχα φάσματα.

Καταλήγοντας, έγινε ανάλυση των αποτελεσμάτων και μπόρεσαν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα, τόσο για την ακρίβεια των μετρήσεων, όσο και για την ακρίβεια του μαθηματικού μοντέλου.

5.2 Προτάσεις για περαιτέρω μελέτη

Το μαθηματικό μοντέλο που αναλύθηκε στην παρούσα διπλωματική θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και για τις παρακάτω περιπτώσεις:

- Μέτρηση αεροδυναμικού θορύβου υποηχητικής αέριας δέσμης υψηλής ταχύτητας ($1 > M > 0.5$)
- Μέτρηση αεροδυναμικού θορύβου υπερηχητικής αέριας δέσμης υψηλής ταχύτητας ($M > 1$)

Επίσης θα μπορούσε να κατασκευαστεί ένας ανηχοϊκός θάλαμος ώστε η δέσμη να εκρέει μέσα σε αυτόν. Στη συνέχεια θα μπορούσαν να πραγματοποιηθούν μετρήσεις μέσα στο θάλαμο, χρησιμοποιώντας κάποιο

πλέγμα μικροφώνων γύρω από τον άξονα της δέσμης. Οι συνθήκες αυτές θα ήταν ιδανικές για μέτρηση της στάθμης της ηχητικής πίεσης. Τα αποτελέσματα για την στάθμη της πίεσης θα μπορούσαν να συγκριθούν με τα αποτελέσματα που προέκυψαν, στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Ξενογλώσση Βιβλιογραφία

- [1] James Lighthill (1952), **“ON SOUND GENERATED AERODYNAMICALLY: GENERAL THEORY”**
- [2] James Lighthill (1954), **“ON SOUND GENERATED AERODYNAMICALLY: TURBULENCE AS A SOURCE SOUND”**
- [3] James Lighthill (NASA, 1992), **“A GENERAL INTRODUCTION TO AEROACOUSTICS AND ATMOSPHERIC SOUND”**
- [4] James Lighthill (NASA, 1993), **“SOME ASPECTS OF THE AEROACOUSTICS OF HIGH-SPEED JETS”**
- [5] Marvin E. Goldstein (1976), **“AEROACOUSTICS”**
- [6] Harvey H. Hubbard (NASA, 1991), **“AEROACOUSTICS OF FLIGHT VEHICLES: THEORY AND PRACTICE”, Vol. I (Noise Sources) & Vol. II (Noise Control)**
- [7] Lawrence E. Kinsler & Austin R. Frey (1962), **“FUNDAMENTALS OF ACOUSTICS”**
- [8] Jens Blauert and Ning Xiang (2008), **“ACOUSTICS FOR ENGINEERS”**
- [9] Randall F. Barron (2001), **“INDUSTRIAL NOISE CONTROL AND ACOUSTICS”**
- [10] Bies & Hansen (1988), **“ENGINEERING NOISE CONTROL THEORY AND PRACTICE”**
- [11] Sound Research Laboratories Ltd, **“NOISE CONTROL IN INDUSTRY”**
- [12] Nicholas P. Cheremisinoff (1996), **“NOISE CONTROL IN INDUSTRY A Practical Guide”**
- [13] Bruel & Kjaer (1998), **“BASIC CONCEPTS OF SOUND”**
- [14] Bruel & Kjaer (1998), **“BASIC FREQUENCY ANALYSIS OF SOUND”**
- [15] Bruel & Kjaer (1984), **“MEASURING SOUND”**



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000073785

Ελληνική Βιβλιογραφία

- [16] Μαθιουδάκης Κ. , “ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΑΕΡΟΠΟΡΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ, ΕΠΙΔΟΣΕΙΣ, ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ ΚΑΙ ΉΧΟΥ”
- [17] Μανόλης Τζεκάκης & Νίκος Τσινίκας, “ΠΟΛΕΟΔΟΜΙΚΗ ΗΧΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑ”
- [18] Διονύσιος Ευθυμιάτος , “ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ & ΚΤΙΡΙΑΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ”
- [19] V. Streeter & E.B. Wylie, “ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ”