Λυμένες Ασκήσεις του μαθήματος

Ακουστική Χώρων

Δρ. Νικόλαος Στεφανάκης

Επίκουρος Καθηγητής

Ιούνιος 2023

ΜΑΘΗΜΑ 1ο

ΑΣΚΗΣΗ 1

Να βρεθεί η ακουστική ισχύς σε Watt που απαιτείται για πανκατευθυντική πηγή για να πετυχαίνουμε ένταση 80 dB SPL στα 60 m απόσταση από την πηγή στο ελεύθερο πεδίο. Δίνεται το γινόμενο της πυκνότητας *ρ* του αέρα επί της ταχύτητας του ήχου c, *ρc*=407 Ω,

Λύση:

Γνωρίζουμε ότι αφού η πηγή είναι πανκατευθυντική, θα παράγει την ίσια τιμή ακουστικής πίεσης p σε όλα τα σημεία πάνω σε μια επιφάνεια σφαίρας με κέντρο την πηγή, συγκεκριμένα θα ισχύει $W = \frac{P^2}{\rho c} 4\pi R^2$,όπου R η ακτίνα της σφαίρας. Καταρχάς, βρίσκουμε τη μέση τετραγωνική της πίεσης που αντιστοιχεί σε στάθμη 80 dB SPL.

$$20\log\frac{P}{P_{ref}} = 80 \Rightarrow \log\frac{P}{P_{ref}} = \frac{80}{20} = 4 \Rightarrow 10^{\log\frac{P}{P_{ref}}} = 10^4 \Rightarrow \frac{P}{P_{ref}} = 10^4 \Rightarrow$$
$$P = 10^4 \cdot P_{ref} = 10^4 \cdot 2 \cdot 10^{-5} = 2 \cdot 10^{-1} \Rightarrow P = 0.2Pa$$

Οπότε η ισχύς που απαιτείται τώρα μπορεί να υπολογιστεί:

$$W = \frac{P^2}{\rho c} 4\pi R^2 \Rightarrow W = \frac{0.2^2}{407} 4\pi 60^2 \cong 4.5Watt$$

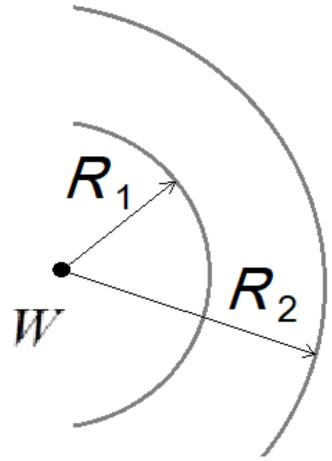
Παρατηρούμε ότι με λιγοστά Watt ακουστικής ισχύος μπορεί να καλυφθεί μία αρκετά μεγάλη περιοχή. Θα πρέπει να έχουμε υπόψιν ότι τα ακουστικά watt είναι δεν ταυτίζονται με τα ηλεκτρικά watt που έχουμε στην είσοδο ενός ηχείου και συνήθως είναι ένα μικρό ποσοστό της ηλεκτρικής ισχύος που καταναλώνουμε για να μπορούμε να παράγουμε ήχο

ΑΣΚΗΣΗ 2

Για μια σημειακή πανκατευθυντική πηγή στο ελεύθερο πεδίο αποδείξτε τον νόμο του αντίστροφου τετραγώνου για την απόσταση θεωρώντας ότι δεν υπάρχουν απώλειες στο μέσο διάδοσης.

Λύση:

Ο νόμος του αντίστροφου τετραγώνου για την απόσταση μας λέει ότι η στάθμη του ήχου ελαττώνεται κατά 6 dB κάθε φορά που διπλασιάζεται η απόσταση. Για να τον αποδείξουμε, θεωρούμε μία ηχητική πηγή και δύο διαφορετικές επιφάνειες σφαίρας (με κέντρο την πηγή) μίας ακτίνας R_1 και μία ακτίνας R_2 όπως φαίνεται και στο παρακάτω Σχήμα



$$W = \frac{P_1^2}{\rho c} 4\pi R_1^2 = \frac{P_2^2}{\rho c} 4\pi R_2^2$$

Η ακουστική ένταση κατά την φορά διάδοσης πάνω στην πρώτη σφαίρα ισούται με $I_1 = \frac{P_1^2}{\rho c}$ και πάνω στην δεύτερη σφαίρα με $I_2 = \frac{P_2^2}{\rho c}$. Εφόσον δεν έχουμε απώλειες και εφόσον η ίδια πηγή είναι η αιτία για το ηχητικό πεδίο σε όλο το χώρο, καταλαβαίνουμε ότι το γινόμενο της ακουστικής έντασης επί την επιφάνεια κάθε μίας σφαίρας θα ισούται με την ισχύ της πηγής και επομένως

$\frac{P_1^2}{\rho c} 4\pi R_1^2 = \frac{P_2^2}{\rho c} 4\pi R_2^2 \Rightarrow \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^2 = \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2 = \frac{I_1}{I_2}$ και επίσης $\frac{P_1}{P_2} = \frac{R_2}{R_1}$.

Από την τελευταία Σχέση μπορούμε εύκολα να αποδείκουμε το γνωστό τύπο για τη μεταβολή της απόστασης:

$$\frac{\frac{P_1}{P_{ref}}}{\frac{P_2}{P_{ref}}} = \frac{R_2}{R_1} \Rightarrow 20\log\frac{P_1}{P_{ref}} \cdot \frac{P_{ref}}{P_2} = 20\log\frac{R_2}{R_1} \Rightarrow 20\log\frac{P_1}{P_{ref}} + 20\log\frac{P_{ref}}{P_2} = 20\log\frac{R_2}{R_1} \Rightarrow$$

$$L_1 - L_2 = 20\log\frac{R_2}{R_1} \Rightarrow L_2 - L_1 = 20\log\frac{R_1}{R_2}$$

Ερώτηση: Υπό ποια προϋπόθεση γενικεύεται **το παραπάνω συμπέρασμα** όταν η πηγή δεν είναι ισοτροπική (έχει δηλαδή κατευθυντικότητα)?

Απάντηση : Όταν η γωνιά είναι ίδια.

Μάθημα 2ο

Πρόσθεση δύο ηχητικών πηγών με στάθμη L1 και L2:

$$L_{o\lambda} = 10\log(10^{\frac{L_1}{10}} + 10^{\frac{L_2}{10}}) \qquad (2.1)$$

Γενικός τύπος για πρόσθεση N πηγών:

$$L_{o\lambda} = 10\log(10^{\frac{L_1}{10}} + 10^{\frac{L_2}{10}} + \ldots + 10^{\frac{L_N}{10}}) \qquad (2.2)$$

Πρόθεση N πηγών με την ίδια στάθμη L $(L_1 = L_2 = \ldots = L_N = L)$

$$L_{o\lambda} = 10\log(N \cdot 10^{\frac{L}{10}}) = 10\log N + L \qquad (2.3)$$

Αφαίρεση θορύβου βάθους:

Έστω Lολ η συνολική στάθμη μέτρησης, Lθ η στάθμη του θορύβου και Lπ η στάθμη της πηγής που ψάχνουμε. Η στάθμη της πηγής προκύπτει αφαιρώντας από τη συνολική στάθμη τη στάθμη του θορυβου:

$$L_{\Pi\eta\gamma\acute{\eta}\varsigma} = 10\log(10^{\frac{L_{o\lambda}}{10}} - 10^{\frac{L_\theta}{10}}) \qquad (2.4)$$

<u>ΑΣΚΗΣΗ 1</u>

Στο εργαστήριο ηλεκτρονικών υπολογιστών η στάθμη θορύβου από τους ανεμιστήρες 5 τερματικών που δούλευαν ταυτόχρονα ήτανε 72 dB SPL. 1) Πόσο αναμένεται να είναι η στάθμη θορύβου όταν λειτουργεί ένα μόνο τερματικό? 2) Όταν δουλεύουν και τα 20 τερματικά?

<u>Λύση:</u>

1) Κάνουμε εφαρμογή της Σχέσης (2.3) με $L_{o\lambda}$ = 72 dB SPL και N=5.

$$72 = 10\log N + L_T \Rightarrow L_T = 72 - 10\log 5 = 72 - 7 = 65dB$$

2) Κάνουμε πάλι εφαρμογή της Σχέσης (2.3) παρατηρώντας ότι 20 πηγές αντιστοιχούν σε ένα τετραπλασιασμό των πηγών σε σχέση με τις 5 πηγές:

$$L_{20T} = 10\log 4 + L_{5T} = 6 + 72 = 78dB_{SPL}$$

<u>ΑΣΚΗΣΗ 2</u>

Κατά τη μέτρηση της στάθμης θορύβου που παράγεται από μία ηλεκτρική συσκευή η ένδειξη του ηχόμετρου ήτανε 88 dBA. Αν ο θόρυβος βάθους είναι 76 dBA πόση η πραγματική στάθμη που παράγεται από τη συσκευή?

<u>Λύση:</u>

Έχουμε ότι $L_{ολ} = 88dB_A$ και $L_Θ = 76dB_A$. Κάνοντας εφαρμογή της Σχέσης 2.4 βρίσκουμε:

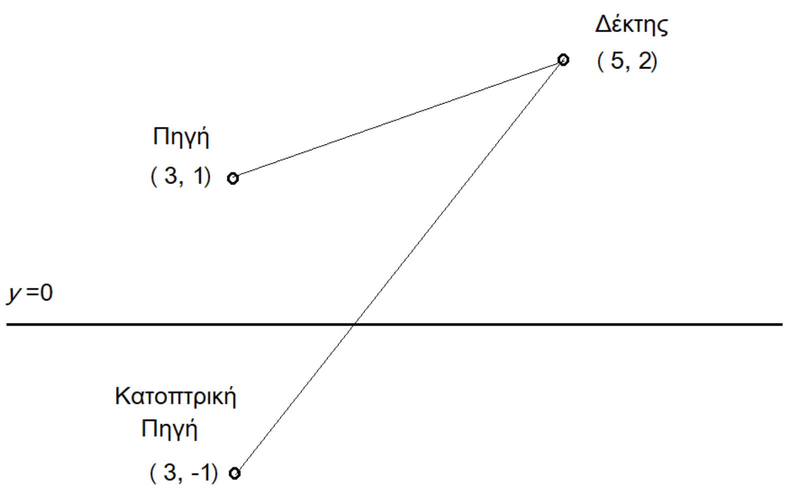
$$L_Π = 10\log(10^{8,8} - 10^{7,6}) = 87.7dB_A$$

Μάθημα 3ο

ΑΣΚΗΣΗ 1

Οι συντεταγμένες (x,y) μιας σημειακής πηγής και ενός σημειακού δέκτη είναι (5,2) m και (3,1) m αντίστοιχα. Θεωρώντας τέλεια ανακλαστικό πάτωμα στο y=0, **(1)** υπολογίστε τη χρονική διαφορά άφιξης (ΧΔΑ) μεταξύ απευθείας και ανακλώμενου ήχου. **(2)** Αποδείξτε ότι για καθαρό τόνο συχνότητας f_1=625 Hz, ο απευθείας και ο ανακλώμενος ήχος θα συμβάλουν αποσβεστικά, ενώ για συχνότητα f_2=750 Hz ο απευθείας και ο ανακλώμενος ήχος θα συμβάλουν ενισχυτικά. Δίνεται η ταχύτητα του ήχου c=343 m/s.

Λύση:



Θεωρούμε την κατοπτρική της πηγής ως προς το επίπεδο ανάκλασης με συντεταγμένες $(x'_π, y'_π) = (3, -1)$.

Η διαδρομή του απευθείας ήχου είναι από την πηγή στο δέκτη και έχει μήκος

$$d_{απ} = \sqrt{(x_π - x_δ)^2 + (y_π - y_δ)^2} = \sqrt{2^2 + 1^2} = \sqrt{5} = 2.236\,m$$

Η διαδρομή του ανακλώμενου ήχου είναι από την κατοπτρική πηγή στο δέκτη και έχει μήκος

$$d_{αν} = \sqrt{(x'_π - x_δ)^2 + (y'_π - y_δ)^2} = \sqrt{2^2 + 3^2} = \sqrt{13} = 3.606\,m$$

Η διαφορά στη διαδρομή του ήχου είναι $d_{αν} - d_{απ}$ = 1.37 m που αντιστοιχεί σε Χρονική Διαφορά Άφιξης (ΧΔΑ) Δt = $\frac{1,37}{343} = 0.004\,s$.

Λόγω της ΧΔΑ, οι ήχοι θα φτάνουν με διαφορά φάσης στο δέκτη. Η διαφορά φάσης υπολογίζεται με βάση τον τύπο

$$Δφ = ωΔt = 2πfΔt \qquad (3.1)$$

Για f_1=625 Hz η διαφορά φάσης θα είναι $\Delta\varphi$=2π·625·0.004=15.708 rad. Παρατηρούμε ότι cos(15.708)=-0.999 που σημαίνει ότι ο ανακλώμενος ήχος θα συμβάλει καταστροφικά με τον απευθείας ήχο. Από την άλλη, για f_2=750 Hz παρατηρούμε ότι η διαφορά φάσης είναι $\Delta\varphi$=2π·725·0.004=18.850 rad και cos(18.850)=1.0. Άρα στα 750 Hz βλέπουμε ότι ο απευθείας και ανακλώμενος ήχος θα βρίσκονται σε συμφωνία φάσης και επομένως θα συμβάλουν ενισχυτικά.

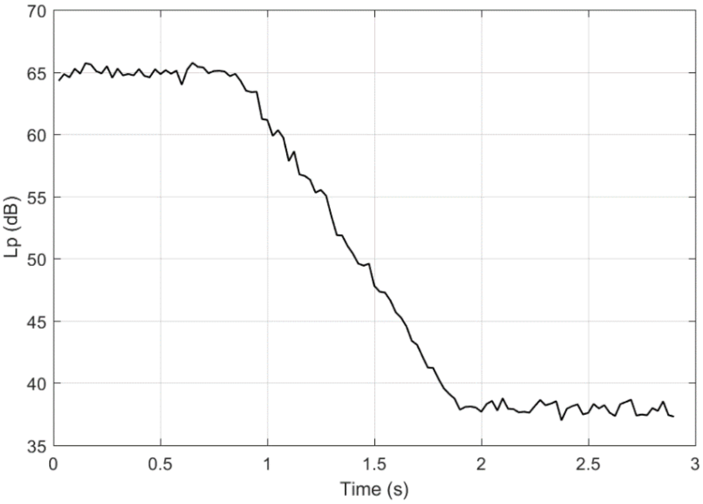
Μάθημα 4ο

ΑΣΚΗΣΗ 1

Κατά τη μέτρηση του χρόνου αντήχησης με τη μέθοδο της διακοπτόμενης πηγής στα 1000 Hz πήραμε το παρακάτω διάγραμμα (οι τιμές του άξονα του -x είναι σε δευτερόλεπτα).

α) Ποια από τις προδιαγραφές RT_{20} και RT_{30} θεωρειτε ως καλυτερη για τη μέτρηση χρόνου αντήχησης για τη συγκεκριμένη περίπτωση και γιατί;

β) Κάνετε μια εκτίμηση του χρόνου αντήχησης με βάση το διάγραμμα.



Λύση:

Α) Βλέπουμε ότι από τα 65 dB μέχρι τα 38 περίπου dB που είναι ο θόρυβος βάθους, το δυναμικό εύρος είναι ναι μεν μεγαλύτερο των 20 dB, μικρότερο όμως των 30 dB που απαιτούνται για χρήστη του RT_{30} . Άρα η προδιαγραφή RT_{20} είναι η κατάλληλη.

Β) Τα 60 dB (5dB κάτω από το μέγιστο) βλέπουμε ότι αντιστοιχούν στην χρονική στιγμή t=1s ενώ τα 40 dB (20 dB κάτω), τη χρονική στιγμή t=1.8s περίπου. Επομένως, η εκτίμηση του χρόνου αντήχησης με βάση το RT_{20} είναι: RT_{20}= $3 \cdot \Delta T_{20}$ =$3 \cdot (1.8 - 1.0)$ =$3 \cdot 0.8$ = 2.4s

Μάθημα 5ο

<u>ΕΡΩΤΗΣΗ</u>

Εξηγείστε την έννοια του Mean Free Path (MFP). Με βάση την έννοια του MFP, εξηγείστε γιατί σε ένα κλειστό χώρο ο χρόνος αντήχησης αυξάνεται με το μέγεθος του χώρου.

ΑΠΑΝΤΗΣΗ: Μεγάλος χώρος σημαίνει μεγάλο MFP, άρα μεγάλο χρονικό διάστημα μεταξύ ανακλάσεων, άρα μικρότερος ρυθμός απορρόφησης της ενέργειας.

<u>ΑΣΚΗΣΗ 0</u>

Καφετέρια έχει διαστάσεις 10 x 10 x 4(Μ x Π x Υ). Στην αίθουσα υπάρχουν 80 καθίσματα και 20 τραπέζια. 1)Με χρήση του τύπου του Sabine υπολογίστε το RT για 500 Hz στην περίπτωση που τα καθίσματα είναι ξύλινα και το πάτωμα μαρμάρινο. 2)Στην δεύτερη περίπτωση αντικαθιστούμε τα καθίσματα με ίσο αριθμό καθισμάτων με βαριά επένδυση και τοποθετούμε ξύλινο πάτωμα . Υπολογίστε το νέο RT με τον τύπο του Sabine.

Δίνονται: $\alpha_{τοίχου} = \alpha_{οροφής} = \alpha_{μαρμάρου}$=0.01, $\alpha_{ξύλ.πάτ.} = 0.1$

$Α_{ξύλ.κάθ.} = 0.4m^2,\ A_{τραπ.} = 0.4m^2,\ A_{κάθ.με\ βαριά\ επένδ.} = 0.8m^2.$

<u>Λύση:</u>

1) $A_{Δ.Α.} = 80 \cdot 0.4 + 20 \cdot 0.4 = 40m^2$ ή $Sabines$

$A_{επιφανειών} = \left(S_{πατ} + S_{οροφ} + S_{πλευρ.τοίχων}\right)\alpha$ =(10×10 + 10×10 + 4×10×4) · 0.01=360 · 0.01 ⇒

$A_{επιφανειών} = 3.6\ m^2$ ή $Sabines$

παίρνω Sabine με Δ Α

$$RT_{60} = \frac{0.161\ V}{A_{επιφ} + A_{ΔΑ}} = \frac{0.161 \cdot 400}{3.6+40} = 1.48s$$

$2)A_{Δ.Α} = 80 \cdot 0.8 + 20 \cdot 0.4 = 72m^2$

$A_{επιφανειων} = 10 \cdot 10 \cdot 0{,}1 + 10 \cdot 10 \cdot 0{,}01 + 4 \cdot 10 \cdot 4 \cdot 0{,}01 = 12{,}6m^2$

$$RT_{60} = \frac{0.161\ V}{12{,}6 + 72} \Rightarrow RT = 0.76s$$

Μάθημα 6ο

ΑΣΚΗΣΗ 1

Υπολογίστε την απορρόφηση στα 2000Hz των 30000 m^3 αέρα μέσα σε μία εκκλησία, όταν η σχετική υγρασία είναι 50% και η θερμοκρασία 20° C. Αν ο χρόνος αντήχησης στα 2000 Hz είναι 4s, βρείτε την απορρόφηση της κατασκευής (δηλαδή χωρίς την απορρόφηση του αέρα).

Λύση:

Από το σχετικό διάγραμμα βλεπουμε ότι για 20° C, υγρασία 50% και για τα 2000 Hz, 4m=0.0096.

Επομένως $A_{\alpha\varepsilon\rho\alpha} = 4m \cdot V = 0.0096 \cdot 30000 = 288 m^2$ ή $Sabines$.

2) Έστω $A_{\kappa\alpha\tau}$ η απορρόφηση της κατασκευής. Με βάση το σχετικό τύπο θα ισχύει

$$RT_{60} = \frac{0.161V}{A_{\kappa\alpha\tau}+A_{\alpha\varepsilon\rho\alpha}} \Rightarrow \left(A_{\kappa\alpha\tau} + A_{\alpha\varepsilon\rho\alpha}\right) \cdot RT_{60} = 0.161 \cdot V \Rightarrow A_{\kappa\alpha\tau} + A_{\alpha\varepsilon\rho\alpha} = \frac{0{,}161 \cdot V}{RT_{60}} \Rightarrow$$

$$A_{\kappa\alpha\tau} = \frac{0{,}161 \cdot 30000}{4} - 288 \Rightarrow A_{\kappa\alpha\tau} = 919{,}5 m^2 \quad \text{ή} \quad Sabines$$

ΑΣΚΗΣΗ 2

Αίθουσα ορθογωνίων διαστάσεων έχει διαστάσεις Lx=10, Ly=10 και Lz=4 m. Για την αίθουσα δίνονται οι παρακάτω συντελεστές απορρόφησης: α_{xy}=0.01, α_{xz}=0.01, α_{yz}=0.1. Υπολογίστε το RT με χρήση (α) Sabine και (β) Fitzroy. (γ) Κάνετε το ίδιο για την περίπτωση που α_{yz}=0.01 και εξηγείστε τι παρατηρείτε.

Λύση:

(α) Τί μας λέει ο Sabine : $RT_{60} = \frac{0.161V}{A_{\varepsilon\pi\iota\varphi.}}$

$S_{xy} = 2 \cdot 10 \cdot 10 = 200 m^2$

$S_{xz} = 2 \cdot 10 \cdot 4 = 80 m^2$

$S_{yz} = 2 \cdot 10 \cdot 4 = 80 m^2$

$S_{o\lambda} = 360 m^2$

$V = 10 \cdot 10 \cdot 4 = 400 m^3$

$$A_{\varepsilon\pi\iota\varphi} = S_{xy} \cdot \alpha_{xy} + S_{xz} \cdot \alpha_{xz} + S_{yz} \cdot \alpha_{yz} = 200 \times 0.01 + 80 \times 0.01 + 80 \times 0.1$$
$$= 2 + 0{,}8 + 8 = 10{,}8\ Sabines$$

Άρα: $RT_{60} = \frac{0.161 \cdot 400}{10{,}8} = 6.0\ s$ με βάση Sabine

(β) Τί μας λέει ο Fitzroy : $RT_{60} = \frac{0161 \cdot V}{S_{o\lambda}^2}\left(\frac{S_{xy}}{Q_{xy}} + \frac{S_{xz}}{Q_{xz}} + \frac{S_{yz}}{Q_{yz}}\right) = \frac{0.161 \cdot 400}{360^2}\left(\frac{200}{0.01} + \frac{80}{0.01} + \frac{80}{0.1}\right)$

$= 5 \cdot 10^{-4} \cdot 28800 = 14{,}3 s$

Παρατηρούμε μια μεγάλη διαφορά στους εκτιμώμενους χρόνους αντήχησης.

(γ) Υλοποιώντας τους ίδιους υπολογισμούς για την περίπτωση που α_{yz}=0.01 , καταλήγουμε ότι οι και δυο τύποι δίνουν το ίδιο αποτέλεσμα και συγκεκριμένα RT = 17.9 s! Άρα ο τύπος του Fitzroy έχει νόημα εφόσον υπάρχουν μεγάλες διαφορές στους συντελεστές απορρόφησης των επιφανειών, αλλιώς αυτό που θα μας δίνει δεν θα διαφοροποιείται από αυτό που μας δίνει ο Sabine.

ΑΣΚΗΣΗ 3

Ο συντελεστής απορρόφησης ενός υλικού μετρήθηκε σε θάλαμο αντήχησης με όγκο 1300m^3. Στα 500Hz βρέθηκε: RT60 άδειου θαλάμου (RT_A)=18.5 s, RT60 γεμάτου θαλάμου ($RT_Γ$)=9.4 s με χρήση 30m^2 απορροφητικού υλικού

1) Βρείτε το συντελεστή απορρόφησης του υλικού

2) Στον ίδιο (άδειο) θάλαμο, τοποθετήθηκαν 40 καρέκλες και ο χρόνος αντήχησης ήτανε 6.7 s. Ποιο το A της καρέκλας?

Υπόδειξη: χρησιμοποιήστε τον τύπο του Sabine

<u>Λύση:</u>

1) Ορίζουμε τις παρακάτω ποσότητες:

$A_{ΥΛ}$: απορρόφηση που προσφέρει το υλικό

RT_A: χρόνος αντήχησης άδειας αίθουσας (δηλ χωρίς το υλικό μέσα) και αντιστοιχα

A_A: απορρόφηση άδειας άιθουσας

$RT_Γ$ **:**χρόνος αντήχησης γεμάτης αίθουσας (δηλ με το υλικό μέσα) και αντίστοιχα

$A_Γ$: απορρόφηση γεμάτης αίθουσας

Για την περίπτωση της άδειας αίθουσας, με βάση τον τύπο του Sabine θα ισχύει:

$$18{,}5 = \frac{0{,}161 \cdot 1300}{A_A} \Rightarrow A_A = \frac{0{,}161 \cdot 1300}{18{,}5} = 113 \ m^2$$

$$RT_Γ = \frac{0{,}161V}{A_A + A_{ΥΛ}} \Rightarrow A_A + A_{ΥΛ} = \frac{0{,}161V}{RT_Γ} \Rightarrow A_{ΥΛ} = \frac{0161 \cdot 1300}{9{,}4} - 11{,}3 = 11m^2$$

$$A_{ΥΛ} = S_{ΥΛ}\alpha_{ΥΛ} \Rightarrow \alpha_{ΥΛ} = \frac{A_{ΥΛ}}{S_{ΥΛ}} = \frac{11}{30}$$

$$αρα: \ \alpha_{ΥΛ} = 0{,}37 \ στα \ 500Hz$$

2) Ορίζουμε τώρα αντίστοιχα με $RT_Γ$ και $A_Γ$ το χρόνο αντήχησης και την απορρόφηση της αίθουσας με τις 40 καρέκλες μέσα.

$$RT_Γ = \frac{0{,}161V}{A_A + A_{καρεκλών}} \Rightarrow A_A + A_{καρεκλών} = \frac{0{,}161V}{RT_Γ} \Rightarrow$$

$$A_{καρεκλών} = \frac{0{,}161 \cdot 1300}{6{,}7} - 11{,}3 = 31{,}23 - 11{,}3 = 19{,}93 \ Sabines$$

Επομένως η απορρόφηση της μίας καρέκλας θα είναι $A_{καρέκλας} = \frac{A_{καρεκλών}}{Αριθμό\ καρεκλών} = \frac{19{,}93}{40} = 0{,}5 \ Sabines$

<u>ΑΣΚΗΣΗ 4</u>

Χώρος έχει διαστάσεις $L_x = 4.8m$, $L_y = 7m$, $L_z = 3m$ (Μήκος x Πλάτος xΥψος).

1) Αν οι τοίχοι είναι από τούβλο και η οροφή με το πάτωμα από σκυρόδεμα, να βρεθεί ο χρόνος αντήχησης του δωματίου στα 500Hz.

2) Έστω ότι θέλουμε να μειώσουμε το χρόνο αντήχησης στα 1.8 s. Να υπολογίσετε την επιφάνεια του πατώματος που θα πρέπει να επενδύσουμε με χαλί, ώστε να επιτύχουμε τον επιθυμητό χρόνο αντήχησης.

Δίνονται για τα 500 Hz οι συντελεστές απορρόφησης: $\alpha_{σκυρόδεμα}$= 0.04, $\alpha_{τούβλο}$=0.06, $\alpha_{χαλί}$= 0.2

Λύση:

1)

$S_{τοιχων} = 2L_xL_z + 2L_yL_z \; = 28.8 + 42 = 70.8m^2$

$S_{πατ+οροφ} = 2L_XL_y = 2 \times 4.8 \times 7 = 67.2m^2$

$S_{πατ} = 4.8 \times 7 = 33.6m^2$

$A_{ολ} = 70{,}8 \cdot 0{,}06 + 67{,}2 \cdot 0{,}04 = 6{,}94m^2$

$V = \; L_x \cdot L_y \cdot L_z = 100.8m^3$

Βλέπουμε ότι $\bar{a} = \frac{A_{ολ}}{S_{ολ}} = \frac{6{,}94}{67{,}2+70{,}8} = 0.05 < 0.1$ επομένως μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τον τύπο του Sabine.

$$RT_{60} = \frac{0.161 \cdot 100.8}{6.94} = 2.34s$$

2) Πόση είναι η συνολική απορρόφηση στο χώρο έτσι ώστε το RT_{60}=1.8s ;

$$RT_{60} = \frac{0.161 \cdot 100.8}{A_{ολ}} \Rightarrow A_{ολ} = \frac{0{,}161 \cdot 100.8}{1.8} = 9m^2 \;\; \text{ή} \;\; Sabines$$

$A_{ολ} = A_{πατ} + A_{οροφ} + A_{τοιχ} \Rightarrow 9 = A_{πατ} + 33.6 \cdot 0.04 + 70.8 \cdot 0.06 \Rightarrow$

$A_{πατ} = 9 - 4{,}25 - 1{,}34 = 3{,}41m^2$

έστω x το εμβαδό του χαλιού που θα μπει. Θα πρέπει τα x αυτά τετραγωνικά μέτρα να τα αφαιρέσουμε από το εμβαδό του σκυροδέματος που συνεισφέρει ως απορρόφηση, λόγω του ότι αντικαθίσταται από το χαλί. Επομένως , θα πρέπει:

$x \cdot 0.2 + (S_{πατ} - x) \cdot 0.04 = 3.41$

Άρα: $x \cdot 0.2 + (33.6 - x) \cdot 0.04 = 3.41 \Rightarrow \; 0.16x = 3.41 - 1.34 \Rightarrow x = \frac{2.07}{0.16} = 12.94 \; m^2$, που είναι και η επιφάνεια του χαλιού που πρέπει να μπει.

ΑΣΚΗΣΗ 5

Προτείνετε το βέλτιστο όγκο και χρόνο αντήχησης για μια αίθουσα συναυλίας χωρητικότητας 450 ατόμων που θα χρησιμοποιείται κυρίως για ορχήστρα.

Λύση:

Από πίνακα 7.8.2.: V=450·7,1=3195 m^3

Με βάση την εξίσωση Stephens-Bate: $RT_{60} = r(0{,}012\sqrt[3]{V} + 0{,}107)$,

Κάνουμε εφαρμογή με *r*=5 (ορχήστρα)

$RT_{60} = 5(0{,}012\sqrt[3]{3195} + 0{,}107)$ = 1,4 s

ΑΣΚΗΣΗ 6

Αίθουσα πρόκειται να κατασκευαστεί με σκοπό να χρησιμοποιηθεί σαν χώρος διαλέξεων (ομιλία), χωρητικότητας 100 ατόμων. Το ύψος του κτιρίου είναι 4 m. α) Προτείνετε βέλτιστο όγκο και διαστάσεις για την αίθουσα β) με χρήση των τύπων Stephens-Bate, υπολογίστε το προτεινόμενο RT και απορρόφηση της αίθουσας.

Λύση:

Α) Από πίνακα 7.8.2.: V=100×2,8=280m^3

Διαστάσεις: αν το ύψος είναι 4 m τότε Υψος x Πλάτος x Μήκος=280⇒ Πλάτος x Μήκος = 70

Προτείνονται οι παρακάτω διαστάσεις: Μήκος=10 Πλάτος=7 m

Β) RT_{60}=4(0,012 $280^{\frac{1}{3}}$+0,107)=0,74s

ΆΣΚΗΣΗ 7

Το αμφιθέατρο μιας σχολής πρόκειται να κατασκευαστεί για να εξυπηρετεί 200 άτομα και θα χρησιμοποιείται κυρίως για λόγο.

α) Ορίστε τον κατάλληλο όγκο και χρόνο αντήχησης

β) Πόση απορρόφηση χρειάζεται στην κατασκευή ώστε να πετύχουμε τις βέλτιστες συνθήκες όταν η αίθουσα είναι γεμάτη κατά τα 2/3?

(Υποθέτουμε ότι η μελέτη γίνεται στα 500 Hz όπου η απορρόφηση του ενός ατόμου είναι 0.4 m^2)

Λύση:

(α) Από το σχετικό πίνακα βλέπουμε ότι ο βέλτιστος όγκος ανά άτομο για αίθουσες ομιλίας είναι 2.8. Άρα, ο προτεινόμενος όγκος της αίθουσας είναι 200·2.8=560 m^3. Ο βέλτιστος χρόνος αντήχησης (RT) με βάση την εξίσωση Stephens-Bate υπολογίζεται

$RT = 4(0.012\cdot \sqrt[3]{560} + 0.107) = 0.82\ s.$

(β) 2/3·200 = 133,3 άτομα και $A_{ατόμων}$ = 133.3·0.4=53.3 m^2. Με βάση τον τύπο του Sabine θα ισχύει

$RT = \frac{1.061V}{A_{κατασκευής}+A_{ατόμων}} \Rightarrow A_{κατασκευής} + A_{ατόμων} = \frac{0,161\cdot 560}{0.82}$=110 m^2.

Άρα $A_{κατασκευής}$ = 110-53.3 = 56.7 m^2.

Μάθημα 7ο

ΆΣΚΗΣΗ 1

Για την οκτάβα των 1000 Hz σε ένα χώρο η κρίσιμη απόσταση μπροστά από ένα ηχείο είναι Dc=2 m. Σε ποια απόσταση θα έχω DRR=6 dB, DRR=-6 dB και DRR=4 dB?

Λύση:

Το DRR (Direct-to-Reverberant-Ratio) είναι η απόσταση, σε dB, μεταξύ της στάθμης του απευθείας και του ανακλώμενου ήχου, δηλ

DRR = Lαπ - Lαν

.Στα 2m που είναι η κρίσιμη απόσταση, ο απευθείας και ο ανακλώμενος ήχος έχουν ίδια στάθμη. Μεταβάλλοντας την απόσταση ξέρουμε ότι η στάθμη του ανακλώμενου ήχου δεν μεταβάλλεται, μεταβάλλεται όμως αυτή του απευθείας. Για να πάμε σε DRR = 6 σημαίνει ότι ο απευθείας ήχος πρέπει να αυξηθεί κατά 6 dB, πράγμα το οποίο θα επιτευχθεί αν η απόσταση από την πηγή μειωθεί στο μισό (νόμος της αντίστροφης απόστασης). Επομένως, DRR=6 dB θα έχουμε για απόσταση r=1 m. Για να γίνει το DRR=-6 dB, σημαίνει ότι η απόσταση από την πηγή θα πρέπει να αυξηθεί και δεδομένου πάλι του νόμου της αντίστροφης απόστασης, καταλαβαίνουμε ότι θα πρέπει να διπλασιαστεί. Επομένως, DRR=-6 dB θα έχουμε για απόσταση r=4 m.

Για να βρούμε που θα έχουμε DRR=4 dB, θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε τον γνωστό τύπο που έχουμε για τη μεταβολή της στάθμης του απευθείας ήχου συναρτήσει της απόστασης. Ας θεωρήσουμε ως L_1 τη στάθμη του απευθείας ήχου στην απόσταση r_1=2 m. Σε μια νέα απόσταση r_2, θα έχουμε μία στάθμη L_2 η οποία θα είναι 4 dB αυξημένη σε σχέση με την L_1. Ως γνωστό θα ισχύει,

$$L_2 - L_1 = 20\log\frac{r_1}{r_2}$$

όπου δεν ξέρουμε το L_1 και το L_2, ξέρουμε όμως ότι $L_2 - L_1 = 4$ dB. Αντικαθιστώντας τώρα και r_1=2, μπορούμε να βρούμε το r_2 που είναι και η απάντηση στο ερώτημα

$$4 = 20\,log\frac{2}{r_2} \Longrightarrow \frac{4}{20} = log\frac{2}{r_2} \Longrightarrow 10^{\frac{4}{20}} = 10^{\log\frac{2}{r_2}} \Longrightarrow \frac{2}{r_2} = 10^{\frac{4}{20}} \Longrightarrow r_2 = 2\cdot 10^{\frac{-4}{20}} = 1{,}26m$$

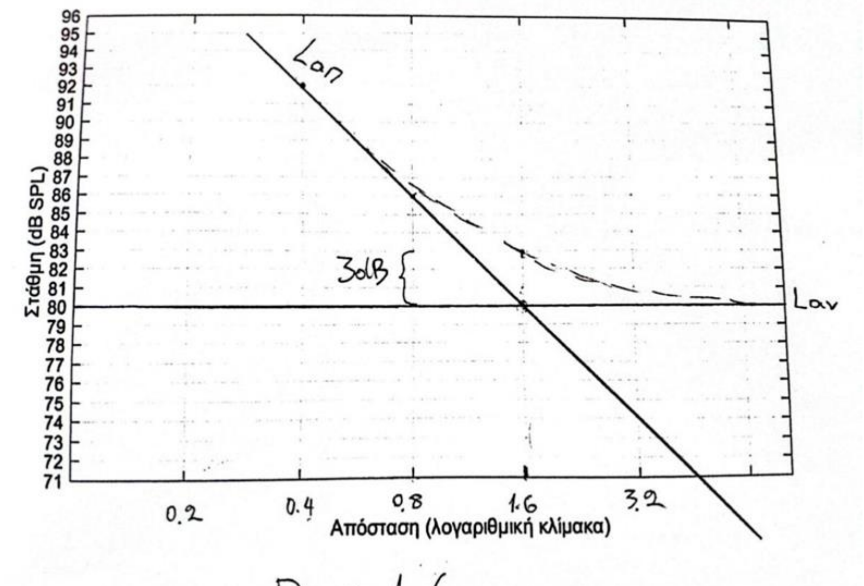
ΆΣΚΗΣΗ 2

Η στάθμη του ανακλώμενου ήχου σε ένα μεγάλο κλειστό χώρο είναι 80 dB SPL. Επίσης, η στάθμη του απευθείας ήχου σε απόσταση 0.4 m από την πηγή είναι 92 dB SPL.

1) Χρησιμοποιώντας το παρακάτω διάγραμμα, χαράξτε τις καμπύλες με τη θεωρητική μεταβολή του απευθείας ήχου ,του ανακλώμενου ήχου και του συνολικού ήχου συναρτήσει της απόστασης, δίνοντας και τιμές για την απόσταση (σε m) πάνω στο διάγραμμα.

2) Με βάση το διάγραμμα που φτιάξατε, υπολογίστε την κρίσιμη απόσταση (Dc) αιτιολογώντας την απάντησή σας.

Λύση:



$D_c = 1.6m$

Το διάγραμμα φαίνεται παραπάνω. Καταρχάς, πρέπει να προσέξουμε τη διαβάθμιση στον οριζόντιο άξονα που είναι λογαριθμική, και έχουμε διπλασιασμό της απόστασης για κάθε βήμα (0.2, 0.4, 0.8, 1.6, …). Χαράζουμε τη γραμμή του ανακλώμενου ήχου στα 80 dB, η οποία είναι μια οριζόντια γραμμή αφού ο ανακλώμενος ήχος είναι παντού ίδιος και δε μεταβάλλεται με την απόσταση. Για τη γραμμή του απευθείας ήχου, αρκεί να βρούμε δύο σημεία για να μπορέσουμε να τη χαράξουμε. Το ένα σημείο μας δίνεται απευθείας από την εκφώνηση και είναι το (0.4 m, 92 dB). Ένα δεύτερο σημείο μπορούμε να βρούμε με διάφορους τρόπους. Για παράδειγμα, αν στα 0.4 m έχουμε 92 dB, τότε μπορούμε εύκολα να υπολογίσουμε ότι στην διπλάσια απόσταση, r = 0.8 m, η στάθμη θα έχει μειωθεί κατά 6 dB επομένως ένα δεύτερο σημείο από το οποίο θα περνάει η ευθεία του απευθείας ήχου είναι το (0.8 m, 86 dB)

Ένας άλλο σημείο που μπορούμε να βρούμε είναι αυτό για το οποίο ο απευθείας ήχος θα είναι ίσος με τον ανακλώμενο, δηλαδή Lαπ = 80 dB. Επειδή τα 80 dB είναι 12 dB κάτω από τα 92, καταλαβαίνουμε ότι ο απευθείας ήχος θα γίνει 80 dB όταν έχουμε δύο διπλασιασμούς (τετραπλασιασμό) της απόστασης, δηλαδή r = 4·0.4 = 1.6 m. Άρα, το δεύτερο σημείο σε αυτήν την περίπτωση είναι το (1.6 m, 80 dB). Προφανώς από τον παραπάνω συλλογισμό καταλήγουμε ότι D_c=1.6 m.

Για να ολοκληρωθεί το διάγραμμα, χαράζουμε και την καμπύλη του συνολικού ήχου. Αυτή φαίνεται με τη διακεκομμένη γραμμή στο σχήμα και παρατηρούμε ότι εφάπτεται τόσο της ευθείας του απευθείας ήχου όσο και της ευθείας του ανακλώμενου ήχου. Για r = D_c = 1.6 m, παρατηρείστε ότι ο συνολικός ήχος είναι 3 dB πάνω από τα 80 dB.

ΆΣΚΗΣΗ 3

Ένα ηχείο έχει ευαισθησία “90 dB SPL at 1 m and 1 Watt RMS” και κατά την τοποθέτησή του σε κλειστό χώρο η κρίσιμη απόσταση έχει μετρηθεί Dc=4 m.

0) Να υπολογιστεί η στάθμη του απευθείας ήχου για απόσταση 4 m από το ηχείο και ισχύς 1 Watt RMS.

1) Πόση θα είναι η στάθμη του αντηχητικού πεδίου όταν το ηχείο δουλεύει στα 1 Watt RMS?

2) Πόση θα γίνει στάθμη του αντηχητικού πεδίου όταν το ηχείο δουλεύει στα 100 Watt RMS?

3) Να υπολογιστεί η στάθμη του απευθείας ήχου, του ανακλώμενου ήχου και η συνολική στάθμη στα 6 m από το ηχείο όταν η ισχύς είναι 100 Watt RMS.

Λύση:

0) Η προδιαγραφή ευαισθησίας ξέρουμε ότι ισχύει στο ελεύθερο πεδίο και επομένως αφορά τον απευθείας ήχο. Για 1 Watt είσοδο, η προδιαγραφή μας λέει ότι η στάθμη στο 1 m απόσταση θα είναι 90 dB SPL. Στα 4 m απόσταση, η απόσταση επιδέχεται δύο διπλασιασμούς, άρα μπορούμε απευθείας να καταλάβουμε ότι θα έχουμε πτώση στάθμης 2·(-6)=-12 dB, επομένως η στάθμη του απευθείας ήχου θα είναι Lαπ=90-12=78 dB SPL.

1) Αφού η κρίσιμη απόσταση είναι 4 m,, ο απευθείας και ανακλώμενος ήχος θα έχουν την ίδια στάθμη στα 4 m. Επομένως, σύμφωνα με την απάντηση στο ερώτημα (0), θα έχουμε Lαν = Lαπ= 78 dB SPL.

2) Προφανώς, με την αύξηση της ισχύος της πηγής, ο απευθείας και ο ανακλώμενος ήχος θα αυξηθούν κατά τη ίδια ποσότητα σε dB. Χρησιμοποιώντας τον τύπο μεταβολής κατάστασης που γνωρίσουμε από το μάθημα της Ηλεκτρακουστικής, μπορούμε να υπολογίσουμε ότι

$$L_2 - L_1 = 10 \log \frac{w_2}{w_1} \Longrightarrow L_2 - 78 = 10\ log\frac{100}{1} \Longrightarrow L_2 = 78 + 20 = 98\ dB\ SPL,$$

Άρα η απάντηση είναι ότι η στάθμη του αντηχητικού πεδίου θα γίνει 98 dB SPL όταν η πηγή δουλεύει στα 100 Watt RMS.

3) Για τον ανακλώμενο ήχο ξέρουμε ότι στα 100 Watt, Lαν=98 dB SPL και ότι αυτή η τιμή δε μεταβάλλεται με την απόσταση. Για τον απευθείας ήχο, θα πρέπει να τον υπολογίσουμε για d= 6 m και για 100 Watt. Από το ερώτημα (2) ξέρουμε ότι στα 4 m και για 100 Watt, Lαπ =98 dB SPL. Άρα, παίρνουμε μεταβολή κατάστασης όπου το μόνο που αλλάζει είναι η απόσταση, θεωρώντας L1=98 dB και d1=4 m:

$$L_2 - L_1 = 20 \log \frac{d_1}{d_2}, \Longrightarrow L_2 - 98 = 20\ log\frac{4}{6} \Longrightarrow L_2 = 98 + 20\ log\frac{4}{6} = 94.5 \text{ dB SPL.}$$

Η στάθμη του συνολικού ήχου μπορεί τώρα να υπολογιστεί με βάση τον τύπο για την πρόσθεση των ηχητικών πηγών

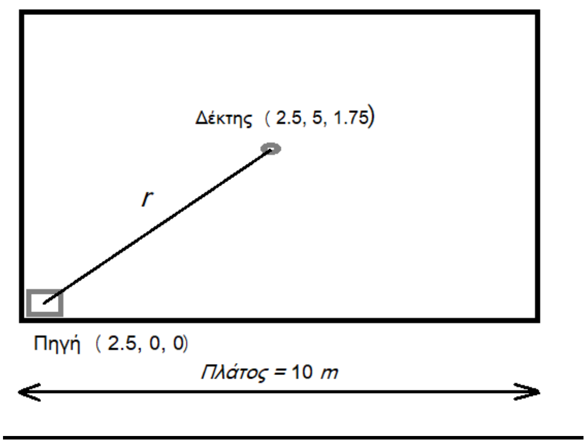
$$L_{o\lambda} = 10\ \ log\left(10^{\frac{L_{\alpha\pi}}{10}} + 10^{\frac{L_{\alpha\nu}}{10}}\right) = 10\ \ log(10^{9,45} + 10^{9,8}) = 99,6 dB\ SPL.$$

Μάθημα 8ο

ΆΣΚΗΣΗ 1

Δωμάτιο με διαστάσεις Μήκος = 5 , Πλάτος = 10 και Ύψος = 3.5 m περιλαμβάνει ισοτροπική ηχητική πηγή ισχύος 10 μW στην συχνότητα των 1000 Hz, τοποθετημένη στο κέντρο της ακμής του τοίχου των 5 m. Αν οι συντελεστές απορρόφησης για τη συχνότητα των 1000 Hz είναι $\alpha_{πατώματος}$=0.1, $\alpha_{τοίχων}$=0.02 και $\alpha_{οροφής}$=0.26, να βρεθεί η στάθμη του ανακλώμενου ήχου, του απευθείας ήχου και η συνολική ηχητική στάθμη στο κέντρο του δωματίου, δηλαδή στο σημείο (2.5, 5, 1.75). Επίσης, για το ίδιο σημείο να υπολογιστεί ο λόγος απευθείας σήματος προς ανακλώμενο (DRR).

Λύση:



Από τα δεδομένα καταλαβαίνουμε ότι η πηγή είναι στο σημείο (2.5, 0, 0) και αφού είναι στην ακμή δύο τοίχων, σύμφωνα με τη θεωρία ο συντελεστής κατευθυντικότητας που θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν είναι ο Q=4. Από Πυθαγόρειο μπορώ να υπολογίσω ότι για την απόσταση r μεταξύ πηγής και δέκτη θα ισχύει $r^2 = 5^2 + 1{,}75^2 = 28$.

Επίσης με βάση τις διαστάσεις του δωματίου μπορώ να υπολογίζω τα παρακάτω εμβαδά:

$S_{τοίχων} = 2\times5\times3{,}5 + 2\times10\times3{,}5 = 35+70 = 105\ m^2$

$S_{οροφής} = 5\times10 = 50\ m^2$

$S_{πάτωμα} = 50\ m^2$

$S_{ολικό} = 205\ m^2$

Καθώς και το μέσο συντελεστή απορρόφησης

$$\bar{\alpha} = \frac{105\cdot0{,}02 + 50\cdot0{,}1 + 50\cdot0{,}26}{205} = 0{,}085$$

Άρα $\bar{\alpha} < 0{,}1\ και\ μπορώ\ να\ πω\ R \cong A = 205\cdot0{,}085 = 17{,}4$

Αναφορικά με τη στάθμη ισχύος της πηγής, μπορώ να την υπολογίσω με βάση τον τύπο που ξέρουμε από τη θεωρία:

$$L_w = 10\log\frac{10^{-5}}{10^{-12}} = 10\,log\,10^{-5-(-12)} = 10\,log\ 10^{7} = 70\text{ dB}$$

Η στάθμη του ανακλώμενου ήχου στο δωμάτιο θα είναι:

$$L_{\alpha\nu} = L_w + 10\log\frac{4}{R} = 70 - 6{,}4 = 63{,}6dB\ SPL$$

Ενώ η στάθμη του απευθείας ήχου θα είναι

$$L_{\alpha\pi} = L_w + 10\log\frac{Q}{4\pi r^2} = 70 + 10\ log\frac{4}{4\pi\cdot 28} = 70 - 19{,}4 = 50{,}5dB\ SPL$$

Προσθέτοντας απευθείας και ανακλώμενο ήχο βρίσκω τη απευθείας ήχου:

$$L_{o\lambda} = 10\ log\left(10^{\frac{L_{\alpha\pi}}{10}} + 10^{\frac{L_{\alpha\nu}}{10}}\right) = 10\ log(10^{5{,}05} + 10^{6{,}36}) = 63{,}8dB\ SPL$$

Ο λόγος απευθείας σήματος προς ανακλώμενο είναι DRR = $L_{\alpha\pi} - L_{\alpha\nu}$ = 50,5-63,8=-13,3 dB.

ΆΣΚΗΣΗ 2

Για μια πηγή που έχει υπολογιστεί ότι πετυχαίνει Dc=4 m μέσα σε ένα κλειστό χώρο, πόσο θα γίνει το Dc αν **(1)** το ηχείο αντικατασταθεί με άλλο ηχείο που έχει τετραπλάσιο συντελεστή κατευθυντικότητας Q, **(2)** ο κλειστός χώρος χτιστεί με τα ίδια υλικά αλλά με κλίμακα 2:1, **(3)** ο ίδιος χώρος χτιστεί με το διπλάσιο μέσο συντελεστή απορρόφησης? (υποθέτουμε ότι ο μέσος συντελεστής απορρόφησης είναι σε κάθε περίπτωση μικρότερος του 0.1)

Λύση:

1) Έστω D_{c1} η κρίσιμη απόσταση στην αρχική κατάσταση όπου είναι ίση με 4 m. Από τη θεωρία γνωρίζω ότι όταν $\bar{\alpha} < 0.1$ τότε η σταθερά δωματίου R είναι πρακτικά ίση με την απορρόφηση που είναι ίση με $A = S\bar{\alpha}$. Σε αυτήν την περίπτωση για την κρίσιμη απόσταση ισχύει η σχέση

$$\mathrm{D_C} = \frac{\sqrt{\mathrm{QS\bar{a}}}}{7}. \tag{8.1}$$

Τετραπλάσιος συντελεστής απορρόφησης Q σημαίνει ουσιαστικά ότι έρχομαι σε μια νέα κατάσταση όπου η αρχική ποσότητα Q αντικαθίσταται από την ποσότητα 4Q. Έστω D_{c2} η κρίσιμη απόσταση στη νέα κατάσταση, τότε προφανώς θα ισχύει

$$D_{C_2} = \frac{\sqrt{4QS\bar{a}}}{7}. \tag{8.2}$$

Διαιρώντας τη Σχέση (8.2) με την (8.1) κατά μέλη προκύπτει

$$\frac{D_{C_2}}{D_{C_1}} = \frac{\sqrt{4QS\bar{a}}}{\sqrt{QS\bar{a}}} = \sqrt{4} = 2 \Longrightarrow D_{C_2} = 2D_{C_1} = 8m$$

Δηλαδή η κρίσιμη απόσταση αυξάνεται (όπως και ήταν λογικό) και γίνεται ίση με 8 m.

2) Μπορώ να σκεφτώ ως παράδειγμα ένα ορθογώνιο δωμάτιο διαστάσεων L_x , L_y , L_z και ότι από εκεί (κατάσταση 1) πάω σε μία νέα κατάσταση με διαστάσεις $2L_x$, $2L_y$, $2L_z$. Συμπεραίνουμε ότι διπλασιασμός των διαστάσεων σημαίνει τετραπλασιασμό των εμβαδών! Άρα αν S_1 το εμβαδό των επιφανειών στην κατάσταση 1 τότε στην κατάσταση 2 θα ισχύει

$$S_2 = 4S_1 \implies S_2\bar{a} = 4S_1\bar{a} \implies A_2 = 4A_1$$

Δηλαδή η απορρόφηση στο δωμάτιο θα τετραπλασιαστεί. Ξανά παίρνοντας το λόγο των κρίσιμων αποστάσεων στη κατάσταση 1 και 2 καταλήγω ότι

$$\frac{D_{C_2}}{D_{C_1}} = \frac{\sqrt{Q4S_1\bar{a}}}{\sqrt{QS_1\bar{a}}} = \sqrt{4} = 2 \implies D_{C_2} = 2D_{C_1} = 8m$$

Επομένως η κρίσιμη απόσταση διπλασιάζεται όπως και στο ερώτημα (1).

3) Με παρόμοιο σκεπτικό, μπορώ να πάρω το λόγο ανάμεσα σε δύο καταστάσεις, μία με μέσο συντελεστή απορρόφησης $\bar{a}$ και μία με μέσο συντελεστή απορρόφησης $2\bar{a}$. Θα ισχύει

$$\frac{D_{C_2}}{D_{C_1}} = \frac{\sqrt{QS2\bar{a}}}{\sqrt{QS\bar{a}}} = \sqrt{2} \implies D_{C_2} = \sqrt{2}D_{C_1} = 4\sqrt{2} = 5{,}7m,$$

Επομένως θα έχω πάλι αύξηση της κρίσιμης απόστασης κατά ένα παράγοντα ίσο με $\sqrt{2}$.

Μάθημα 9ο και 10ο

Λυμένες ασκήσεις για τους μικρούς κλειστούς χώρους και τα ορθογώνια δωμάτια θα βρείτε στο φυλλάδιο «Σημειώσεις θεωρίας για τα ορθογώνια δωμάτια», διαθέσιμα και αυτά στο eclass του μαθήματος.