



ΑΣΚΗΣΗ 1

Μέτρηση ηχητικής στάθμης πίεσης 1^ο

ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΑΣΚΗΣΗΣ

Σκοπός της άσκησης αποτελεί η μέτρηση της ηχητικής στάθμης μιας ηχητικής πηγής. Στη συγκεκριμένη άσκηση θα ασχοληθούμε μόνο με την απλή περίπτωση *ΜΙΑΣ* μόνο ηχητικής *πηγής*. Επιπλέον, θα γίνει εκμάθηση της χρήσης του φορητού ηχομέτρου και της βαθμονόμησής του.
Μετρούμενα μεγέθη: Στάθμη ηχητικής πίεσης, σταθμισμένες τιμές, ισοδύναμη στάθμη συνεχούς θορύβου, Sound Exposure Level.

1. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΘΕΩΡΙΑΣ

1.1. Μετρήσιμα μεγέθη

Στη συγκεκριμένη άσκηση ασχολούμαστε με κάποια αντικειμενικά μετρήσιμα μεγέθη, τα οποία μας επιτρέπουν να ποσοτικοποιήσουμε το πόσο δυνατά ηχεί μια πηγή. Κατ' επέκτασιν αυτά τα μεγέθη συνδέονται και με την έννοια της *ακουστότητας*, δηλαδή την υποκειμενική απόκριση του αυτιού στη στάθμη του ήχου που εκπέμπεται από μια ηχητική πηγή, δηλαδή την αίσθηση του πόσο δυνατά αντιλαμβανόμαστε έναν ήχο (ο όρος "ένταση" αποφεύγεται εδώ, για να μη γίνει σύγχυση με το φυσικό μέγεθος της έντασης, I).

Ένα βασικό τέτοιο φυσικό μέγεθος είναι η εκπεμπόμενη ενέργεια από την ηχητική πηγή, E . Παρ' όλα αυτά συνήθως ενδιαφερόμαστε περισσότερο για το ρυθμό ροής της ηχητικής ενέργειας και μάλιστα σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση. Συνεπώς καταλήγουμε στο φυσικό μέγεθος της ηχητικής έντασης, I , που δίνει την ηχητική ενέργεια που διαπερνάει στη μονάδα του χρόνου τη μονάδα επιφάνειας που βρίσκεται κάθετα στη διάδοση.

Θεωρώντας ότι έχουμε:

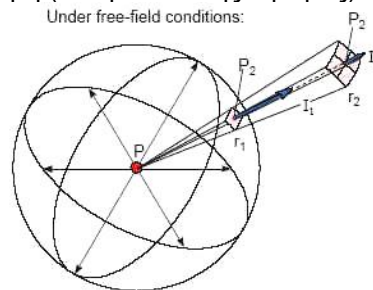
(α) σημειακή πηγή ή οποιαδήποτε άλλη πηγή που εκπέμπει ομοιόμορφα σε όλες τις διευθύνσεις, δηλαδή έχει σφαιρικό μέτωπο κύματος

(β) σε ελεύθερο πεδίο¹,

η ένταση υπολογίζεται από τη διαίρεση της εκπεμπόμενης από την πηγή ισχύος με την επιφάνεια μιας σφαίρας (σε κάποια απόσταση r από την πηγή, όπου βρίσκεται ο παρατηρητής), δηλαδή είναι αντιστρόφως ανάλογη προς το τετράγωνο της απόστασης, r . Οπότε:

$$I = \frac{W}{4\pi r^2}, \text{ με μονάδες: } [I] = \text{Watt}/\text{m}^2$$

, όπου W η εκπεμπόμενη ηχητική ισχύς από την πηγή και r η απόσταση πηγής-παρατηρητή (και η ακτίνα της σφαίρας).



Σχήμα 1. Υπολογισμός της έντασης σε ελεύθερο πεδίο, για σφαιρικό μέτωπο κύματος [11]

Η σχέση που συνδέει το φυσικό μέγεθος της ηχητικής έντασης με την ηχητική πίεση για πηγή με σφαιρικό μέτωπο κύματος (πχ. σημειακή πηγή) σε ελεύθερο πεδίο είναι:

$$I = \frac{p_{rms}^2}{\rho c},$$

, όπου p_{rms} η ενεργός τιμή της πίεσης, ρ η πυκνότητα του αέρα και c η ταχύτητα του ήχου στον αέρα.

Από τα παραπάνω έχουμε: $W \propto I$ και $I \propto p^2$, όπου

$$\left\{ \begin{array}{l} W \text{ ακουστική ισχύς, σε Watt} \\ I \text{ ακουστική ένταση, σε Watt/m}^2 \\ p \text{ ακουστική πίεση, σε Pa ή N/m}^2 \end{array} \right.$$

¹ Ελεύθερο πεδίο ονομάζουμε ένα πεδίο στο οποίο δεν υπάρχουν όρια, κατά συνέπεια δεν υπάρχουν καθόλου ανακλάσεις. Συνθήκες τέτοιου πεδίου μπορούμε να έχουμε είτε σε ανοιχτό χώρο είτε σε ανηχοϊκό θάλαμο.

² Σε διάχυτο ανηχητικό πεδίο ισχύει: $|I| = 0$ μέσα στο χώρο και $I = \frac{p_{rms}^2}{4\rho c}$ σε διαχωριστική επιφάνεια



1.2. Λογαριθμική κλίμακα – Αναλογίες έναντι διαφορών

Υπάρχουν δύο βασικοί λόγοι που αντί να παρουσιάζουμε τις απόλυτες τιμές των μεγεθών, χρησιμοποιούμε λογαριθμικές κλίμακες:

(1) Ο ψυχοφυσικός νόμος των Weber-Fechner, σύμφωνα με τον οποίο *σχεδόν όλες οι υποκειμενικές ανθρώπινες αισθήσεις είναι ανάλογες προς το λογάριθμο (της έντασης) του ερεθίσματος.*

(2) Το γεγονός ότι τα φυσικά μεγέθη που σχετίζονται με την ακοή (όπως ηχητική πίεση και ηχητική ένταση) για ακουστούς από τον άνθρωπο ήχους παρουσιάζουν ένα τεράστιο εύρος τιμών, και κατ' επέκταση θα απαιτούνταν η αναγραφή πολλών δεκαδικών ψηφίων για την αναπαράστασή τους.

Συγκεκριμένα:

(1) Στην περίπτωση της ανθρώπινης ακοής έχει παρατηρηθεί πράγματι ότι: Αύξηση της πίεσης:

- από 1 μονάδα πίεσης --> σε 10 μονάδες πίεσης (=> διαφορά=9 μ.π. και λόγος=10 μ.π.) και

- από 1000 μονάδες πίεσης --> σε 10000 μονάδες πίεσης (διαφορά=9999μ.π. και λόγος=10 μ.π.)

προκαλεί την ίδια μεταβολή στην υποκειμενική αίσθηση της ακουστότητας του ηχητικού ερεθίσματος και συγκεκριμένα διπλασιασμό.

Βλέπουμε, λοιπόν, ότι ο λόγος πιέσεων, δηλαδή η σχετική μεταβολή της πίεσης και όχι η διαφορά τους (η απόλυτη μεταβολή της) προκαλεί το ίδιο ακουστικό αποτέλεσμα στο ανθρώπινο αυτί.

(2) Σχετικό εύρος μέγιστης-ελάχιστης πίεσης και έντασης (όριο πόνου - κατώφλι ακουστότητας, στο 1 kHz):

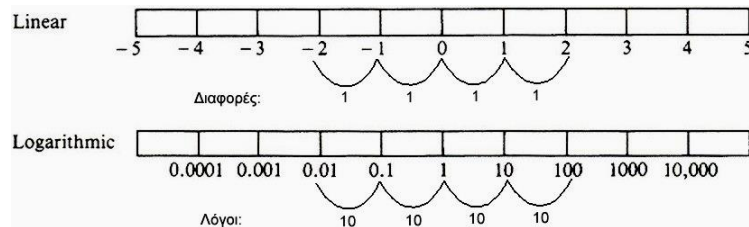
- Πίεση: 1000000:1 περίπου (περίπου 20Pa – 20μPa), δηλαδή 0,0000001

- Ένταση: 100000000000:1 περίπου (περίπου 10Watt/m² – 10⁻¹²Watt/m²), δηλαδή 1.000.000.000.000

Ένας τρόπος να συμπίεσουμε αυτό το τεράστιο εύρος τιμών και ταυτόχρονα να προσομοιάσουμε τον τρόπο που λειτουργεί το αυτί μας είναι να μεταφερθούμε από γραμμική σε λογαριθμική κλίμακα (διαίρεση και εξαγωγή λογάριθμου).

- Στη γραμμική κλίμακα: ίσες διαφορές αναπαρίστανται με ίσες αποστάσεις, ενώ

- Στη λογαριθμική κλίμακα: ίσοι λόγοι αναπαρίστανται με ίσες αποστάσεις.



Σχήμα 2. Γραμμικές και λογαριθμικές σχέσεις [1]

Ο λογάριθμος ενός λόγου ορίζει τη μονάδα bel. Δεν είναι φυσική μονάδα, αλλά χαρακτηρίζει τον λόγο δύο ομοειδών μεγεθών, γι' αυτό πρέπει να αναγράφεται πάντα δίπλα στο αποτέλεσμα.

$$L_A (bel) = \log \frac{A_2}{A_1}$$

1 bel αντιστοιχεί σε λόγο εντάσεων 10:1.

Η παραπάνω σχέση *πολλαπλασιαζόμενη με το 10 (ή το 20)* ονομάζεται στάθμη, με μονάδα το dB και έχει την ιδιότητα να δίνει το ίδιο αποτέλεσμα για ίδιους λόγους. Π.χ. ο λόγος 10^{0,1} δύο μεγεθών αντιστοιχεί σε 1 dB διαφορά.

$$L_A (dB) = 10 \cdot \log \frac{A_2}{A_1}$$

- Στην ακουστική, *πολλαπλασιάζοντας με το 10 ή το 20* λαμβάνουμε ακριβώς ακέραιες τιμές στάθμης έντασης για μόλις ακουστές μεταβολές έντασης.



- Επειδή ανάλογα με το A_1 το αποτέλεσμα αλλάζει και δίνει μια σχετική τιμή, ορίζουμε μία συγκεκριμένη τιμή αναφοράς για κάθε μέγεθος, A_{ref} . Στην περίπτωση των ηχητικών μεγεθών χρησιμοποιούμε τις τιμές που αντιστοιχούν στο κατώφλι ακουστότητας, στο 1 kHz.
- Έτσι έχουμε το εξής για τη **στάθμη ηχητικής έντασης**:

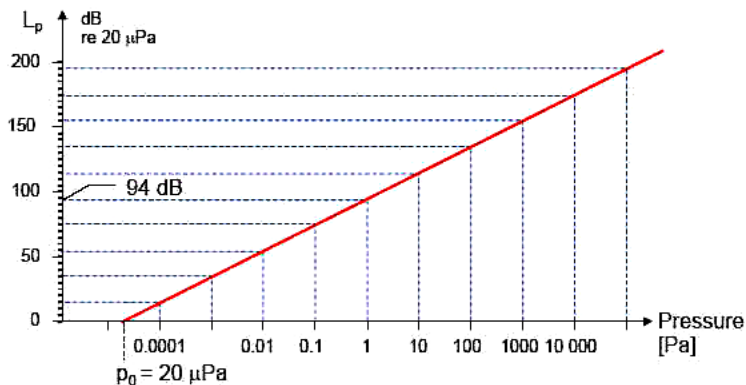
$$SIL = L_I = 10 \cdot \log \frac{I}{I_{ref}}, \text{ με } I_{ref} = 10^{-12} \text{ Watt/m}^2$$

- Εφόσον $I = \frac{p_{rms}^2}{\rho c}$ (και γενικά $I \propto p^2$) \Rightarrow Για τη **στάθμη ηχητικής πίεσης**:

$$SPL = L_p = 10 \cdot \log \frac{\frac{p_{rms}^2}{\rho c}}{\frac{p_{rms,ref}^2}{\rho c}} = 10 \cdot \log \frac{p_{rms,2}^2}{p_{rms,1}^2} = 10 \cdot \log \left(\frac{p_{rms}}{p_{rms,ref}} \right)^2 = 2 \cdot 10 \cdot \log \left(\frac{p_{rms}}{p_{rms,ref}} \right)$$

$$\Leftrightarrow SPL = L_p = 20 \cdot \log \left(\frac{p_{rms}}{p_{rms,ref}} \right), \text{ με } p_{ref} = 20 \mu\text{Pa} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ N/m}^2$$

Παρατηρούμε ότι στην περίπτωση της στάθμης ηχητικής πίεσης πολλαπλασιάζουμε με **20**.



Σχήμα 3. Γραμμική σχέση σχετικών τιμών (λόγων) πίεσης και στάθμεων πίεσης [11]

- Αντίστοιχα, εφόσον $I = \frac{W}{4\pi r^2}$ ($W \propto I$) \Rightarrow Για τη **στάθμη ηχητικής ισχύος**:

$$SWL = L_W = 10 \cdot \log \frac{\frac{W}{4\pi r^2}}{\frac{W_{ref}}{4\pi r^2}}$$

$$\Leftrightarrow SWL = L_W = 10 \cdot \log \frac{W}{W_{ref}}, \text{ με } W_{ref} = 10^{-12} \text{ Watt}$$



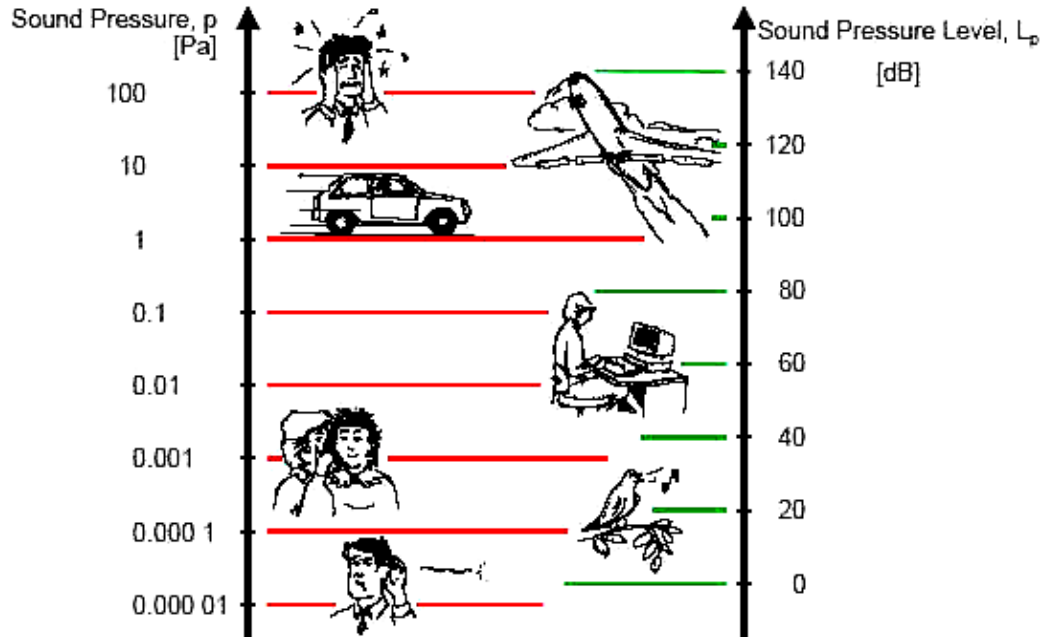
Συνοπτικά έχουμε τα ακόλουθα:

	Στάθμη έντασης	Στάθμη πίεσης	Στάθμη ισχύος
Σύμβολο	SIL ή L_I	SPL ή L_p	SWL ή L_w
Σχέση	$L_I = 10 \cdot \log \frac{I}{I_{ref}}$	$L_p = 20 \cdot \log \frac{p}{p_{ref}}$	$L_w = 10 \cdot \log \frac{W}{W_{ref}}$
Μονάδες	$[L_I] = dB$ $[I] = Watt/m^2$	$[L_p] = dB$ $[p] = Pa = Watt/m^2$	$[L_w] = dB$ $[W] = Watt$
Τιμή αναφοράς/ κατώφλι ακουστότητας	$I_{ref} = 10^{-12} Watt/m^2$	$p_{ref} = 20 \mu Pa = 2 \cdot 10^{-5} N/m^2$	$W_{ref} = 10^{-12} Watt$
Όριο πόνου	$I_{max} = 10 Watt/m^2$	$p_{max} = 63 Pa = 63 N/m^2$	
Στάθμη κατωφλίου ακουστότητας	$L_I = 0dB$	$L_p = 0dB$	$L_w = 0dB$
Στάθμη όριου πόνου	$L_I = 130dB$	$L_p = 130dB$	

Πίνακας 1. Συνοπτικός πίνακας φυσικών μεγεθών και αντίστοιχων στάθμεων

Αν και χάριν απλότητας συνηθίζουμε να θεωρούμε στην ακουστική ότι $L_I = L_p$, αυτό ισχύει μόνο στην περίπτωση ελεύθερου πεδίου (χωρίς ανακλάσεις) και σημειακής πηγής, ενώ σε άλλες περιπτώσεις η σχέση τους εξαρτάται από το χώρο. Αντίθετα, το L_w είναι πιο θεμελιώδες μέγεθος και χαρακτηρίζει την ίδια την πηγή ανεξάρτητα από το περιβάλλον στο οποίο είναι τοποθετημένη (αποτελεί μέτρο της συνολικής ισχύος που εκπέμπεται προς όλες τις κατευθύνσεις από μια ηχητική πηγή) [2].

1.3. Παραδείγματα τιμών ηχητικής στάθμης πίεσης:



Σχήμα 4. Παραδείγματα θορύβων σε τιμές πίεσης και στάθμης πίεσης [11]

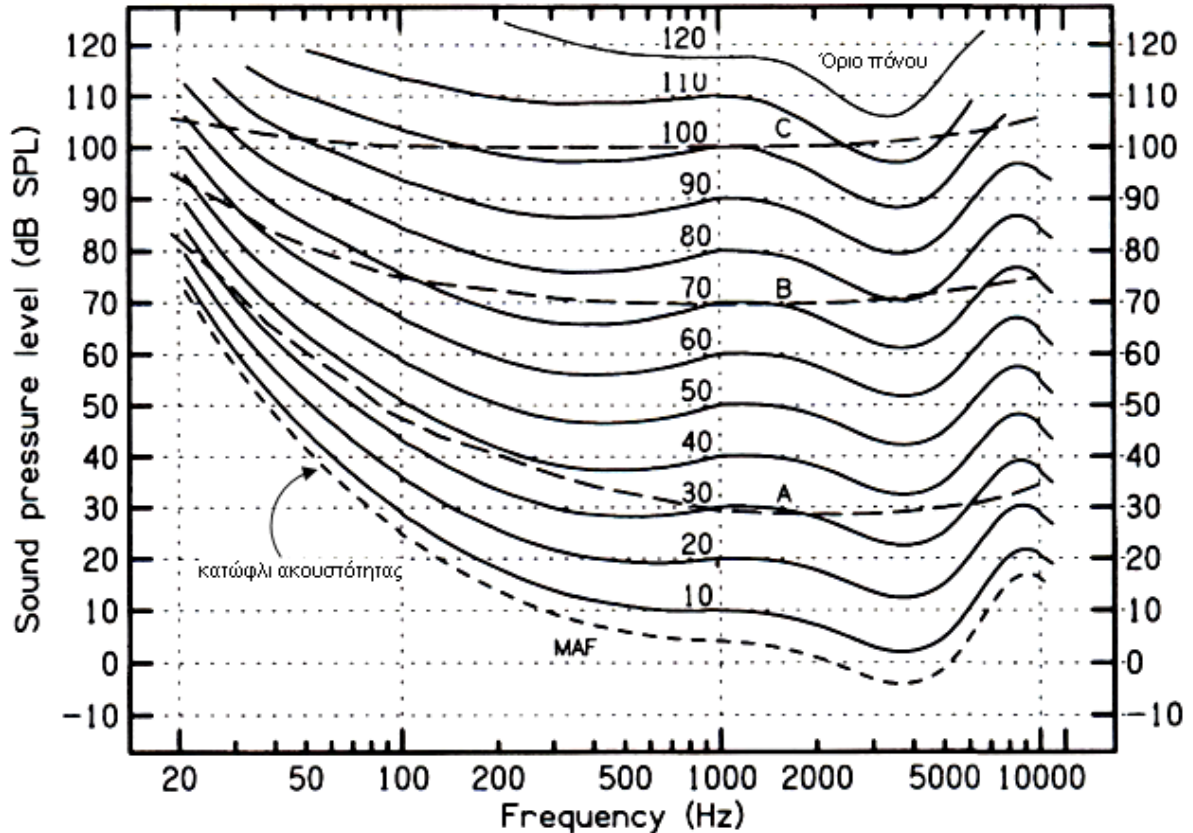
Table 2.1 Typical sound levels in the environment

Example sound	dB(SPL)	Description
Long range gunfire at gunner's ear	140	
Threshold of pain	130	Ouch!
Jet take-off at approximately 100 m	120	
Peak levels on a night club dance floor	110	
Loud shout at 1 m	100	Very noisy
Heavy truck at about 10 m	90	
Heavy car traffic at about 10 m	80	
Car interior	70	Noisy
Normal conversation at 1 m	60	
Office noise level	50	
Living room in a quiet area	40	Quiet
Bedroom at night time	30	
Empty concert hall	20	
Gentle breeze through leaves	10	Just audible
Threshold of hearing for a child	0	

Πίνακας 2. Παραδείγματα θορύβων σε τιμές πίεσης και στάθμης πίεσης [9]

1.4. Καμπύλες ίσης ακουστότητας των Fletcher-Munson

Οι καμπύλες ίσης ακουστότητας μας δίνουν τις συνθήκες που πρέπει να εκπληρώνονται για συχνότητα και ηχητική στάθμη, ώστε ένα άτομο με φυσιολογική ακοή να αντιλαμβάνεται τους ήχους αυτούς εξίσου δυνατά. Πρόκειται για πειραματικές καμπύλες που σχηματίστηκαν από σειρά ψυχοακουστικών πειραμάτων, όπου τα υποκείμενα ρύθμιζαν την ακουστότητα ενός απλού ήχου (μίας καθαρής συχνότητας), ώστε αυτός να ηχεί εξίσου δυνατά. Σημειώνεται ότι οι καμπύλες ίσης ακουστότητας αντιπροσωπεύουν μέσες τιμές από σειρά πειραμάτων, εφόσον στην πράξη υπάρχει κάποια απόκλιση από άτομο σε άτομο (με βάση την ηλικία κλπ).



Σχήμα 5. Καμπύλες ίσης ακουστότητας [3]

Αυτό που αποκαλύπτουν οι εμπειρικές καμπύλες Fletcher-Munson είναι ότι η ένταση του ηχοισθήματος του ανθρώπου εξαρτάται από τη συχνότητα και την ηχητική στάθμη εκπομπής της πηγής και μάλιστα όχι με γραμμικό τρόπο. Συγκεκριμένα:

(1) Το αυτί παρουσιάζει διαφορετική ευαισθησία στις διάφορες συχνότητες. Παρατηρούμε μέγιστη ευαισθησία γύρω στα 3-4kHz (περιοχή συχνοτήτων ομιλίας), λιγότερη ευαισθησία στις υψηλές συχνότητες και ελάχιστη στις χαμηλές συχνότητες. Έτσι, για να ακουστεί ένας ήχος σταθερής ηχητικής ισχύος εξίσου δυνατά στις διάφορες συχνότητες, απαιτείται στις χαμηλές συχνότητες μεγαλύτερη ηχητική στάθμη από ότι στις υψηλές συχνότητες, ενώ σε συχνότητες γύρω στα 4 kHz (περιοχή μέγιστης ευαισθησίας του αυτιού) απαιτείται η ελάχιστη δυνατή στάθμη.

Για παράδειγμα, η ελάχιστη ισχύς μιας πηγής ήχου που προκαλεί έναν ήχο μόλις αντιληπτό από το ανθρώπινο αυτί στα 30 Hz είναι κάπου ένα εκατομμύριο φορές μεγαλύτερη απ' ό τι στα 4 kHz [4].

Επίσης, αντίστροφα, αν τοποθετήσουμε το 'volume' ενός ηχητικού συστήματος σε σταθερή θέση και κάνουμε μια σάρωση στις ακουστές συχνότητες, η ακουστότητα του ήχου θα μεταβάλλεται, σύμφωνα με τις παραπάνω καμπύλες.

(2) Για μεγαλύτερες στάθμες, οι καμπύλες ίσης ακουστότητας γίνονται πιο επίπεδες από ότι σε χαμηλές στάθμες, δηλαδή εξασθενεί η διαφορά της ηχητικής στάθμης μεταξύ χαμηλών και υψηλών συχνοτήτων που απαιτείται για να ακούγονται εξίσου δυνατά. Για υψηλές στάθμες έχουμε μικρές διαφορές, ενώ για χαμηλές στάθμες μεγάλες διαφορές.



Αυτό έχει επίδραση στην αναπαραγωγή ενός σύνθετου ήχου, πχ. μουσική. Εφόσον η ακουστότητα στις διάφορες συχνотικές περιοχές μεταβάλλεται σύμφωνα με τη συνολική ένταση του ήχου, κατά την αναπαραγωγή η «τονική ισορροπία» θα μεταβληθεί, εκτός κι αν η αναπαραγωγή γίνει στην ίδια στάθμη με αυτήν της εγγραφής.³

Στο διάγραμμα φαίνονται επίσης:

- *Το κατώφλι ακουστότητας*: Δίνει την ελάχιστη τιμή της στάθμης ενός τόνου που μπορεί να γίνει αντιληπτή από το ανθρώπινο αυτί ενός ατόμου νεαρής ηλικίας
- *Το όριο του πόνου*: Δίνει την ανώτατη στάθμη, ανεκτή από το ανθρώπινο αυτί.

Και τα δύο εξαρτώνται από τη συχνότητα.

³ Έτσι εξηγείται γιατί όταν παίζουμε σε ένα ηχητικό σύστημα δυνατά μουσική, παρατηρούνται δυσανάλογα πιο έντονα το μπάσο και τα ψηλά, ενώ όταν παίζουμε την ίδια μουσική χαμηλόφωνα χάνεται το σώμα (body) και η λαμπρότητά του [4].

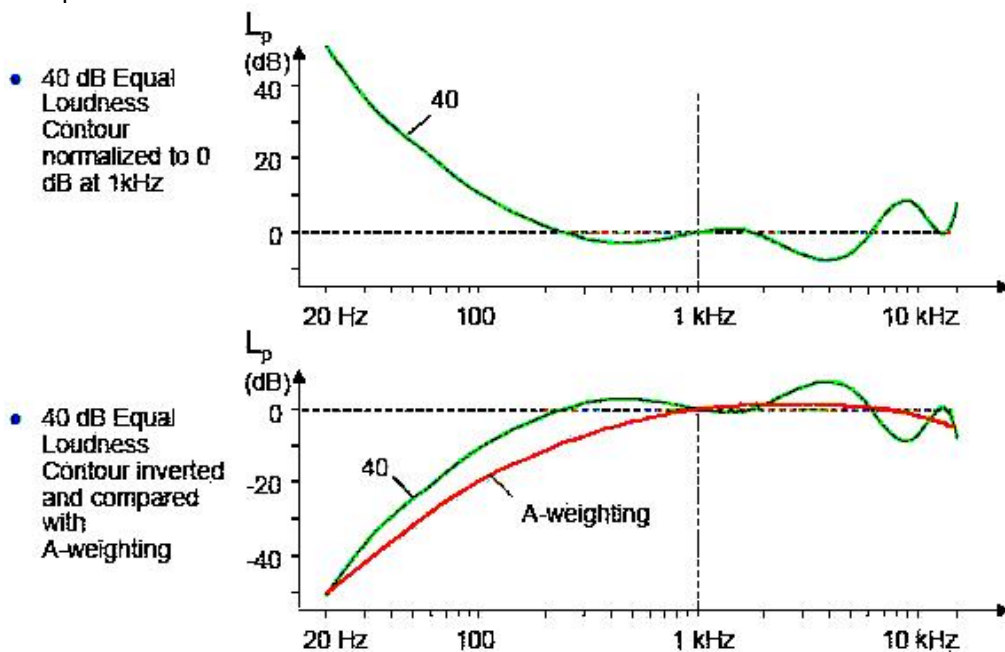


1.5. Προσέγγιση της Υποκειμενικής Αίσθησης της Ακουστότητας με τη Χρήση Σταθμισμένων φίλτρων

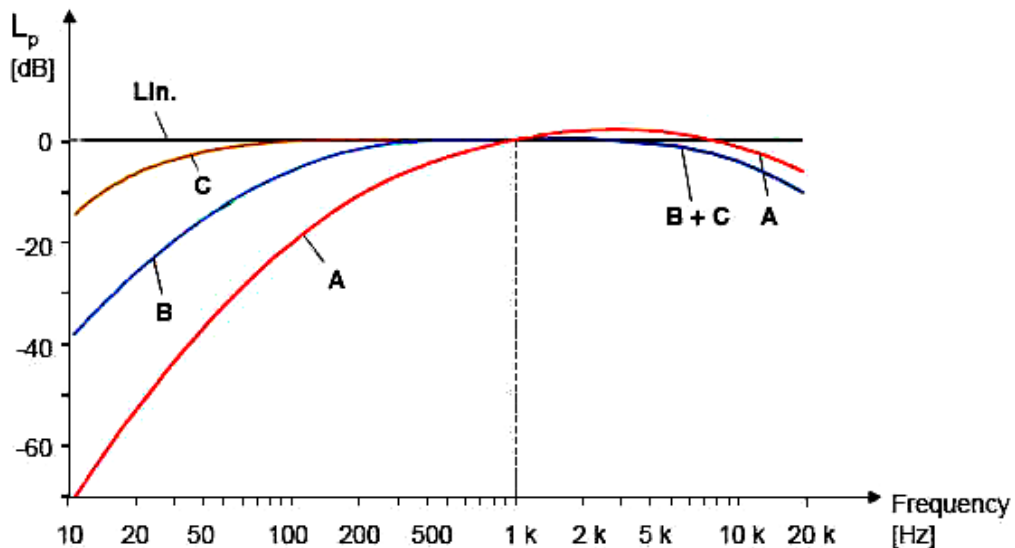
Όπως είδαμε παραπάνω, το ανθρώπινο αισθητήριο της ακοής δεν έχει ευθεία απόκριση σε όλο το φάσμα των ακουστικών συχνοτήτων (και ηχητικών στάθμεων).

Στις μετρήσεις που λαμβάνουμε με ένα όργανο μέτρησης, όπως το ηχόμετρο, πολλές φορές θέλουμε να λάβουμε υπόψη μας αυτή τη μη-γραμμική συμπεριφορά του αυτιού που παρουσιάζεται στις καμπύλες Fletcher-Munson, έτσι ώστε το αποτέλεσμα να αποτελεί πραγματικά μέτρο της ανθρώπινης αντίληψης του πόσο δυνατά ακούστηκε ένας ήχος.

Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούμε τις 3 χονδροειδείς καμπύλες του σχήματος 7, που χαρακτηρίζουν τη συμπεριφορά του αυτιού ως προς συχνότητα και στάθμη του ερεθίσματος. Έχοντας το αντίστροφο πρόβλημα (του υπολογισμού της υποκειμενικής τιμής μιας στάθμης από μια γραμμική μέτρηση), καταλήγουμε στις τρεις χονδροειδείς καμπύλες του παρακάτω διαγράμματος (μία για κάθε μία περιοχή στάθμεων), που είναι κατοπτρικές των προηγούμενων. Αυτές μας δίνουν το πλήθος των dB που πρέπει να αφαιρέσουμε από μια γραμμική τιμή στάθμης πίεσης, για να προσομοιάσουμε τον τρόπο με τον οποίο ακούμε.



Σχήμα 6. Σταθμισμένο φίλτρο A – σύγκριση με αντίστοιχη καμπύλη ίσης ακουστότητας A [11]



Σχήμα 7. Σταθμισμένα φίλτρα A, B και C [11]



Συχνότητα (Hz)	Συνάρτηση A	Συνάρτηση B	Συνάρτηση C
10	-70.4		
12.5	-63.4		
16	-56.7		
20	-50.5		
25	-44.7	-20.4	-4.4
31.5	-39.4	-17.1	-3
40	-34.6	-14.2	-2
50	-30.2	-11.6	-1.3
63	-26.2	-9.3	-0.8
80	-22.5	-7.4	-0.5
100	-19.1	-5.6	-0.3
125	-16.1	-4.2	-0.2
160	-13.4	-3	-0.1
200	-10.9	-2	0
250	-8.9	-1.3	0
315	-6.6	-0.8	0
400	-4.8	-0.5	0
500	-3.2	-0.3	0
630	-1.9	-0.1	0
800	-0.8	0	0
1000	0	0	0
1250	0.6	0	0
1600	1	0	-0.1
2000	1.2	-0.1	-0.2
2500	1.3	-0.2	-0.3
3150	1.2	-0.4	-0.5
4000	1	-0.7	-0.8
5000	0.5	-1.2	-1.3
6300	-0.1	-1.9	-2
8000	-1.1	-2.9	-3
10000	-2.5	-4.3	-4.4
12500	-4.3	-6.1	-6.2
16000	-6.6	-8.4	-8.5
20000	-9.3	-11.1	-11.2

Πίνακας 3. Τιμές συναρτήσεων βάρους A, B και C [7]

Έτσι, για παράδειγμα, στην περίπτωση πολύ χαμηλών συχνοτήτων (όπου το αυτί έχει τη λιγότερη ευαισθησία \Rightarrow ακούμε πιο χαμηλόφωνα) πρέπει να αφαιρέσουμε περισσότερα dB από ό,τι στις μεσαίες περιοχές (σχετικά μεγαλύτερη ευαισθησία \Rightarrow ακούμε πιο δυνατά). Οι ακριβείς τιμές εξαρτώνται από την καμπύλη που χρησιμοποιούμε.

Έχουμε τις ακόλουθες **τρεις βασικές περιπτώσεις**:

Ηχοστάθμη	Τιμές ηχοστάθμης	Καμπύλη ίσης ακουστότητας	Χρήση φίλτρου
Χαμηλή	20 – 55 dB	40 dB	A
Μεσαία	55- 85 dB	70 dB	B
Υψηλή	85 – 140 dB	100 dB	C

Πίνακας 4. Επιλογή φίλτρων

Σημειώσεις:

- (1) Η διαφορά των τριών φίλτρων είναι ότι το A αφαιρεί μεγάλο μέρος της ηχητικής ενέργειας των χαμηλών συχνοτήτων, το B αφαιρεί λιγότερο και το C σχεδόν καθόλου (είναι γραμμικό για 200 – 1250 Hz).
- (2) Παρατηρούμε ότι και οι τρεις καμπύλες συμπίπτουν στο 1 kHz, που σημαίνει ότι οι τιμές και των τριών σταθμισμένων στάθμεων θα είναι ίδιες.
- (3) Παρά το γεγονός ότι η στάθμιση με φίλτρο A είναι η καταλληλότερη για χαμηλές στάθμες, συχνά γίνεται χρήση του για οποιαδήποτε ηχοστάθμη, έτσι ώστε όλες οι μετρήσεις να λαμβάνονται με τον ίδιο τρόπο.

**Προσοχή:**

Στην περίπτωση σταθμισμένων ηχητικών στάθμεων πρέπει πάντοτε να σημειώνουμε το είδος του φίλτρου τόσο στο μέγεθος όσο και στις μονάδες, π.χ. $[L_{pA}] = dB_A$.

Στην πράξη, στο ηχόμετρο χρησιμοποιούμε φίλτρα (σταθμιστικά) με συνάρτηση μεταφοράς της παραπάνω μορφής.

Αν και οι σταθμισμένες ηχοστάθμες δεν παρέχουν άμεσα κάποια πληροφορία για το συχνοτικό περιεχόμενο του υπό εξέταση ήχου, μας δίνουν τη δυνατότητα να βγάλουμε ένα γενικό συμπέρασμα, για το αν η ηχητική ενέργεια είναι κατά κύριο λόγο στις χαμηλές ή στις υψηλότερες συχνότητες. Συγκεκριμένα: Αν η τιμή που μετράται με φίλτρο A είναι μικρότερη αυτής που μετράται με φίλτρο C, μπορούμε να υποθέσουμε ότι ο μετρούμενος ήχος βρίσκεται κυρίως στις χαμηλές συχνότητες

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ: Σε όλα τα παραπάνω θεωρήσαμε ότι το πλάτος των ηχητικών κυμάτων δε μεταβάλλονταν με το χρόνο. Επειδή εν γένει αυτό δεν ισχύει, καταφεύγουμε σε στάθμες που αντιπροσωπεύουν ένα είδος μέσης τιμής σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα.



1.6. Ισοδύναμη στάθμη συνεχούς θορύβου

Είναι εκείνη η ηχοστάθμη ενός σταθερού θορύβου που για το χρονικό διάστημα της μέτρησης παρέχει τόση σταθμισμένη ηχητική ενέργεια όση και ο μεταβαλλόμενος πραγματικός θόρυβος.

Δηλαδή στο διάγραμμα (8) θα πρέπει η επιφάνεια που περικλείεται ανάμεσα στη οριζόντια γραμμή ενός υποτιθέμενου ήχου σταθερής έντασης και του άξονα του χρόνου για το χρονικό διάστημα T να είναι ίση με την επιφάνεια που περικλείεται ανάμεσα στη γραφική παράσταση του μεταβλητού θορύβου και του άξονα του χρόνου για το ίδιο χρονικό διάστημα.

Στα διακριτά μαθηματικά χωρίζουμε τον άξονα των x σε μικρά κομμάτια και υπολογίζουμε τη συνολική επιφάνεια από το άθροισμα της επιφάνειας των μικρών ράβδων που σχηματίζονται με την κυματομορφή, δηλαδή:

$$L_{eq(A)} = 10 \cdot \log \left(\frac{t_1 \cdot 10^{L_1/10} + t_2 \cdot 10^{L_2/10} + t_3 \cdot 10^{L_3/10} + \dots + t_n \cdot 10^{L_n/10}}{T} \right)$$

, όπου L_i σε $dB(A)$ και $T = t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_n$, όπου t_i χρονικά τμήματα του συνολικού διαστήματος (ο χρόνος μπορεί να δοθεί σε οποιοσδήποτε μονάδες, εφόσον οι μονάδες του απαλείφονται μέσα στο λογάριθμο).

Αντίστοιχα, μπορούμε να εκφράσουμε το παραπάνω με ένα ολοκλήρωμα:

$$L_{eq(A)} = 10 \cdot \log \left(\frac{1}{T} \int_0^T 10^{L(t)/10} \cdot dt \right), \text{ όπου } T = t_b - t_a \text{ το συνολικό χρονικό διάστημα της μέτρησης.}$$

Προσοχή:

Δίπλα στην τιμή του L_{eq} αναγράφουμε πάντα το αντίστοιχο χρονικό διάστημα T για το οποίο μετρήθηκε.

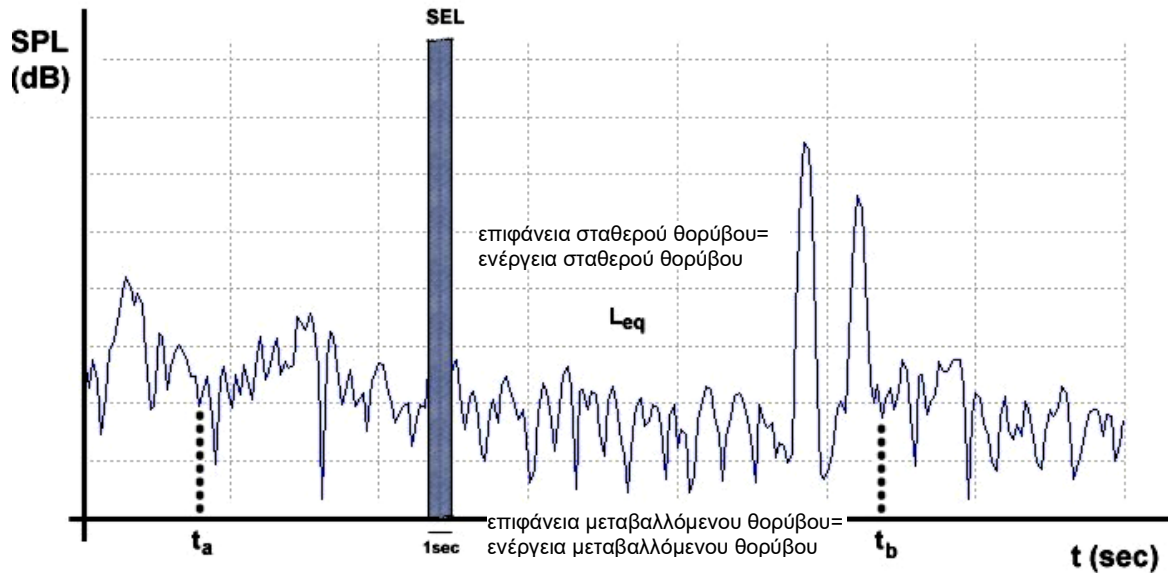


1.7. Sound Exposure Level

Συνήθως η έκθεση σε κάποιο θόρυβο (πχ. οδικό) για κάποια συνολική χρονική διάρκεια οδηγεί στην καταγραφή διαφόρων ανεξάρτητων μεταξύ τους γεγονότων σε διαφορετικές ή μη χρονικές στιγμές, με ποικίλες διάρκειες το καθένα. Θα ήταν καλύτερο για τη σύγκριση μεταξύ διαφορετικών τύπων γεγονότων να υπολογίζαμε το μέσο όρο του θορύβου από όλες τις πηγές στην ίδια χρονική περίοδο. Έτσι ορίζουμε το παρακάτω εναλλακτικό μέγεθος:

Το Sound Exposure Level ορίζεται ως η ηχοστάθμη ενός σταθερού θορύβου που επιδρώντας για χρονικό διάστημα 1sec παρέχει την ίδια ενέργεια με τον μεταβαλλόμενο θόρυβο.

$$SEL = L_{AE} = L_{eq(A)} + 10 \log T, \text{ όπου } T \text{ το συνολικό χρονικό διάστημα σε sec.}$$



Σχήμα 8. L_{eq} και SEL



1.8. Θόρυβος

Βρίσκουμε διάφορους *ορισμούς* του θορύβου:

- (1) Είναι κάθε ήχος τυχαίας πηγής και φάσματος χωρίς καθαρούς τόνους,
- (2) Είναι κάθε ηχητικό ερέθισμα που είναι ανεπιθύμητο στον ακροατή είτε διότι δεν είναι ευχάριστο ή ενοχλητικό είτε διότι παρεμποδίζει την αντίληψη ωφέλιμων ήχων είτε διότι είναι βλαπτικό.
- (3) Είναι κάθε ακανόνιστος απεριοδικός ήχος που η στιγμιαία του τιμή αυξομειώνεται γενικά με τυχαίο τρόπο.

Θόρυβος βάθους (*background noise*)

Θόρυβος βάθους μιας περιοχής ορίζεται ως ο συνολικός θόρυβος που υπάρχει στην περιοχή όταν η ηχητική πηγή που μας ενδιαφέρει δεν λειτουργεί.

Όταν η στάθμη του θορύβου βάθους είναι συγκρίσιμη με τη στάθμη της πηγής που επιθυμούμε να μετρήσουμε (συγκεκριμένα διαφέρουν λιγότερο από 10dB σε οποιαδήποτε συχνотική περιοχή), πρέπει να γίνουν διορθώσεις. Θα πρέπει να μετρήσουμε ξεχωριστά μόνο το θόρυβο βάθους και να αφαιρέσουμε τη στάθμη του (λογαριθμικά) από τη συνολικά μετρούμενη στάθμη. Μπορούμε επίσης για ευκολία να χρησιμοποιήσουμε τους παρακάτω πίνακες:

Διαφορά σε dB μεταξύ μέτρησης και θορύβου βάθους	Διόρθωση σε dB (αφαιρείται από την μέτρηση)	Διαφορά (dB)	Διόρθωση (dB)
6	1.3	3	-3
7	1	4-5	-2
8	0.8	6-9	-1
9	0.6		
10	0.4		
11	0.3		
12	0.3		
13	0.2		
14	0.2		
15	0.1		

Πίνακας 5. Διόρθωση λόγω θορύβου βάθους [7]



1.9. Πρόσθεση και αφαίρεση στάθμεων

Αν και με αυτό το ζήτημα θα ασχοληθούμε αναλυτικά στην Άσκηση 2, εν συντομία:

$$L_1 \oplus L_2 = 10 \cdot \log \left(10^{L_1/10} + 10^{L_2/10} \right)$$

$$L_2 \ominus L_1 = 10 \cdot \log \left(10^{L_2/10} - 10^{L_1/10} \right)$$

Σε κάθε περίπτωση:

ΠΟΤΕ δεν προσθέτουμε ή αφαιρούμε δύο στάθμες **ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ!!!**

Για παράδειγμα για να προσθέσουμε δύο διαφορετικούς ήχους στάθμης 80dB έκαστος:

$$L_1 \oplus L_2 = 10 \cdot \log \left(10^{80/10} + 10^{80/10} \right) = 10 \cdot \log (2 \cdot 10^8) = 10 \cdot \log 10^8 + 10 \cdot \log 2 = 8 \cdot 10 \cdot \log 10 + 10 \cdot \log 2$$

⇔

$$L_1 \oplus L_2 = 80 + 10 \cdot \log 2 = 80 + 10 \cdot 0,3 = 80 + 3 = 83dB$$



1.10. Μετρούμενο φυσικό μέγεθος

- Η ηχητική ισχύς μπορεί να υπολογιστεί από τις τιμές της ηχητικής πίεσης ή έντασης με χωρική ολοκλήρωση σε κατάλληλη επιφάνεια (πχ. ημισφαίριο) γύρω από την πηγή, που να περικλείει μόνον αυτή. Ηχητική ισχύ μετράμε όταν ενδιαφερόμαστε για το χαρακτηρισμό μιας πηγής ως προς το θόρυβο που εκπέμπει.



Σχήμα 9. Μέτρηση ηχητικής ισχύος σε ημισφαιρική επιφάνεια γύρω από την πηγή ήχου [11]

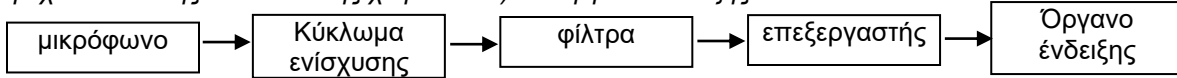
Η ηχητική πίεση και η ηχητική ένταση μπορούν να μετρηθούν απευθείας με τη χρήση κατάλληλων οργάνων.

- Ηχητική ένταση μετράμε για τον εντοπισμό και χαρακτηρισμό μιας πηγής ως προς το θόρυβο που εκπέμπει. Η μέτρηση της ηχητικής έντασης, όντας διανυσματικό μέγεθος, παρουσιάζει κάποιες πρακτικές δυσκολίες στην μέτρηση (ανάγκη χρήσης δύο μικροφώνων σε μικρή μεταξύ τους απόσταση, συγκεκριμένη φασική σχέση μεταξύ των μικροφώνων κλπ).

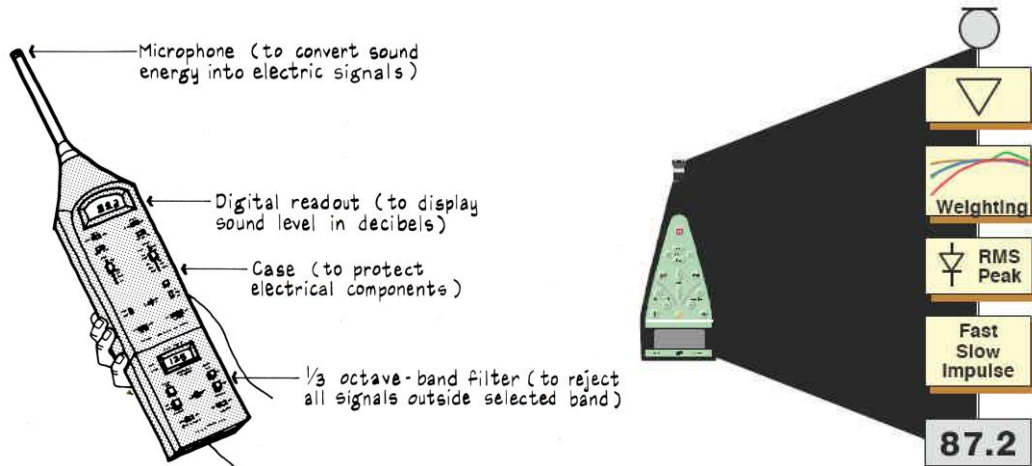
- Στην πράξη συνηθίζουμε να μετράμε ηχητική πίεση (p_{rms}), μέσω της οποίας και (υπό συνθήκες) δύναται να υπολογιστεί η ηχητική ισχύς/ένταση [11]. Άλλωστε και το ανθρώπινο αυτί αντιδρά σε μεταβολές της ηχητικής πίεσης.

1.11. Όργανο μέτρησης - Ηχόμετρο

Στο εργαστήριο θα χρησιμοποιήσουμε ένα φορητό ηχόμετρο. Τα ηχόμετρα αποτελούνται από τα εξής: Μικρόφωνο, κύκλωμα ενίσχυσης, σταθμιστικά φίλτρα, ολοκληρωτής (για τον υπολογισμό του L_{eq} και των στατιστικών δεικτών, βλ παρακάτω), επεξεργαστής (για φασματική ανάλυση, υπολογισμό παραμέτρων ψυχοακουστικής – ακουστικής χώρου κλπ) και όργανο ένδειξης:



Τα ηχόμετρα με τη βοήθεια του μικροφώνου ουσιαστικά μετρούν μεταβολές στις τιμές της ενεργού πίεσης, p_{rms} , στη διάρκεια ενός μικρού χρονικού διαστήματος (βλέπε 'σταθερές ολοκλήρωσης'). Οι τιμές αυτές μετατρέπονται σε ηλεκτρικό σήμα, το οποίο στη συνέχεια ενισχύεται εσωτερικά, διέρχεται από σταθμιστικά φίλτρα και μια συστοιχία φίλτρων (για φασματική ανάλυση) και καταλήγει στην οθόνη, ως τιμή κάποιας σταθμισμένης λογαριθμικής κλίμακας.



Σχήμα 10. Ηχόμετρο [2], [11]

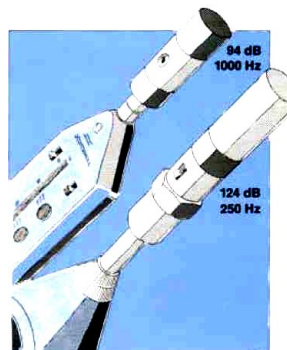
1.11.1. Κατηγορίες ηχομέτρων

Ανάλογα με την ακρίβειά τους τα ηχόμετρα διακρίνονται σε τρεις κύριους τύπους:

- Τύπου 1 (κατηγορία υψηλής ακρίβειας και τιμής)
- Τύπου 2 (μέτριας ακρίβειας με αρκετή απόκλιση σε υψηλές συνήθως συχνότητες),
- Τύπου εκτίμησης (survey).

1.11.2. Βαθμονόμηση

Βασική προϋπόθεση για έγκυρες ηχητικές μετρήσεις αποτελεί η σωστή βαθμονόμηση του ηχομέτρου πριν από κάθε χρήση. Αυτό γίνεται συνήθως με τη βοήθεια ενός φορητού ακουστικού βαθμονομητή, ο οποίος εκπέμπει συγκεκριμένη ηχητική στάθμη σε συγκεκριμένη συχνότητα (πχ. 94 dB στο 1 kHz) και τοποθετείται απευθείας στο μικρόφωνο.



Σχήμα 11. Φορητοί βαθμονομητές [11]



1.11.3. Σταθερές ολοκλήρωσης

Τα ηχώμετρα ουσιαστικά μετρούν *τιμές ενεργού πίεσης*, p_{rms} στη διάρκεια ενός μικρού χρονικού διαστήματος. Συνήθως μάλιστα είναι εφοδιασμένα με περισσότερες από μια σταθερές χρόνου ολοκλήρωσης. Όσο μεγαλύτερη είναι η σταθερά ολοκλήρωσης, τόσο πιο αργά αντιδρά το ηχώμετρο και τόσο πιο εύκολα αγνοεί πολύ σύντομα γεγονότα. Έχουμε εν γένει τις παρακάτω σταθερές ολοκλήρωσης:

- Fast (1/8 sec, δηλαδή 125 msec)
- Slow (1 sec)
- Impulse (35 msec)
- Peak (<100 μ sec).

Σε καμία περίπτωση αυτό που μας δίνει το ηχώμετρο δεν είναι η στάθμη που αντιστοιχεί σε στιγμιαίες τιμές πίεσης, $p(t)$!



1.12. Διαφορική ευαισθησία της ακοής

Διαφορική ευαισθησία της ακοής ονομάζουμε το ποσό κατά το οποίο πρέπει να μεταβληθεί η ένταση ή η συχνότητα ενός ήχου, ώστε αυτή να γίνει μόλις αντιληπτή από τον άνθρωπο.

Όπως είδαμε, το ανθρώπινο αυτί αντιδρά σε ηχητικά ερεθίσματα ενός πολύ μεγάλου εύρους συχνοτήτων. Το εντυπωσιακό είναι ότι ταυτόχρονα παρουσιάζει και πολύ μεγάλη διακριτική ικανότητα σε μικρές διαφορές έντασης ενός ήχου.

Αν και αυτή η διακριτική ικανότητα εξαρτάται από τη συχνότητα αλλά και από άλλους παράγοντες (διάρκεια του ήχου και ψυχολογικούς παράγοντες), μπορούμε σε γενικές γραμμές να πούμε τα παρακάτω:

Μεταβολή στάθμης (dB)	Μεταβολή στη φαινομενική αίσθηση της ακουστότητας
1	Μη αντιληπτή (εκτός καθαρών τόνων)
3	Μόλις αντιληπτή
6	Καθαρά αντιληπτή
10	Περίπου 2 φορές πιο δυνατός
20	Περίπου τέσσερις φορές πιο δυνατός

Πίνακας 6. Διαφορική ευαισθησία ακοής [2]

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ – ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΛΟΓΑΡΙΘΜΩΝ

$$\log(A \cdot B) = \log A + \log B$$

$$\log\left(\frac{A}{B}\right) = \log A - \log B$$

$$\log A^n = n \cdot \log A$$

Για επίλυση ως προς x :

$$\text{Αν } \log_{10} x = y \Leftrightarrow 10^{\log_{10} x} = 10^y \Leftrightarrow x = 10^y$$

$$\text{Αν } \ln x = y, \text{ δηλαδή } \log_e x = y \Leftrightarrow e^{\log_e x} = e^y \Leftrightarrow x = e^y$$



2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

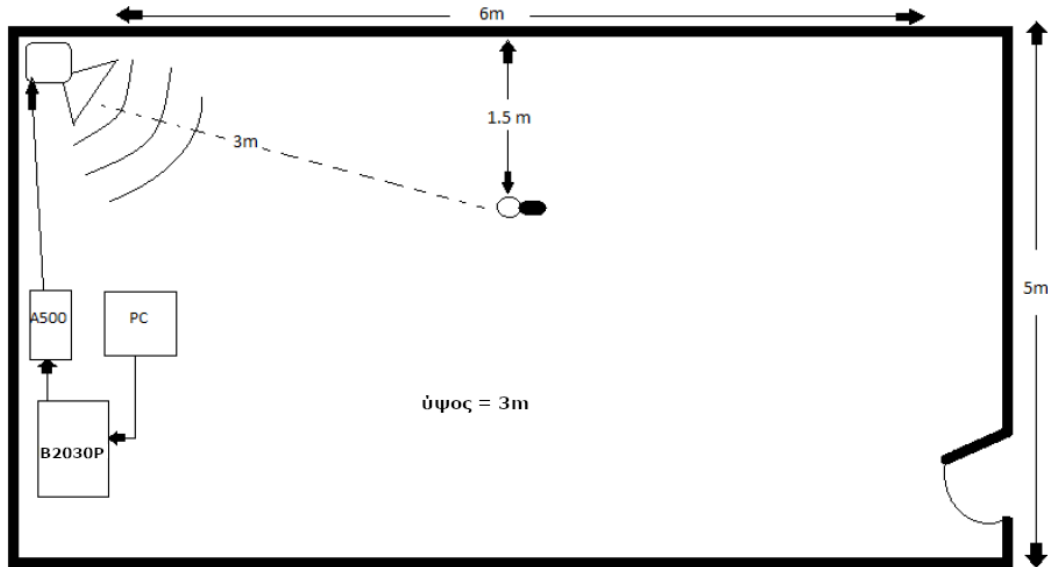
- [1] Rossing T., Moore R., Wheeler P. (2002). "The science of sound"
- [2] Egan D. (1988), "Architectural acoustics"
- [3] Moore B. (1997), "Psychology of hearing"
- [4] Kinsler L., Frey A., Coppens A., Sanders J. (2000), "Fundamentals of acoustics"
- [5] Porges G. (1977), "Applied acoustics"
- [6] Davis D., Davis C. (1997), "Sound system engineering"
- [7] Σκαρλάτος Δ. (2003), "Εφαρμοσμένη ακουστική"
- [8] Everest A. (1998), "Εγχειρίδιο ακουστικής"
- [9] Howard D., Angus J. (1996), "Acoustics and Psychoacoustics"
- [10] Κουτσοδημάκης Χ., Σηφάκης Μ., "Εργαστηριακό Φυλλάδιο Μηχανικής Ήχου I"
- [11] Brüel & Kjær, "Handbooks & Lectures", <http://www.bksv.com/3975.asp>



3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Πειραματική διάταξη

- Χρησιμοποιούμενες συσκευές: Η/Υ + {1},{2},{5},{6} (1 μόνο ηχείο)
- Σχήμα / κάτοψη χώρου (να γίνει κατά τη διάρκεια του εργαστηρίου)



[από παλιότερη εργασία φοιτητή]

**Πειραματική διαδικασία**

1. Να γίνει βαθμονόμηση του ηχομέτρου (calibration στα 94dB – 1kHz).
2. Να μετρηθεί η στάθμη θορύβου βάθους (background noise) της αίθουσας (γραμμικά & με φίλτρα A,C):
 $B_{(lin)} = \dots\dots\dots dB$, $B_{(A)} = \dots\dots\dots dB_A$, $B_{(C)} = \dots\dots\dots dB_C$.
3. Για πηγή ήχου λευκό θόρυβο φιλτραρισμένο στην οκτάβα με κεντρική συχνότητα τα 125Hz να μετρηθεί η στάθμη πίεσης με τρεις τρόπους: γραμμικά, με φίλτρο A και με φίλτρο C:
 $L_p (lin) = \dots\dots\dots dB$, $L_p (A) = \dots\dots\dots dB_A$, $L_p (C) = \dots\dots\dots dB_C$.
4. Για πηγή ήχου λευκό θόρυβο φιλτραρισμένο στην οκτάβα με κεντρική συχνότητα το 1kHz να μετρηθεί η στάθμη πίεσης με τρεις τρόπους, γραμμικά, με φίλτρο A και με φίλτρο C:
 $L_p (lin) = \dots\dots\dots dB$, $L_p (A) = \dots\dots\dots dB_A$, $L_p (C) = \dots\dots\dots dB_C$.
5. Για πηγή ήχου το τραίνο (CD) να μετρηθεί η στάθμη ισοδύναμου θορύβου και να σημειωθεί ο χρόνος μέτρησης: $L_{eq} = \dots\dots\dots dB_A$ για $t = \dots\dots sec$.
6. Η διαδικασία να επαναληφθεί για τον ήχο αεροπλάνου (CD): $L_{eq} = \dots\dots\dots dB_A$ για $t = \dots\dots sec$.



Επεξεργασία μετρήσεων

1. Με βάση τις τιμές της μέτρησης 1 θα μπορούσατε να εκτιμήσετε ποιό είναι το φασματικό περιεχόμενο του θορύβου βάθους (χαμηλόσυχνος/υψίσυχνος);
2. Τι παρατηρείτε στις τιμές των στάθμεων $L_p (A)$, $L_p (C)$ ως προς την $L_p (lin)$ στην εκάστοτε περίπτωση των μετρήσεων 3 και 4; Επιβεβαιώνεται η θεωρία;
3. Να υπολογιστούν (με τη βοήθεια του πίνακα) τα $L_p (A)$ και $L_p (C)$ από την αντίστοιχη γραμμική μέτρηση για την οκτάβα με κεντρική συχνότητα τα 125Hz (μέτρηση 4) και να γίνει σύγκριση με τις αντίστοιχες πειραματικές τιμές (θα χρειαστεί πρώτα να αποθορυβοποιήσετε τις μετρήσεις αφαιρώντας το θόρυβο βάθους).
4. Να βρεθεί το συνολικό L_{eq} για κάποιον που εκτέθηκε διαδοχικά στους ήχους του τραίνου και του αεροπλάνου. Να γίνει μετατροπή του L_{eq} του τραίνου σε SEL.

Άσκηση για εργασία

Να υπολογιστεί η στάθμη ισοδύναμου θορύβου L_{eq} στο διάστημα των 8 ωρών για έναν εργάτη που εκτίθεται στις παρακάτω στάθμες θορύβου και διάρκειες:

L_p (dB _A)	t (h)
94	3
89	2
98	0.5
83	2.5