A5

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΝΤΑΣΗΣ ΗΧΟΥ ΑΠΟ ΔΥΟ ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΕΣ, ΓΝΩΣΤΕΣ ΠΗΓΕΣ ΣΕ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΥΠΟΘΕΤΙΚΟΥ ΣΤΟΥΝΤΙΟ

1. Σκοπός

Πρόκειται για άσκηση θεωρητικού χαρακτήρα στην οποία πραγματοποιούνται υπολογισμοί για την εύρεση των dB σε υποθετικό στούντιο. Με γνωστά τα χαρακτηριστικά των δύο ηχείων καθώς και την ακριβή γεωμετρική τους θέση, υπολογίζονται τα dB στη μεμονωμένη λειτουργία τους καθώς και στην αντίστοιχη περίπτωση όπου αυτά τα δύο ηχεία λειτουργούν ταυτόχρονα.

2. Θεωρία

2.1 Εισαγωγή

Ο **ήχος** είναι ένα ελαστικό κύμα πίεσης που διεγείρει το αισθητήριο της ακοής. Ο όρος **κύμα** περιγράφει τη διάδοση μιας διαταραχής στο χώρο. Στην περίπτωση των ηχητικών κυμάτων η διαταραχή αυτή είναι μια τοπική μεταβολή της πυκνότητας και πίεσης ενός υλικού μέσου, στερεού, υγρού ή αερίου. Μια τέτοια διαταραχή, που μπορεί να δημιουργηθεί π.χ. με τη μετακίνηση ενός αντικειμένου μέσα στο υλικό, θέτει σε ταλάντωση τα μόρια του υλικού γύρω από την αρχική θέση ισορροπίας τους (όπως για παράδειγμα το παλλόμενο διάφραγμα ενός μεγαφώνου θέτει σε ταλάντωση τα μόρια του αέρα που το περιβάλλουν). Λόγω των ελαστικών ιδιοτήτων του υλικού η ενέργεια της ταλάντωσης μεταφέρεται από το κάθε μόριο στα γειτονικά του. Προκαλούνται έτσι μεταβολές της πίεσης και δημιουργούνται **πυκνώματα** (περιοχές υψηλής πίεσης) και **αραιώματα** (περιοχές χαμηλής πίεσης), που «ταξιδεύουν» μέσα στο υλικό σε διεύθυνση παράλληλη στη διεύθυνση ταλάντωσης των μορίων του. Ο ήχος λοιπόν θεωρείται ένα **διαμήκες** κύμα πίεσης.

Όπως είναι φανερό, η παρουσία ενός ελαστικού μέσου είναι η απαραίτητη, αναγκαία προϋπόθεση για τη διάδοση των ηχητικών κυμάτων. **Ο ήχος δεν διαδίδεται στο κενό.**

Η **ταχύτητα διάδοσης** ($\boldsymbol{u}$) των ηχητικών κυμάτων εξαρτάται από τις ελαστικές ιδιότητες του μέσου διάδοσης και από τη θερμοκρασία. Στον αέρα και σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (20°C) η ταχύτητα του ήχου είναι περίπου $343 m/s$. Στα υγρά η ταχύτητα u είναι μεγαλύτερη (π.χ. σε νερό ίδιας θερμοκρασίας είναι σχεδόν τετραπλάσια), ενώ στα στερεά, όπου οι αποστάσεις μεταξύ των μορίων είναι πολύ μικρότερες, η τιμή της ταχύτητας μπορεί να είναι έως και είκοσι φορές μεγαλύτερη απ' ότι εκείνη στα αέρια.

Η **συχνότητα** της πηγής που παράγει τον ήχο, δηλαδή το πόσο γρήγορα ή αργά επαναλαμβάνεται η αρχική διαταραχή της πίεσης (π.χ. πόσο γρήγορα ή αργά πάλλεται το διάφραγμα του μεγαφώνου), καθορίζει και τη συχνότητα με την οποία δημιουργούνται τα πυκνώματα και τα αραιώματα, δηλαδή τη συχνότητα του ηχητικού κύματος. Η συχνότητα της πηγής προσδιορίζεται από τον αριθμό των επαναλήψεων (κύκλων) στη μονάδα του χρόνου και συνήθως συμβολίζεται με το γράμμα *f*. Μονάδα μέτρησης είναι το *1 Hertz (1Hz=1* κύκλος ανά δευτερόλεπτο) με τα πολλαπλάσιά του: $1kHz = 10^3\ Hz,\ 1MHz = 10^6\ Hz,\ 1GHz = 10^9\ Hz, κ.ο.κ.$

Τα **ηχητικά κύματα** που γίνονται αντιληπτά από τον άνθρωπο, έχουν τιμές συχνότητας στο διάστημα μεταξύ $20Hz$ και $20kHz$. Κύματα με συχνότητες έξω από τα όρια των ακουστών συχνοτήτων, δηλαδή οι **υπόηχοι** που έχουν συχνότητες μικρότερες από εκείνες των ηχητικών (π.χ. σεισμικά κύματα), και οι **υπέρηχοι** που έχουν συχνότητες μεγαλύτερες από *20kHz*, δεν γίνονται αντιληπτά από το ανθρώπινο αυτί.

Το αντίστροφο της συχνότητας $1/f$ είναι ο χρόνος που μεσολαβεί για την εκπομπή δύο διαδοχικών πυκνωμάτων ή αραιωμάτων και καλείται **περίοδος** ($\boldsymbol{T}$). Η απόσταση στην οποία διαδίδεται η διαταραχή σε χρόνο μιας περιόδου ονομάζεται **μήκος κύματος** ($\boldsymbol{\lambda}$) και ισούται προφανώς με την απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών πυκνωμάτων ή αραιωμάτων.

Σε συγκεκριμένο μέσο διάδοσης και για σταθερή θερμοκρασία ο ήχος διαδίδεται με σταθερή ταχύτητα και μάλιστα ισχύει :

$$\boldsymbol{\lambda = u \cdot T} \qquad (2—1)$$

2.2 Πίεση – Ενέργεια – Ένταση

Όταν ένα ηχητικό κύμα διαδίδεται σ' ένα υλικό, τα πυκνώματα και τα αραιώματα ταξιδεύουν με αποτέλεσμα η πίεση να μεταβάλλεται και τοπικά και χρονικά γύρω από μία αρχική τιμή ισορροπίας. Η **πίεση** είναι εκείνο το φυσικό μέγεθος που περιγράφει ποσοτικοποιημένα πόσο πυκνά είναι τα πυκνώματα και πόσο αραιά τα αραιώματα. Συμβολίζεται με το γράμμα *P* και στο *S.I.* μετριέται σε *Pascal* ($1Pa = 1N/m^2$). Συχνά χρησιμοποιείται ως μονάδα μέτρησης και η *1* φυσική ατμόσφαιρα ($1Atm$), που είναι η τιμή της ατμοσφαιρικής πίεσης στην επιφάνεια της θάλασσας και είναι περίπου ίση με $10^5 Pa$. Όταν μελετάμε τη διάδοση των ηχητικών κυμάτων μας ενδιαφέρει η μέγιστη μεταβολή P_{max} της πίεσης από την τιμή ισορροπίας που καλείται **πλάτος πίεσης**. Ειδικότερα για διάδοση του ήχου στον αέρα, που είναι και το αντικείμενο αυτής της άσκησης, αναφερόμαστε σε μεταβολές πίεσης γύρω από την αντίστοιχη τιμή της ατμοσφαιρικής. Το πλάτος είναι θετικό κατά τη μέγιστη συμπίεση (υπερπίεση), ενώ είναι αρνητικό κατά τη μέγιστη αραίωση (υποπίεση).

Να τονίσουμε και πάλι ότι θα πρέπει να είμαστε ιδιαίτερα προσεκτικοί γιατί όταν μιλάμε για κύμα πίεσης, πλάτος πίεσης κ.λ.π. αυτό που πραγματικά εννοούμε είναι τελικά οι **διακυμάνσεις** της πίεσης γύρω από την τιμή της ατμοσφαιρικής. Το ανθρώπινο αυτί είναι ένας εξαιρετικά ευαίσθητος δέκτης που μπορεί να διακρίνει διακυμάνσεις πίεσης της τάξης των τριών δεκάκις δισεκατομμυριοστών της ατμοσφαιρικής![1]

Το έργο που παράγει η ηχητική πηγή για τη δημιουργία του κύματος μετατρέπεται σε κινητική και δυναμική ενέργεια των μορίων του μέσου διάδοσης και έτσι μεταφέρεται από κάθε μόριο στα γειτονικά του. Κατά τη διάδοση επομένως ενός ηχητικού κύματος, μεταφέρεται ποσότητα ενέργειας (ηχητική ενέργεια).

Ο ρυθμός μεταφοράς ηχητικής ενέργειας, δηλαδή το ποσό της ενέργειας που μεταφέρεται στη μονάδα του χρόνου, ονομάζεται **ηχητική ισχύς** και συμβολίζεται με W:

$$W = \frac{\Delta E}{\Delta t} \qquad (2—2)$$

Στο S.I. η ισχύς μετριέται σε μονάδες $Watts$ $(1\, Watt = 1\, Joule/sec)$.

Η **ένταση** ορίζεται ως η ισχύς που διέρχεται από μια μοναδιαία επιφάνεια κάθετη στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Συμβολίζεται με το γράμμα I και μετριέται σε $Watt/(m^2)$. Αν η ηχητική ισχύς κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλη την έκταση μιας επιφάνειας εμβαδού S, τότε ισχύει :

$$\boldsymbol{I = \frac{W}{S}} \qquad (2—2)$$

Για επίπεδα ή σφαιρικά κύματα αποδεικνύεται ότι η ένταση I και η πίεση P συνδέονται με τη σχέση :

$$\boldsymbol{I = \frac{P^2}{\rho \cdot u}} \qquad (2—3)$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα του ομογενούς μέσου διάδοσης και u η ταχύτητα του ήχου.

Στα επόμενα, όταν ορίσουμε τις ηχητικές στάθμες, θα χρησιμοποιήσουμε την έννοια της *«μέσης ενεργού τιμής»* έντασης I_{rms} ή πίεσης P_{rms} που συνδέονται με τα αντίστοιχα πλάτη I_{max} ή P_{max} σύμφωνα με τις σχέσεις:

[1] Οι διακυμάνσεις αυτές αντιστοιχούν σε μετατοπίσεις των μορίων του ηχητικού μέσου της τάξης του 1/10 της διαμέτρου τους!

$$\boldsymbol{I_{rms}=\frac{I_{max}}{2}} \qquad \boldsymbol{\kappa\alpha\iota} \qquad \boldsymbol{P_{rms}=\frac{P_{max}}{\sqrt{2}}} \qquad (2—4)$$

Ο ήχος αρχίζει να γίνεται οριακά αντιληπτός όταν η έντασή του υπερβεί μια ελάχιστη τιμή που καλείται κατώφλι ακουστότητας. Εξάλλου υπάρχει μια μέγιστη τιμή της έντασης που μπορεί να «ανεχθεί» το ανθρώπινο αυτί και η οποία αντίστοιχα καλείται όριο πόνου. Εάν η ένταση του ήχου υπερβεί αυτή την τιμή μας δημιουργείται το δυσάρεστο αίσθημα του πόνου. Η τιμή της έντασης τόσο στο κατώφλι ακουστότητας όσο και στο όριο πόνου εξαρτάται από την τιμή της συχνότητας. Η μέγιστη ευαισθησία της ανθρώπινης ακοής παρατηρείται στην περιοχή των 2 – 4 kHz.

2.3 Ηχητικές Στάθμες

Γιατί χρησιμοποιούμε λογαριθμική κλίμακα μονάδων στην Ακουστική;

Το εύρος τιμών της έντασης που γίνονται αντιληπτές κυμαίνεται από $10^{-12}\ W/m^2$ έως $10\ W/m^2$, δηλαδή ο λόγος της μέγιστης προς την ελάχιστη τιμή είναι 10^{13}. Είναι προφανές ότι δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί γραμμική κλίμακα για να απεικονιστεί μια τόσο ευρεία περιοχή τιμών, γι' αυτό και χρησιμοποιούμε λογαριθμική κλίμακα.

Ο δεύτερος λόγος που επιβάλλει τη χρήση λογαριθμικής κλίμακας έχει να κάνει με το πώς αντιλαμβάνεται τον ήχο ο άνθρωπος. Το πόσο «έντονα» αντιλαμβανόμαστε έναν ήχο δεδομένης συχνότητας, η ακουστότητα όπως λέγεται, συνδέεται με την ένταση του ηχητικού κύματος σύμφωνα με το νόμο των Weber – Fechner. Πρόκειται για έναν ψυχοφυσικό νόμο που συνδέει γενικά οποιαδήποτε υποκειμενική αντίληψη με την αντίστοιχη ένταση του ερεθίσματος που την προκαλεί. Σύμφωνα με τον νόμο αυτό η ακουστότητα ενός ήχου είναι ανάλογη με το λογάριθμο του λόγου της έντασής του ως προς μια ένταση αναφοράς. Για παράδειγμα η αίσθηση που έχουμε όταν η ένταση αυξηθεί από $10\ \mu W/m^2$ σε $20\ \mu W/m^2$, φαίνεται να είναι η ίδια με την αίσθηση που μας προκαλεί η αύξηση της έντασης από $20\ \mu W/m^2$ σε $40\ \mu W/m^2$, δεν εξαρτάται δηλαδή από τη διαφορά μεταξύ αρχικής και τελικής τιμής, αλλά μόνο από τον λόγο τους (που είναι ακριβώς ο ίδιος και ίσος με *2* στο προηγούμενο παράδειγμα και για τις δύο περιπτώσεις).

Για να μετρήσουμε επομένως την ηχητική πίεση και ένταση (αλλά και την ισχύ) χρησιμοποιούμε λογαριθμική κλίμακα και ορίζονται έτσι οι ακόλουθες ηχητικές στάθμες:

α. Η στάθμη έντασης ήχου *(Sound Intensity Level, SIL)* συμβολίζεται με L_I και ορίζεται από τη σχέση:

$$\boldsymbol{L_I = 10log\frac{I}{I_{ref}}} \qquad (2—5)$$

όπου I είναι η μέση ενεργός τιμή της έντασης και $\boldsymbol{I_{ref}} = 10^{-12}\mathrm{W/m^2}$, είναι η τιμή αναφοράς της έντασης.

β. Η στάθμη πίεσης ήχου *(Sound Pressure Level, SPL)* συμβολίζεται με L_P και ορίζεται από τη σχέση:

$$\boldsymbol{L_P = 10log\frac{P^2}{P_{ref}^2} = 20log\frac{P}{P_{ref}}} \qquad (2—6)$$

όπου P είναι η μέση ενεργός τιμή της πίεσης και $P = P_{ref} = 2 \cdot 10^{-5}\, N/m^2$, είναι η τιμή αναφοράς της πίεσης. Σημειώνεται ότι η πίεση εμφανίζεται στο τετράγωνο γιατί η ένταση των ηχητικών κυμάτων είναι ανάλογη με το τετράγωνο της πίεσης (βλ. και σχέση *(2 - 4)*).

Αποδεικνύεται ότι στις συνήθεις ατμοσφαιρικές συνθήκες ισχύει: $L_I = L_P$.

γ. Η στάθμη ισχύος ήχου *(SWL)* συμβολίζεται με L_W και ορίζεται από τη σχέση:

$$\boldsymbol{L_W = 10log\frac{W}{W_{ref}}} \qquad (2—7)$$

όπου: $W_{ref} = I_{ref} \cdot S_{ref} = 10^{-12}\, W/m^2 \cdot 1\, m^2 = 10^{-12} W$ είναι η ισχύς αναφοράς.

Αν χρησιμοποιήσουμε τη σχέση ορισμού της έντασης (σχέση 2 - 3) βρίσκουμε ότι: $L_I = L_W$

Οι ηχητικές στάθμες εκφράζονται σε μονάδες $decibel$ (dB). Τα $decibel$ είναι αδιάστατες μονάδες που προσδιορίζουν σχετικές τιμές ως προς μια συγκεκριμένη τιμή αναφοράς. Για παράδειγμα στάθμη έντασης ήχου $L_I = 1dB$ αντιστοιχεί σε τιμή της έντασης I που προσδιορίζεται από τη σχέση (2 - 6) ως εξής:

$$L_I = 10log\frac{I}{I_{ref}} = 1 \quad, άρα \quad log\frac{I}{I_{ref}} = 0{,}1$$

οπότε και

$$\frac{I}{I_{ref}} = 10^{0{,}1} \cong 1{,}259 \Rightarrow I = 1{,}259 I_{ref}$$

Με άλλα λόγια, η ένταση I είναι κατά περίπου *26%* μεγαλύτερη από την τιμή αναφοράς I_{ref}.

Από την άλλη μεριά, στάθμη πίεσης *(SPL)* $L_P = 1\text{dB}$, αντιστοιχεί σε πίεση ήχου *P,* που υπολογίζεται από τη σχέση (2 - 7):

$$L_P = 20log\frac{P}{P_{ref}} = 1 \Rightarrow log\frac{P}{P_{ref}} = \frac{1}{20} = 0.05 \Rightarrow \frac{P}{P_{ref}} = 10^{0{,}05} = 1{,}12 \Rightarrow P = 1{,}12 P_{ref}$$

δηλαδή είναι κατά 12% μεγαλύτερη από την τιμή της πίεσης αναφοράς.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονίσουμε ότι στις μετρήσεις που πραγματοποιούνται γενικά στα εργαστήρια χρησιμοποιούνται ηχόμετρα που μετρούν τη στάθμη έντασης ήχου. Δεν μετριέται δηλαδή ούτε η πίεση ούτε η ισχύς. Για το λόγο αυτό στα επόμενα αναφερόμαστε κυρίως στη στάθμη έντασης, παρότι ισχύουν τα ίδια και για τις δύο άλλες ηχητικές στάθμες.

Σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιείται και η μονάδα bel που είναι δεκαπλάσια του dB $(1bel = 10decibel)$ και αντιστοιχεί στην τιμή *1* του λογάριθμου που εμφανίζεται στις προηγούμενες σχέσεις (2 - 6), (2 - 7) και (2 - 8).

2.4 ΠΡΑΞΕΙΣ ΜΕ DECIBEL

Μείωση της ηχητικής στάθμης ως συνάρτηση της απόστασης από την πηγή.

Σε ένα χώρο ελεύθερο από εμπόδια, η ηχητική στάθμη (έντασης ή και πίεσης) μειώνεται καθώς απομακρυνόμαστε από την ηχητική πηγή σύμφωνα με τη σχέση:

$$\boldsymbol{L(r) - L_{ref} = 10log\frac{1}{r^2}} \qquad (2—8)$$

όπου L_{ref} είναι η στάθμη αναφοράς (συνήθως λαμβάνεται η τιμή της ηχητικής στάθμης σε απόσταση 1m από σημειακή πηγή). Με βάση την προηγούμενη σχέση αποδεικνύεται εύκολα ότι αν γνωρίζουμε την ηχητική στάθμη $L(r_1)$ σε απόσταση r_1 από την πηγή, τότε η τιμή της $L(r_2)$ σε νέα, μεγαλύτερη απόσταση r_2 δίνεται από τη σχέση:

$$\boldsymbol{L(r_2) - L(r_1) = 10log\left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2} \qquad (2—9)$$

Για παράδειγμα αν $L(r)$ είναι η στάθμη σε απόσταση $r_1 = r$ από την πηγή τότε σε διπλάσια απόσταση $r_2 = 2r$ ο υπολογισμός δίνει:

$$\boldsymbol{L(2r) - L(r) = 10log\left(\frac{r}{2r}\right)^2 = 10log\frac{1}{4} = -6 \Rightarrow}$$

$$\boldsymbol{L(2r) = L(r) - 6\ dB} \qquad (2—10)$$

Με άλλα λόγια κάθε φορά που διπλασιάζεται η απόσταση από την πηγή, η ηχητική στάθμη θα μειώνεται από την προηγούμενη τιμή της κατά 6 dB.

2.4.1 Πρόσθεση των decibel

Εφ' όσον οι μονάδες *decibel* ορίζονται σε λογαριθμική κλίμακα είναι αναμενόμενο ότι οι πράξεις με τα *decibel* δεν θα ακολουθούν τους συνηθισμένους κανόνες της «γραμμικής» άλγεβρας! Ας δούμε λοιπόν πώς υπολογίζουμε τη συνολική στάθμη έντασης ήχου που προέρχεται από πολλές, ανεξάρτητες ηχητικές πηγές.

Για να παραστήσουμε το «άθροισμα» ηχητικών σταθμών χρησιμοποιούμε το διεθνώς καθορισμένο σύμβολο ⊕.

Το άθροισμα δύο ηχητικών σταθμών $L_1,\ L_2$ προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$\boldsymbol{S = L_1 \oplus L_2 = 10log\left(10^{0,1\,L_1} + 10^{0,1\,L_2}\right)} \qquad (2—11)$$

Εναλλακτικά το άθροισμα δύο ηχητικών σταθμών μπορεί επίσης να προσδιοριστεί από τη σχέση :

$$\boldsymbol{S = L_1 \oplus L_2 = L_{max} + C(\Delta L)} \qquad (2\text{—}12)$$

όπου L_{max} είναι η μεγαλύτερη συγκριτικά από τις δύο στάθμες L_1 και L_2 και $C(\Delta L)$ είναι ένας διορθωτικός παράγοντας που η τιμή του (σε dB) εξαρτάται από τη διαφορά $\Delta L = |L_1 - L_2|$ και προσδιορίζεται από το διάγραμμα του σχήματος *1*.

Παρότι η δεύτερη μέθοδος (σχέση *2 - 13*) είναι προσεγγιστική, εν τούτοις δίνει τη συνολική ηχητική στάθμη με αρκετά ικανοποιητική ακρίβεια. Το βασικό πλεονέκτημά της είναι ότι οι υπολογισμοί είναι απλοί, σε αντίθεση με τη σχέση *(2 - 12)* η οποία απαιτεί το χειρισμό σύνθετων πράξεων που δε μπορούν να γίνουν εύκολα χωρίς υπολογιστή.

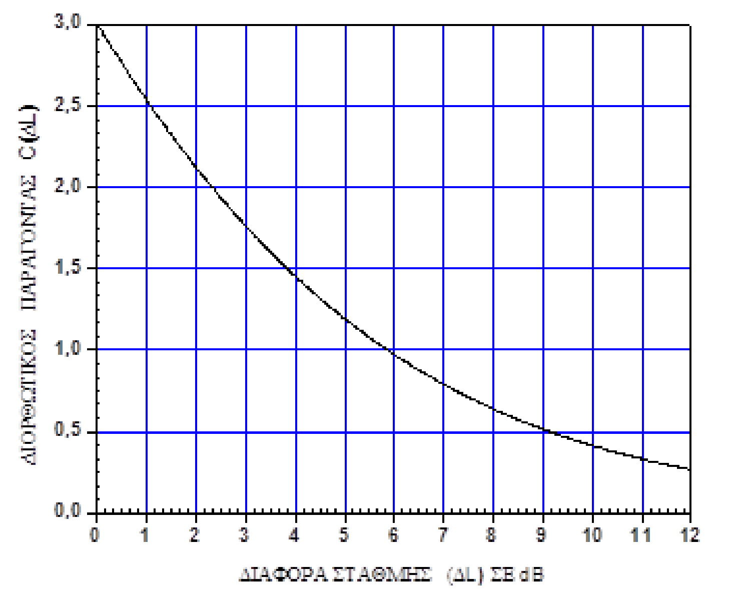
- **Παράδειγμα πρόσθεσης**

Έστω ότι σε κάποια περιοχή του χώρου η στάθμη έντασης του ήχου που εκπέμπει ένα ηχείο είναι $L_1 = 75\,dB$. Αν στην ίδια περιοχή η στάθμη έντασης του ήχου από ένα δεύτερο, ανεξάρτητο ηχείο είναι $L_1 = 80\,dB$, τότε αν εκπέμπουν και τα δύο ηχεία ταυτόχρονα, η συνολική στάθμη έντασης υπολογίζετε σε (σχέση *2 - 13*) :

$S = L_1 \oplus L_2 = L_{max} + C(\Delta L)$

όπου $L_{max} = L_2 = 80\,dB$ και $\Delta L = L_2 - L_1 = 5\,dB$. Από το διάγραμμα του σχήματος *1* προκύπτει ότι για $\Delta L = 5\,dB$ ο διορθωτικός παράγοντας είναι $C(\Delta L) \cong 1{,}2\,dB$. Άρα η συνολική στάθμη έντασης υπολογίζεται τώρα σε:

$S = 75 \oplus 80 = 80 + C(5) = 80 + 1{,}2 = 81{,}2\,dB$.



Σχήμα 1
Ο διορθωτικός παράγοντας $\boldsymbol{C(\Delta L)}$ σε μονάδες $\boldsymbol{dB}$ της σχέσης (2 - 13) συναρτήσει της διαφοράς $\boldsymbol{\Delta L}$ των δύο σταθμών.

Παρατηρεί δηλαδή κανείς ότι η τιμή που βρέθηκε είναι κατά 1,5 % αυξημένη από τη μεγαλύτερη στάθμη και πάντως αρκετά διαφορετική από αυτή του αλγεβρικού αθροίσματος των δύο σταθμών ($80 + 75 = 155\ dB$).

Αν έστω $L_1 = L_2$, τότε από το διάγραμμα βρίσκεται ότι $C(\Delta L) = C(0) = 3dB$ και η συνολική στάθμη είναι κατά $3\ dB$ μεγαλύτερη από τις επιμέρους. Κατά συνέπεια αν διπλασιάσουμε τη συνολικά εκπεμπόμενη ισχύ η ηχητική στάθμη αυξάνεται τελικά κατά $3\ dB$.

Αν τώρα έχουμε N ανεξάρτητες ηχητικές πηγές, η συνολική στάθμη θα είναι:

$$\boldsymbol{L = L_1 \oplus L_2 \oplus L_3 \oplus \ldots} \qquad (2—13)$$

και υπολογίζεται επιμεριστικά ως εξής: αθροίζουμε κατ' αρχήν τις δύο πρώτες όπως περιγράψαμε προηγουμένως, στο άθροισμά τους προσθέτουμε την τρίτη (πάλι με τον ίδιο τρόπο), κ.ο.κ.

2.4.2 Αφαίρεση των dB

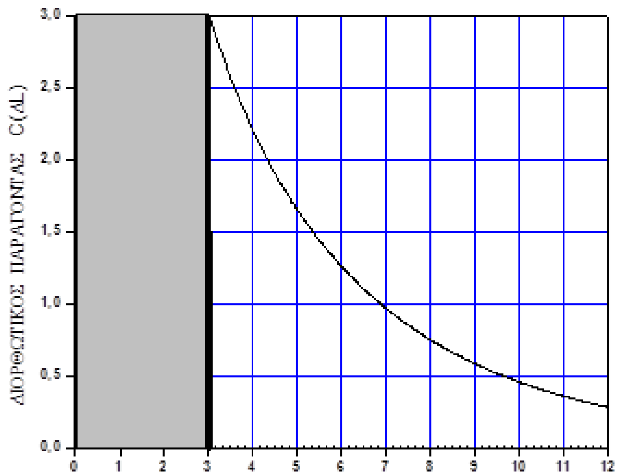
Συχνά θέλουμε να αφαιρέσουμε από τη συνολική, ηχητική στάθμη που μετράμε τη συνεισφορά από ανεπιθύμητους θορύβους του περιβάλλοντος. Αν L_{tot} είναι η ηχητική στάθμη που μετράμε, η τιμή αυτή περιλαμβάνει τη στάθμη L_S του «καθαρού» ήχου που εκπέμπει η πηγή και την (ανεπιθύμητη) στάθμη του θορύβου L_N. Αποδεικνύεται ότι η στάθμη L_S του καθαρού ήχου μπορεί να προσδιοριστεί από τη σχέση:

$$\boldsymbol{L_S = L_{tot} \ominus L_N = 10log\left(10^{0,1L_{tot}} - 10^{0,1L_N}\right)} \qquad (2—14)$$

ή εναλλακτικά από τη σχέση:

$$\boldsymbol{L_S = L_{tot} - C(\Delta L)} \qquad (2—15)$$

όπου $\Delta L = L_{tot} - L_N$ και η τιμή του διορθωτικού παράγοντα $C(\Delta L)$ σε μονάδες dB



Σχήμα 2
Ο διορθωτικός παράγοντας $\boldsymbol{C(\Delta L)}$ σε μονάδες $\boldsymbol{dB}$ της σχέσης *(2 - 16)* συναρτήσει της διαφοράς $\boldsymbol{\Delta L}$ της μετρούμενης στάθμης $\boldsymbol{L_{tot}}$ από τη στάθμη θορύβου L_N.

προσδιορίζεται από το διάγραμμα του σχήματος *2*. Αν ο θόρυβος του περιβάλλοντος είναι μικρότερος από την τιμή των $10dB$, τότε $\Delta L > 10\ dB$ και η μετρούμενη στάθμη είναι σχεδόν ίση με τη στάθμη του καθαρού ήχου που εκπέμπει η πηγή. Πράγματι, στο σχ. 2 παρατηρούμε ότι πρακτικά $C(\Delta L) \simeq 0$ για $\Delta L > 10\ dB$.

- **Παράδειγμα αφαίρεσης**

Έστω για παράδειγμα ότι μετριέται πειραματικά η στάθμη έντασης του ήχου που εκπέμπει ένα μεγάφωνο εγκατεστημένο σε ένα «θορυβώδες» δωμάτιο και βρίσκεται ίση με $68\ dB$. Αν η στάθμη έντασης του θορύβου (που μετριέται με το μεγάφωνο εκτός λειτουργίας) είναι $60\ dB$, τότε τα dB του «καθαρού» ήχου που συνεισφέρει το μεγάφωνο υπολογίζονται από τη σχέση $(2-16)$ σε:

$$L_S = 68\ dB\ -\ \mathrm{C}(\Delta\mathrm{L})$$

όπου $\Delta L\ =\ 68dB - 60dB\ =\ 8dB$. Από το διάγραμμα του σχήματος 2 προκύπτει ότι για $\Delta L = 8\ dB$ ο διορθωτικός παράγοντας είναι $C(\Delta L) = 0{,}75\ dB$. Άρα η στάθμη έντασης του «καθαρού» ήχου είναι $L_S \cong 67{,}25\ dB$. Αξίζει να παρατηρήσει κανείς ότι η τιμή που βρέθηκε δε διαφέρει σημαντικά από αυτή της συνολικής στάθμης ($L_{tot}\ = 68\ dB$), ενώ αντίθετα είναι αρκετά (!!) διαφορετική από αυτή της διαφοράς $\Delta L = 8\ dB$ της συνολικής στάθμης από τη στάθμη έντασης του θορύβου.

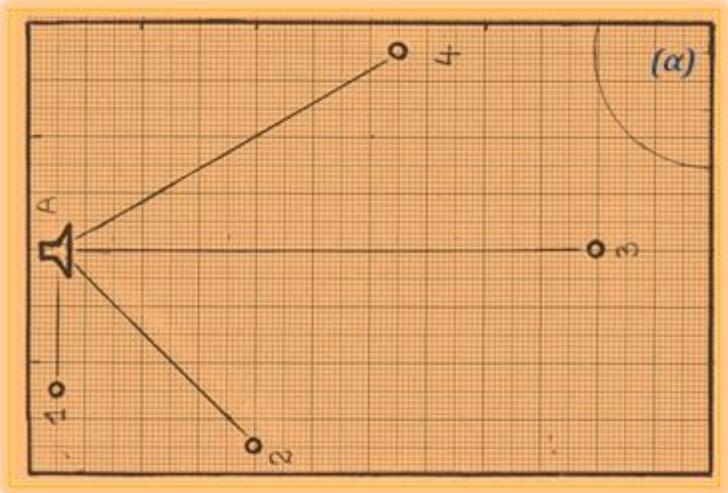
3. Πειραματική διαδικασία

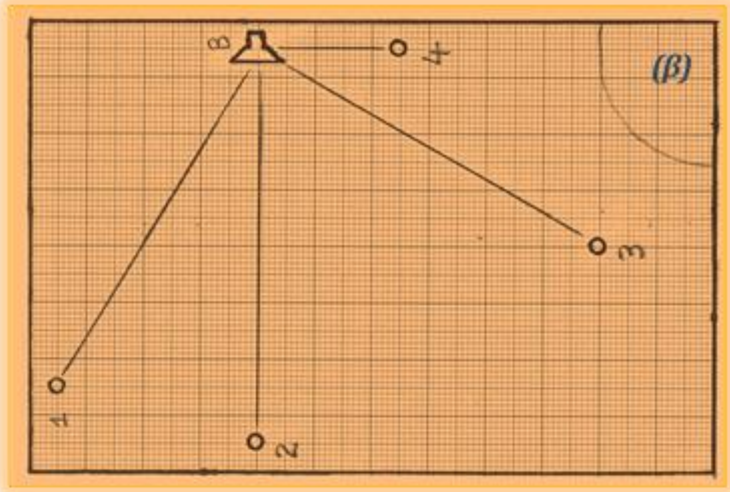
Στο διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζεται, σε όμοια τριπλή αναπαράσταση, η κάτοψη του ίδιου ακριβώς δωματίου - στούντιο υπό σχεδιαστική κλίμακα $(1{:}\,50)$.

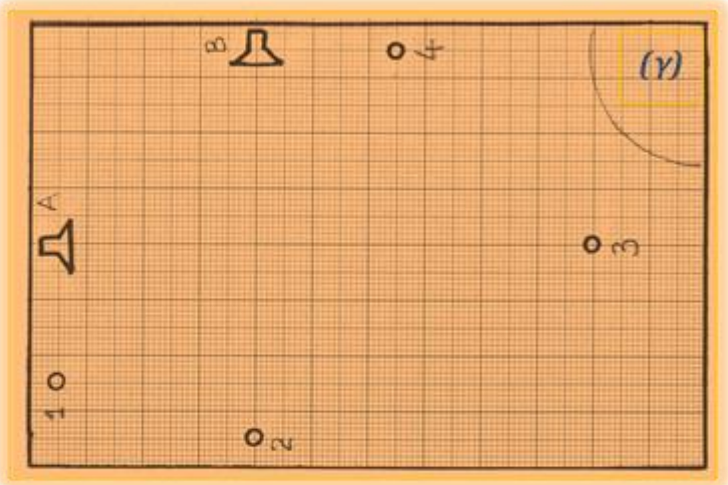
Στο δωμάτιο αυτό που έχει διαστάσεις $(4x6)m^2$ πρόκειται να εγκατασταθούν δυο όμοιες ηχητικές πηγές (π.χ. ηχεία με γνωστά τα πολικά διαγράμματα εκπομπής) στις θέσεις A και B. Εάν οι δυο αυτές πηγές τροφοδοτηθούν ταυτόχρονα με την ίδια ισχύ και εκπέμψουν στην ίδια ακριβώς συχνότητα θα υπολογίσουμε θεωρητικά τα συνολικά dB που δημιουργούνται στα σημεία *1, 2, 3* και *4* του δωματίου. Ο υπολογισμός αυτός θα γίνει αφού πρώτα υπολογιστεί αναλυτικά η συνεισφορά της κάθε πηγής ξεχωριστά στα συγκεκριμένα σημεία.

Στην εικόνα (α) παρουσιάζεται η ηχητική εγκατάσταση 1 που αφορά την λειτουργία της πηγής στο σημείο A, η εικόνα (β) αντιστοιχεί στη μεμονωμένη λειτουργία όμοιας πηγής στο σημείο B και τέλος η τρίτη εικόνα (γ) εμφανίζει την τελική εγκατάσταση της ταυτόχρονης λειτουργίας και των δυο ηχητικών πηγών στο ίδιο, συγκεκριμένο δωμάτιο.

Αξιοποιώντας την γνωστή κλίμακα σχεδίασης $(1{:}\,50)$ μπορεί κανείς να υπολογίσει άμεσα την πραγματική απόσταση του κάθε σημείου από την ηχητική πηγή.







Η εικόνα (α) παρουσιάζει την λειτουργία της πηγής στο σημείο *Α*, η εικόνα (β) αντιστοιχεί στη λειτουργία όμοιας πηγής στο σημείο *Β* και η εικόνα (γ) εμφανίζει την ταυτόχρονης λειτουργία και των δυο ηχητικών πηγών στο ίδιο, συγκεκριμένο δωμάτιο

Για παράδειγμα η απ' ευθείας μέτρηση (στην εικόνα α) της απόστασης του σημείου *1* από την πηγή A δίνει $2.5cm$ και έτσι προσδιορίζεται η πραγματική απόσταση στο δωμάτιο ότι είναι: $2.5cm x 50 = 125cm = 1.25m$. Όμοια η απόσταση του σημείου *3* από το A υπολογίζεται ότι είναι: 9.5cmx50= 475cm=4.75m.

Εκτός όμως από τις αποστάσεις, η σχεδίαση υπό κλίμακα βοηθάει στο ότι μπορεί κανείς να μετρήσει απ' ευθείας τις γωνίες, σε σχέση με τον κεντρικό άξονα εκπομπής, της ευθείας που συνδέει την ηχητική πηγή με τα μελετούμενα σημεία *1, 2, 3* και *4*. Η μέτρηση αυτή γίνεται άμεσα και εύκολα με τη χρήση ενός μοιρογνωμονίου.

Θεωρούμε ότι τα *4* μελετούμενα σημεία βρίσκονται στο ίδιο ακριβώς οριζόντιο επίπεδο στο οποίο επίσης ανήκουν και οι θέσεις A και B των δυο ηχητικών πηγών. Το οριζόντιο αυτό επίπεδο είναι π.χ. σε ύψος $1.20m$ από το δάπεδο δηλαδή στο ύψος που βρίσκεται το κεφάλι ενός υποθετικού ακροατή που είναι καθιστός και απολαμβάνει τον ήχο που προέρχεται από τις δυο πηγές. Επισημαίνεται επίσης ότι εν προκειμένω θεωρούμε ότι δεν υπάρχουν φαινόμενα ανακλάσεων των ηχητικών κυμάτων σε επιφάνειες (π.χ. κάλυψη του δαπέδου με ηχο-απορροφητική μοκέτα).

Με δεδομένο τώρα το οριζόντιο πολικό διάγραμμα (βλ. το σχήμα *3* που ακολουθεί) και για μεμονωμένη λειτουργία της πηγής A, προσδιορίζουμε π.χ. στη διεύθυνση των 90^{o} την ένταση αναφοράς σε $60\,dB$. Επισημαίνεται ότι οι τιμές των dB του πολικού διαγράμματος θεωρούμε ότι ισχύουν στην απόσταση αναφοράς του *1m*. Τότε η στάθμη έντασης π.χ. στο σημείο *(1)* υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση *(2 - 10)* σε :

$$\mathrm{L_1} = \mathrm{L_0} + 10 \cdot \log\left(\frac{\mathrm{r_0}}{\mathrm{r}}\right)^2 = \mathrm{L_0} - 20 \cdot \log\left(\frac{\mathrm{r}}{\mathrm{r_0}}\right) = 60\ \mathrm{dB} - \left(20 \cdot \log\frac{1.25}{1}\right)\mathrm{dB} \cong 58.1\ \mathrm{dB}$$

Όμοια, για το σημείο *3* της ίδιας εικόνας (α) οι αντίστοιχοι υπολογισμοί δίνουν :

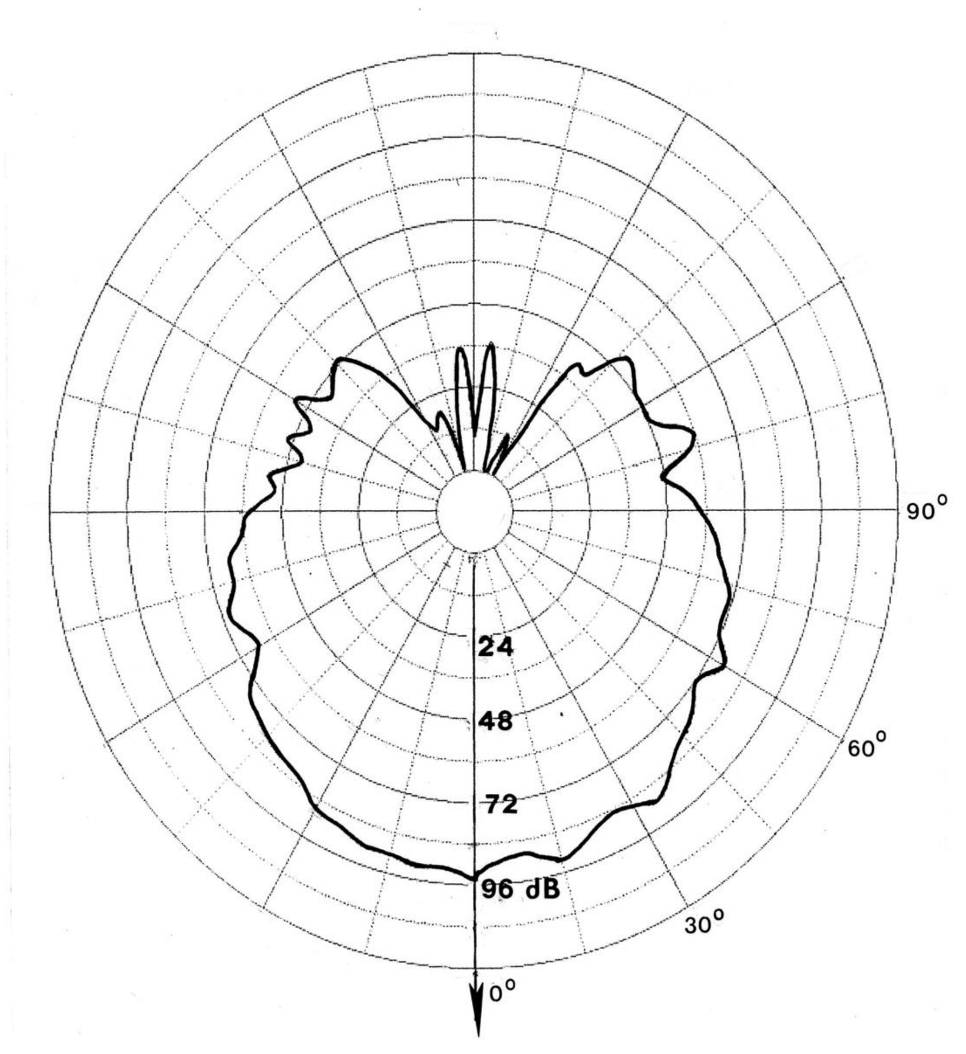
$$96dB - (20 \cdot log 4.75)dB \cong 82.5dB.$$

4. Θεωρητικοί Υπολογισμοί

Εφαρμόζοντας τα προηγούμενα υπολογίζουμε αναλυτικά, και για τα τέσσερα μελετούμενα σημεία, τα dB που οφείλονται στην λειτουργία της πηγής A (εικόνα α) και στην συνέχεια τις αντίστοιχες τιμές για τα ίδια σημεία του δωματίου από την μεμονωμένη δράση της πηγής B (εικόνα β). Με δεδομένα τα dB στη μια και την άλλη περίπτωση (δηλαδή τα L_1, L_2) ο συνολικός υπολογισμός για την ταυτόχρονη δράση και των δύο ηχητικών πηγών ικανοποιεί την σχέση :

$$S = 10log\left(10^{0,1L_1} + 10^{0,1L_2}\right) = L_{max} + C(\Delta L)$$

Με την αντικατάσταση των L_1, L_2 και κάνοντας πράξεις υπολογίζουμε τα συνολικά dB του συστήματος των δύο ηχητικών πηγών.



Σχήμα 3
Οριζόντιο πολικό διάγραμμα κατευθυντικότητας ενός κοινού μεγαφώνου του εμπορίου. Πρόκειται για πολικό διάγραμμα που δημιουργήθηκε από πραγματικές πειραματικές μετρήσεις. Διαπιστώνει κανείς ότι έχει ένα σχήμα συμμετρικό χωρίς και αυτό να είναι απόλυτο. Φανερή είναι ωστόσο η προδιάθεση του συγκεκριμένου μεγαφώνου να εκπέμπει κυρίως στις «μπροστά» γωνίες (από 0º έως 60º).

Πίνακας μετρήσεων και υπολογισμών						
	r *(m)*	*r / r₀* $r_o = 1m$	*20 log(r/r₀)*	*θ* *(μοίρες)*	L_0 *(dB)*	L_i *(dB)*
Εγκατάσταση 1 (Εικόνα α)						**i = 1**
Θέση 1						
Θέση 2						
Θέση 3						
Θέση 4						
Εγκατάσταση 2 (Εικόνα β)						**i = 2**
Θέση 1						
Θέση 2						
Θέση 3						
Θέση 4						

Τελικός πίνακας υπολογισμών συνολικής έντασης στην εγκατάσταση 3								
Εγκατάσταση 3	L_1 *(dB)*	L_2 *(dB)*	$0.1 \cdot L_1$ *(dB)*	$0.1 \cdot L_2$ *(dB)*	$10^{0.1 \cdot L1}$ $\times 10^6$	$10^{0.1 \cdot L2}$ $\times 10^6$	*S'* $\times 10^6$	*10 logS'* *(dB)*
Θέση 1								
Θέση 2								
Θέση 3								
Θέση 4								

Στην προτελευταία στήλη στον ανωτέρω πίνακα το σύμβολο *S'* σημαίνει:

$$S' = 10^{0,1 \cdot L_1} + 10^{0,1 \cdot L_2}$$

5. Ερωτήσεις Κατανόησης

1. Στην ηχητική εγκατάσταση 3 της ταυτόχρονης δράσης και των δύο ηχείων ποια από τις περιοχές υπολογίστηκε να έχει τα περισσότερα dB ; ποια τα λιγότερα;

2. Στις περιοχές των θέσεων (1) και (4) της ίδιας εγκατάστασης οι υπολογισμένες τιμές των dB πρέπει να βρέθηκαν ακριβώς ίδιες. Το περιμένατε αυτό σαν αποτέλεσμα ; Γιατί να συμβαίνει αυτό το γεγονός ;

3. Η διαφορά των dB στις θέσεις (2) και (3) της εγκατάστασης 3 που υπολογίστηκε γίνεται εύκολα αντιληπτή από ένα ανθρώπινο αυτί ή όχι ;

4. Στον πίνακα υπολογισμών για την εγκατάσταση 3 να συγκρίνετε τα συνολικά dB που υπολογίσατε (τελευταία στήλη) με την τιμή L_{max} της μεγαλύτερης από τις δύο στάθμες σε κάθε περίπτωση. Επιβεβαιώνονται οι τιμές της συνολικής έντασης σε dB αν εφαρμόσουμε τη σχέση (Δ.5) σε συνδυασμό με το διάγραμμα του σχήματος 1;

5.1 Απαραίτητες γνώσεις

Ήχος - Ηχητικά κύματα, χαρακτηριστικά του ήχου, ηχητικές στάθμες, decibel.

5.2 Βιβλιογραφία

1. Physics for Scientists & Engineers , Τόμος III (Θερμοδυναμική – Κυματική – Οπτική) /Serway.
2. Γενική Φυσική, Τόμος Α’ Μηχανική-Ακουστική / Κ. Δ. Αλεξόπουλος.
3. Εφαρμοσμένη Ακουστική, Γ΄ Έκδοση / Δ. Σκαρλάτος.
4. Ηλεκτρονικά ΜΜΕ – Ραδιόφωνο, Γ. Παπανικολάου – Γ. Καλλίρης – Μ. Ματσιώλα, Τμήμα Δημοσιογραφίας και ΜΜΕ, ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη 2003.
5. http://lyk-vatheos.eyv.sch.gr/Ergasies/2009-2010/RADIOFONO.files