

3^ο ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ: Μέτρηση του Συντελεστή Ηχοαπορρόφησης σε Θάλαμο Αντήχησης

Σπύρος Κουζούπης - Σηφάκης Μηνάς
Έκδοση 1.1 – 26/02/2008

Σκοπός της Εργαστηριακής Άσκησης

Η άσκηση αυτή έχει ως στόχο την εφαρμογή της μεθόδου μέτρησης του συντελεστή ηχοαπορρόφησης ακουστικών υλικών που χρησιμοποιούνται για επικάλυψη τοίχων ή οροφών, και της ισοδύναμης επιφάνειας ηχοαπορρόφησης διαφόρων αντικειμένων όπως π.χ. ηχοαπορροφητών χώρου, επίπλων, ανθρώπων, ηχοαπορροφητικών χωρισμάτων γραφείων κ.λ.π. Δεν προορίζεται όμως για μέτρηση των χαρακτηριστικών ηχοαπορρόφησης που επιτυγχάνεται με χρήση συνηχητών.

Θεωρία Άσκησης Εργαστηρίου

Υποθέτουμε ότι υπάρχει μία ηχητική πηγή σε ένα κλειστό χώρο. Η στάθμη της ηχητικής πίεσης που υπάρχει μέσα στο χώρο καθώς και ο ρυθμός ελάττωσης της πίεσης όταν απότομα διακοπεί η εκπομπή της πηγής, καθορίζονται από τα χαρακτηριστικά ηχοαπορρόφησης των περατωτικών επιφανειών του κλειστού χώρου και των αντικειμένων που υπάρχουν μέσα σ' αυτόν. Η γνώση των χαρακτηριστικών ηχοαπορρόφησης των επιφανειών, συνήθως με τη μορφή κατάλληλης μέσης τιμής πάνω σε όλες τις γωνίες πρόσπτωσης, είναι πολύ χρήσιμη γιατί μπορεί να χρησιμοποιηθεί στον ακουστικό σχεδιασμό και στην ηχοαπορροφητική βελτίωση ενός χώρου, συνδέεται δε άμεσα με τον χρόνο αντήχησης. Δεδομένου ότι σε τυπικούς κλειστούς χώρους τα ηχητικά κύματα οδεύουν προς ακαθόριστες κατευθύνσεις, είναι βολικό και λογικό να επιλέξουμε σαν απαίτηση για την εγκυρότητα αυτού του είδους των μετρήσεων, το ηχητικό πεδίο να είναι διάχυτο. Δηλαδή η ηχητική ένταση πρέπει να είναι ανεξάρτητη της θέσης μέσα στο δωμάτιο και η γωνία πρόσπτωσης ενός κύματος πάνω σε μία επιφάνεια του δωματίου πρέπει να είναι τυχαία.

Σε αυτό το εργαστήριο οι μετρήσεις των ακουστικών μεγεθών σε αντηχητικό πεδίο είναι απαραίτητες, διότι λαμβάνονται υπόψη οι συνθήκες τοποθέτησης των διαφόρων αντικειμένων. Επιπλέον για ορισμένα είδη αντικειμένων είναι ο μόνος τρόπος να μετρηθεί η ηχοαπορρόφηση, όπως π.χ. καθίσματα, κινητά χωρίσματα κ.λ.π.

Πρέπει να τονιστεί ότι για να έχουν εγκυρότητα οι μετρήσεις, απαιτείται ηχητικό πεδίο περισσότερο διάχυτο από ότι συνήθως υπάρχει σε κοινά δωμάτια ή σε αίθουσες ακροατηρίου. Γι' αυτό τίθενται και επιπρόσθετοι περιορισμοί που αφορούν τη μορφή της ηχητικής διέγερσης και τις διαστάσεις του δωματίου αντήχησης, όπως θα δούμε παρακάτω.

Η μέθοδος συνίσταται στη μέτρηση των χρόνων αντήχησης σε μία αίθουσα με και χωρίς το δοκίμιο και στον υπολογισμό, από τους χρόνους αυτούς, της ισοδύναμης επιφάνειας ηχοαπορρόφησης του δοκιμίου. Οι ορισμοί βασικών μεγεθών τα οποία χρησιμοποιούμε δίδονται στη συνέχεια. Αν υποθέσουμε ότι ο θόρυβος βάθους είναι αρκετά χαμηλός, τότε ο χρόνος αντήχησης ορίζεται ως εξής:

Χρόνος Αντήχησης ενός ολικά ή μερικά κλειστού χώρου, όπου λειτουργεί μία ηχητική πηγή, είναι ο χρόνος που απαιτείται, μετά το απότομο σταμάτημα της ηχητικής πηγής, για να ελαττωθεί η στάθμη ηχητικής πίεσης κατά 60 dB. Συμβολίζεται με T , και εκφράζεται σε δευτερόλεπτα (s).

Η Ισοδύναμη Επιφάνεια Ηχοαπορρόφησης μιάς αίθουσας είναι το εμβαδό μιάς υποθετικής επιφάνειας, τελείως ηχοαπορροφητικής, χωρίς επιδράσεις ηχοπερίθλασης, η οποία, αν ήταν το μόνο ηχοαπορροφητικό στοιχείο μέσα στην αίθουσα θα έδινε χρόνο αντήχησης ίσο με το χρόνο αντήχησης της αίθουσας.

Αν η αίθουσα αντήχησης είναι κενή, το μέγεθος αυτό συμβολίζεται με A_1 , ενώ όταν η αίθουσα περιέχει και ένα δοκίμιο συμβολίζεται με A_2 . Μονάδα μέτρησης είναι το τετραγωνικό μέτρο (m^2).

Η Ισοδύναμη Επιφάνεια Ηχοαπορρόφησης ενός δοκιμίου είναι η διαφορά της ισοδύναμης επιφάνειας ηχοαπορρόφησης της αίθουσας αντήχησης με και χωρίς δοκίμιο. Συμβολίζεται με A και εκφράζεται σε τετραγωνικά μέτρα (m^2).

Συντελεστής Ηχοαπορρόφησης, ενός δοκιμίου, είναι το πηλίκο της ισοδύναμης επιφάνειας ηχοαπορρόφησης του δοκιμίου δια του εμβαδού του. Το μέγεθος αυτό ορίζεται μόνο για επίπεδο δοκίμιο, συμβολίζεται με α_S και είναι καθαρός αριθμός¹.

Προδιαγραφές και Πειραματική Διευθέτηση

- 1) Ο όγκος της αίθουσας αντήχησης πρέπει να είναι τουλάχιστον $150 m^3$. Κατά προτίμηση ο όγκος πρέπει να είναι $200 m^3$.
- 2) Εάν L_{max} είναι το μήκος του μεγαλύτερου ευθύγραμμου τμήματος που χωράει μέσα στα όρια της αίθουσας (π.χ. η μεγάλη διαγώνιος σε αίθουσα που έχει σχήμα ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου) και αν V είναι ο όγκος της αίθουσας, τότε το σχήμα της αίθουσας πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να ικανοποιείται η συνθήκη:

$$L_{max} < 1.9 V^{1/3} \quad (1)$$

Επίσης θα πρέπει οι διαστάσεις της αίθουσας, αν ληφθούν ανά δύο, να μην έχουν λόγους ίσους με τους λόγους μικρών ακέραιων αριθμών. Αυτό πρέπει να ισχύει για να κατανέμονται ομοιόμορφα στο χώρο των συχνοτήτων οι ιδιοσυχνότητες του δωματίου.

- 3) Το φθίνον ηχητικό πεδίο μέσα στην αίθουσα αντήχησης θα πρέπει να είναι διάχυτο. Για να επιτευχθεί ικανοποιητική ηχοδιάχυση, οποιοδήποτε και αν είναι το σχήμα της αίθουσας, απαιτείται γενικά η χρησιμοποίηση αιωρούμενων ηχοδιαχυτών ή περιστρεφόμενων ηχοδιαχυτών. Τα στοιχεία αυτά τα οποία θα προκαλούν την ηχοδιάχυση πρέπει να είναι από κάποιο υλικό με χαμηλή ηχοαπορρόφηση και επιφανειακή πυκνότητα η οποία να είναι τουλάχιστον 5 Kg/m^2 . Καλό είναι να υπάρχουν ηχοδιαχυτές διαφόρων μεγεθών και να έχουν

¹ Όταν ο προσδιορισμός του συντελεστή ηχοαπορρόφησης γίνεται σε αίθουσα αντήχησης, στο σύμβολό του χρησιμοποιείται ο δείκτης S , για να αποφεύγεται η σύγχυση με το συντελεστή ηχοαπορρόφησης που ορίζεται ως ο λόγος της μη ανακλώμενης ηχητικής ισχύος προς την προσπίπτουσα ηχητική ισχύ ενός επιπέδου ηχητικού κύματος που προσπίπτει σε ένα επίπεδο τοίχωμα με ορισμένη γωνία πρόσπτωσης. Αυτός είναι πάντοτε μικρότερος από τη μονάδα (εκφράζεται επίσης και σαν ποσοστό %). Ο συντελεστής ηχοαπορρόφησης που προσδιορίζεται σε αίθουσα αντήχησης (από μετρήσεις του χρόνου αντήχησης), μπορεί να έχει τιμές μεγαλύτερες της μονάδας, λόγω π.χ. του φαινομένου της ηχοπερίθλασης, και ως εκ τούτου δεν πρέπει να εκφράζεται σαν ποσοστό.

εμβαδόν (η μία όψη) από 0.8 m^2 έως 3 m^2 . Τα φύλλα πρέπει να έχουν τυχαίο προσανατολισμό και κατανομή μέσα στην αίθουσα και να είναι ελαφρά κυρτωμένα.

- 4) Η *Ισοδύναμη Επιφάνεια Ηχοαπορρόφησης* της αίθουσας αντήχησης, όταν είναι άδεια, δεν θα πρέπει να ξεπερνά τις τιμές του πίνακα παρακάτω.

Πίνακας 1

Συχνότητα (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Ισοδύναμη επιφάνεια ηχοαπορρόφησης	6.5	6.5	6.5	7.0	9.5	13.0

Αν ο όγκος της αίθουσας δεν είναι 200 m^3 , τότε οι τιμές του πίνακα, θα πρέπει να πολλαπλασιαστούν με τον παράγοντα $(V/200)^{2/3}$.

Η γραφική παράσταση της ισοδύναμης επιφάνειας ηχοαπορρόφησης της κενής αίθουσας αντήχησης σε συνάρτηση με τη συχνότητα, πρέπει να είναι ομαλή καμπύλη και να μην εμφανίζει κορυφές ή βυθίσματα που διαφέρουν περισσότερο από 15 % από τη μέση τιμή των τιμών των δύο παρακείμενων τριτοοκταβικών ζωνών.

Όσον αφορά το δοκίμιο, αν είναι επίπεδο, θα πρέπει να έχει εμβαδόν μεταξύ 10 m^2 και 12 m^2 . Αν ο όγκος V της αίθουσας είναι μεγαλύτερος από 250 m^3 , τότε το εμβαδόν του δοκιμίου θα πρέπει να πολλαπλασιαστεί με τον παράγοντα $(V/250)^{2/3}$. Πρέπει επίσης να είναι ορθογώνιο με λόγο πλάτους προς μήκος μεταξύ 0.7 και 1. Η τοποθέτηση του πρέπει να είναι τέτοια ώστε κανένα μέρος του να μην είναι πλησιέστερα από 1 m από οποιαδήποτε ακμή της περατωτικής επιφάνειας της αίθουσας. Το δοκίμιο πρέπει επίσης να εγκαθίσταται σύμφωνα με τις σχετικές προδιαγραφές που παρέχει ο κατασκευαστής. Αν το δοκίμιο είναι τέτοιο ώστε να πρέπει να στηρίζεται άμεσα σε μία από τις επιφάνειες της αίθουσας, οι πλευρές του θα πρέπει να είναι σφικτά κλεισμένες σε ένα ηχοανακλαστικό πλαίσιο ειδικά κατασκευασμένο, το οποίο δεν θα πρέπει να προεξέχει πάνω από την επιφάνεια του δοκιμίου και το πάχος δεν θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο από 2 cm. Στην περίπτωση δοκιμίου που αφήνει διάκενο αέρα πίσω του, όπως π.χ. στη περίπτωση προσομοίωσης ψευδοροφής, τα πλευρικά τοιχώματα θα πρέπει να κατασκευάζονται κάθετα προς την επιφάνεια δοκιμής, να είναι πολύ ηχοανακλαστικά και να περικλείουν τα άκρα του διάκενου και τα άκρα του δοκιμίου.

- 5) Τα διάκριτα αντικείμενα, π.χ. καθίσματα, ηχοαπορροφητές χώρου, (ή και άνθρωποι), θα πρέπει να εγκαθίστανται για τις μετρήσεις με τον ίδιο τρόπο που εγκαθίστανται τυπικά στην πράξη. Για παράδειγμα, καθίσματα και χωρίσματα γραφείων πρέπει να τοποθετούνται στο δάπεδο της αίθουσας, αλλά να μην είναι κοντύτερα από 1 m από οποιαδήποτε επιφάνεια της αίθουσας. Οι ηχοαπορροφητές χώρου πρέπει και αυτοί να μην τοποθετούνται σε απόσταση μικρότερη του 1m από οποιαδήποτε επιφάνεια της αίθουσας και από το μικρόφωνο.

Πρέπει να περιλαμβάνεται αρκετό πλήθος διάκριτων αντικειμένων (γενικά, από τρία και πάνω), ώστε να δημιουργείται μετρήσιμη μεταβολή στην ισοδύναμη επιφάνεια ηχοαπορρόφησης της αίθουσας. Αυτή πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 1 m^2 , αλλά όχι μεγαλύτερη από 12 m^2 . Αν ο όγκος V της αίθουσας είναι μεγαλύτερος από 250 m^3 , αυτές οι τιμές θα πρέπει να πολλαπλασιαστούν επί τον παράγοντα $(V/250)^{2/3}$.

Αντικείμενα τα οποία κανονικά τοποθετούνται ως μεμονωμένα αντικείμενα, πρέπει να τοποθετούνται με τυχαίο τρόπο, σε αποστάσεις τουλάχιστον 2 m, το ένα από το άλλο. Αν το

δοκίμιο είναι ένα αντικείμενο, πρέπει να δοκιμαστεί τουλάχιστον σε τρεις θέσεις, σε αποστάσεις τουλάχιστον 2 m, η μία από την άλλη και να ληφθεί η μέση τιμή των αποτελεσμάτων.

Αν το δοκίμιο περιλαμβάνει μία σειρά αντικειμένων (π.χ. καθίσματα θεάτρου, ηχοαπορροφητικά πλακίδια), θα πρέπει να εγκατασταθούν με τον ίδιο ακριβώς τρόπο όπως και στην πράξη. Όταν δοκιμάζονται ομάδες καθισμάτων με καθισμένα άτομα, τα άκρα της διάταξης θα πρέπει να περιβάλλονται με ηχοανακλαστικό υλικό, το ύψος του οποίου να είναι μέχρι 1 m. Σε άλλες περιπτώσεις το ύψος του περιβλήματος πρέπει να ποσαρμόζεται στο ύψος του δοκιμίου.

Ειδικά όσον αφορά τις κουρτίνες, όταν είναι κλειστές (δηλαδή προτεταμένες ώστε να καλύπτουν μία επιφάνεια), μπορούν να θεωρηθούν επίπεδοι ηχοαπορροφητές ή να θεωρηθούν διάκριτοι απορροφητές αν είναι ανοικτές (μαζεμένες). Οι απαιτήσεις της ελάχιστης απόστασης του 1 m από τους τοίχους ή από τις ακμές της αίθουσας, δεν εφαρμόζονται στις κουρτίνες.

Διαδικασία Μετρήσεων και Υπολογισμών

Πρέπει να χρησιμοποιηθούν τουλάχιστον τριτοκταβικά (οκταβικά για το εκπαιδευτικό αυτό εργαστήριο είναι αρκετά) φίλτρα για τον παραγόμενο ήχο στο δωμάτιο εκπομπής και ο ήχος αυτός πρέπει να είναι σταθερός με σταθερό συνεχές φάσμα στην υπό μέτρηση ζώνη. Σε κάθε ζώνη συχνοτήτων η ηχητική ισχύς πρέπει να είναι τέτοια ώστε η στάθμη ηχητικής πίεσης να είναι το λιγότερο 10 dB πάνω από τη στάθμη θορύβου βόθους.

Οι μετρήσεις πρέπει να γίνουν με τριτοκταβικά φίλτρα των οποίων οι κεντρικές συχνότητες να είναι τουλάχιστον οι ακόλουθες (σε Hz):

100, **125**, 160, 200, **250**, 315, 400, **500**, 630, 800, **1000**, 1250, 1600, **2000**, 2500, 3150, **4000**, 5000.

Η μέτρηση των χρόνων αντήχησης κατά τη διάρκεια της εργαστηριακής άσκησης θα γίνει με δύο διαφορετικά όργανα που διαθέτει το εργαστήριο. Αρχικά με ένα φορητό ηχόμετρο το οποίο έχει δυνατότητα αποθήκευσης και μεταφοράς των μετρήσεων σε υπολογιστή για περαιτέρω επεξεργασία και στη συνέχεια (αν είναι εφικτό) με μία περισσότερο περίπλοκη μονάδα της ίδιας εταιρείας (κάρτα Symphonie της εταιρίας 01 dB-Stel σε συνδυασμό με λογισμικό σε PC). Με τη χρήση αυτών των οργάνων δεν απαιτείται να γίνει διάγραμμα της πτώσης του ηχητικού πεδίου και να εξαχθεί από αυτό η κλίση του. Ο χρόνος αντήχησης υπολογίζεται αυτόματα από τις ίδιες τις συσκευές.

Ο αριθμός μετρήσεων (της πτώσης του ηχητικού πεδίου) που απαιτείται για κάθε ζώνη συχνοτήτων είναι 2 τουλάχιστον (αν και για καλύτερη ακρίβεια στις χαμηλές ζώνες, καλό είναι να γίνουν παραπάνω μετρήσεις με διαφορετικές διατάξεις πηγής-μικροφώνου).

Ο χρόνος αντήχησης της αίθουσας σε κάθε ζώνη συχνοτήτων εκφράζεται από την μέση αριθμητική τιμή του συνολικού αριθμού μετρήσεων του χρόνου αντήχησης που έγιναν για τη ζώνη εκείνη. Οι μέσοι χρόνοι αντήχησης T_1 και T_2 σε κάθε ζώνη συχνοτήτων θα πρέπει να υπολογίζονται και να

εκφράζονται τουλάχιστον με δύο δεκαδικά ψηφία. Η *ισοδύναμη επιφάνεια ηχοαπορρόφησης* A_1 σε m^2 της αίθουσας αντήχησης όταν είναι κενή, θα πρέπει να υπολογίζεται από τον τύπο,

$$A_1 = \frac{55.3 V}{c T_1} \quad (2)$$

όπου V είναι ο όγκος σε m^3 της αίθουσας αντήχησης όταν είναι κενή, c είναι η ταχύτητα του ήχου στον αέρα σε m/s , και T_1 είναι ο χρόνος αντήχησης σε s της αίθουσας όταν είναι κενή. Για τον προσδιορισμό της ταχύτητας του ήχου χρησιμοποιείται ο τύπος $c=331+0.6 \theta$ όπου θ είναι η θερμοκρασία του αέρα σε $^{\circ}C$.

Η *ισοδύναμη επιφάνεια ηχοαπορρόφησης* A_2 σε m^2 , της αίθουσας αντήχησης όταν αυτή περιέχει το δοκίμιο, θα πρέπει να υπολογίζεται από τον τύπο,

$$A_2 = \frac{55.3 V}{c T_2} \quad (3)$$

όπου V και c έχουν την ίδια σημασία όπως και πριν, ενώ T_2 είναι ο χρόνος αντήχησης της αίθουσας σε s , όταν έχει τοποθετηθεί το δοκίμιο.

Η *ισοδύναμη επιφάνεια ηχοαπορρόφησης* A του δοκιμίου σε m^2 , θα πρέπει να υπολογίζεται από τον τύπο,

$$A = A_2 - A_1 = 55.3 \frac{V}{c} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \quad (4)$$

όπου V , c , T_1 και T_2 έχουν την ίδια σημασία όπως και πριν.

Ο υπολογισμός του a_s ενός επιπέδου ηχοαπορροφητή θα πρέπει να υπολογίζεται από τον τύπο,

$$a_s = \frac{A}{S} \quad (5)$$

όπου A είναι η *ισοδύναμη επιφάνεια ηχοαπορρόφησης* σε m^2 που υπολογίστηκε μόλις προηγουμένως, και S το εμβαδόν του δοκιμίου σε m^2 .

Στην περίπτωση των διάκριτων ηχοαπορροφητών, το αποτέλεσμα της μέτρησης πρέπει γενικά να εκφράζεται ως *ισοδύναμη επιφάνεια ηχοαπορρόφησης* ανά αντικείμενο. Προσδιορίζεται με διαίρεση της A με τον αριθμό των αντικειμένων που έχουν χρησιμοποιηθεί στην μέτρηση.

Εργασίες

Στο εργαστήριο αυτό θα γίνει:

α) Μέτρηση ενός δοκιμίου το οποίο καλύπτει σχεδόν όλη την επιφάνεια ενός τοίχου του εργαστηρίου. Το δοκίμιο αυτό αποτελείται από 8-9 μικρότερες ορθογώνιες επιφάνειες οι οποίες τοποθετούνται κατάλληλα ώστε να αποτελέσουν μία ενιαία επιφάνεια. Το υλικό από το οποίο αποτελούνται οι ορθογώνιες επιφάνειες είναι χονδρό ύφασμα εξωτερικά, ενώ εσωτερικά υπάρχει ορυκτοβάμβακας.

β) Μέτρηση διάκριτων αντικειμένων. Στην συγκεκριμένη περίπτωση θα μετρηθεί η ηχοαπορροφητικότητα 9 καθήμενων ατόμων, όπως συμβαίνει π.χ. στη περίπτωση μίας θεατρικής αίθουσας.

Η παραδοτέα έκθεση του εργαστηρίου πρέπει να περιλαμβάνει τα ακόλουθα:

- 1) Σύντομη περιγραφή της όλης διαδικασίας και των επί μέρους συσκευών με τις οποίες έγιναν οι μετρήσεις. Ειδικότερα περιγράψτε με ποιά διαδικασία (εσωτερικά) το όργανο υπολογίζει το χρόνο αντήχησης.
- 2) Περιγραφή του σχήματος της αίθουσας αντήχησης, τις διαστάσεις, τον όγκο της και το ολικό εμβαδόν των επιφανειών της αίθουσας.
- 3) Περιγραφή του υπό μέτρηση δοκιμίου, το εμβαδόν S της επιφανείας του, τη στήριξη και τη θέση του μέσα στην αίθουσα αντήχησης (κάντε και ένα απλό σχέδιο της αίθουσας αν είναι απαραίτητο).
- 4) Το είδος του θορύβου που χρησιμοποιήθηκε και τη θερμοκρασία που επικρατούσε στο δωμάτιο.
- 5) Πίνακες με τους μέσους χρόνους αντήχησης T_1 και T_2 σε κάθε συχνότητα.
- 6) Για τους επίπεδους απορροφητές που χρησιμοποιήθηκαν, πίνακα με τον συντελεστή ηχοαπορρόφησης α_s ανά συχνότητα και διάγραμμα (καμπύλη) συναρτήσεως της συχνότητας.
- 7) Για τα διάκριτα αντικείμενα που χρησιμοποιήθηκαν, την ισοδύναμη επιφάνεια ηχοαπορρόφησης ανά αντικείμενο. Στη γραφική παράσταση τα σημεία της μέτρησης πρέπει να ενώνονται με ευθείες γραμμές (ή να γίνει κάποια προσαρμογή καμπύλης). Ο οριζόντιος άξονας συχνότητων να είναι σε λογαριθμική κλίμακα και ο κάθετος που θα δίνει την ισοδύναμη επιφάνεια ηχοαπορρόφησης ή τον συντελεστή ηχοαπορρόφησης, σε γραμμική κλίμακα.

Βιβλιογραφία

[1] *Εφαρμοσμένη Ακουστική*, Σκαρλάτος Δ., 2003, Εκδόσεις Φιλομάθεια.

[2] *Ακουστική και Κτιριακές Εφαρμογές*, Δ. Ευθυμιάτος, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2007.