

Σχολή



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Πολιτικών Μηχανικών

ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΜΦΙΘΕΑΤΡΟΥ



ΚΟΥΦΟΥΔΗΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ

Γ. ΠΟΥΛΑΚΟΣ

ΑΘΗΝΑ ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2011

ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΜΦΙΘΕΑΤΡΟΥ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

Κεφάλαιο 2 Θεωρητικά στοιχεία

2.1. Γενικά

- 2.1.1. Ο ήχος και οι ηχητικές παράμετροι
- 2.1.2. Οκτάβα, τριτοοκτάβα
- 2.1.3. Ηχητικό πεδίο, ηχητική πίεση, στάθμη ηχητικής πίεσης [dB], ηχητική ενέργεια
- 2.1.4. Η αντίληψη της στάθμης του ήχου
- 2.1.5. Κατευθυντικότητα της ανθρώπινης φωνής

2.2. Ακουστικά φαινόμενα που παρατηρούνται σε κλειστούς χώρους – Σχεδιασμός αξιοποίησής τους

- 2.2.1. Ανάκλαση
- 2.2.2. Διάχυση
- 2.2.3. Περίθλαση
- 2.2.4. Ηχοαπορρόφηση
 - 2.2.4.1. Πορώδη ηχοαπορροφητικά υλικά
 - 2.2.4.2. Συνηχητές μεμβράνης χαμηλών συχνοτήτων
 - 2.2.4.3. Συνηχητές κοιλότητας μεσαίων συχνοτήτων

2.3. Ακουστικά προβλήματα που παρατηρούνται σε κλειστούς χώρους – Σχεδιασμός αντιμετώπισής τους

- 2.3.1. Συντονισμός
- 2.3.2. Ηχώ
- 2.3.3. Πλαταγισμός
- 2.3.4. Εστιασμός του ήχου

2.4. Ακουστικά κριτήρια χώρων διδασκαλίας

- 2.4.1. Ευκρίνεια του ήχου της ομιλίας (speech intelligibility)
- 2.4.2. Φυσικά κριτήρια για την ευκρίνεια του ήχου της ομιλίας

2.5. Αρχές ακουστικού σχεδιασμού των χώρων διδασκαλίας

- 2.5.1. Σχεδιασμός βελτιστοποίησης του απ' ευθείας ήχου
- 2.5.2. Σχεδιασμός εξασφάλισης άφθονων πρώτων ανακλάσεων
 - 2.5.2.1. Σχεδιασμός της οροφής των χώρων διδασκαλίας
 - 2.5.2.2. Σχεδιασμός των πλευρικών παρειών των χώρων διδασκαλίας
- 2.5.3. Σχεδιασμός ελαχιστοποίησης θορύβου βάθους
- 2.5.4. Βελτιστοποίηση του χρόνου αντήχησης - Υπολογισμός του βέλτιστου όγκου του χώρου - Επιλογή ηχοαπορροφητικών υλικών
- 2.5.5. Βελτιστοποίηση του χρόνου αντήχησης με βάση την ελληνική γλώσσα

Κεφάλαιο 3. Βιβλιογραφική αναδρομή

Κεφάλαιο 4. Σχεδιασμός μετρήσεων

4.1. Γενικές παρατηρήσεις

4.2. Χώρος διδασκαλίας

4.3. Φυσικές ακουστικές μετρήσεις

- 4.3.1. Γενικά

ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΜΦΙΘΕΑΤΡΟΥ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

- 4.3.2. Μετρήσεις θορύβου βάθους
- 4.3.3 Μετρήσεις στάθμης εντάσεως του ήχου (dB)
- 4.3.4. Μετρήσεις χρόνου αντήχησης
- 4.3.5. Συνδεσμολογία

Κεφάλαιο 5. Μετρήσεις και αποτελέσματα

Αμφιθέατρο Γ18 Κτιρίου Γκίνη, Συγκρότημα Πατησίων

- 5.1. Χρόνος Αντήχησης
- 5.2. Υπολογισμός θεωρητικού χρόνου αντήχησης σε αμφιθέατρο χωρίς ακροατήριο
- 5.3. Υπολογισμός χρόνου αντήχησης για αμφιθέατρο με πληρότητα ακροατηρίου κατά τα 2/3.
- 5.4. Υπολογισμός χρόνου αντήχησης για αμφιθέατρο με πληρότητα ακροατηρίου
- 5.5. Αξιολόγηση αποτελεσμάτων
- 5.6. Μετατροπή του εξεταζόμενου αμφιθεάτρου σε ιδανικό χώρο ακρόασης για διδασκαλία
- 5.7. Θόρυβος βάθους
- 5.8 Στάθμη εντάσεως του ήχου

Κεφάλαιο 6. Συμπεράσματα

Βιβλιογραφία

Κατάλογος Πινάκων

Κατάλογος Σημάτων

Παράρτημα

Αμφιθέατρο Γ20 κτιρίου Γκίνη, συγκρότημα Πατησίων

- Π.1. Κάτοψη
- Π.2. Θέσεις μετρήσεως στάθμης εντάσεως του ήχου
- Π.3 Θέσεις μετρήσεως χρόνου αντήχησης

Εισαγωγή

Μία από τις πέντε αισθήσεις, η οποία παίζει κυρίαρχο ρόλο στην καθημερινότητα μας και κατ'επέκταση στη ζωή μας, είναι η ακοή. Η ακοή διεγείρεται από τους διαφόρων μορφών ήχους φυσικούς ή τεχνητούς, απλούς ή σύνθετους. Τα ηχητικά ερεθίσματα γίνονται συνεχώς αντιληπτά από όλες τις κατευθύνσεις. Όταν ένας ήχος εκπέμπεται στον αέρα από ένα σημείο, δημιουργείται μια σειρά από σφαιρικά κύματα, που μεταδίδονται προς τα έξω με μορφή ομοκέντρων σφαιρών, όλο και μεγαλύτερας διαμέτρου και έτσι η ενέργεια σε κάθε σημείο μειώνεται συνεχώς, καθώς και η απόσταση από τη πηγή αυξάνει.

Όπως είναι λογικό, τα ηχητικά κύματα διέπονται από διάφορους φυσικούς κανόνες που εκτός των άλλων καθορίζουν εν τέλει και τον ακριβή τρόπο διάδοσής τους στον χώρο. Όλα αυτά τα γνωρίσματα των ηχητικών κυμάτων έχουν μελετηθεί και αποτέλεσμα αυτής της μελέτης είναι η δημιουργία του κλάδου της ακουστικής. Η ακουστική με απλά λόγια, θα μπορούσε να οριστεί ως ο τομέας που συνδέει τον ήχο και τις ιδιότητές του με την αρχιτεκτονική των χώρων και τον τρόπο τοποθέτησης των υλικών σε αυτούς. Είναι εύκολα αντιληπτό τον μεγάλο ρόλο που παίζει ο κλάδος της ακουστικής στην κατασκευή και διαμόρφωση αιθουσών, προορισμένες για διαλέξεις ή εκδηλώσεις, στις οποίες η σωστή και επαρκής ακουστική του χώρου είναι αναγκαία.

Θεωρώτας έναν ακροατή σε ένα χώρο, με αυξημένες απαιτήσεις ακουστικής, προσλαμβάνει τα ηχητικά κύματα, κυρίως με τρεις τρόπους. Αρχικά και κύρια δέχεται τον κατ' ευθείαν ήχο (direct sound) και δευτερευόντως τον ήχο που έρχεται μετά από ανάκλαση σε μία επιφάνεια. Αυτός ο τελευταίος ήχος, πάλι, είναι εκείνος που προέρχεται από τις πρώτες ανακλάσεις (first reflections) και εκείνος, που προέρχεται από τις μετέπειτα. Αυτοί οι τρεις τρόποι πρόσληψης ηχητικών κυμάτων είναι οι πιο βασικοί παράγοντες, που καθορίζουν το ακουστικό περιβάλλον ενός κλειστού χώρου. Κατά συνέπεια των ανακλάσεων έχουμε την αντήχηση που είναι το συνολικό ηχητικό αποτέλεσμα των ανακλάσεων του ήχου. Η αντήχηση δεν σβήνει αμέσως αλλά σταδιακά μετά το σταμάτημα του πρωτογενούς ήχου, αυξάνοντας το συνολικό επίπεδο του θορύβου και δημιουργώντας προβλήματα στην ομιλία, ακοή και αυτοσυγκέντρωση των ανθρώπων που βρίσκονται στην αίθουσα.

Η μελέτη της ακουστικής των χώρων γίνεται με διάφορα μοντέλα, πχ από τα εμπειρικά μοντέλα των Sabine και Eyring που παρέχουν προσεγγιστικές εκτιμήσεις ακρίβειας οκτάβας, μέχρι την κυματική θεωρία με τους κανονικούς ιδιορυθμούς, τα υπολογιστικά μοντέλα των μεθόδων των πεπερασμένων στοιχείων FEM (Finite Element Method), των συνοριακών στοιχείων BEM (Boundary Element Method) και των πεπερασμένων διαφορών στο πεδίο του χρόνου FDTD (Finite Difference Time Domain) έως και τη γεωμετρική θεωρία διάδοσης με ηχητικές ακτίνες (μέθοδοι ακτίνων, ειδώλων, ακουστικών δεσμών).

Στην παρούσα εργασία θα ασχοληθούμε με την ακουστική του αμφιθεάτρου 20 του ισογείου του κτιρίου Γκίνη, συγκρότημα Πατησίων, που αποτελεί έναν καθημερινό τόπο διαβίωσης των φοιτητών και ως εκ τούτου πρέπει να πληρεί τις

ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΜΦΙΘΕΑΤΡΟΥ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΕΙΣΑΓΩΓΗ

απαραίτητες προϋποθέσεις, έτσι ώστε να προσφέρει ένα ευχάριστο ακουστικό αίσθημα στους ακροατές, καθιστώντας τους ικανούς να αντιλαμβάνονται με ευκολία τις διαλέξεις που λαμβάνουν χώρα.

Παρατηρώντας το αμφιθέατρο και έχοντας παρακολουθήσει διαλέξεις σε αυτό, κρίνουμε ότι ο ακουστικός σχεδιασμός του ήταν ανεπαρκής, με αποτέλεσμα να μην αποδίδει ηχητικά. Ο στόχος της εργασίας μας είναι η διερεύνηση του αμφιθεάτρου ως προς ακουστικής άποψης.

Η εργασία, με δεδομένους τους περιορισμούς που ενέχονται σε επί τόπου μετρήσεις καθώς και όσον αφορά τη διαθεσιμότητα των κατάλληλων οργάνων ακουστικών μετρήσεων από το εργαστήριο Ηχοτεχνίας του Ε.Μ.Π., βασίζεται σε φυσικές ακουστικές μετρήσεις, δηλαδή μετρήσεις του χρόνου αντήχησης, της στάθμης εντάσεως του ήχου και του θορύβου βάθους, οι οποίες διεξήχθησαν σε κλειστό χώρο διδασκαλίας του Ε.Μ.Π χωρίς ακροατήριο.

Πιο αναλυτικά, στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις μας για τον θόρυβο βάθους, την στάθμη εντάσεως του ήχου και τον χρόνο αντήχησης καθώς και οι μετρήσεις που προέκυψαν για το καθένα από αυτά. Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων και γίνεται η κατάλληλη επεξεργασία και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Στο κεφάλαιο 6, έχουμε πλέον τη δυνατότητα να συμπεράνουμε και να επισημάνουμε τα προβλήματα ως προς την ακουστική του αμφιθεάτρου.

2.1. Γενικά

2.1.1. Ο ήχος και οι ηχητικές παράμετροι

Ο ακουστικός σχεδιασμός υφίσταται λόγω του φυσικού φαινομένου του *ήχου*, δηλαδή της μηχανικής διαταραχής, η οποία διαδίδεται σε ένα ελαστικό μέσο με συγκεκριμένη ταχύτητα, διεγείροντας το αισθητήριο της ακοής και προκαλώντας ακουστικό αίσθημα. Ο όρος ήχος επεκτείνεται, έτσι ώστε να μπορεί να περιλαμβάνει κάθε διαταραχή, ανεξάρτητα από τη συχνότητα, που μπορεί να διαδοθεί μέσα σε ένα ελαστικό μέσο. Εμείς θα ασχοληθούμε με τον ήχο ο οποίος διαδίδεται στον ατμοσφαιρικό αέρα.

Ένα φυσιολογικό αντί, σε νεαρή ηλικία, ακούει ήχους στο φάσμα συχνοτήτων από 20 ως 20.000 Hz . Συχνότητες μεγαλύτερες από 10.000 Hz θεωρούνται αμελητέας σπουδαιότητας, όσον αφορά την ευκρίνεια του ήχου.

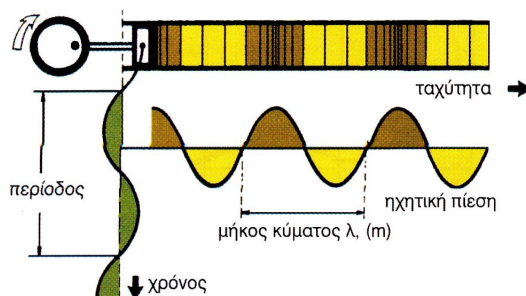
Η *ταχύτητα του ήχου* είναι η ταχύτητα διάδοσης των ηχητικών κυμάτων, συμβολίζεται με C και μετριέται σε m/s (μέτρα ανά δευτερόλεπτο). Η ταχύτητα του ήχου στα στερεά και τα υγρά διαφέρει από αυτή στον αέρα και εξαρτάται από το υλικό του μέσου. Ένας επιπλέον παράγοντας που επηρεάζει τη συγκεκριμένη παράμετρο είναι η θερμοκρασία. Στην ακουστική χώρων χρησιμοποιούμε την ταχύτητα του ήχου στον αέρα σε θερμοκρασία δωματίου που λαμβάνεται γύρω στους $20^{\circ}C$, είναι ίδια για όλες τις συχνότητες και ισούται με $340 m/s$.

Η *περίοδος του ήχου* είναι ο χρόνος που χρειάζεται το ηχητικό κύμα για να πραγματοποιήσει έναν πλήρη κύκλο, συμβολίζεται με T και μετριέται σε S (δευτερόλεπτα).

Ως *συχνότητα του ήχου* ορίζεται ο αριθμός των ταλαντώσεων σε ένα δευτερόλεπτο, συμβολίζεται με f , μετριέται σε Hz (Hertz) και είναι το αντίστροφο της περιόδου, δηλαδή $f = \frac{1}{T}$.

Το *μήκος κύματος του ήχου* αποτελεί την απόσταση που διανύει το ηχητικό κύμα μέχρι να ολοκληρωθεί ένας πλήρης κύκλος, συμβολίζεται με λ και η μονάδα μέτρησής του είναι το m (μέτρο). Το μήκος κύματος του ήχου παίζει σημαντικό ρόλο στο σχεδιασμό χώρων ακρόασης ομιλίας, από τη στιγμή που το μέγεθος των ανακλαστήρων, των διαχυτών, των ηχοαπορροφητών συνδέεται άμεσα με τη συχνότητα.

Οι ηχητικές παράμετροι (μήκος κύματος του ήχου, ταχύτητα, περίοδος, συχνότητα) συνδέονται με τη σχέση $c = \frac{\lambda}{T}$ ή $c = \lambda * f$.



ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΜΦΙΘΕΑΤΡΟΥ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2-ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Σχήμα 2.1. Σχηματική παράσταση φυσικών ιδιοτήτων του ήχου.
(N. Τσινίκας 2005)

2.1.2. Οκτάβα, τριτοοκτάβα

Τα ακουστικά προβλήματα αντιμετωπίζονται σε συνάρτηση με τη συχνότητα, αφού οι περισσότεροι ήχοι αποτελούνται από διάφορες συχνότητες, χαμηλές, μεσαίες, υψηλές.

Οκτάβα είναι κάθε ζώνη συχνοτήτων, που ο λόγος της αρχικής της συχνότητας f_1 προς την τελική f_2 ισούται με 2, $\frac{f_2}{f_1} = 2$. Η οκτάβα είναι μονάδα μέτρησης διαστήματος συχνοτήτων και λαμβάνει την ονομασία της από την κεντρική συχνότητα του κάθε διαστήματος, $f_o = \sqrt{f_1 * f_2}$. Ο λόγος των κεντρικών συχνοτήτων σε δύο διαδοχικές οκτάβες ισούται με δύο. Οι κεντρικές συχνότητες του ακουστού ηχητικού φάσματος είναι οι 20 , 40 , 80 , 160 , 315 , 630 , 1.250 , 2.500 , 5.000 , 10.000 , 20.000 Hz και οι κεντρικές συχνότητες από τις οκτάβες που χρησιμοποιούνται για την ακουστική χώρου είναι οι 125 , 250 , 500 , 1.000 , 2.000 , 4.000 Hz .

Ορισμένες φορές, για μεγαλύτερη ανάλυση, χρησιμοποιούμε την **τριτοοκτάβα**, ζώνη συχνοτήτων, στην οποία ισχύει $\frac{f_2}{f_1} = 2^{1/3}$. Οι κεντρικές συχνότητες του ακουστού ηχητικού φάσματος είναι οι 20 , 31,5 , 40 , 50 , 63 , 80 , 100 , 125 , 160 , 200 , 250 , 315 , 400 , 500 , 630 , 800 , 1.000 , 1.250 , 1.600 , 2.000 , 2.500 , 3.150 , 4.000 , 5.000 , 6.300 , 8.000 , 10.000 , 12.500 , 16.000 , 20.000 Hz .

2.1.3. Ηχητικό πεδίο, ηχητική πίεση, στάθμη ηχητικής πίεσης [dB], ηχητική ενέργεια

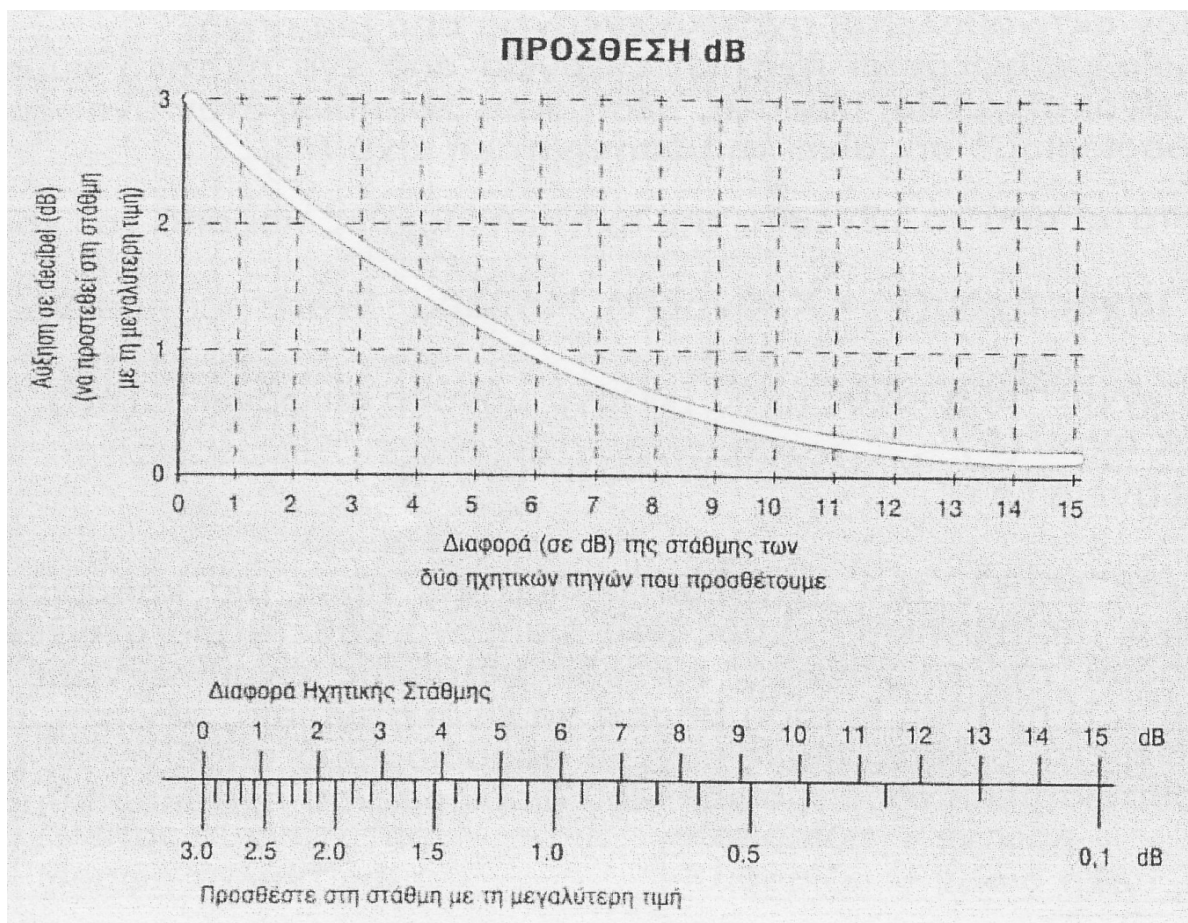
Ηχητικό πεδίο ονομάζεται ο χώρος, όπου υφίστανται ηχητικά κύματα, καθώς και η ηχητική κατάσταση, που δημιουργείται από τα εν λόγω κύματα.

Ηχητική πίεση σε συγκεκριμένο σημείο του ηχητικού πεδίου είναι η διαφορά της στατικής πίεσης του μέσου από την ολική πίεση που υπάρχει σε αυτό το σημείο. Συμβολίζεται με P και μετριέται σε Pa (πασκάλ). Η **στάθμη της ηχητικής πίεσης** είναι το μέγεθος $10 \log \frac{P^2}{P_0^2}$, όπου P είναι η ενεργός τιμή της ηχητικής πίεσης και P_0

είναι η ηχητική πίεση αναφοράς (στον αέρα $P_0 = 20 \mu Pa$ ή $0,00002 N/m^2$). Ως μονάδα μέτρησης χρησιμοποιείται το dB (ντεσιμπέλ). Η λογαριθμική κλίμακα των ντεσιμπέλ χρησιμοποιείται, γιατί ταιριάζει απόλυτα με τον λογαριθμικό τρόπο λειτουργίας του αφτιού. Όσον αφορά τους συνεχείς ήχους, η μικρότερη αλλαγή στη στάθμη της ηχητικής πίεσης, που μπορεί να γίνει εύκολα αντιληπτή, είναι τα $3dB$.

Τα dB δεν προστίθενται αλγεβρικά. Αντιθέτως, χρησιμοποιούμε σχέσεις με λογαρίθμους ή, για μεγαλύτερη ευκολία, γραφήματα, όπως τα κατωτέρω, σύμφωνα με τα οποία, σε κάθε διαφορά της στάθμης των δύο ηχητικών πηγών που επιθυμούμε να προσθέσουμε, αντιστοιχεί ένας συγκεκριμένος αριθμός, τον οποίο προσθέτουμε στη στάθμη με τη μεγαλύτερη τιμή.

ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΜΦΙΘΕΑΤΡΟΥ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2-ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ



Σχήμα 2.2. Γραφήματα πρόσθεσης dB .
(Γ. Βιάζης 2005)

Παρατηρούμε ότι όταν η διαφορά της στάθμης των πηγών είναι μεγαλύτερη από 15 dB , ο πιο σιγανός από αυτούς, είναι σαν να μην υπάρχει, δηλαδή, δε συνεισφέρει στη συνολική ένταση που ακούμε.

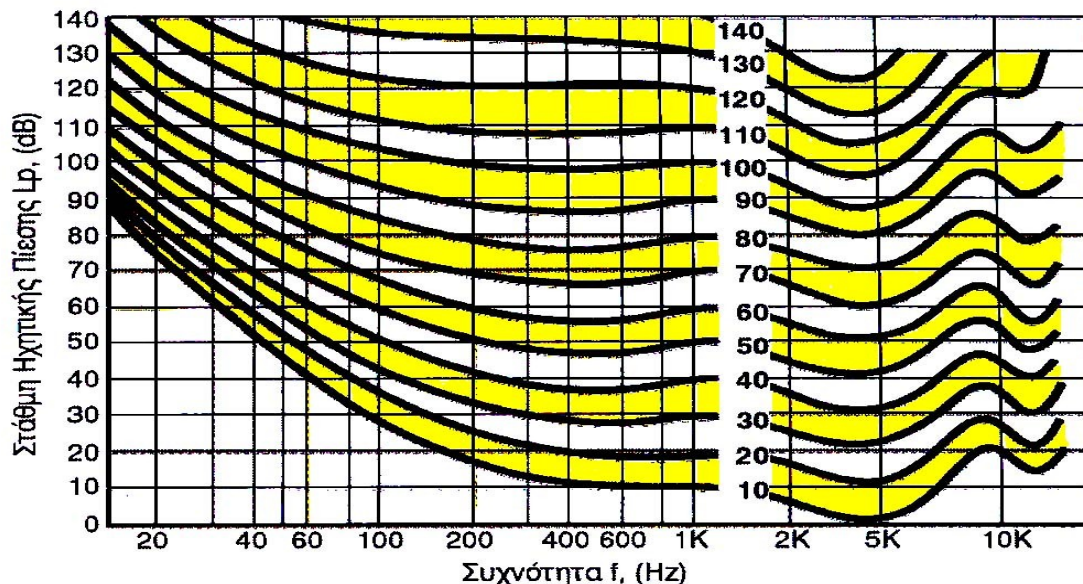
Η **ηχητική ενέργεια** είναι η ενέργεια που περιέχει ένα ελαστικό μέσο, λόγω της παρουσίας ηχητικού πεδίου, συμβολίζεται με W και μετριέται σε J (τζάουλ).

2.1.4. Η αντίληψη της στάθμης του ήχου

ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΜΦΙΘΕΑΤΡΟΥ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2-ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Ως **ακουστότητα** ορίζεται η αντίληψη της στάθμης ενός ήχου με υποκειμενικά κριτήρια, υπό την προϋπόθεση θεώρησης φυσιολογικού ακροατή, είναι και μετριέται σε *son* (σον).

Ισοφωνικές καμπύλες καθαρών τόνων είναι ο γεωμετρικός τόπος των ήχων, που αντιστοιχούν σε μια συγκεκριμένη τιμή ακουστότητας.



Σχήμα 2.3. Ισοφωνικές καμπύλες καθαρών τόνων.
(N. Τσινίκας 2005)

Ορισμένες παρατηρήσεις που προκύπτουν από το σχήμα είναι οι εξής:

- υπάρχουν ήχοι με την ίδια στάθμη, που δεν ανήκουν στην ίδια ισοφωνική καμπύλη, αν αντιστοιχούν σε διαφορετικές συχνότητες
- γύρω στα 4.000 Hz σε κάθε ισοφωνική καμπύλη έχουμε τη μέγιστη ευαισθησία του οργάνου της ακοής
- όσο προχωράμε σε πιο χαμηλές συχνότητες, τόσο μειώνεται η ευαισθησία του οργάνου της ακοής.

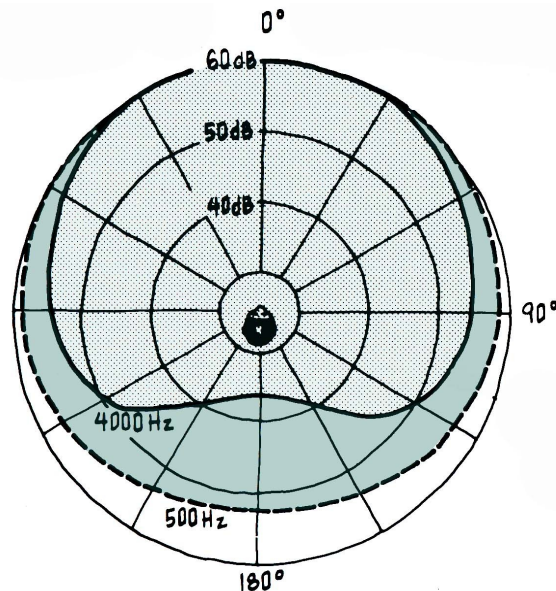
Ορίζουμε την **ηχοστάθμη**, τη σταθμισμένη στάθμη ηχητικής πίεσης, που ισούται με $10 \log \frac{pA^2}{p_0^2}$, όπου pA είναι η ενεργός τιμή της ηχητικής πίεσης μετρημένης με

χρήση σταθμιστικού κυκλώματος A, έτσι ώστε να λαμβάνεται υπόψη η ευαισθησία του αφτιού στις διάφορες συχνότητες. Ως μονάδα μέτρησης χρησιμοποιείται το *dB*A. Γενικά, τα σταθμιστικά κυκλώματα παρεμβάλλονται στις διατάξεις μέτρησης του ήχου, για να περιορίζουν ή να ενισχύουν κατάλληλα τις διάφορες συνιστώσες του ηχητικού φάσματος.

2.1.5. Κατευθυντικότητα της ανθρώπινης φωνής

ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΜΦΙΘΕΑΤΡΟΥ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2-ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Με σκοπό την απεικόνιση της κατευθυντικότητας της ανθρώπινης φωνής κατασκευάζουμε τα πολικά διαγράμματα.



Σχήμα 2.4. Πολικό διάγραμμα για την κατευθυντική κατανομή του ήχου της ομιλίας στο οριζόντιο επίπεδο.
(Egan M. D. 1972)

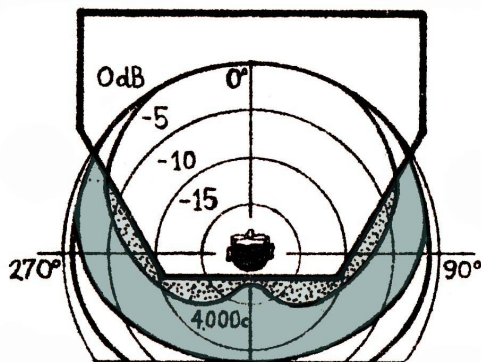
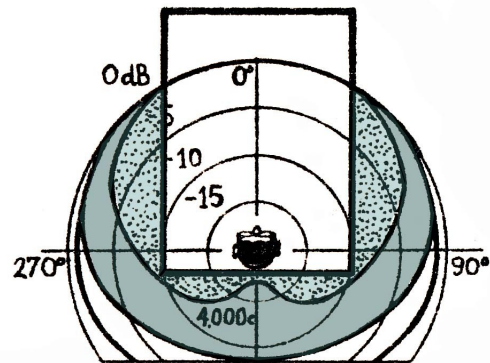
Παρατηρούμε ότι, σε ένα ελεύθερο ηχητικό πεδίο, τα ηχητικά κύματα μεταδίδονται προς όλες τις κατευθύνσεις, όμως, όπως είναι λογικό, η ηχητική ένταση της ανθρώπινης φωνής οδηγείται προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση σε μεγαλύτερο βαθμό. Η γωνία εκπομπής του ήχου συνδέεται άμεσα με τη συχνότητα, έτσι παρατηρούνται μεγάλες γωνίες εκπομπής στις χαμηλές συχνότητες και μικρές γωνίες εκπομπής στις υψηλές συχνότητες.

Στο παραπάνω πολικό διάγραμμα, η γωνία των 0° είναι η κατεύθυνση προς την οποία κοιτάζει ο ομιλητής, άρα η γωνία των 180° είναι η κατεύθυνση ακριβώς πίσω από τον ομιλητή.

Συμπεραίνουμε ότι στις χαμηλές συχνότητες ($\leq 500 \text{ Hz}$) η ηχητική ένταση μειώνεται ελάχιστα αριστερά και δεξιά του ομιλητή, ενώ πίσω από αυτόν, η μείωση της ηχητικής έντασης είναι κάπως πιο αισθητή. Στις υψηλές συχνότητες ($\geq 4000 \text{ Hz}$) η μείωση της ηχητικής έντασης αριστερά και δεξιά του ομιλητή αντιστοιχεί περίπου σε 6 dB , ενώ πίσω από αυτόν, η μείωση της ηχητικής έντασης πλησιάζει τα 20 dB . Συνεπάγεται ότι, σε περίπτωση που ο ομιλητής γυρίσει την πλάτη του προς το ακροατήριο, το καθιστά ανέκδοτο να αντιληφθεί τις υψηλές συχνότητες.

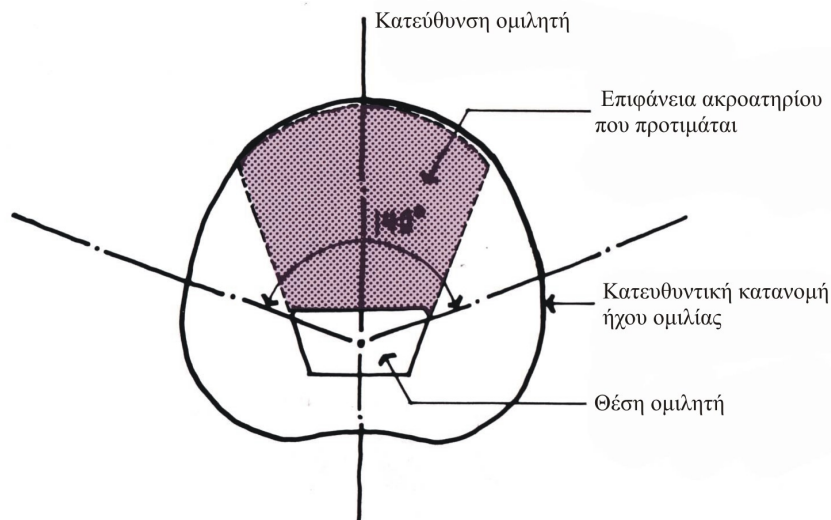
Η κατευθυντικότητα της ανθρώπινης φωνής αποτελεί κριτήριο ακουστικού σχεδιασμού των χώρων ακρόασης ομιλίας. Με βάση αυτή, μπορούμε να σχεδιάσουμε το χώρο με τέτοια μορφή, ώστε να εκμεταλλευτούμε τις κατά πλάτος δυνατότητες της ανθρώπινης φωνής. Μια τραπεζοειδής μορφή χώρου προσαρμόζεται αρκετά καλά στις δυνατότητες της φωνής, σε αντίθεση με έναν ορθογωνικό χώρο, που αφήνει ανεκμετάλλευτες μεγάλες γωνίες, στις οποίες η ένταση είναι το ίδιο δυνατή.

**ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΜΦΙΘΕΑΤΡΟΥ
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2-ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ**



Σχήμα 2.5. Σχηματική απεικόνιση της διαφοροποίησης ενός ορθογωνικού χώρου από ένα τραπεζοειδή ως προς την εκμετάλλευση της κατευθυντικότητας της ανθρώπινης φωνής.
(Ε. Τζεκάκης 1970)

Τελικά, συνίσταται η επιφάνεια των ακροατών να είναι έτσι κατασκευασμένη ώστε να εμπεριέχεται όλη σε γωνία από τον ομιλητή μικρότερη ή ίση με 140° .



Σχήμα 2.6. Βέλτιστη τοποθέτηση της επιφάνειας των ακροατών σε χώρο ακρόασης ομιλίας με βάση την κατευθυντικότητα της ανθρώπινης φωνής.
(Egan M. D. 1972)

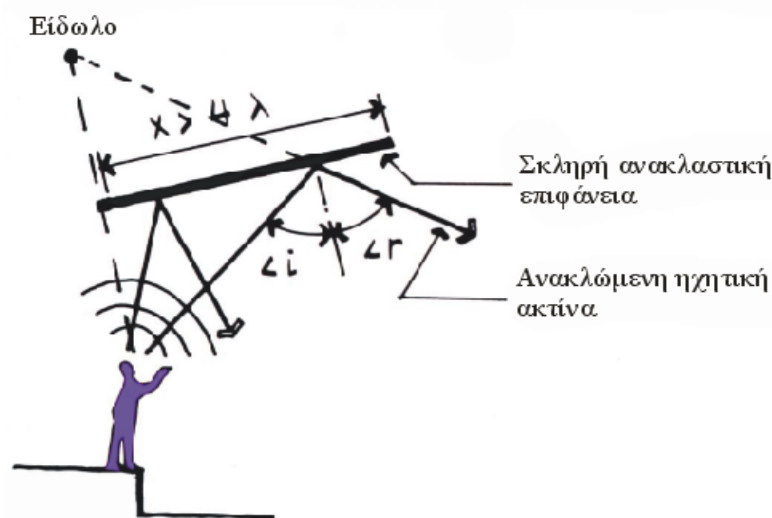
2.2. Ακουστικά φαινόμενα που παρατηρούνται σε κλειστούς χώρους - Σχεδιασμός αξιοποίησής τους

Κατά τη διάδοση του ήχου σε κλειστούς χώρους παρατηρούνται ακουστικά φαινόμενα, όπως η ανάκλαση, η διάχυση, η περίθλαση και η ηχοαπορρόφηση, τις ιδιότητες των οποίων προσπαθούμε να εκμεταλλευτούμε και να αξιοποιήσουμε κατά τον ακουστικό σχεδιασμό.

2.2.1. Ανάκλαση

Η αλλαγή της πορείας του ήχου, που παρατηρείται κατά την πρόσπτωσή του στη διαχωριστική επιφάνεια δύο μέσων, ονομάζεται ανάκλαση. Το αποτέλεσμα του φαινομένου της ανάκλασης είναι η ηχώ και η αντήχηση.

Στην περίπτωση που η διάσταση X της ανακλαστικής επιφάνειας είναι μεγαλύτερη από το διπλάσιο ή το τετραπλάσιο του μήκους κύματος λ του προσπίπτοντος ηχητικού κύματος, η γωνία πρόσπτωσης i ισούται με τη γωνία ανάκλασης r . Όπως παρατηρούμε στο σχήμα που ακολουθεί, η πηγή και το είδωλο απέχουν ίση απόσταση από την ανακλαστική επιφάνεια, ενώ το είδωλο βρίσκεται στην πρόεκταση της ανακλώμενης ηχητικής ακτίνας.



Σχήμα 2.7. Ανάκλαση.
(Egan M. D. 1972)

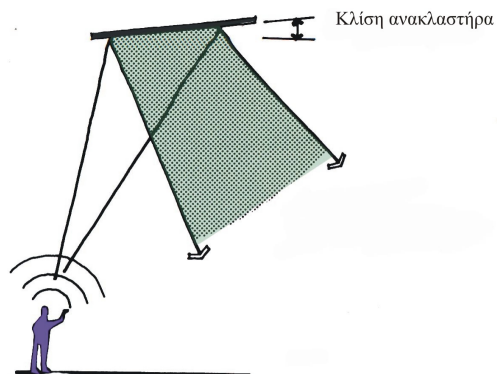
Στο σχεδιασμό χώρων ακρόασης ομιλίας αξιοποιούμε το φαινόμενο της ανάκλασης χρησιμοποιώντας τους ανακλαστήρες, δηλαδή επιφάνειες με την ιδιότητα να ανακλούν τον ήχο που προσπίπτει επάνω τους. Οι ανακλαστήρες κατηγοριοποιούνται ως εξής:

- επίπεδοι

Επίπεδες σκληρές επιφάνειες, οι οποίες αν είναι αρκετά μεγάλες και έχουν τοποθετηθεί με τη σωστή κλίση, μπορούν να διανείμουν αποτελεσματικά τον

ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΜΦΙΘΕΑΤΡΟΥ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2-ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

ανακλώμενο ήχο, με κύριο σκοπό την προώθηση της ηχητικής ενέργειας προς το πίσω μέρος του ακροατηρίου.



Σχήμα 2.8. Επίπεδος ανακλαστήρας με κλίση για την προώθηση της ηχητικής ενέργειας προς το πίσω μέρος του ακροατηρίου.
(Egan M. D. 1972)

- *κυρτοί*

Οι κυρτοί ανακλαστήρες, αν έχουν αρκετά μεγάλο μέγεθος, είναι το πιο αποτελεσματικό είδος ανακλαστήρων, αφού έχουν την ιδιότητα να διαχέουν τον ανακλώμενο ήχο σε μεγάλο εύρος.



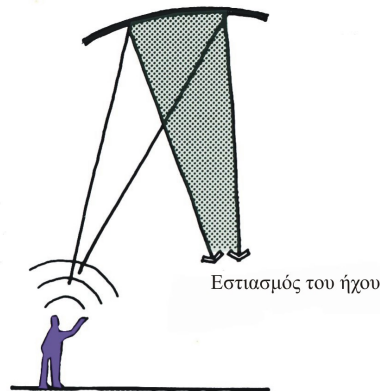
Σχήμα 2.9. Κυρτός ανακλαστήρας.
(Egan M. D. 1972)

- *κοίλοι*

Οι κοίλοι ανακλαστήρες έχουν την ιδιότητα να εστιάζουν τον ήχο, με αποτέλεσμα η ηχητική ένταση να είναι αφύσικα υψηλή σε ορισμένα σημεία του ακροατηρίου, τα λεγόμενα εστιακά σημεία. Αυτό, όμως, αποτελεί κάτι ανεπιθύμητο κατά τον ακουστικό σχεδιασμό, οπότε και τους αποφεύγουμε.

ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΜΦΙΘΕΑΤΡΟΥ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2-ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

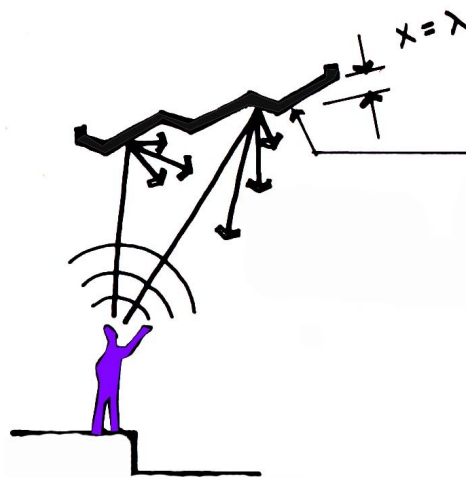


Σχήμα 2.10. Κοίλος ανακλαστήρας.
(Egan M. D. 1972)

Οι ιδιότητες των ανακλαστήρων διαφοροποιούνται ανάλογα με το υλικό τους και το επιφανειακό τους βάρος.

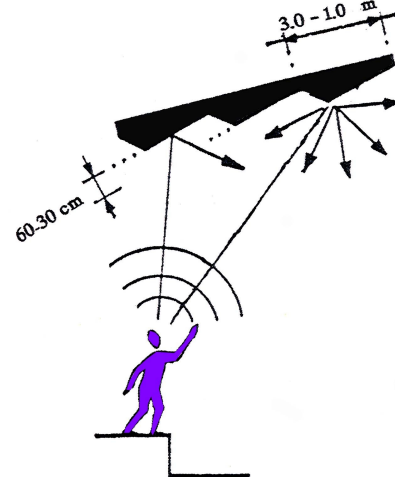
2.2.2. Διάχυση

Διάχυση ονομάζεται ο σκεδασμός μιας ανακλώμενης ηχητικής ακτίνας σε ασθενέστερες ακτίνες τυχαίας κατανομής και υφίσταται όταν το μήκος κύματος λ του ήχου ισούται με το μέγεθος X της ανακλαστικής επιφάνειας.



(Egan M. D. 1972)

Σχήμα 2.11. Διάχυση.



(Α. Σωτηροπούλου 1996)

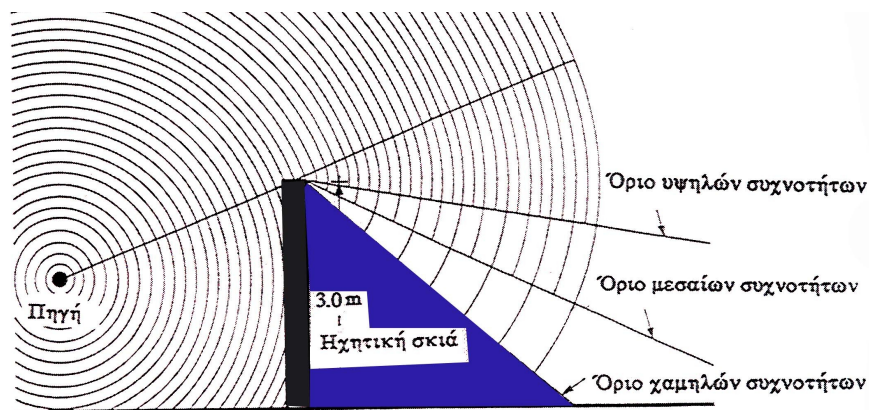
Η διάχυση του ήχου επιβάλλεται στις αίθουσες μουσικής, για να έχει το ακροατήριο την αίσθηση ότι ο ήχος έρχεται από όλες τις κατευθύνσεις με την ίδια ένταση. Αντίθετα, ένα πολύ μικρό ποσοστό διάχυσης ήχου επαρκεί σε χώρους ακρόασης ομιλίας και μπορεί να επιτευχθεί ακόμα και με τη χρήση εναλλάξ απορροφητικού και ανακλαστικού υλικού.

ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΜΦΙΘΕΑΤΡΟΥ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2-ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

2.2.3. Περίθλαση

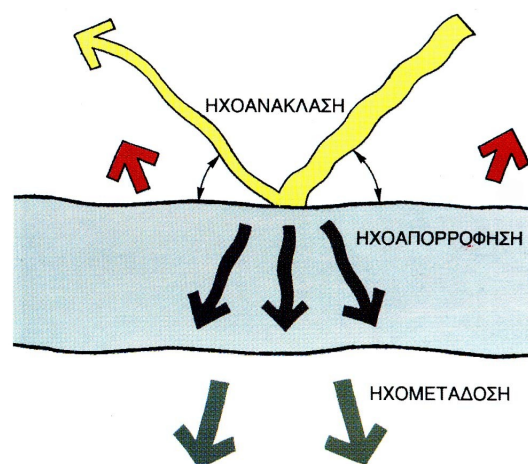
Η *περίθλαση* είναι η αλλαγή της διεύθυνσης της διάδοσης του ήχου, λαμβάνει χώρα κοντά σε ασυνέχειες του μέσου διάδοσης και έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ασαφούς ηχητικής σκιάς, δηλαδή μείωσης της στάθμης του ήχου. Για συχνότητες από 125 Hz και πάνω, τις οποίες μελετούμε στην ακουστική χώρου, η περίθλαση είναι σημαντική. Το φαινόμενο αυτό εξαρτάται από το μήκος κύματος του ήχου σε σχέση με το μέγεθος του εμποδίου. Αν το μήκος κύματος του ήχου είναι μικρό σε σχέση με το μέγεθος του εμποδίου, ο ήχος δε θα λυγίσει.



Σχήμα 2.12. Περίθλαση.
(Α. Σωτηροπούλου 1996)

2.2.4. Ηχοαπορρόφηση

Κατά την πρόσπτωση του ήχου σε κάποιο πέτασμα του χώρου, ένα ποσό του ανακλάται και ένα άλλο απορροφάται. Με τον όρο *ηχοαπορρόφηση* προσδιορίζεται η ιδιότητα των υλικών να απορροφούν την ηχητική ενέργεια, οπότε ένα μέρος της μετατρέπεται σε θερμότητα εντός του υλικού και το υπόλοιπο μεταδίδεται ως ηχητική ενέργεια στο μέσο, που υπάρχει πίσω από το πέτασμα (ηχομετάδοση).



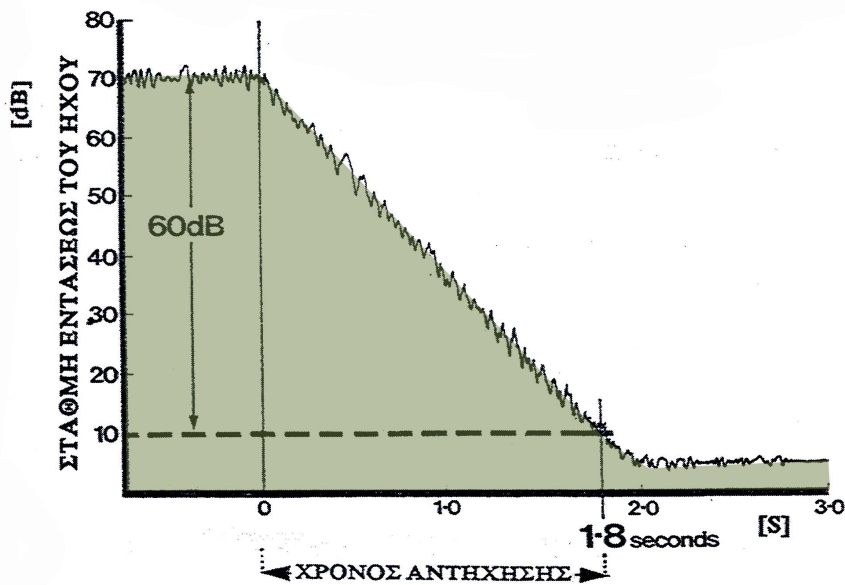
Σχήμα 2.13 Σχήμα με ηχοανάκλαση, ηχοαπορρόφηση και ηχομετάδοση.
(Ν. Τσινίκας 2005)

ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΜΦΙΘΕΑΤΡΟΥ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2-ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η ηχοαπορρόφηση ενός συγκεκριμένου υλικού δεν είναι ίδια για κάθε συχνότητα. Η ολική ηχοαπορρόφηση ενός χώρου εξαρτάται από την ποσότητα και τη θέση των ηχοαπορροφητικών υλικών.

Ο συντελεστής ηχοαπορρόφησης ενός υλικού σε συγκεκριμένη συχνότητα και συγκεκριμένες συνθήκες είναι το ποσοστό εκ του προσπίπτοντος επί του υλικού, ήχου που δεν ανακλάται και συνδέεται άμεσα με τη γωνία πρόσπτωσης. Η τιμή του συντελεστή ηχοαπορρόφησης κυμαίνεται από 0 έως 1, από την πλήρη ανάκλαση έως την πλήρη απορρόφηση του ήχου.

Κατά τον υπολογισμό της ηχοαπορρόφησης, ο χρόνος αντήχησης αποτελεί σημαντικό παράγοντα. **Αντήχηση** είναι το σύνολο των ανακλάσεων των επιφανειών του χώρου, που δε δημιουργούν ηχώ, που φτάνουν, δηλαδή, στο δέκτη, με καθυστέρηση μικρότερη από $\frac{1}{25}$ sec. Ο **χρόνος αντήχησης** (ανά συχνότητα) είναι ο χρόνος που χρειάζεται ο ήχος, από τη στιγμή της διακοπής παραγωγής του μέσα σε ένα χώρο, για να χάσει 60 dB από την αρχική του ένταση.



Σχήμα 2.14. Διάγραμμα εντάσεως του ήχου.
(Α. Σωτηροπούλου 1996)

Γνωρίζοντας το βέλτιστο χρόνο αντήχησης του χώρου που σχεδιάζουμε, έχουμε τη δυνατότητα να προσδιορίσουμε σε μία πρώτη προσέγγιση το εμβαδόν των ηχοαπορροφητικών επιφανειών, χρησιμοποιώντας τον τύπο του Sabine.

τύπος του Sabine:	$R.T. = \frac{0.16V}{\sum_i F_i a_i + Vx}$
-------------------	--

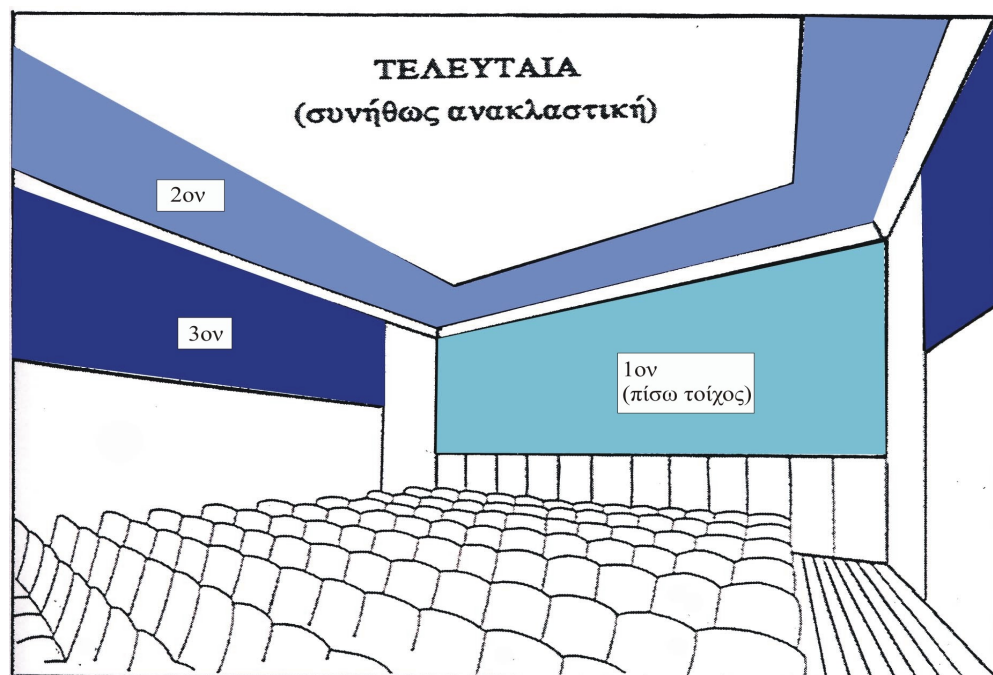
- R.T. [S] είναι ο χρόνος αντήχησης
- V [m³] είναι ο όγκος του χώρου
- F_i [m²] είναι η επιφάνεια του νιοστού υλικού του χώρου
- a_i [Sab] είναι ο συντελεστής ηχοαπορρόφησης του νιοστού υλικού του χώρου

ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΜΦΙΘΕΑΤΡΟΥ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2-ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

- $x [m^2 Sab / m^3]$ είναι η ηχοαπορρόφηση του αέρα ανά μονάδα όγκου
- ν είναι το πλήθος των ηχοαπορροφητικών υλικών του χώρου

Για να ισχύει ο τύπος του χρόνου αντήχησης, όπως αυτός διατυπώθηκε από το Sabine, απαιτείται επαρκής ηχοδιάχυση στο χώρο.

Σημαντικό ρόλο παίζει η θέση, στην οποία τοποθετούμε τα ηχοαπορροφητικά υλικά, για να μη μας δημιουργήσουν πρόβλημα αλλά να συμβάλλουν όντως στην καλύτερη ακουστική του χώρου. Συνήθως, προτιμάμε να τα τοποθετούμε στα τμήματα του χώρου με τη σειρά προτεραιότητας που απεικονίζεται στο επόμενο σχήμα. Στους χώρους ακρόασης ομιλίας με αποδεκτό ύψος, έτσι ώστε να μη δημιουργείται ηχώ, αποφεύγουμε την τοποθέτηση ηχοαπορροφητικών υλικών στην οροφή, διότι είναι επιθυμητές οι ανακλάσεις, από την οροφή, του ήχου, που προέρχεται από τον ομιλητή.



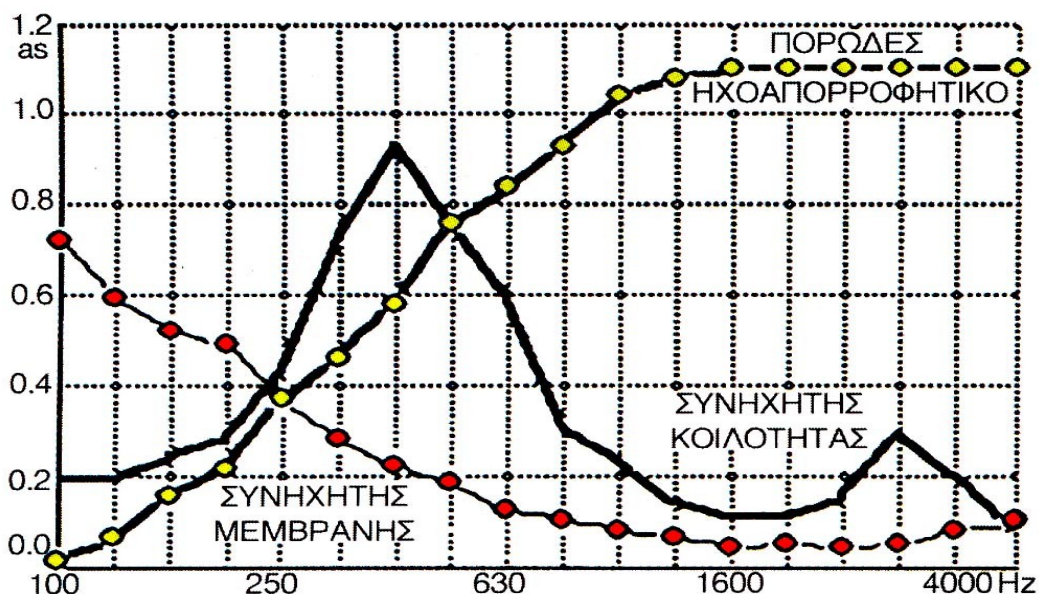
Σχήμα 2.15. Τοποθέτηση ηχοαπορροφητικών υλικών στο χώρο.
(Α. Σωτηροπούλου 1996)

Ηχοαπορροφητικά υλικά ονομάζονται τα υλικά με σχετικά μεγάλη ικανότητα ηχοαπορρόφησης και ορισμένα από αυτά είναι ο αέρας, που υπάρχει σε κάθε χώρο και οι επενδύσεις των περατωτικών επιφανειών του, τα άτομα, τα καθίσματα, οι κουρτίνες, τα χαλιά και οι σπές εξαερισμού, που περιλαμβάνει.

Οι κατηγορίες στις οποίες κατατάσσουμε τα ηχοαπορροφητικά υλικά σύμφωνα με τις περιοχές συχνοτήτων που αποδίδουν πιο πολύ, είναι οι παρακάτω:

- *πορώδη ηχοαπορροφητικά υλικά υψηλών έως μεσαίων συχνοτήτων*
- *συνηχητές μεμβράνης χαμηλών συχνοτήτων*
- *συνηχητές κοιλότητας μεσαίων συχνοτήτων*

ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΜΦΙΘΕΑΤΡΟΥ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2-ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ



Σχήμα 2.16. Αντιπροσωπευτικές τυπικές καμπύλες των τριών κατηγοριών ηχοαπορροφητικών υλικών. (N. Τσινίκας 2005)

2.2.4.1. Πορώδη ηχοαπορροφητικά υλικά

Τα *πορώδη ηχοαπορροφητικά υλικά* έχουν την ιδιότητα να μετατρέπουν σε θερμότητα ένα ποσοστό του ήχου που προσπίπτει σε αυτά, ενώ την υπόλοιπη και φυσικά μειωμένη ηχητική ενέργεια να την ανακλούν. Ως προς τη σύνθεσή τους, περιλαμβάνουν ένα δίκτυο κυττάρων με πόρους οι οποίοι συνδέονται μεταξύ τους.

Τα πορώδη ηχοαπορροφητικά υλικά είναι:

- i. ο αέρας, που απορροφά τον ήχο στις υψηλές συχνότητες μειώνοντας το χρόνο αντήχησης της αίθουσας. Η ηχοαπορρόφηση του αέρα επηρεάζεται από τη θερμοκρασία και τη σχετική υγρασία, ενώ παίρνει τιμές πάνω από τη συχνότητα των 1.000 Hz .
- ii. οι οπές, τα ανοίγματα
- iii. τα άτομα, τα οποία λαμβάνονται ως ηχοαπορροφητές μεσαίων και υψηλών συχνοτήτων
- iv. τα καθίσματα, που απορροφούν τον ήχο στις μεσαίες και υψηλές συχνότητες. Η ηχοαπορρόφηση των καθισμάτων πρέπει να πλησιάζει αυτή των ατόμων σε καθίσματα. Όσον αφορά τις πλευρές του καθίσματος, αυτές στις οποίες κάθετα το άτομο πρέπει να είναι ηχοαπορροφητικές ενώ οι υπόλοιπες μπορούν να είναι σκληρές επιφάνειες. Η πίσω πλευρά της βάσης, όταν ανασηκώνεται, πρέπει να έχει οπές, έτσι ώστε το υλικό με το οποίο είναι κατασκευασμένη, να απορροφά τον ήχο, ακόμα και στην περίπτωση που το κάθισμα είναι άδειο. Οι παραπάνω κανόνες λαμβάνονται απαραίτητως υπόψη σε αίθουσες μουσικής κυρίως, όπου οι απαιτήσεις καλής ακουστικής είναι αυξημένες, παρά σε χώρους ακρόασης ομιλίας.
- v. τα ανατημένα πορώδη ηχοαπορροφητικά υλικά χώρου. Αυτά χρησιμοποιούνται σε χώρους, που δε διαθέτουν άδειες επιφάνειες για την τοποθέτηση ηχοαπορροφητικών υλικών.

ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΜΦΙΘΕΑΤΡΟΥ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2-ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

- vi. οι κουρτίνες
- vii. οι μοκέτες
- viii. τα μαλακά, αφρώδη πλαστικά και οι πλάκες από αφρώδη πολυουρεθάνη
- ix. οι ινόπλακες από ορυκτές ίνες, όπως πλάκες υαλοβάμβακα, πετροβάμβακα, ορυκτοβάμβακα. Αυτά είναι τα υλικά που χρησιμοποιούνται πιο συχνά στην ακουστική, τοποθετώντας στην τελική επιφάνειά τους μια λεπτή στρώση από υαλοπίλημα, για να μην ξεφτίζουν. Οι πλάκες τοποθετούνται μέσα σε πλαίσια ανάρτησης για την εξασφάλιση της σταθερότητάς τους και επικαλύπτονται από ηχοδιαπερατά υλικά πλέγματα (ξύλο, μέταλλο, ύφασμα) για λόγους πρακτικότητας και αισθητικής.
- x. οι ινόπλακες από φυτικές ίνες, όπως ινόπλακες ψευδοροφών, ινοτσιμεντόπλακες.

Ο **συντελεστής ηχοαπορρόφησης** των υλικών εξαρτάται από την αντίσταση ροής του κάθε υλικού, το πάχος του στρώματος και την απόστασή του από τη σκληρή επιφάνεια, στην οποία είτε αναρτάται είτε τοποθετείται.

Η **αντίσταση ροής** των υλικών εξαρτάται από τον αριθμό των πόρων, το μέγεθός τους, τη διάταξή τους και το πάχος του στρώματος.

Γενικά, όσο πιο μεγάλο είναι το **πάχος του στρώματος** του υλικού τόσο πιο αποτελεσματικό είναι, αλλά αυτό συμβαίνει μέχρι ενός σημείου, μετά από το οποίο η ηχοαπορρόφηση δεν είναι εφικτή, αφού λόγω της έντονης αύξησης της αντίστασης ροής, ο ήχος δε μπορεί να διαπεράσει όλο το στρώμα του υλικού.

Με την αύξηση της **απόστασης του υλικού** από τη σκληρή επιφάνεια, στην οποία τοποθετείται, η ηχοαπορρόφηση επεκτείνεται όλο και περισσότερο στις χαμηλές συχνότητες.

2.2.4.2. Συνηχητές μεμβράνης χαμηλών συχνοτήτων

Όταν ο ήχος προσπίπτει επάνω στην επιφάνεια του συνηχητή, αυτή πάλλεται αποσβένοντας τον κραδασμό. Η ηχοαπορρόφηση του συνηχητή σχετίζεται με το υλικό, με το πάχος της επιφάνειάς του και με τις διαστάσεις του.

Οι συνηχητές είναι ηχοαπορροφητικές διατάξεις χαμηλών συχνοτήτων κυρίως, που σημαίνει ότι είναι απαραίτητες σε αίθουσες ακροατηρίου, από τη στιγμή που οι ακροατές, καθώς και η πλειοψηφία των υλικών που απαρτίζουν την αίθουσα, είναι ηχοαπορροφητικά μεσαίων και υψηλών συχνοτήτων.

Η καμπύλη του συντελεστή ηχοαπορρόφησης των συνηχητών μεμβράνης έχει σχήμα παρόμοιο του γράμματος Λ, δηλαδή παρουσιάζει μια κορυφή, τη μέγιστη ηχοαπορρόφηση κάποιας συχνότητας. Είναι εφικτή η μετατόπιση της οριακής συχνότητας με την αλλαγή των διαστάσεων του συνηχητή, με την αλλαγή του πάχους της τελικής επιφάνειάς του και με την τοποθέτηση πορώδους ηχοαπορροφητικού υλικού σε όλο το διάκενο ή σε τμήμα του.

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή συνηχητών είναι τα υποπροϊόντα ξύλου π.χ. μοριοσανίδες, αντικολλητά φύλλα, λεπτά ξύλα, γυψοσανίδες και λεπτά μεταλλικά φύλλα.

ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΜΦΙΘΕΑΤΡΟΥ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2-ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

2.2.4.3. Συνηχητές κοιλότητας μεσαίων συχνοτήτων

Ο πιο απλός συνηχητής κοιλότητας είναι ένα μπουκάλι αέρα με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά ως προς την κατασκευή του. Φυσώντας στο μπουκάλι αυτό, όντας άδειο, ακούγεται μία νότα, η συχνότητα συνήχησης, η οποία μετατοπίζεται προς υψηλότερες συχνότητες όσο εμείς τοποθετούμε στο μπουκάλι όλο και μεγαλύτερη ποσότητα νερού. Σε περίπτωση τοποθέτησης πορώδους ηχοαπορροφητικού υλικού στην κοιλότητα του συνηχητή, το φάσμα ηχοαπορρόφησης μεγαλώνει, σε αντίθεση με τη μέγιστη τιμή ηχοαπορρόφησης, η οποία μικραίνει.

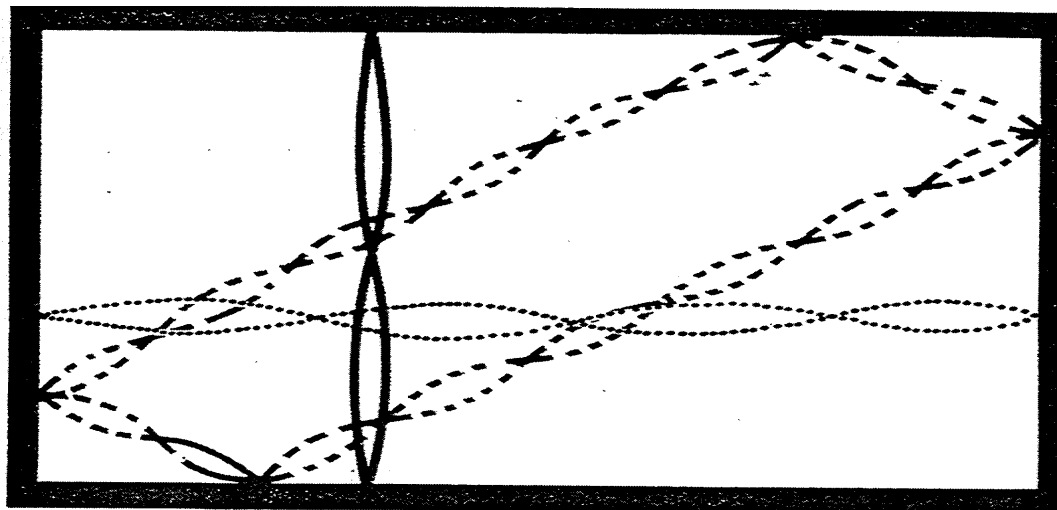
Οι συνηχητές κοιλότητας εφαρμόζονται στις περατωτικές επιφάνειες των χώρων είτε μεμονωμένα είτε ως συνηχητές διάτρητης μεμβράνης είτε ως συνηχητές με σχισμές.

2.3. Ακουστικά προβλήματα που παρατηρούνται σε κλειστούς χώρους - Σχεδιασμός αντιμετώπισής τους

Τα ακουστικά προβλήματα, τα οποία εμφανίζονται σε χώρους διαλέξεων είναι ο συντονισμός, η ηχώ, ο πλαταγισμός και ο εστιασμός του ήχου. Κατά τον ακουστικό σχεδιασμό λαμβάνουμε μέτρα αντιμετώπισής τους ή αποφυγής τους, διότι σε κάθε άλλη περίπτωση, θα έχουμε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός ακατάλληλου ακουστικού περιβάλλοντος.

2.3.1. Συντονισμός

Σε περίπτωση που η απόσταση ανάμεσα σε δύο παράλληλες ανακλαστικές επιφάνειες είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του μισού του μήκους κύματος του ήχου, ο ήχος εγκλωβίζεται ανάμεσά τους, δε μεταδίδεται, δημιουργώντας στάσιμο ηχητικό κύμα. Το στάσιμο ηχητικό κύμα ορίζεται ως το περιοδικό ηχητικό κύμα με σταθερή κατανομή στο χώρο, ενώ χαρακτηρίζεται από σημεία μέγιστου και ελάχιστου πλάτους, τις κοιλίες και τους κόμβους αντίστοιχα, που είναι σταθερά στο χώρο. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως συντονισμός. Ο συντονισμός δημιουργείται σε ορθογωνικούς χώρους, που αποτελούνται από ανακλαστικές επιφάνειες και οι «εμπλεκόμενες αποστάσεις» είναι ακέραια πολλαπλάσια του μισού του μήκους κύματος του ήχου.



Σχήμα 2.17. Συντονισμός.
(Α. Σωτηροπούλου 1996)

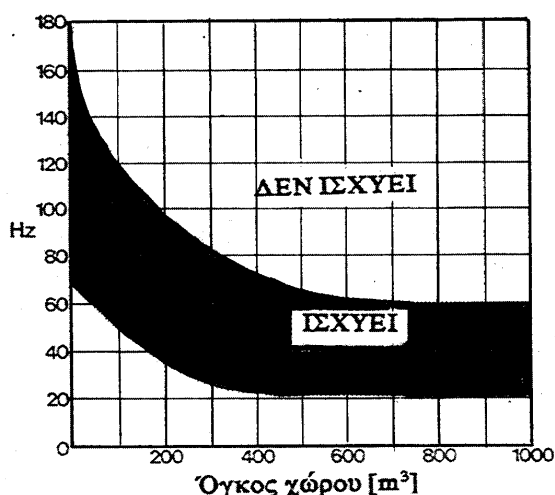
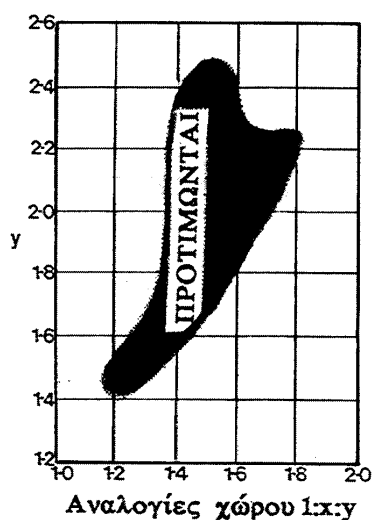
Η παρουσία συχνοτήτων συντονισμού στο χώρο οδηγεί στη μείωση της ακουστικής ποιότητας. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα συντονισμού είναι ο βομβώδης ήχος στο λουτρό.

Αν ο χώρος που σχεδιάζουμε έχει διαστάσεις μεγαλύτερες των $8,5m$, ο συντονισμός δεν δύναται να δημιουργήσει πρόβλημα, λόγω του ότι η χαμηλότερη συχνότητα συντονισμού βρίσκεται κάτω από το όριο ακουστών συχνοτήτων. Όταν όμως οι διαστάσεις του χώρου είναι μικρότερες των $8,5m$ κρίνεται απαραίτητη η λήψη μέτρων αντιμετώπισης του εν λόγω φαινομένου. Ένα από τα μέτρα αυτά είναι η χρήση

ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΜΦΙΘΕΑΤΡΟΥ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2-ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

ηχοαπορροφητικών υλικών και ένα δεύτερο η κατάλληλη επιλογή του σχήματος του χώρου, επιδιώκοντας να αλληλοεπικαλύπτονται οι συχνότητες συντονισμού, να είναι ομαλά κατανεμημένες στο φάσμα.

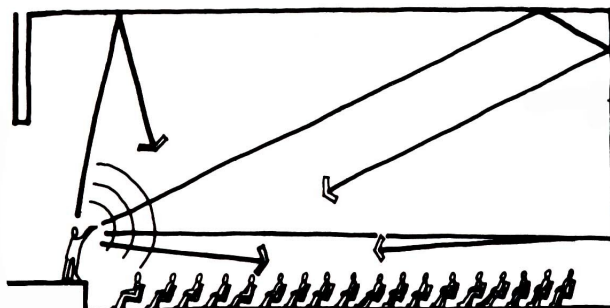
Ειδικότερα, όσον αφορά την επιλογή του κατάλληλου σχήματος του χώρου, προτιμάμε τα ακανόνιστα σχήματα αποφεύγοντας τους παράλληλους απέναντι τοίχους. Αν όμως τελικά επιλέξουμε το σχήμα του ορθογωνίου, τότε προσπαθούμε να τηρήσουμε κάποιες αναλογίες σχετικές με τις διαστάσεις του.



Σχήμα 2.18. Διαγράμματα που αφορούν τις διαστάσεις του χώρου για την αποφυγή του συντονισμού.
(Α. Σωτηροπούλου 1996)

2.3.2. Ηχώ

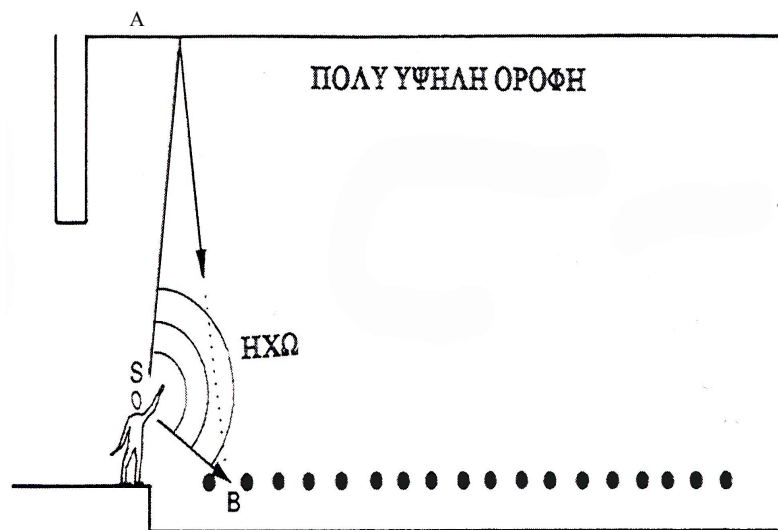
Η *ηχώ* είναι μια καθυστερημένη ανάκλαση σχετικά έντονη, την οποία μπορούμε να διακρίνουμε σε σχέση με τον απευθείας ήχο. Δεν αλλοιώνει τον τόνο του ήχου απλά τον αναμεταδίδει. Το φαινόμενο αυτό δύναται να προκληθεί από την οροφή του χώρου, από τον πίσω τοίχο ή από το συνδυασμό των δύο παραπάνω.



Σχήμα 2.19. Δημιουργία ηχούς.
(Egan M. D. 1972)

Πιο συγκεκριμένα, η ηχώ δημιουργείται όταν η διαφορά της διαδρομής του ήχου, που ανακλάται, από την διαδρομή του απ' ευθείας ήχου είναι μεγαλύτερη από $1 \xi m$.

ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΜΦΙΘΕΑΤΡΟΥ
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2-ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

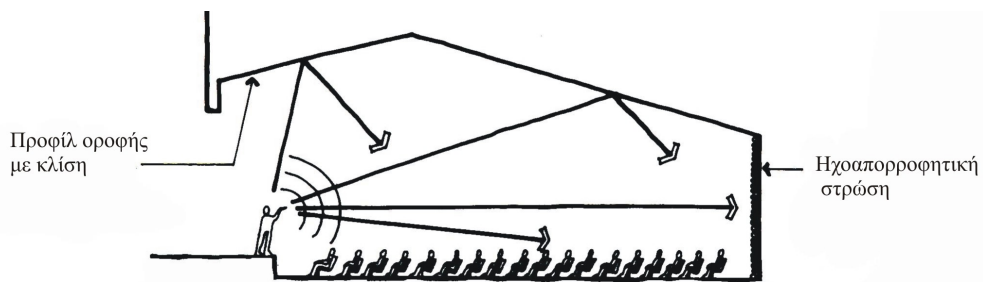


$$[(SAB) - (SB)] \geq 1 \text{ m}$$

Σχήμα 2.20. Δημιουργία ηχούς.
 (Α. Σωτηροπούλου 1996)

Η ίδια διαφορά μετρημένη σε χρόνο είναι $\frac{1}{20} \text{ sec}$, που σημαίνει ότι όταν ο ανακλώμενος ήχος φτάνει στο αφτί μετά από $\frac{1}{20} \text{ sec}$, διαχωρίζεται από τον απ' ευθείας, δημιουργώντας ηχώ.

Ένας τρόπος σχεδιασμού του χώρου, με σκοπό την αποφυγή της ηχούς, είναι η κατασκευή της οροφής με τέτοια κλίση, ώστε να ισχύει η σχέση $[(SAB) - (SB)] \leq 1 \text{ m}$ και η τοποθέτηση ηχοαπορροφητικής στρώσης στον πίσω τοίχο.

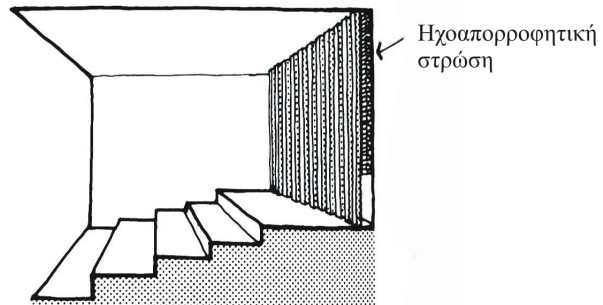


Σχήμα 2.21. Σχεδιασμός χώρου με σκοπό την αποφυγή της ηχούς.
 (Egan M. D. 1972)

Για να αποφύγουμε τη δημιουργία ηχούς από τον πίσω τοίχο προβαίνουμε στις εξής ενέργειες:

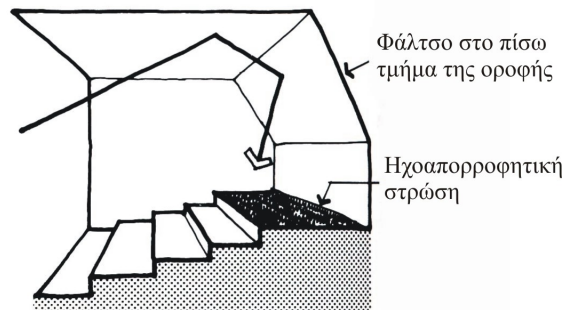
- τοποθέτηση ηχοαπορροφητικής στρώσης στον πίσω τοίχο

ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΜΦΙΘΕΑΤΡΟΥ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2-ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ



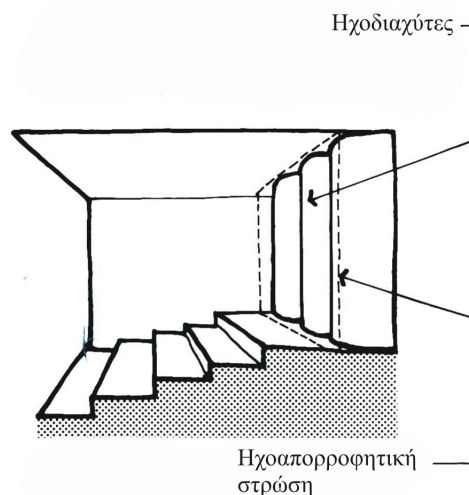
Σχήμα 2.22. Σχεδιασμός πίσω τοίχου με σκοπό την αποφυγή της ηχούς.
(Egan M. D. 1972)

- κατασκευή φάλτσου στο πίσω τμήμα της οροφής και τοποθέτηση ηχοαπορροφητικού υλικού στο τμήμα που φαίνεται στο σχήμα



Σχήμα 2.23. Σχεδιασμός πίσω τοίχου με σκοπό την αποφυγή της ηχούς.
(Egan M. D. 1972)

- τοποθέτηση στοιχείων διάχυσης του ήχου στον πίσω τοίχο



Σχήμα 2.24. Σχεδιασμός πίσω τοίχου με σκοπό την αποφυγή της ηχούς.
(Egan M. D. 1972)

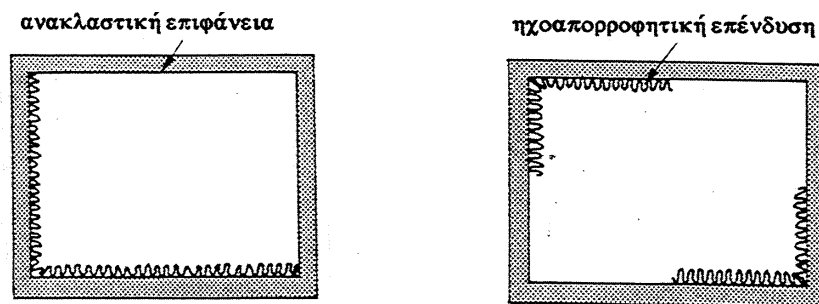
2.3.3. Πλαταγισμός

ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΜΦΙΘΕΑΤΡΟΥ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2-ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Ο **πλαταγισμός** είναι το αποτέλεσμα μιας επαναλαμβανόμενης ανάκλασης με σχετικά υψηλή ένταση. Επαναλαμβανόμενη ανάκλαση μπορεί να δημιουργηθεί π.χ. ανάμεσα σε απέναντι παράλληλες ή κοίλες ανακλαστικές επιφάνειες, αν οι υπόλοιπες επιφάνειες του χώρου είναι ηχοαπορροφητικές. Κατά τον πλαταγισμό παρατηρείται αλλοίωση του ήχου, αφού ορισμένες συχνότητές του αντιστοιχούν σε συχνότητες συντονισμού του χώρου.

Υπάρχουν τρόποι με τους οποίους μπορούμε να αποφύγουμε την εμφάνιση πλαταγισμού:

- οι αντικριστές παρειές του χώρου να μη σχεδιάζονται ως παράλληλες
- να τοποθετούνται ηχοαπορροφητικές επενδύσεις σε μια από τις δύο παράλληλες παρειές

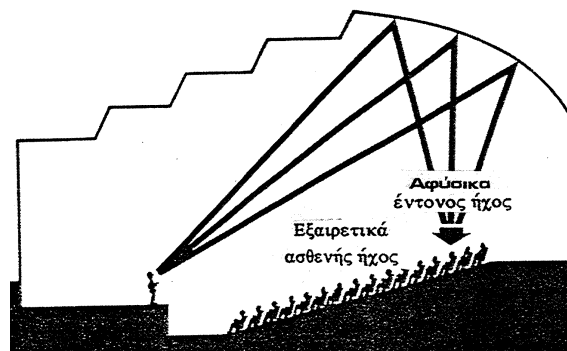


Σχήμα 2.25. Σχεδιασμός με σκοπό την αποφυγή του πλαταγισμού.
(Α. Σωτηροπούλου 1996)

- να τοποθετούνται διαχύτες σε μια από τις παράλληλες παρειές.

2.3.4. Εστιασμός του ήχου

Εστιασμός του ήχου παρατηρείται, όταν υπάρχουν στο χώρο κοίλες ανακλαστικές επιφάνειες, όπως ο πίσω τοίχος, η οροφή ή τμήμα της, με αποτέλεσμα οι ανακλάσεις να συγκεντρώνονται σε ένα σημείο. Η ένταση στα εστιακά σημεία πολλαπλασιάζεται, οπότε παρατηρείται ανομοιομορφία στην κατανομή του ήχου και δεν ισχύει η σταδιακή μείωσή του με την απόσταση.



Σχήμα 2.26. Εστιασμός ήχου λόγω του κοίλου τμήματος της οροφής.
(Α. Σωτηροπούλου 1996)

Για την αντιμετώπιση του εστιασμού του ήχου συνήθως αποφεύγουμε τις κοίλες επιφάνειες στους χώρους. Όμως, σε περίπτωση ύπαρξής τους, τοποθετούμε σε αυτές διαχύτες ή ηχοαπορροφητικές επενδύσεις. Τέλος, μπορούμε να σχεδιάσουμε το χώρο

ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΜΦΙΘΕΑΤΡΟΥ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2-ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

έτσι, ώστε τα εστιακά σημεία της κοίλης επιφάνειας να βρίσκονται πάνω από το επίπεδο ακρόασης, αυτό, π.χ. ως προς την οροφή, επιτυγχάνεται με το σχεδιασμό υψηλής οροφής.

2.4. Ακουστικά κριτήρια χώρων διδασκαλίας

Προτεραιότητα στο σχεδιασμό των χώρων διδασκαλίας δίνεται στην ευκρίνεια του ήχου της ομιλίας, λόγω του ότι χρησιμοποιούνται ειδικές ορολογίες, οι οποίες πρέπει να γίνουν αντιληπτές από το ακροατήριο με ευκολία.

2.4.1. Ευκρίνεια του ήχου της ομιλίας (speech intelligibility)

Η ευκρίνεια του ήχου της ομιλίας αποτελεί ένα ακουστικό κριτήριο βασισμένο στην αντίληψη των ακροατών όσον αφορά το ακουστικό περιβάλλον του χώρου, πιο συγκεκριμένα, αναφέρεται στο ποσοστό συγκεκριμένου υλικού ομιλίας, συχνά μεμονωμένων λέξεων, που γίνονται σωστά κατανοητές από τους ακροατές.

2.4.2. Φυσικά κριτήρια για την ευκρίνεια του ήχου της ομιλίας

Τα *φυσικά ακουστικά κριτήρια*, τα οποία χρησιμοποιούνται, είναι τα εξής:

- **το κλάσμα των πρώτων ανακλάσεων.** Οι πρώτες ανακλάσεις, που φτάνουν αμέσως μετά τον απ' ευθείας ήχο, σε χρονικό διάστημα των 50 m sec , ενισχύουν τον απ' ευθείας ήχο και συντελούν στην αίσθηση μεγέθους του χώρου. Για το λόγο αυτό, εισάγεται ως ακουστικό κριτήριο το κλάσμα των πρώτων ανακλάσεων, το οποίο συμβολίζεται με (EEF_{50}) και ισούται με το λόγο της ηχητικής ενέργειας, που φτάνει στον ακροατή εντός 50 m sec προς τη συνολική ηχητική ενέργεια, που φτάνει στον ακροατή, μετρώντας το χρόνο από τη στιγμή άφιξης του απ' ευθείας ήχου στον ακροατή. Όσο αυξάνεται το ποσοστό της ηχητικής ενέργειας, που φτάνει στον ακροατή, σε σύγκριση με τη συνολική ηχητική ενέργεια, που εκπέμπεται σε μικρότερο χρονικό διάστημα, τόσο καλύτερες συνθήκες ευκρίνειας επικρατούν. Η βέλτιστη τιμή του κλάσματος των πρώτων ανακλάσεων είναι $EEF_{50} = 0.50$.

- **ο λόγος του σήματος προς το θόρυβο** (Signal-to-Noise Ratio), όπου σήμα θεωρείται ο ήχος της ομιλίας στη θέση του ακροατή και θόρυβος ο παρειασδύων θόρυβος, ο θόρυβος αναπνοής του κοινού κ.τ.λ. Οι τιμές του λόγου, που είναι αποδεκτές, είναι όσες ισούνται ή ξεπερνούν τα 10 dB .

- **ο χρόνος αντήχησης.** Υπάρχουν βέλτιστες τιμές του χρόνου αντήχησης ενός χώρου ανάλογα με τον όγκο του, με τις οποίες συγκρίνουμε τον πραγματικό χρόνο αντήχησης του χώρου (σχήμα 2.36.)

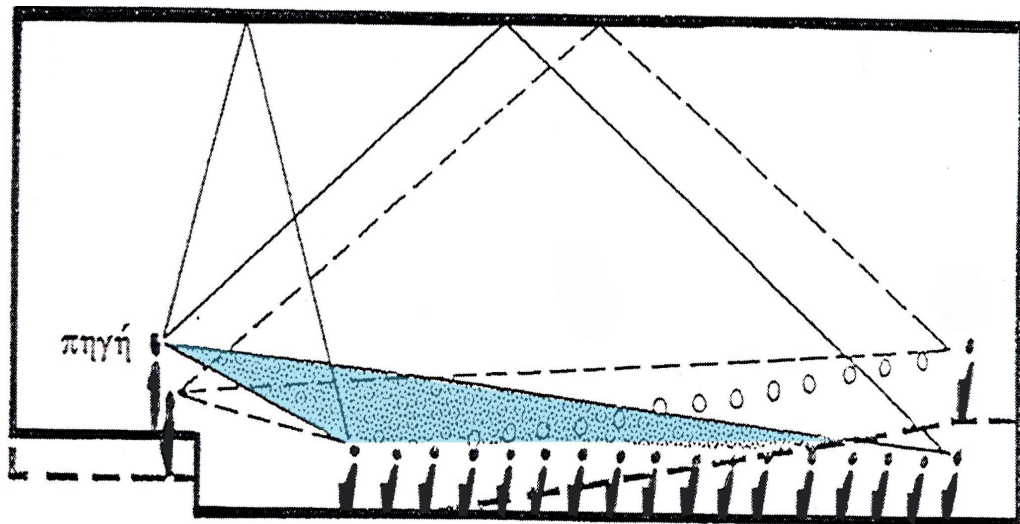
2.5. Αρχές ακουστικού σχεδιασμού των χώρων διδασκαλίας

2.5.1. Σχεδιασμός βελτιστοποίησης του απ' ευθείας ήχου

Κατά το σχεδιασμό βελτιστοποίησης του απ' ευθείας ήχου έχουμε δύο βασικούς στόχους, να εξασφαλίσουμε την απρόσκοπτη πορεία του και να ελαχιστοποιήσουμε την απόσταση ανάμεσα στον ομιλητή και το ακροατήριο.

Έχοντας ως στόχο την *εξασφάλιση της απρόσκοπτης πορείας του απ' ευθείας ήχου*, εφαρμόζουμε μια από τις επόμενες τεχνικές ή συνδυασμό τους:

- τοποθετούμε τον ομιλητή σε υψηλότερο επίπεδο από αυτό του ακροατηρίου κατασκευάζοντας μια εξέδρα
- σχεδιάζουμε κεκλιμένο επίπεδο για το ακροατήριο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του ποσού του ήχου που αντιστοιχεί σε κάθε ακροατή, αφού ο ήχος πλέον δεν κρύβεται πίσω από τον προηγούμενο ακροατή ούτε απορροφάται από αυτόν. Επιπλέον, εξασφαλίζουμε καλές οπτικές συνθήκες σε όλους τους ακροατές.



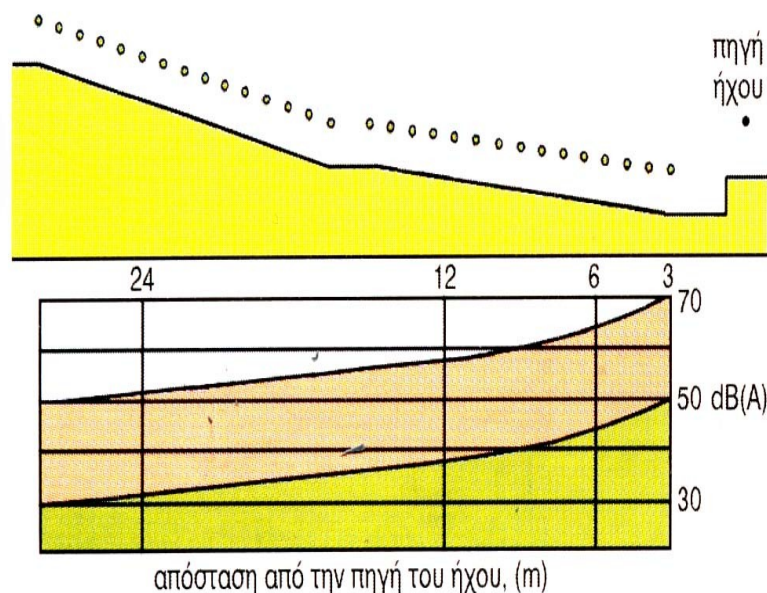
ΤΟΜΗ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ

Σχήμα 2.27. Σχεδιασμός με σκοπό τη βελτιστοποίηση του απ' ευθείας ήχου.
(Α. Σωτηροπούλου 1996)

ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΜΦΙΘΕΑΤΡΟΥ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2-ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Όσο πιο μεγάλη είναι η γωνία εκπομπής από τον ομιλητή προς τους ακροατές, τόσο μεγαλύτερο ποσοστό απ' ευθείας ήχου φτάνει στους ακροατές.

Η στάθμη της έντασης του απ' ευθείας ήχου της ομιλίας μειώνεται καθώς αυξάνεται η απόσταση από τον ομιλητή.



Σχήμα 2.28. Μεταβολή της στάθμης εντάσεως του απ' ευθείας ήχου της ομιλίας σε συνάρτηση με την απόσταση από την πηγή σε ένα χώρο ομιλίας με 30 σειρές ακροατών.
(N. Τσινίκας 2005)

Σύμφωνα με το διάγραμμα που προηγήθηκε, η ομιλία υψηλής ηχοστάθμης 70 dB (A) στη θέση της πηγής του ήχου μειώνεται κατά 20 dB (A) στην τελευταία σειρά ακροατών και η ομιλία θεωρητικά κανονικής ηχοστάθμης 50 dB (A) μειώνεται στα 30 dB (A) στην τελευταία σειρά του ακροατηρίου, η οποία αντιστοιχεί σε χαμηλότερη τιμή από τον θόρυβο βάθους, με τους ακροατές να διατηρούν απόλυτη ησυχία.

Οπότε, κρίνεται σημαντική η **ελαχιστοποίηση των αποστάσεων ανάμεσα στον ομιλητή και το ακροατήριο**. Η μέγιστη αποδεκτή απόσταση στους χώρους διαλέξεων ισούται με 20 m , ενώ για την ενίσχυση του ήχου τοποθετούμε ανακλαστήρες μετά τα 8 m . Οι τεχνικές που χρησιμοποιούμε σε αυτήν την περίπτωση είναι:

- η μείωση της χωρητικότητας της αίθουσας
- η κατασκευή αβαθών εξωστών, με σκοπό να αυξηθεί η χωρητικότητα του χώρου αποφεύγοντας την αύξηση της απόστασης ανάμεσα στον ομιλητή και τους ακροατές.

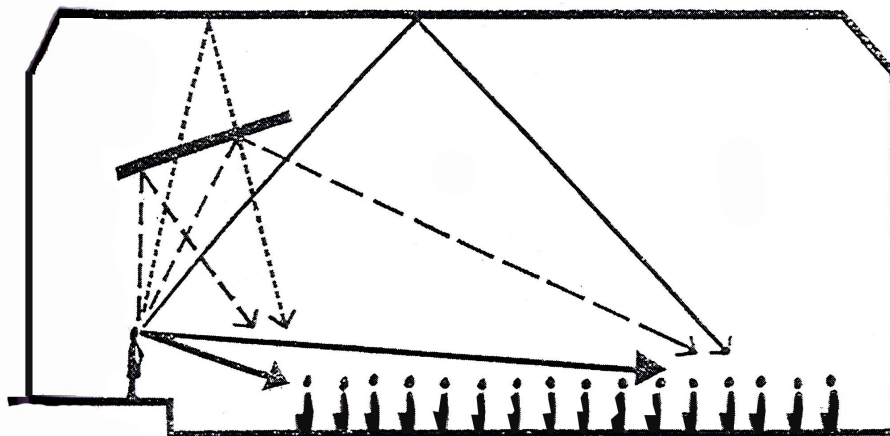
ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΜΦΙΘΕΑΤΡΟΥ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2-ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

- η τοποθέτηση του ακροατηρίου αμφιθεατρικά γύρω από τον ομιλητή, έτσι ώστε να αυξηθεί η χωρητικότητα του χώρου με διατήρηση σταθερών των αποστάσεων ανάμεσα στον ομιλητή και τους ακροατές.

2.5.2. Σχεδιασμός εξασφάλισης άφθονων πρώτων ανακλάσεων

Κάθε ακροατής, σε όποιο σημείο και να βρίσκεται, πρέπει να ενισχύεται με ανακλώμενο ήχο, γεγονός επιτακτικό για όσους βρίσκονται κοντά στις τελευταίες σειρές. Αυτό επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση ανακλαστικών επιφανειών:

- πάνω από τον ομιλητή
- στην οροφή της αίθουσας



ΤΟΜΗ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ

Σχήμα 2.29. Τοποθέτηση ανακλαστήρα πάνω από τη θέση του ομιλητή.
(Α. Σωτηροπούλου 1996)

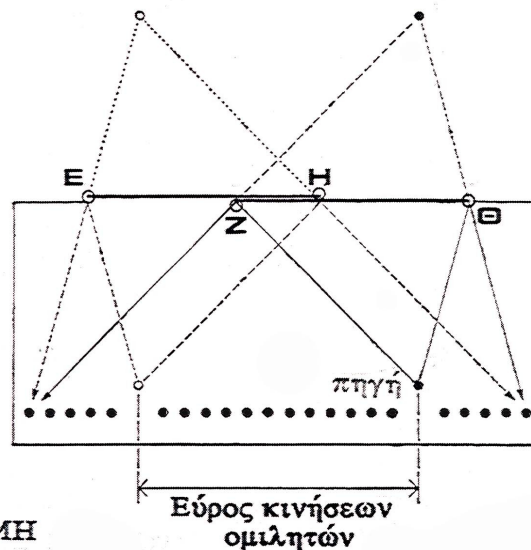
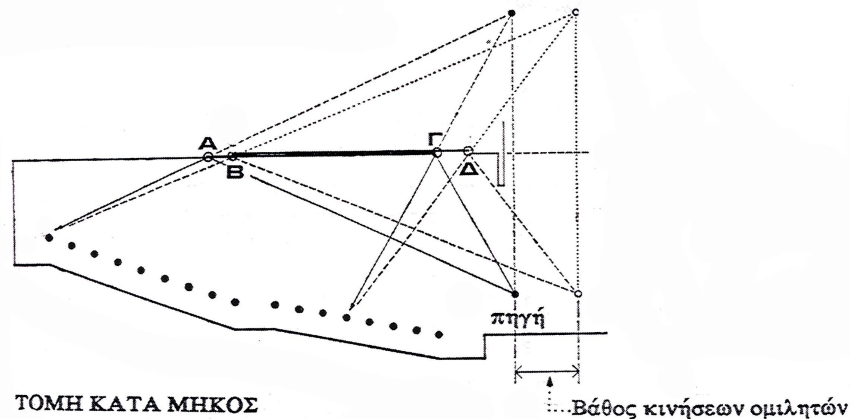
- στις πλευρικές παρειές της αίθουσας

Όσον αφορά τις διαστάσεις των ανακλαστήρων, η επιφάνειά τους πρέπει να είναι σχετικά μεγάλη ως προς το μήκος κύματος του ήχου. Τα υλικά κατασκευής τους είναι άκαμπτα με λείο και σκληρό τελείωμα, όπως επίχρισμα, γυψοσανίδες, παχύ φύλλο κόντρα πλακέ, πλεξιγκλάς.

ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΜΦΙΘΕΑΤΡΟΥ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2-ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

2.5.2.1. Σχεδιασμός της οροφής των χώρων διδασκαλίας

Ένας τρόπος, που χρησιμοποιούμε για το σχεδιασμό της οροφής του χώρου και πιο συγκεκριμένα την τοποθέτηση ανακλαστήρων σε αυτήν, υπό την προϋπόθεση ότι δεν είναι πολύ υψηλή, είναι ο προσδιορισμός των τμημάτων της, τα οποία λειτουργούν ως ανακλαστήρες, μέσω της εύρεσης του ειδώλου της πηγής και αφού το ενώσουμε με την τελευταία και την πέμπτη σειρά των ακροατών.



Σχήμα 2.30. Απεικόνιση διαδικασίας εύρεσης τμημάτων οροφής, που λειτουργούν ως ανακλαστήρες.
(Α. Σωτηροπούλου 1996)

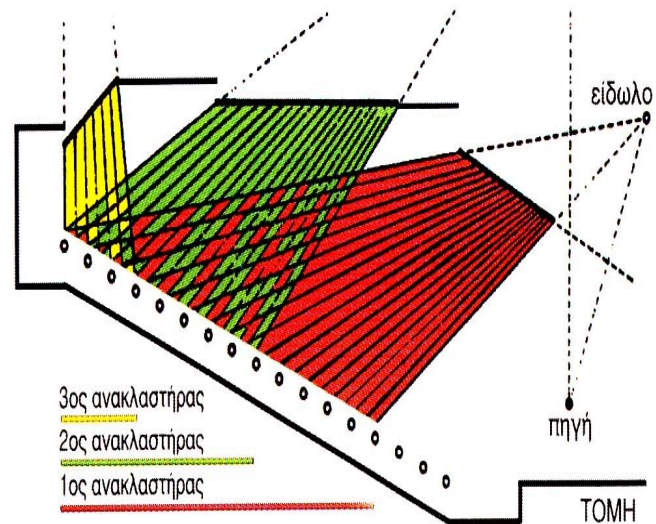
Λαμβάνουμε υπόψη την κίνηση του ομιλητή μπρος-πίσω και αριστερά-δεξιά, με στόχο ο ανακλαστήρας να καλύπτει το βάθος και το εύρος των κινήσεων του ομιλητή.

Έχοντας προσδιορίσει τις επιφάνειες, που λειτουργούν ως ανακλαστήρες, τις καλύπτουμε με ανακλαστικά υλικά.

Ένας άλλος τρόπος σχεδιασμού της οροφής περιλαμβάνει την τοποθέτηση ανακλαστικής ψευδοροφής, αποτελούμενης από επίπεδα με συγκεκριμένη κλίση το

ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΜΦΙΘΕΑΤΡΟΥ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2-ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

καθένα, έτσι ώστε να ενισχύεται σταδιακά όλο και πιο πολύ ο ήχος καθώς κατευθυνόμαστε προς τα πίσω καθίσματα του χώρου. Αυτό συμβαίνει, επειδή οι μεσαίες και οι πίσω θέσεις του ακροατηρίου τροφοδοτούνται με ανακλώμενο ήχο, που προέρχεται από περισσότερα από ένα επίπεδα οροφής.

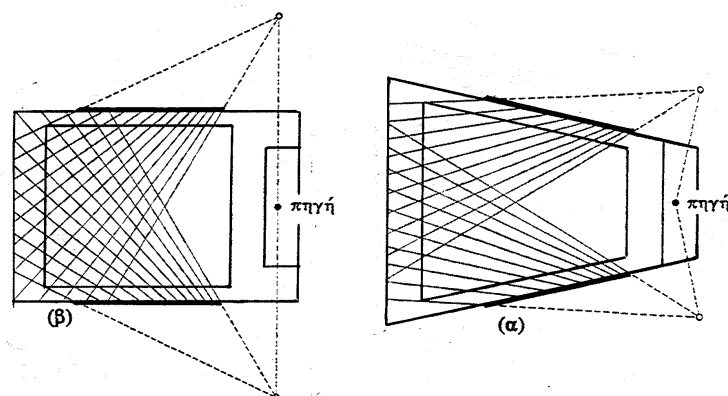


Σχήμα 2.31. Σχεδιασμός ανακλαστικής ψευδοροφής.
(Ν. Τσινίκας 2005)

2.5.2.2. Σχεδιασμός των πλευρικών παρειών των χώρων διδασκαλίας

Για το σχεδιασμό των πλευρικών παρειών και ειδικότερα την εύρεση των τμημάτων τους, που λειτουργούν ως ανακλαστήρες, ακολουθούμε την ίδια διαδικασία με αυτή που χρησιμοποιήσαμε για το σχεδιασμό της οροφής.

Η κάτοψη σχήματος βεντάλιας, με την προϋπόθεση ότι το εύρος των παρειών είναι σχετικά μικρό, προτιμάται από την ορθογωνική, λόγω του ότι έχει την ιδιότητα να προβάλλει τον ήχο αποτελεσματικότερα στο πίσω τμήμα του ακροατηρίου, σε περίπτωση ύπαρξης κατάλληλων ανακλαστικών επιφανειών στις παρειές.



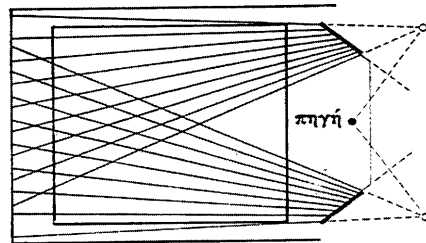
Σχήμα 2.32. Απεικόνιση διαδικασίας εύρεσης τμημάτων πλευρικών παρειών, που λειτουργούν ως ανακλαστήρες.
(Α. Σωτηροπούλου 1996)

Οι πλευρικές ανακλάσεις δεν είναι αποτελεσματικές στο κέντρο του ακροατηρίου όταν το επίπεδο είναι οριζόντιο, επειδή απορροφώνται, λόγω της διέλευσής τους

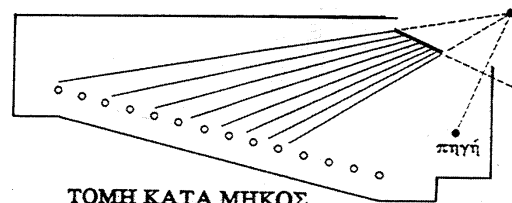
ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΜΦΙΘΕΑΤΡΟΥ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2-ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

εφαπτομενικά προς το ακροατήριο. Η κατάσταση διορθώνεται κατά ένα μέρος κατασκευάζοντας κεκλιμένο επίπεδο για το ακροατήριο.

Τέλος, μπορούμε να τοποθετήσουμε ανακλαστήρες γύρω από τον ομιλητή στο κέλυφος του χώρου με σκοπό την επίτευξη επιπλέον πρώτων ανακλάσεων.



ΚΑΤΩΨΗ



ΤΟΜΗ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ

Σχήμα 2.33. Τοποθέτηση ανακλαστήρων γύρω από
(Α. Σωτηροπούλου 1996)

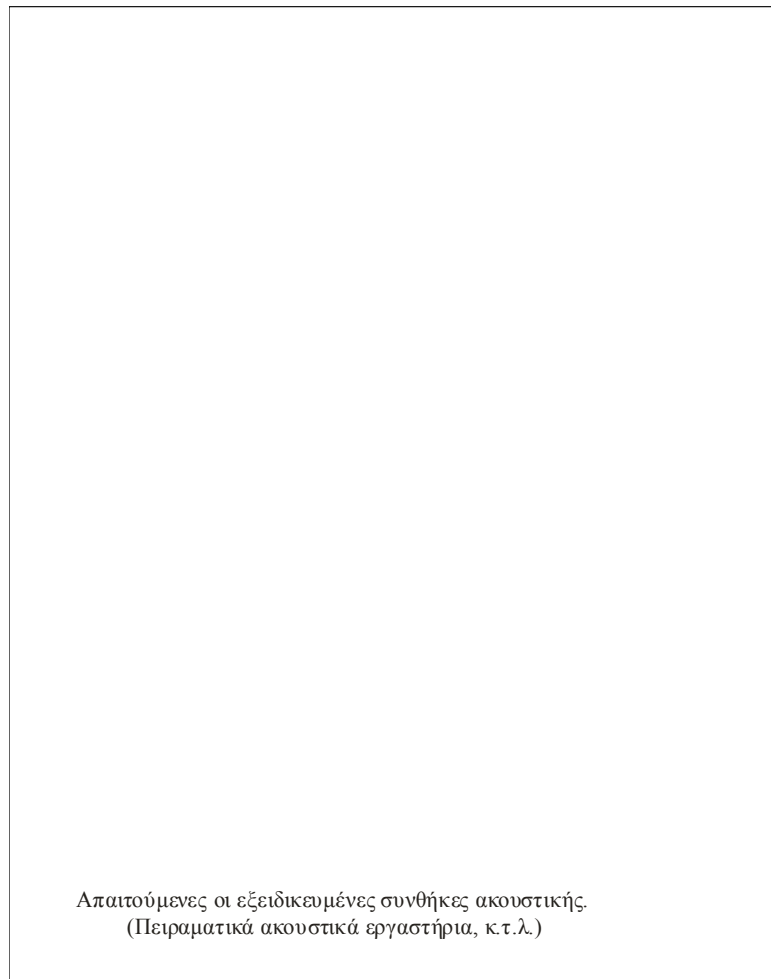
2.5.3. Σχεδιασμός ελαχιστοποίησης θορύβου βάθους

Ο θόρυβος βάθους (Background noise) προέρχεται είτε από εξωτερικούς παράγοντες, όπως τα μεταφορικά μέσα, ο άνεμος, η βροχή, το χαλάζι, το τρίξιμο των τζαμιών, η συγκέντρωση ανθρώπων είτε από εσωτερικούς, όπως το σύστημα κλιματισμού, τα φώτα, το ακροατήριο του χώρου.

Για τη σωστή λειτουργία ενός χώρου διδασκαλίας θεωρείται επιτακτική η λήψη μέτρων σχετικών με την ελαχιστοποίηση του θορύβου βάθους στο εσωτερικό του χώρου, η μελέτη των οποίων δεν αποτελεί αντικείμενο της παρούσας εργασίας.

Η εκτίμηση της ανεκτής στάθμης θορύβου δεν είναι ιδιαίτερα εύκολη, διότι σημαντικό ρόλο στο θέμα αυτό παίζει ο υποκειμενικός παράγοντας. Βέβαια, έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία τιμές ανεκτής στάθμης θορύβου σε συνάρτηση με τη χρήση του χώρου και ονομάζονται κριτήρια θορύβου (Noise Criteria - NC).

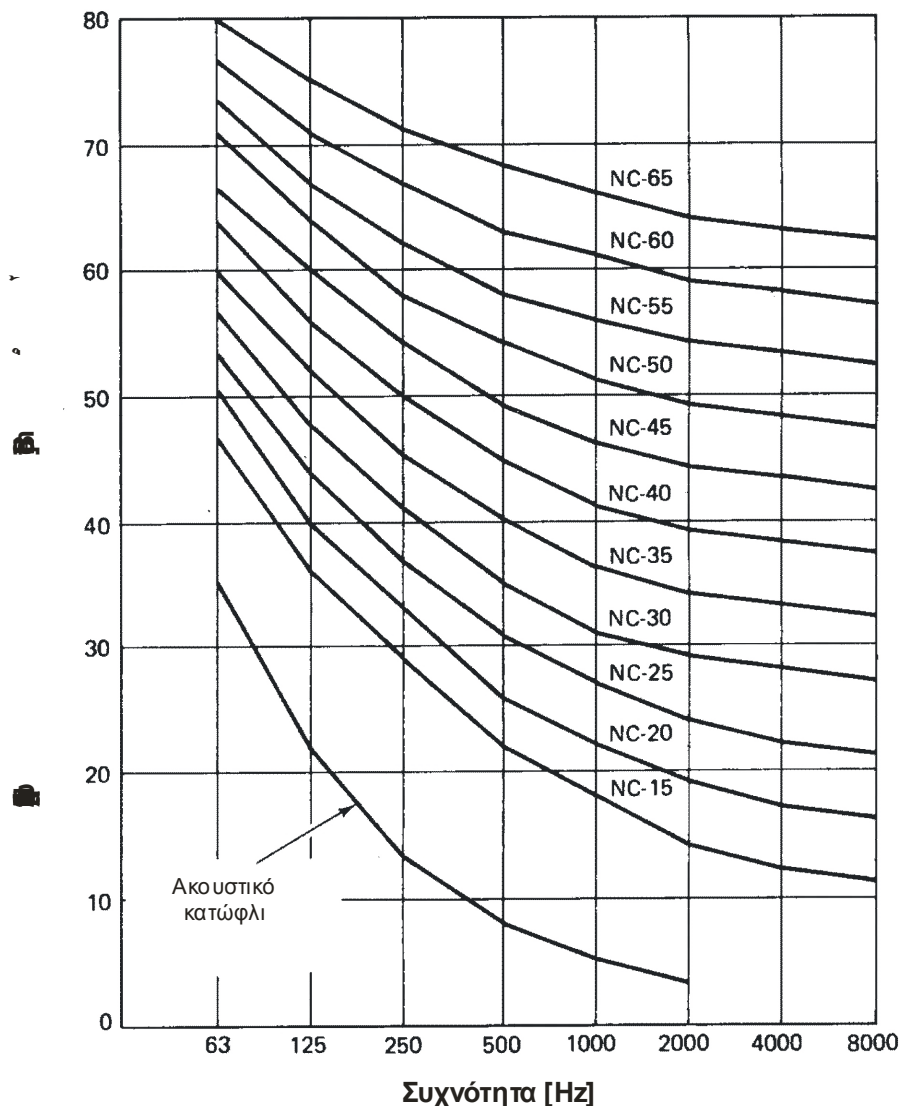
ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΜΦΙΘΕΑΤΡΟΥ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2-ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ



Σχήμα 2.34. Κριτήρια θορύβου (αποδεκτές τιμές θορύβου) ανάλογα με τη λειτουργία του χώρου.
(SRL 1976)

Έχει καθιερωθεί το διάγραμμα καμπύλων κριτηρίων θορύβου (σχήμα 2.35.), στο οποίο τοποθετούμε τις μετρήσεις του θορύβου βάθους συναρτήσει της συχνότητας, έτσι ώστε να βρούμε την καμπύλη, που αντιστοιχεί στο συγκεκριμένο χώρο διδασκαλίας και είναι αυτή με τη χαμηλότερη τιμή, την οποία δεν ξεπερνά το φάσμα θορύβου βάθους. Έπειτα, συγκρίνουμε την τιμή NC στο χώρο με την αποδεκτή τιμή θορύβου (σχήμα 2.34.), για να διαπιστώσουμε αν την υπερβαίνει ή όχι.

ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΜΦΙΘΕΑΤΡΟΥ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2-ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

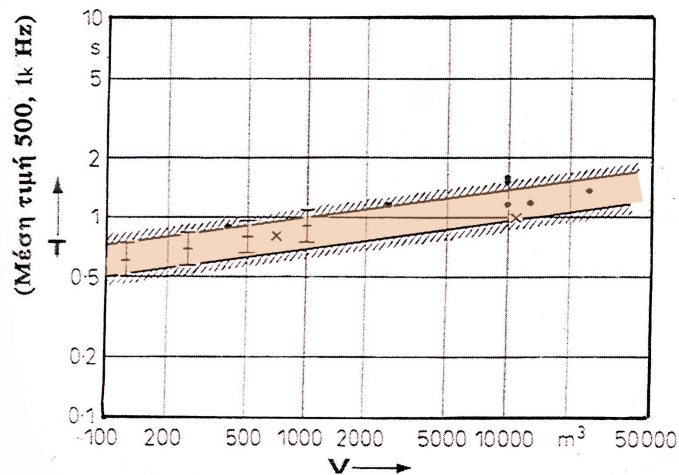


Σχήμα 2.35. Καμπύλες κριτηρίων θορύβου.
(SRL 1976)

2.5.4. Βελτιστοποίηση του χρόνου αντήχησης με βάση τον όγκο του χώρου-Υπολογισμός του βέλτιστου όγκου του χώρου - Επιλογή ηχοαπορροφητικών υλικών

Ο χρόνος αντήχησης ενός χώρου συνδέεται άμεσα με τον όγκο του και τα ηχοαπορροφητικά υλικά που περιλαμβάνει. Επιθυμούμε ο χρόνος αντήχησης να πλησιάζει κατά το δυνατόν το βέλτιστο.

Ο βέλτιστος χρόνος αντήχησης ενισχύει τη στάθμη ακουστότητας της ομιλίας, όμως μεγαλύτερος χρόνος αντήχησης από το βέλτιστο επιφέρει τη μείωση της ευκρίνειας του ήχου, αφού συλλαβές που ακόμα αντηχούν, επικαλύπτουν τις συλλαβές που μόλις έχουν ακουστεί. Στην περίπτωση αυτή, ο ομιλητής πρέπει να αφήνει μεγαλύτερα κενά ανάμεσα στις λέξεις που προφέρει και συγχρόνως να μειώνει την ένταση της ομιλίας. Αντιθέτως, ο μικρός χρόνος αντήχησης βελτιώνει την ευκρίνεια της ομιλίας αλλά οδηγεί σε μείωση της ολικής στάθμης εντάσεως του ήχου και η ομιλία στερείται βάθους.



Σχήμα 2.36. Βέλτιστες τιμές του χρόνου αντήχησης ανάλογα με τον όγκο του χώρου. Στο άνω όριο επιτυγχάνουμε υψηλές στάθμες ήχου ενώ στο κάτω όριο υψηλή υποκειμενική ευκρίνεια. (Α. Σωτηροπούλου 1996)

Ο όγκος του χώρου σχετίζεται με την τιμή του όγκου ανά ακροατή και του αριθμού των ακροατών. Οι συνιστώμενες τιμές του όγκου ανά ακροατή σε ένα χώρο ακρόασης ομιλίας κυμαίνονται από $2,3-4,3m^3$ με βέλτιστη τιμή τα $3,1m^3$. Αν η τιμή όγκου ανά ακροατή είναι αισθητά μικρότερη από τη βέλτιστη τότε και ο χρόνος αντήχησης θα είναι μικρότερος από το βέλτιστο, που σημαίνει ότι θα πρέπει να μην τοποθετηθούν ηχοαπορροφητικά υλικά στο χώρο ή να αφαιρεθούν καθίσματα. Το αντίθετο συμβαίνει αν η τιμή του όγκου ανά ακροατή είναι σημαντικά μεγαλύτερη από τη βέλτιστη.

2.5.5. Βελτιστοποίηση του χρόνου αντήχησης με βάση την ελληνική γλώσσα

Ο βέλτιστος χρόνος αντήχησης σε ένα χώρο σχετίζεται άμεσα με τη γλώσσα που χρησιμοποιείται.

Για την Ελληνική Γλώσσα από πλευράς ευκρίνειας της ομιλίας οι καλύτερες συνθήκες ακρόασης που χαρακτηρίζουν την κατάσταση ως «Εξαιρετική» είναι για χρόνους αντήχησης μικρότερους από 0,9sec, ενώ «Πολύ καλή» χαρακτηρίζεται η κατάσταση για χρόνους αντήχησης από 0,9 - 1,4sec.

Επιπλέον, πρέπει να εξασφαλίζονται συνθήκες άνετης ακρόασης για τους ακροατές, για να μην καταβάλλουν έντονη προσπάθεια να αντιληφθούν την ομιλία. Για την ελληνική γλώσσα από πλευράς κόπωσης των ακροατών οι καλύτερες συνθήκες ακρόασης επιτυγχάνονται για χρόνους αντήχησης γύρω από το 1,0sec. Για χρόνους αντήχησης μικρότερους από 1,0sec υφίσταται αύξηση της κόπωσης με πολύ βραδύ ρυθμό, αφού η ομιλία στερείται βάθους. Για χρόνους αντήχησης μεγαλύτερους από 1,0sec υφίσταται αύξηση της κόπωσης με έντονο ρυθμό, εξαιτίας του φαινομένου της επικάλυψης.

ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΜΦΙΘΕΑΤΡΟΥ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2-ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Τέλος, οι ιδανικές συνθήκες ακρόασης ομιλίας σε χώρους διδασκαλίας για την Ελληνική Γλώσσα λαμβάνοντας υπόψη τόσο την ευκρίνεια της ομιλίας, όσο και την κόπωση των ακροατών, επιτυγχάνονται σε χρόνο αντήχησης γύρω από το 1,0 sec, με δυνατότητα μεταβολής από 0,8 - 1,2sec. (Γ. Πουλάκος 1989)

Βιβλιογραφική αναδρομή

Η **ακουστική χώρων** ή **αρχιτεκτονική ακουστική** ασχολείται γενικότερα με τη μελέτη και συμπεριφορά του ήχου σε διάφορους κλειστούς χώρους και την αλληλεπίδραση με τα διάφορα αντικείμενα στο εσωτερικό των χώρων αυτών (αίθουσες συναυλιών, αμφιθέατρα, θέατρα, κινηματογράφοι, όπερες, studios, ναοί, γραφεία, άλλους εργασιακούς χώρους, ακόμη και απλές κατοικίες), με σκοπό τον έλεγχο του παραγόμενου ηχητικού αποτελέσματος και του επιπέδου θορύβου και αντηχήσεων.

Η έρευνα μας εστιάζει στην ακουστική αμφιθεάτρων διδασκαλίας για τα οποία κοινή είναι η αίσθηση ότι στην πλειονότητά τους πάσχουν από τυπικά σφάλματα στον ακουστικό σχεδιασμό τους. Η αποφυγή τέτοιων σφαλμάτων μπορεί να εξοικονομήσει αφάνταστο κόστος κατασκευής και εξίσου υψηλό όφελος ως προς τις επιπτώσεις στην μαθησιακή διαδικασία.

Σύμφωνα με έρευνες που συνδέουν τις επιπτώσεις στην επικοινωνία με τις κακές συνθήκες ακρόασης των χώρων διδασκαλίας προβάλλει τα κυριότερα συμπεράσματα που είναι σχετικά με αυτόν τον τομέα. Η ανεπαρκής ακουστική των χώρων διδασκαλίας οδηγεί σε χαμηλές επιδόσεις των μαθητών, ενώ έχει επιπτώσεις και στην υγεία των διδασκόντων, οι οποίοι προσπαθούν να αντεπεξέλθουν στις συνθήκες αυτές. Ο υπερβολικός θόρυβος βάθους, η κακή άρθρωση λόγου από τους διδάσκοντες και ο μεγάλος χρόνος αντήχησης αποτελούν πρόβλημα. Ο θόρυβος συνδέεται με σοβαρές επιπτώσεις στην κοινωνική συμπεριφορά των μαθητών. Οι επιπτώσεις του θορύβου στους μαθητές μειώνονται καθώς αυξάνεται η ηλικία τους.

Ακόμα, η παράμετρος της γλώσσας υπεισέρχεται στην αντίληψη του ακροάματος στους χώρους διδασκαλίας και στη μαθησιακή ευχέρεια. Ανάλογα με τη γλώσσα, ο βέλτιστος χρόνος αντήχησης διαφοροποιείται για να ικανοποιήσει όχι μόνο το κριτήριο της ευκρίνειας της ομιλίας, αλλά και το κριτήριο κόπωσης των ακροατών.

Επίσης είναι αναγκαίο να επισημάνουμε ότι τις τελευταίες τρεις δεκαετίες υπήρξε μια αλματώδης εξέλιξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών που είχε ως επακόλουθο η χρήση τους να επεκταθεί σε πολλές περισσότερες επιστήμες σε σχέση με τα πρώτα χρόνια ύπαρξής τους. Μία από αυτές είναι και η επιστήμη της ακουστικής. Αρκετά είναι τα προγράμματα που κυκλοφορούν στο εμπόριο και στα οποία μπορούμε να προσομοιώσουμε έναν χώρο (υπάρχοντα ή μη) με σκοπό να προσδιορίσουμε τις ακουστικές παραμέτρους.

Μία δημοσίευση των Hodgson et al (2008) έχει ως αντικείμενο τη σύγκριση μετρήσεων στον πραγματικό και στον οωνί χώρο. Στην μελέτη αυτή χρησιμοποιούνται δύο όμοιοι πειραματικοί χώροι 480 m³ ο καθένας με μόνη διαφορά ο ένας είναι τελείως γυμνός από ηχοαπορροφητικά υλικά ενώ ο άλλος είναι επενδυμένος με ένα συγκεκριμένο και γνωστό στον μελετητή ηχοαπορροφητικό υλικό. Για κάθε έναν από τους δύο αυτούς πειραματικούς χώρους γίνονται μετρήσεις, όσο και στον οωνί, μέσω της προσομοίωσής τους στον ηλεκτρονικό υπολογιστή, χώρο. Οι συγγραφείς καταλήγουν στο ότι η προσομοίωση με ηλεκτρονικό

ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΜΦΙΘΕΑΤΡΟΥ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

υπολογιστή δε δίνει ακριβή αποτελέσματα στην περίπτωση χαμηλού χρόνου αντήχησης ή υψηλού θορύβου βάρους.

Η βιβλιογραφία αποδεικνύει ότι ο ακουστικός σχεδιασμός των χώρων διδασκαλίας αποτελεί μια περιοχή, η οποία έχει ανάγκη περαιτέρω διερεύνησης και κατανόησης.

Η έλλειψη μελετών που να κωδικοποιούν τα συνήθη σφάλματα στην κατασκευή χώρων διδασκαλίας, τα οποία δυστυχώς έχουν ως αποτέλεσμα τη μείωση της ευκρίνειας του ήχου της ομιλίας, και να δικαιολογούν επιστημονικά τα προβλήματα που πηγάζουν με τη διεξαγωγή φυσικών ακουστικών μετρήσεων, μας οδήγησε στην κατάστρωση της παρούσας εργασίας.

4.1 Γενικές παρατηρήσεις

Στην παρούσα εργασία θα μελετήσουμε κλειστό χώρο διδασκαλίας και συγκεκριμένα αμφιθέατρο. Ως αμφιθέατρο ορίζουμε το χώρο με κάτοψη σχήματος βεντάλιας σε αντίθεση με την αίθουσα που είναι χώρος με ορθογωνική κάτοψη. Στο ευρύ κοινό έχει επικρατήσει ο εν λόγω διαχωρισμός να μη γίνεται με βάση το σχήμα της κάτοψης του χώρου αλλά με βάση το επίπεδο διάταξης των ακροατών. Ειδικότερα, στην περίπτωση που το επίπεδο διάταξης των ακροατών είναι κεκλιμένο, ο χώρος ονομάζεται αμφιθέατρο, ενώ όταν είναι οριζόντιο ονομάζεται αίθουσα.

Η διάκριση των χώρων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου γίνεται σύμφωνα με το επίπεδο διάταξης των ακροατών, οπότε από το σημείο αυτό και στη συνέχεια θα υιοθετήσουμε και εμείς το συγκεκριμένο τρόπο ονομασίας, για να μην προκύψουν λανθασμένα συμπεράσματα.

Ένα αρχικό γενικό σχόλιο είναι ότι στα αμφιθέατρα, λόγω του κεκλιμένου επιπέδου διάταξης των ακροατών, εξασφαλίζεται η απρόσκοπτη πορεία του απ' ευθείας ήχου, που σημαίνει ότι αυξάνει το ποσό του ήχου που αντιστοιχεί σε κάθε ακροατή σε σχέση με την αίθουσα, όπου λόγω του οριζόντιου επιπέδου διάταξης του ακροατηρίου, μέρος του ήχου απορροφάται από τον προηγούμενο ακροατή.

4.2 Χώρος διδασκαλίας

Ο χώρος διδασκαλίας που θα χρησιμοποιήσουμε, είναι το αμφιθέατρο 20 του κτιρίου Γκίνη του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου στο συγκρότημα Πατησίων.

4.3 Φυσικές ακουστικές μετρήσεις

4.3.1. Γενικά

Διενεργήσαμε αρχιτεκτονική αποτύπωση των χώρων, έτσι ώστε να χρησιμοποιήσουμε τα φυσικά δεδομένα τους στους υπολογισμούς των επόμενων φάσεων.

Στη συνέχεια, διεξήχθησαν φυσικές ακουστικές μετρήσεις, δηλαδή η μέτρηση του θορύβου βάθους, της στάθμης εντάσεως του ήχου (SPL) και του χρόνου αντήχησης.

4.3.2. Μετρήσεις θορύβου βάθους

Μετρήθηκε ο θόρυβος μέσα στο αμφιθέατρο σε οκταβικές ζώνες συχνοτήτων.

4.3.3. Μετρήσεις στάθμης εντάσεως του ήχου

Μετρήσαμε σε 20 θέσεις του αμφιθεάτρου τη στάθμη εντάσεως του ήχου, μία τιμή ανά θέση

4.3.4. Μετρήσεις χρόνου αντήχησης

Ένας χώρος διδασκαλίας χαρακτηρίζεται από το χρόνο αντήχησης που επικρατεί εντός αυτού, και πρέπει είναι σταθερός μέσα στο χώρο, καθώς και το δε ηχητικό

ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΜΦΙΘΕΑΤΡΟΥ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

πεδίο να είναι διάχυτο. Με στόχο την καλύτερη προσέγγιση της πραγματικής τιμής του χρόνου αντήχησης πήραμε μετρήσεις σε παραπάνω από μία θέσεις στο χώρο διδασκαλίας. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο στις χαμηλές συχνότητες, που υπάρχει σχετικά αυξημένη διακύμανση τιμών, λόγω του μεγάλου μήκους κύματος των ηχητικών κυμάτων.

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο χώρο διδασκαλίας χωρίς ακροατήριο, από τη στιγμή που η διεξαγωγή τους σε κατειλημμένο χώρο θα ήταν ιδιαίτερα δύσκολη.

4.3.5. Συνδεσμολογία

Στις μετρήσεις για τον προσδιορισμό των σταθμών ηχητικής έντασης στα διάφορα σημεία του αμφιθεάτρου ως σύστημα παραγωγής ήχου χρησιμοποιήθηκε η ηχητική πηγή 1001 της Bruel & Kjaer συνδεδεμένη με οκταβικό φίλτρο συχνοτήτων. Ως σύστημα λήψεως του ήχου χρησιμοποιήθηκε το ηχόμετρο τύπου 2209 της Bruel & Kjaer συνδεδεμένο με οκταβικό φίλτρο συχνοτήτων 1613. Στον ενισχυτή επιλέγουμε κάθε φορά τη συχνότητα, στην οποία θα γίνει η μέτρηση, προσέχοντας πάντα να συμπίπτει με την ορισμένη, στο φίλτρο, συχνότητα. Ανοίγουμε τον ενισχυτή, για να λειτουργήσει η ηχητική πηγή, και μέσω του ηχομέτρου μετράμε τη στάθμη εντάσεως του ήχου σε dB .

Με σκοπό να έχουν νόημα οι μετρήσεις θεωρούμε ως σημείο αναφοράς τη στάθμη εντάσεως του ήχου στη θέση μέτρησης, πολύ κοντά στην ηχητική πηγή, και υπολογίζουμε τη μεταβολή της στάθμης εντάσεως του ήχου πηγής σταθερής εκπομπής, δηλαδή την απόσβεση της στάθμης εντάσεως του ήχου πηγής σταθερής εκπομπής συναρτήσει της απόστασης από την ηχητική πηγή.

Το ίδιο σύστημα λήψης του ήχου χρησιμοποιήθηκε και για τον προσδιορισμό του θορύβου βόθους.

Για τον προσδιορισμό του χρόνου αντήχησης χρησιμοποιήθηκε ως σύστημα ηχητικής εκπομπής ο ήχος από πιστόλι εκπυροσκόρπησης και ως σύστημα λήψης η συσκευή 2250 της Bruel & Kjaer.

Όλες οι μετρήσεις έγιναν στις οκταβικές ζώνες συχνοτήτων 125, 250, 500, 1000, 2000 και 4000 Hz.

ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΜΦΙΘΕΑΤΡΟΥ
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5-ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

5.1 Χρόνος Αντήχησης

Αρχικά παραθέτουμε έναν πίνακα που παρουσιάζει τον χρόνο αντήχησης για τις διάφορες θέσεις μέτρησης, χωρισμένες ανά τις συχνότητες που μελετάμε. Ακολουθεί ένα διάγραμμα του χρόνου αντήχησης στις διάφορες σχέσεις συνταρτήσεων των υπό εξέταση συχνοτήτων, για μια ταχεία εικόνα της μεταβολής του χρόνου αντήχησης σε σχέση με τις υπό εξέταση συχνότητες.

Πίνακας 5.1 Μέτρηση χρόνου αντήχησης $T_R(s)$ - χωρίς ακροατήριο												
		125	250		500		1000		2000		4000	
ΘΕΣΗ ΜΕΤΡΗΣΗΣ	T_R (sec)	μ.τ. T_R	$T_R(sec)$	μ.τ. T_R	$T_R(sec)$	μ.τ. T_R	$T_R(sec)$	μ.τ. T_R	$T_R(sec)$	μ.τ. T_R	$T_R(sec)$	μ.τ. T_R
Α	2,00		1,80		1,50		1,40		1,30		1,30	
	2,00		1,80		1,60		1,30		1,40		1,30	
	2,10	2,03	1,90	1,83	1,70	1,60	1,50	1,40	1,40	1,37	1,30	1,30
Β	2,10		1,60		1,60		1,30		1,40		1,20	
	2,10		1,70		1,60		1,40		1,40		1,30	
	2,10	2,10	1,70	1,67	1,50	1,57	1,40	1,37	1,30	1,37	1,20	1,23
Γ	2,00		1,80		1,60		1,40		1,30		1,20	
	2,10		1,80		1,60		1,40		1,40		1,20	
	2,10	2,07	1,70	1,77	1,40	1,53	1,50	1,43	1,40	1,37	1,20	1,20
Δ	1,90		1,60		1,50		1,50		1,40		1,20	
	1,90		1,70		1,60		1,50		1,40		1,30	
	1,90	1,90	1,60	1,63	1,70	1,60	1,50	1,50	1,50	1,43	1,20	1,23
μέση τιμή	2,03		1,73		1,58		1,43		1,38		1,24	
τυπική απόκλιση	0,08		0,10		0,08		0,06		0,04		0,03	

Πίνακας 5.1 Χρόνος Αντήχησης $T_R(sec)$, από μετρήσεις στο αμφιθέατρο χωρίς ακροατήριο

Σχήμα 5.1 Διάγραμμα χρόνου αντήχησης, ανά θέση μέτρησης

Παρακάτω ακολουθεί το διάγραμμα που αποτυπώνει τον μέσο όρο χρόνου αντήχησης των διαφόρων θέσεων μέτρησης σε συνάρτηση με τις υπό εξέταση συχνότητες.

Σχήμα 5.2 Διάγραμμα χρόνου αντήχησης, μέσο όρος μετρήσεων ανά συχνότητα όλων των θέσεων

5.2 Υπολογισμός θεωρητικού χρόνου αντήχησης για αμφιθέατρο χωρίς ακροατήριο

Ο χρόνος αντήχησης για συνηθισμένους χώρους και για συνθήκες διάχυτου ηχητικού πεδίου προσδιορίζεται με πολύ καλή προσέγγιση από τον εμπειρικό τύπο του Sabine, ο οποίος είναι

$$T_R = 0,163A \times V, \text{ σε sec. τύπος (1)}$$

V: ο όγκος του χώρου σε κυβικά μέτρα (m^3)

A: η ισοδύναμη επιφάνεια ηχοαπορρόφησης του χώρου (dB)

T_R : χρόνος αντήχησης σε sec

Ο όγκος του αμφιθεάτρου υπολογίζεται ίσος με $985,84 m^3$.

ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΜΦΙΘΕΑΤΡΟΥ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5-ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Άρα έχω $V = 985,84 \text{ m}^3$

Από τις μετρήσεις και την βοήθεια του παραπάνω τύπου (1) προκύπτει ο εξής πίνακας, ο οποίος παρουσιάζει την ηχοαπορρόφηση του κενού αμφιθεάτρου ανά εξεταζόμενη συχνότητα, βάσει μετρήσεων.

ηχοαπορρόφηση A χωρίς ακροατήριο από μετρήσεις	
συχνότητα f(Hz)	A(dB)
125	79,35
250	93,15
500	102,03
1000	112,77
2000	116,16
4000	129,42

Πίνακας 5.2 Ηχοαπορρόφηση A(db) βάσει μετρήσεων, στο αμφιθέατρο χωρίς ακροατήριο

Η θεωρητική ισοδύναμη επιφάνεια ηχοαπορρόφησης A, ενός χώρου δίνεται από τον παρακάτω τύπο:
 $\Sigma S_i \cdot a_i + \Sigma N_j \cdot a_j$

S_i : το εμβαδό της επιφάνειας του κάθε διαφορετικού υλικού σε τετραγωνικά μέτρα (m^2)

α_i : ο αντίστοιχος συντελεστής ηχοαπορρόφησης

N_j : ο αριθμός των προσώπων και των ομοειδών επίπλων (πχ καρέκλες)

α_j : ο αντίστοιχος συντελεστής ηχοαπορρόφησης ανά μονάδα (άτομο ή έπιπλο).

Ακολουθούν οι πίνακες με τους συντελεστές ηχοαπορρόφησης σε σχέση με τα υλικά και την εξεταζόμενη συχνότητα, καθώς επίσης και τα εμβαδά των υλικών.

Συντελεστής ηχοαπορρόφησης α	συχνότητα f(Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Υλικά χώρου διδασκαλίας						
επίχρισμα ασβεστομαρμαροκονιάματος	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,05
ξύλινη πόρτα	0,18	0,12	0,08	0,05	0,08	0,10
πίνακας	0,10	0,07	0,06	0,04	0,06	0,10
μωσαικά	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04
ξύλινα βάθρο	0,42	0,30	0,20	0,15	0,12	0,10
ξύλινη επένδυση σε τοίχο	0,06	0,06	0,05	0,03	0,03	0,02
συνιτισμένα τζάμια παραθύρου	0,35	0,25	0,18	0,10	0,07	0,04
επένδυση από διάτρητο celotex πάχους 12 mm	0,23	0,30	0,38	0,45	0,46	0,50
ξύλινα καθίσματα	0,03	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05

Πίνακας 5.3 Υλικά χώρου διδασκαλίας και οι συντελεστές ηχοαπορρόφησης τους

Παρακάτω παρατίθεται ο πίνακας με τα υλικά του αμφιθεάτρου, καθώς επίσης και η επιφάνειά τους.

Υλικά χώρου διδασκαλίας	Εμβαδά Υλικών (m ²)
επίχρισμα ασβεστομαρμαροκονιάματος	233,00
ξύλινη πόρτα	24,00
Πίνακας	8,00
Μωσαικά	258,00
ξύλινα βάθρο	18,00
ξύλινη επένδυση σε τοίχο	9,00
συνιτισμένα τζάμια παραθύρου	12,60
επένδυση από διάτρητο celotex πάχους 12 mm	193,00
ξύλινα καθίσματα	103,00

Πίνακας 5.4 Υλικά και τα αντίστοιχα εμβαδά τους

ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΜΦΙΘΕΑΤΡΟΥ
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5-ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Βάσει του παραπάνω τύπου και των πινάκων με τα χαρακτηριστικά των υλικών, υπολογίζουμε την θεωρητική ηχοαπορρόφηση συναρτήσει των υπό εξέταση συχνοτήτων.

Θεωρητική ηχοαπορρόφηση A χωρίς ακροατήριο	
συχνότητα f(Hz)	A(dB)
125	79,84
250	89,28
500	100,91
1000	112,48
2000	119,28
4000	129,30

Πίνακας 5.5 Θεωρητική ηχοαπορρόφηση A(dB) στο αμφιθέατρο, χωρίς ακροατήριο

Εν συνεχεία υπολογίζεται και ο θεωρητικός χρόνος αντήχησης χωρίς ακροατήριο, βάσει του τύπου είναι

$$TR=0,163A \times V, \text{ σε sec. τύπος (1).}$$

θεωρητικός χρόνος αντήχησης	
συχνότητα f(Hz)	T _R (sec)
125	2,01
250	1,80
500	1,59
1000	1,43
2000	1,35
4000	1,24

Πίνακας 5.6 Θεωρητικός χρόνος αντήχησης T_R(sec) στο αμφιθέατρο, χωρίς ακροατήριο

Παρακάτω παρουσιάζεται τα διαγράμματα με τις καμπύλες της θεωρητικής και της βάσει μετρήσεων υπολογισμένη ηχοαπορρόφηση A(dB)

Σχήμα 5.3 Διάγραμμα ηχοαπορρόφησης A(dB) από μετρήσεις και θεωρητικές τιμές βάσει σχέσης (1)

Ακολουθούν αντίστοιχα διαγράμματα με τους χρόνους αντήχησης.

Σχήμα 5.4 Διάγραμμα χρόνου Αντήχησης T_R(sec) από μετρήσεις και θεωρητικές τιμές βάσει σχέσης (1)

ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΜΦΙΘΕΑΤΡΟΥ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5-ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Παρατηρούμε ότι οι τιμές της ηχοαπορρόφησης και του χρόνου αντήχησης αφ' ενός με θεωρητικό υπολογισμό και αφ' ετέρου με υπολογισμό βάσει μετρήσεων είναι ικανοποιητικά κοντά.

5.3 Υπολογισμός χρόνου αντήχησης για αμφιθέατρο με πληρότητα ακροατηρίου κατά τα 2/3

Το ακροατήριο έχει χωρητικότητα 212 ατόμων.

Οι μετρήσεις, όπως είναι λογικό, έχουν πραγματοποιηθεί σε κενό χώρο διδασκαλίας. Οι διαλέξεις, παρόλ' αυτά πραγματοποιούνται με ένα ποσοστό ακροατηρίου μέσα στο χώρο, το οποίο ακροατήριο όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό λειτουργεί ως επιπλέον ηχοαπορροφητικά στοιχεία. Θα ήταν λοιπόν πρακτικό να υπολογιστεί το μέγεθος χρόνου αντήχησης θεωρώντας την αίθουσα διάλεξης γεμάτη κατά τα 2/3.

Αρχικώς παίρνουμε τον τύπο $TR=0,163A \times V$, σε sec. τύπος (1)

V: ο όγκος του χώρου σε κυβικά μέτρα (m^3)

A: η ισοδύναμη επιφάνεια ηχοαπορρόφησης του χώρου (dB)

T_R : χρόνος αντήχησης σε sec

Ακολουθώς υπολογίζουμε τη συνολική ηχοαπορρόφηση A(dB) του κενού χώρου σε όλες τις συχνότητες που μελατάμε, βάσει του προαναφερθέντα τύπου, πράγμα το οποίο έχουμε ήδη κάνει (πίνακας 5.5).

Βρίσκουμε την ηχοαπορρόφηση των 2/3 του συνόλου του ακροατηρίου, θεωρώντας ότι αντιστοιχούν 2 άτομα/ m^2 (συνολικά θεωρώ ότι υπάρχουν 141 άτομα) με χρήση των κατωτέρω συντελεστών.

Συντελεστής ηχοαπορρόφησης α	συχνότητα f(Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
ξύλινα καθίσματα κενά	0,03	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05
ξύλινα καθίσματα κατειλημένα(ανά άτομο)	0,24	0,40	0,55	0,60	0,60	0,60

Πίνακας 5.7 Συντελεστές ηχοαπορρόφησης α για ξύλινα καθίσματα και για ακροατήριο σε ξύλινα καθίσματα

Οι συντελεστές ηχοαπορρόφησης του παραπάνω πίνακα δίνουν ως αποτέλεσμα ηχοαπορρόφηση A(dB) πολλαπλασιαζόμενοι με αριθμό ή άτομα και όχι με εμβαδό όπως στα υλικά.

Προκειμένου να βρούμε την συνολική ηχοαπορρόφηση του ακροατηρίου, εφαρμόζουμε ανά συχνότητα τον παρακάτω τύπο.

$$A(2/3 \text{ ακροατηρίου}) = \text{αριθμός καθισμάτων} \cdot \text{συντελεστής κατειλημένων καθισμάτων} - \text{αριθμός καθισμάτων} \cdot \text{συντελεστής κενών καθισμάτων}$$

	συχνότητα f(Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
A(2/3 ακροατηρίου)	29,68	50,88	72,08	77,73	77,73	77,73

Πίνακας 5.8 Τιμές ηχοαπορρόφησης A(dB) με πληρότητα ακροατηρίου κατά 2/3

Ακολούθως με τον τύπο Sabine για πληρότητα ακροατηρίου κατά τα 2/3 έχουμε

$$T_R(2/3 \text{ κατειλημμένο}) = 0,163 A_{2/3} \text{ κατειλημμένο} \times V,$$

V: ο όγκος του χώρου σε κυβικά μέτρα (m³)

A: η ισοδύναμη επιφάνεια ηχοαπορρόφησης του χώρου (dB) με πληρότητα ακροατηρίου κατά τα 2/3

T_R(2/3 κατειλημμένο) = χρόνος αντήχησης σε sec.

$$\text{Όπου βεβαίως, } A_{2/3} \text{ κατειλημμένο} = A_{\text{κενό}} + A(2/3 \text{ ακροατηρίου})$$

συχνότητα f(Hz)	A(κενό)	A(2/3 ακροατηρίου)	A(2/3 κατειλημμένο)
125	79,84	29,68	109,52
250	89,28	50,88	140,16
500	100,91	72,08	172,99
1000	112,48	77,73	190,21
2000	119,28	77,73	197,02
4000	129,30	77,73	207,04

Πίνακας 5.9 Τιμές ηχοαπορρόφησης A(dB) για ακροατήριο κατειλημμένο κατά 2/3.

Βρίσκω εν τέλει τον μέσο όρο ανά συχνότητα του χρόνου αντήχησης σε χώρο με κατειλημμένα τα 2/3 των καθισμάτων του.

συχνότητα f(Hz)	T _R (sec) (κενό)	T _R (sec) (2/3 κατειλημμένο)
125	2,012675	1,47
250	1,799866	1,15

ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΜΦΙΘΕΑΤΡΟΥ
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5-ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

500	1,59246	0,93
1000	1,428627	0,84
2000	1,347161	0,82
4000	1,242746	0,78

Πίνακας 5.10 Χρόνος Αντήχησης $T_R(sec)$ για αμφιθέατρο κατειλημμένο κατά τα 2/3

5.4 Υπολογισμός χρόνου αντήχησης για αμφιθέατρο με πληρότητα ακροατηρίου

Βρίσουμε την ηχοαπορρόφηση του συνόλου του ακροατηρίου, θεωρώντας ότι αντιστοιχούν 2 άτομα /m², με χρήση των κατωτέρω συντελεστών.

Συντελεστής ηχοαπορρόφησης α	συχνότητα f(Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
ξύλινα καθίσματα κενά	0,03	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05
ξύλινα καθίσματα κατειλημένα(ανά άτομο)	0,24	0,40	0,55	0,60	0,60	0,60

Πίνακας 5.11 Συντελεστές ηχοαπορρόφησης α για ξύλινα καθίσματα και για ακροατήριο σε ξύλινα καθίσματα

Εφαρμόζουμε ανά συχνότητα τον τύπο:

A(πλήρους ακροατηρίου)= αριθμός καθισμάτων*συντελεστής κατειλημένων καθισμάτων-αριθμός καθισμάτων*συντελεστής κενών καθισμάτων, όπου αριθμός καθισμάτων είναι η τιμή 212 άτομα.

Βάσει του οποίου έχουμε τα αποτελέσματα του παρακάτω πίνακα.

	συχνότητα f(Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
A(πλήρους ακροατηρίου)	44,52	76,32	108,12	116,6	116,6	116,6

Πίνακας 5.12 Πίνακας τιμών ηχοαπορρόφησης A(dB) για πλήρες αμφιθέατρο

Εν συνεχεία με εφαρμογή του παρακάτω τύπου ανά συχνότητα,

A κατειλημμένο=Aκενό+A(ακροατηρίου)

συχνότητα f(Hz)	A(κενό)	A(ακροατηρίου)	A(κατειλημένο)
125	79,84	44,52	124,36
250	89,28	76,32	165,60
500	100,91	108,12	209,03
1000	112,48	116,60	229,08
2000	119,28	116,60	235,88
4000	129,30	116,6	245,90

Πίνακας 5.13 Ηχοαπορρόφηση A(dB) για πλήρες ακροατήριο

Εφαρμόζουμε εκ νέου τον τύπο Sabine, αλλά για αμφιθέατρο πλήρες αυτή τη φορά.

$$T_R(\text{κατειλημμένο}) = 0,163 A_{\text{κατειλημμένο}} \times V,$$

V: ο όγκος του χώρου σε κυβικά μέτρα (m³)

A: η ισοδύναμη επιφάνεια ηχοαπορρόφησης του χώρου (dB) με πληρότητα ακροατηρίου

T_R(κατειλημμένο) = χρόνος αντήχησης σε sec.

Υπολογίζουμε τους χρόνους αντήχησης T_R (sec),

συχνότητα f(Hz)	T _R (κενό) sec	T _R (κατειλημμένο) sec
125	2,01	1,29
250	1,80	0,97
500	1,59	0,77
1000	1,43	0,70
2000	1,35	0,68
4000	1,24	0,65

Πίνακας 5.14 Χρόνος αντήχησης για πλήρες αμφιθέατρο από ακροατήριο

5.5 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα που απεικονίζουν τόσο την ηχοαπορρόφηση όσο και τον χρόνο αντήχησης του αμφιθεάτρου, όταν αυτό είναι κενό, αλλά και κατειλημένο κατά τα 2/3 και πλήρες. Αρχικά το διάγραμμα ηχοαπορρόφησης,

Σχήμα 5.5 Απεικόνιση της ηχοαπορρόφησης A(dB) για πλήρες, κενό και κατειλημένο κατά 2/3 αμφιθέατρο.

Εν συνεχεία το διάγραμμα χρόνου αντήχησης,

Σχήμα 5.6 Απεικόνιση χρόνων αντήχησης για κενό, πλήρες και κατειλημμένο κατά 2/3

Παρατηρώντας το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι το αμφιθέατρό μας κατειλημμένο κατά τα 2/3 από ακροατήριο, έχει χρόνο αντήχησης που δεν προσεγγίζει τον επιθυμητό, ο οποίος κυμαίνεται γύρω στα 0,95 με 1,00 sec. Συνεπώς απαιτείται κατάλληλη επιδιόρθωση του αμφιθέατρου μας ώστε να καταστεί ιδανικός ο χώρος ακρόασης για κάθε μορφή διαδικασίας.

5.6 Μετατροπή του εξεταζόμενου αμφιθέατρου σε ιδανικό χώρο ακρόασης για διδασκαλία

Ο επιθυμητός χρόνος αντήχησης σε ιδανικές συνθήκες ακρόασης ομιλίας σε χώρους διδασκαλίας εκτιμάται περίπου σε 0,95 για πληρότητα 2/3 του ακροατηρίου. Με βάση αυτή υπολογίζουμε την αντίστοιχη ηχοαπορρόφηση από τον τύπο του Sabine και προκύπτει για κάθε συχνότητα η απαιτούμενη ηχοαπορρόφηση A(dB). Παρακάτω παρατίθεται ένας πίνακας που δείχνει την διαφορά ,ανά συχνότητα, της επιθυμητής ηχοαπορρόφησης με την υπάρχουσα.

συχνότητα f(Hz)	Ηχοαπορρόφηση A(dB)	Ηχοαπορρόφηση A(dB) σε	Διαφορά
-----------------	---------------------	------------------------	---------

ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΜΦΙΘΕΑΤΡΟΥ
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5-ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

	σε ιδανικές συνθήκες ακρόασης	αμφιθέατρο κατειλ/νο κατα τα 2/3	
125	169,15	109,52	59,63
250	169,15	140,16	28,99
500	169,15	172,99	-3,84
1000	169,15	190,21	-21,06
2000	169,15	197,02	-27,87
4000	169,15	207,04	-37,89

Πίνακας 5.15 Διαφορά ηχοαπορρόφησης μεταξύ ιδανικού και υφιστάμενου αμφιθεάτρου

Από τον παραπάνω πίνακα εξάγουμε το συμπέρασμα ότι για τις συχνότητες 125 και 250 θέλουμε αύξηση της ηχοαπορροφητικότητας, ενώ για τις υπόλοιπες συχνότητες θέλουμε μείωση. Κριτήριο για την επιλογή του εμβαδού των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν είναι ο χρόνος αντήχησης για αμφιθέατρο κατα 2/3 πλήρες.

Συντελεστής ηχοαπορρόφησης α	συχνότητα f(Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Υλικά χώρου διδασκαλίας						
επίχρισμα ασβεστομαρμαροκονιάματος	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,05
ξύλινη πόρτα	0,18	0,12	0,08	0,05	0,08	0,10
πίνακας	0,10	0,07	0,06	0,04	0,06	0,10
μωσαϊκά	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04
ξύλινα βάρθο	0,42	0,30	0,20	0,15	0,12	0,10
ξύλινη επένδυση σε τοίχο	0,06	0,06	0,05	0,03	0,03	0,02
συνιτισμένα τζάμια παραθύρου	0,35	0,25	0,18	0,10	0,07	0,04
επένδυση από διάτρητο celotex πάχους 12 mm	0,23	0,30	0,38	0,45	0,46	0,50
ξύλινα καθίσματα	0,03	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05
γυψοσανίδα	0,38	0,24	0,15	0,06	0,07	0,09

Πίνακας 5.16 Πίνακας συντελεστών ηχοαπορρόφησης α

Εισάγουμε ένα νέο υλικό τη γυψοσανίδα προκειμένου να επιτύχουμε το σκοπό μας. Ύστερα απο δοκιμές καταλήγουμε στον παρακάτω πίνακα που παρουσιάζει τα εμβαδά των αντίστοιχων υλικών.

Υλικά χώρου διδασκαλίας	Εμβαδά Υλικών (m ²)
επίχρισμα ασβεστομαρμαροκονιάματος	133,00
ξύλινη πόρτα	24,00
Πίνακας	8,00
Μωσαικά	258,00
ξύλινα βάθρο	18,00
ξύλινη επένδυση σε τοίχο	9,00
συνιθισμένα τζάμια παραθύρου	12,60
επένδυση από διάτρητο celotex πάχους 12 mm	135,00
ξύλινα καθίσματα	103,00
Γυψοσανίδα	161,00

Πίνακας 5.17 Επιφάνειες υλικών εντός αμφιθεάτρου μετά τη διόρθωση

Τα υλικά που μεταβάλλαμε το εμβαδόν τους προκειμένου να καταστήσουμε το αμφιθέατρο ιδανικό, καθώς επίσης και την μεταβολή που υπέστησαν, φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Υλικά χώρου διδασκαλίας	Μεταβολή Εμβαδών (m ²)
επίχρισμα ασβεστομαρμαροκονιάματος	-100,00
ξύλινη πόρτα	0,00
πίνακας	0,00
μωσαικά	0,00
ξύλινα βάθρο	0,00
ξύλινη επένδυση σε τοίχο	0,00
συνιθισμένα τζάμια παραθύρου	0,00
επένδυση από διάτρητο celotex πάχους 12 mm	-61,00
ξύλινα καθίσματα	0,00
γυψοσανίδα	161,00

Πίνακας 5.18 Πίνακας μεταβολών εμβαδών επιφανειών

Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό από τον πίνακα, τη λύση μας τη δίνει η γυψοσανίδα, η οποία είναι και αυτή που προσθέτουμε στη θέση του απλού επιχρίσματος ασβεστομαρμαροκονιάματος και του celotex.

ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΜΦΙΘΕΑΤΡΟΥ
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5-ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Τα μεγέθη ηχοαπορροφητικότητας και χρόνου αντήχησης για τα νέα δεδομένα , για κενό αμφιθέατρο , για πλήρες και για κατειλημμένο κατά 2/3 φαίνονται στους παρακάτω πίνακες και διαγράμματα.

συχνότητα f(Hz)	A(κενό)	A(2/3 ακροατηρίου)	A(2/3 κατειλημένο)
125	124,59	29,68	154,27
250	107,43	50,88	158,31
500	99,93	72,08	172,01
1000	92,95	77,73	170,68
2000	99,75	77,73	177,49
4000	109,64	77,73	187,38

Πίνακας 5.19 Ηχοαπορρόφηση για πλήρες, κενό και κατειλημμένο κατά 2/3 αμφιθέατρο μετά τη διόρθωση

συχνότητα f(Hz)	T _R (κενό) sec	T _R (2/3 κατειλημένο) sec
125	1,29	1,04
250	1,50	1,02
500	1,61	0,93
1000	1,73	0,94
2000	1,61	0,91
4000	1,47	0,86

Πίνακας 5.20 Χρόνος αντήχησης για κενό και κατειλημμένο κατά 2/3 αμφιθέατρο μετά τη διόρθωση

Ακολουθούν οι τιμές για πλήρες αμφιθέατρο.

συχνότητα f(Hz)	A(κενό)	A(ακροατηρίου)	A(2/3 κατειλημένο)
125	124,59	44,52	169,11
250	107,43	76,32	183,75
500	99,93	108,12	208,05
1000	92,95	116,60	209,55
2000	99,75	116,60	216,35
4000	109,64	116,60	226,24

Πίνακας 5.21 Ηχοαπορρόφηση πλήρους, κενού και κατειλημμένου αμφιθεάτρου μετά τη διόρθωση

συχνότητα f(Hz)	T_R (κενό)	T_R (πλήρες κατειλημμένο)
125	1,29	0,95
250	1,50	0,87
500	1,61	0,77
1000	1,73	0,77
2000	1,61	0,74
4000	1,47	0,71

Πίνακας 5.22 Χρόνος αντίχησης για κατειλημμένο αμφιθέατρο κατά 2/3 μετά τη διόρθωση.

ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΜΦΙΘΕΑΤΡΟΥ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5-ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Σχήμα 5.7 Χρόνος αντήχησης για πλήρες, κενό και κατειλημμένο κατά 2/3 αμφιθέατρο

Από το παραπάνω σχήμα γίνεται φανερό ότι ο χρόνος αντήχησης για αμφιθέατρο κατά τα 2/3 κατειλημμένο προσεγγίζει ικανοποιητικά, ειδικά στις μεσαίες συχνότητες, την τιμή 0,95 sec που επιδιώκουμε.

5.7 Θόρυβος βάθους

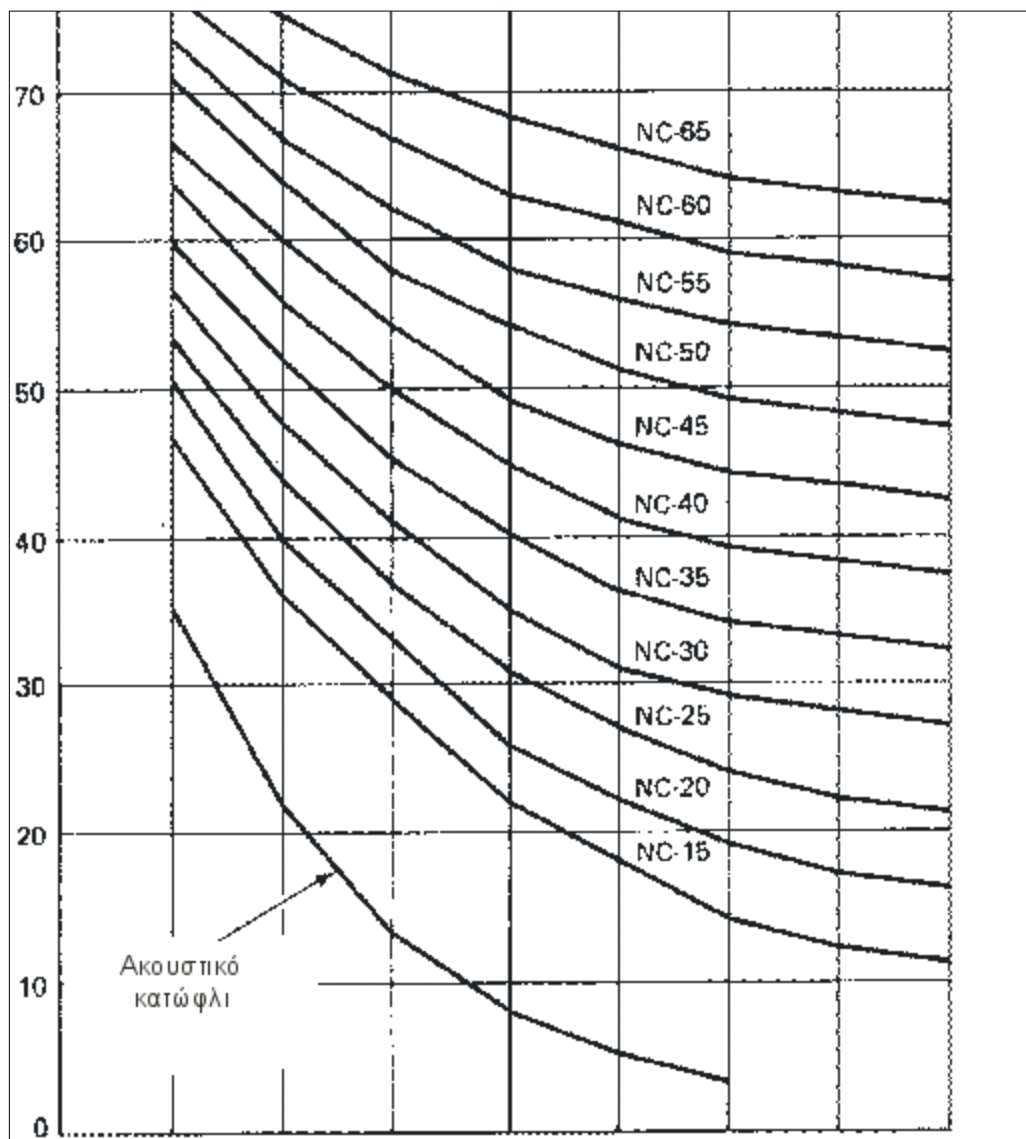
Μετρήθηκε ο θόρυβος βάθους μέσα στο αμφιθέατρο σε οκταβικές ζώνες συχνοτήτων και δίνονται οι μετρήσεις στον παρακάτω πίνακα:

	Θόρυβος βάθους (dB) με αναμμένα φώτα, χωρίς κλιματισμό					
συχνότητ α	125	250	500	1000	2000	4000
	44	41	35	29	23	18

Πίνακας 5.23 Τιμές θορύβου βάθους στις υπό εξέταση συχνότητες.

Επίσης προσδιορίστηκε από το διάγραμμα καμπύλων κριτηρίων θορύβου, στο οποίο τοποθετούμε τις μετρήσεις του θορύβου βάθους συναρτήσει της συχνότητας, το κριτήριο θορύβου που αντιστοιχεί στο συγκεκριμένο χώρο διδασκαλίας και επισυνάπτεται παρακάτω. Έπειτα συγκρίνουμε την τιμή NC στο χώρο με την αποδεκτή τιμή θορύβου, για να διαπιστώσουμε αν την υπερβαίνει ή όχι.

Από το σχήμα 5.6 προκύπτει ότι αυτό το κριτήριο θορύβου αντιστοιχεί σε καλές συνθήκες ακουστικής σε τάξεις(NC20-NC25) και συνεπώς ο θόρυβος βάθους δεν επηρεάζει τις συνθήκες ακρόασης.



Σχήμα 5.8 Κριτήριο θορύβου βάθους

ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΜΦΙΘΕΑΤΡΟΥ
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5-ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

5.8 Στάθμη εντάσεως του ήχου

Παρατηρώντας τον παρακάτω πίνακα και συγκρίνοντας τον με τις τιμές του θορύβου βάθους σε κάθε συχνότητα παρατηρούμε ότι η στάθμη εντάσεως του θορύβου σε όλες τις θέσεις του αμφιθεάτρου και σε όλες τις συχνότητες ξεπερνά το θόρυβο βάθους κατά πολύ (περισσότερο από 10 dB) και συνεπώς προκύπτει ότι η ένταση του ήχου στις θέσεις των ακροατών είναι επαρκής ώστε ο ήχος να γίνεται ακουστός από τους ακροατές.

Πίνακας 5.24 Στάθμη έντασης

ΣΤΑΘΜΗ ΕΝΤΑΣΗΣ ΗΧΟΥ						
συχνότητα	125	250	500	1000	2000	4000
θέση						
1	82	86	89	91	91	90
2	85	89	91	90	92	88
3	85	87	90	89	91	88
4	83	88	88	89	89	87
5	84	87	88	88	89	87
6	82	87	87	87	89	86
7	83	86	87	88	88	86
8	82	86	87	87	88	85
9	82	86	86	87	88	86
10	83	84	87	87	88	85
11	81	86	87	87	88	85
12	81	84	86	87	87	85
13	83	86	87	88	88	86
14	85	87	87	88	88	85
15	83	88	88	89	88	86
16	82	86	88	88	90	88
17	82	86	88	87	88	87
18	84	89	87	89	90	86
19	984	87	89	90	90	89
20	90	94	98	94	94	90

6. Συμπεράσματα

Ο ακουστικός σχεδιασμός των χώρων διδασκαλίας πρέπει να αντιμετωπίζεται με ιδιαίτερη προσοχή από τους μηχανικούς, από τη στιγμή που η σωστή ακουστική εντός αυτών είναι αναπόσπαστο στοιχείο της καλής λειτουργίας τους. Ο στόχος του εν λόγω σχεδιασμού είναι η δημιουργία κατάλληλου ακουστικού περιβάλλοντος για τους ακροατές και για τον ομιλητή. Οι παράγοντες οι σχετικοί με τον παραπάνω στόχο είναι ο θόρυβος βάθους, η στάθμη εντάσεως του ήχου, ο χρόνος αντήχησης οι οποίοι πρέπει να πληρούν συγκεκριμένα κριτήρια για να επιτευχθούν οι καλύτερες δυνατές ακουστικές συνθήκες τόσο από πλευράς ευκρίνειας του ήχου της ομιλίας όσο και από πλευράς ποιότητας του ήχου της ομιλίας.

Στο χώρο διδασκαλίας που μελετήσαμε παρατηρούμε ότι:

- Ο θόρυβος βάθους ικανοποιεί το κριτήριο θορύβου και συνεπώς δεν επηρεάζει τις συνθήκες ακρόασης.
- Η ένταση του ήχου στις θέσεις των ακροατών είναι επαρκής, ώστε ο ήχος να γίνεται ακουστός από τον ακροατή καθώς ξεπερνά κατά πολύ και τον θόρυβο βάθους του συγκεκριμένου χώρου διδασκαλίας.
- Ο χρόνος αντήχησης είναι μικρότερος του επιθυμητού στις μεσαίες και κυρίως στις υψηλές συχνότητες λόγω της αυξημένης ηχοαπορροφητικής ικανότητας του χώρου, ενώ κάποιο έλλειμα ηχοαπορρόφησης παρουσιάζεται στην περιοχή των 125 Hz και των 250 Hz. Έτσι το πρόβλημα του χρόνου αντήχησης αντιμετωπίστηκε με την αντικατάσταση μέρους του ηχοαπορροφητικού υλικού της οροφής με γυψοσανίδα, η οποία τοποθετήθηκε σε κατάλληλες θέσεις ώστε να βελτιώνεται τόσο ο χρόνος αντήχησης όσο και η διάχυση του ήχου μέσα στην αίθουσα.

Τελικά, όντας προσεκτικοί και ακολουθώντας τα παραπάνω, θα έχουμε κάνει ένα θετικό βήμα ως προς τη σωστή ακουστική του αμφιθεάτρου, έτσι ώστε να είναι λειτουργικός από ακουστική άποψη.

Κατάλογος Πινάκων

Κεφάλαιο 5. Μετρήσεις και αποτελέσματα

Αμφιθέατρο Γ20 κτιρίου Γκίνη, συγκρότημα Πατησίων

Πίνακας 5.1 Χρόνος Αντήχησης $T_R(sec)$, από μετρήσεις στο αμφιθέατρο χωρίς ακροατήριο.....	5-40
Πίνακας 5.2 Ηχοαπορρόφηση A(db) βάσει μετρήσεων, στο αμφιθέατρο χωρίς ακροατήριο.....	5-43
Πίνακας 5.3. Υλικά χώρου διδασκαλίας και οι συντελεστές ηχοαπορρόφησής τους.....	5-44
Πίνακας 5.4.Υλικά και τα αντίστοιχα εμβαδά.....	5-44
Πίνακας 5.5. Θεωρητική ηχοαπορρόφηση A(dB) στο αμφιθέατρο, χωρίς ακροατήριο.....	5-45
Πίνακας 5.6. 6 Θεωρητικός χρόνος αντήχησης $T_R(sec)$ στο αμφιθέατρο, χωρίς ακροατήριο	5-45
Πίνακας 5.7 Συντελεστές ηχοαπορρόφησης α για ξύλινα καθίσματα και για ακροατήριο σε ξύλινα καθίσματα.....	5-47
Πίνακας 5.8 Τιμές ηχοαπορρόφησης A(dB) με πληρότητα ακροατηρίου κατά 2/3.....	5-48
Πίνακας 5.9 Τιμές ηχοαπορρόφησης A(dB) για ακροατήριο κατειλημμένο κατά 2/3.....	5-48
Πίνακας 5.10. Χρόνος Αντήχησης $T_R(sec)$ για αμφιθέατρο κατειλημμένο κατά τα 2/3.....	5-48
Πίνακας 5.11. Συντελεστές ηχοαπορρόφησης α για ξύλινα καθίσματα και για ακροατήριο σε ξύλινα καθίσματα.....	5-49
Πίνακας 5.12. Πίνακας τιμών ηχοαπορρόφησης A(dB) για πλήρες αμφιθέατρο	5-49
Πίνακας 5.13. Ηχοαπορρόφηση A(dB) για πλήρες ακροατήριο	5-49
Πίνακας 5.14. Χρόνος αντήχησης για πλήρες αμφιθέατρο από ακροατήριο	5-50
Πίνακας 5.15. Διαφορά ηχοαπορρόφησης μεταξύ ιδανικού και υφιστάμενου αμφιθεάτρο.....	5-53
Πίνακας 5.16. Πίνακας συντελεστών ηχοαπορρόφησης α	5-54
Πίνακας 5.17. Επιφάνειες υλικών εντός αμφιθεάτρο μετά τη διόρθωση	5-54
Πίνακας 5.18. Πίνακας μεταβολών εμβαδών επιφανειών.....	5-55
Πίνακας 5.19. Ηχοαπορρόφηση για πλήρες, κενό και κατειλημμένο κατά 2/3 αμφιθέατρο μετά τη διόρθωση	5-55

**ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΜΦΙΘΕΑΤΡΟΥ
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ**

Πίνακας 5.20 Χρόνος αντήχησης για κενό και κατειλημμένο κατά 2/3 αμφιθέατρο
μετά τη διόρθωση5-56

Πίνακας 5.21 Ηχοαπορρόφηση πλήρους, κενού και κατειλημμένου αμφιθεάτρου
μετά τη διόρθωση.....5-56

Πίνακας 5.22 Χρόνος αντήχησης για κατειλημμένο αμφιθέατρο κατά 2/3 μετά τη
διόρθωση.....5-56

Πίνακας 5.23 Τιμές θορύβου βάθους στις υπό εξέταση συχνότητες.....5-57

Πίνακας 5.24 Στάθμη έντασης.....5-59

Κατάλογος Σχημάτων

Κεφάλαιο 2. Ακουστικός σχεδιασμός χώρων διδασκαλίας

Σχήμα 2.1. Σχηματική παράσταση φυσικών ιδιοτήτων του ήχου.....	2-4
dB	
Σχήμα 2.2. Γραφήματα πρόσθεσης	2-5
Σχήμα 2.3. Ισοφωνικές καμπύλες καθαρών τόνων.....	2-6
Σχήμα 2-4 Πολικό διάγραμμα για την κατευθυντική κατανομή του ήχου της ομιλίας στο οριζόντιο επίπεδο.....	2-7
Σχήμα 2.5. Σχηματική απεικόνιση της διαφοροποίησης ενός ορθογωνικού χώρου από ένα τραπεζοειδή ως προς την εκμετάλλευση της κατευθυντικότητας της ανθρώπινης φωνής.....	2-8
Σχήμα 2.6. Βέλτιστη τοποθέτηση της επιφάνειας των ακροατών σε χώρο ακρόασης ομιλίας με βάση την κατευθυντικότητα της ανθρώπινης φωνής.....	2-8
Σχήμα 2.7. Ανάκλαση.....	2-9
Σχήμα 2.8. Επίπεδος ανακλαστήρας με κλίση για την προώθηση της ηχητικής ενέργειας προς το πίσω μέρος του ακροατηρίου.....	2-10
Σχήμα 2.9. Κυρτός ανακλαστήρας.....	2-10
Σχήμα 2.10. Κοίλος ανακλαστήρας.....	2-11
Σχήμα 2.11. Διάχυση.....	2-11
Σχήμα 2.12. Περίθλαση.....	2-12
Σχήμα 2.13. Σχήμα με ηχοανάκλαση, ηχοαπορρόφηση και ηχομετάδοση.....	2-12
Σχήμα 2.14. Διάγραμμα εντάσεως του ήχου.....	2-13
Σχήμα 2.15. Τοποθέτηση ηχοαπορροφητικών υλικών στο χώρο.....	2-14
Σχήμα 2.16. Αντιπροσωπευτικές τυπικές καμπύλες των τριών κατηγοριών ηχοαπορροφητικών υλικών.....	2-15
Σχήμα 2.17. Συντονισμός.....	2-18
Σχήμα 2.18. Διαγράμματα που αφορούν τις διαστάσεις του χώρου για την αποφυγή του συντονισμού.....	2-19

ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΜΦΙΘΕΑΤΡΟΥ ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.19. Δημιουργία ηχούς.....	2-19
Σχήμα 2.20. Δημιουργία ηχούς.....	2-20
Σχήμα 2.21. Σχεδιασμός χώρου με σκοπό την αποφυγή της ηχούς.....	2-20
Σχήμα 2.22. Σχεδιασμός πίσω τοίχου με σκοπό την αποφυγή της ηχούς.....	2-21
Σχήμα 2.23. Σχεδιασμός πίσω τοίχου με σκοπό την αποφυγή της ηχούς.....	2-21
Σχήμα 2.24. Σχεδιασμός πίσω τοίχου με σκοπό την αποφυγή της ηχούς.....	2-21
Σχήμα 2.25. Σχεδιασμός με σκοπό την αποφυγή του πλαταγισμού.....	2-22
Σχήμα 2.26. Εστιασμός ήχου λόγω του κοίλου τμήματος της οροφής.....	2-22
Σχήμα 2.27. Σχεδιασμός με σκοπό τη βελτιστοποίηση του απ' ευθείας ήχου.....	2-25
Σχήμα 2.28. Μεταβολή της στάθμης εντάσεως του απ' ευθείας ήχου της ομιλίας σε συνάρτηση με την απόσταση από την πηγή σε ένα χώρο ομιλίας με 30 σειρές ακροατών.....	2-26
Σχήμα 2.29. Τοποθέτηση ανακλαστήρα πάνω από τη θέση του ομιλητή.....	2-27
Σχήμα 2.30. Απεικόνιση διαδικασίας εύρεσης τμημάτων οροφής, που λειτουργούν ως ανακλαστήρες.....	2-28
Σχήμα 2.31. Σχεδιασμός ανακλαστικής ψευδοροφής.....	2-29
Σχήμα 2.32. Απεικόνιση διαδικασίας εύρεσης τμημάτων πλευρικών παρειών, που λειτουργούν ως ανακλαστήρες.....	2-29
Σχήμα 2.33. Τοποθέτηση ανακλαστήρων γύρω από τον ομιλητή.....	2-30
Σχήμα 2.34. Κριτήρια θορύβου (αποδεκτές τιμές θορύβου) ανάλογα με τη λειτουργία του χώρου.....	2-31
Σχήμα 2.35. Καμπύλες κριτηρίων θορύβου.....	2-32
Σχήμα 2.36. Βέλτιστες τιμές του χρόνου αντήχησης ανάλογα με τον όγκο του χώρου. Στο άνω όριο επιτυγχάνουμε υψηλές στάθμες ήχου ενώ στο κάτω όριο υψηλή υποκειμενική ευκρίνεια.....	2-33

Κεφάλαιο 5. Μετρήσεις και αποτελέσματα

Σχήμα 5.1 Διάγραμμα χρόνου αντήχησης, ανά θέση μέτρησης.....	5-41
Σχήμα 5.2 Διάγραμμα χρόνου αντήχησης, μέσο όρος μετρήσεων ανά συχνότητα όλων των θέσεων.....	5-43

**ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΜΦΙΘΕΑΤΡΟΥ
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ**

Σχήμα 5.3 Διάγραμμα ηχοαπορρόφησης A(dB) από μετρήσεις και θεωρητικές τιμές βάσει σχέσης (1).....	5-46
Σχήμα 5.4 Διάγραμμα χρόνου Αντήχησης $T_R(sec)$ από μετρήσεις και θεωρητικές τιμές βάσει σχέσης (1).....	5-46
Σχήμα 5.5 Απεικόνιση της ηχοαπορρόφησης A(dB) για πλήρες, κενό και κατειλημμένο κατά 2/3 αμφιθέατρο.....	5-51
Σχήμα 5.6 Απεικόνιση χρόνων αντήχησης για κενό, πλήρες και κατειλημμένο κατά 2/3.....	5-52
Σχήμα 5.7 Χρόνος αντήχησης για πλήρες, κενό και κατειλημμένο κατά 2/3 αμφιθέατρο.....	5-57
Σχήμα 5.8 Κριτήριο θορύβου βάθους.....	5-58

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. **Barron M. (1993).** Auditorium acoustics and architectural design. E & FN SPON, London.
2. **Βιάζης Γ. (2005).** Ηχοπροστασία, Γενικές γνώσεις – Νομοθεσία – Μελέτες.
3. **Hawkes R. J., Douglas H. (1971).** Subjective acoustic experience in concert auditoria. *Acustica* 24.
4. **Ευθυμιάτος Δ. (2001).** Συνοπτικές σημειώσεις ακουστικής χώρων και ηχοπροστασίας.
5. **Egan M. D. (1972).** Concepts in Architectural acoustics. McGraw Hill, N. York.
6. **Καμπουράκης Γ. (2006).** Η ακουστική των αιθουσών διδασκαλίας και οι επιπτώσεις της στην επικοινωνία.
7. **Πουλάκος Γ. (1989).** Μελέτη της ποιότητας της προφορικής επικοινωνίας σε συνάρτηση με την αντήχηση για την ελληνική γλώσσα.
8. **Σωτηροπούλου Α. (1996).** Εμβάθυνση στο σχεδιασμό χώρων ακρόασης.
9. **Αιμ. Κορωνάιος-Γ.Ι.Πουλάκος (2005).** Τεχνικά Υλικά Τόμος 2, ΕΜΠ Αθήνα
10. **Sotiropoulou A., Hawkes R. G., Fleming D. B. (1995).** Concert hall acoustic evaluations by ordinary concert-goers: 1, Multi-dimensional description of evaluations. *Acustica*.
11. **Susan M. Kennedy, Murray Hodgson, Lisa Dillon Edgett, Noelle Lamb, Rod Rempel (2006).** Subjective assessment of listening environments in university classrooms: Perceptions of students. *J. Acoust. Soc. Am.*
12. **Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος – Τμήμα Κεντρικής Μακεδονίας, Ελληνική Ακουστική Εταιρεία.** Ακουστική – 82, ηχομόνωση – πρότυπα - Γ.Ο.Κ.
13. **Τζεκάκης Ε. (1970).** Εφαρμογή της ηχοτεχνίας στην αρχιτεκτονική.
14. **Τσινίκας Ν. (2005).** Ακουστικός σχεδιασμός χώρων.