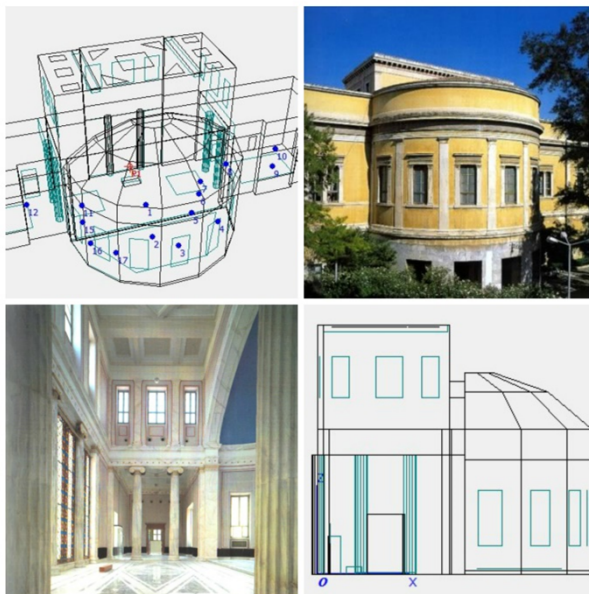




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ

**Συγκριτική μελέτη ακουστικών μετρήσεων μεταξύ
πραγματικού χώρου και προσομοίωσης με το πρόγραμμα
“Odeon Room Acoustics”**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
Περδικάρη Ν. Ελένη



Επιβλέπουσα: Α. Γ. Σωτηροπούλου
Αν. Καθηγήτρια ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2014

**Συγκριτική μελέτη ακουστικών μετρήσεων μεταξύ
πραγματικού χώρου και προσομοίωσης με το
πρόγραμμα “Odeon Room Acoustics”**

Λέξεις-κλειδιά: ακουστική προσομοίωση, αίθουσες ακροατηρίου,
διόρθωση ακουστικής, Odeon

**Comparative study of acoustic measurements between
real space and simulation program "Odeon Room
Acoustics"**

Keywords: acoustic simulation, courtrooms, acoustic correction,

Ελένη Ν. Περδικάρη

Διπλωματούχος Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π

Copyright © Ελένη Ν. Περδικάρη, 2014

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς την συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν την συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Στην οικογένειά μου,
Νίκο, Βαρβάρα,
Στέλλα, Γιώργο

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στα πλαίσια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την επιβλέπουσα καθηγήτριά μου κυρία Αλεξάνδρα Σωτηροπούλου για την ανάθεση, την καθοδήγηση και την πολύτιμη βοήθεια της, όπως και τον υποψήφιο διδάκτορα Γιάννη Καραγιάννη για το χρόνο του και τη συνεχή υποστήριξη καθ' όλη τη διάρκεια της μελέτης.

2.5.3 Σχεδιασμός ελαχιστοποίησης θορύβου βάθους	38
2.5.4 Βελτιστοποίηση του χρόνου αντήχησης με βάση τον όγκο του χώρου- υπολογισμός του βέλτιστου όγκου του χώρου- επιλογή ηχοαπορροφητικών υλικών	40
2.5.5 Βελτιστοποίηση του χρόνου αντήχησης με βάση την ελληνική γλώσσα	41
3 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ	43
4 ΚΤΙΡΙΟ ΑΒΕΡΩΦ Ε.Μ.Π. – ΑΙΘΟΥΣΑ ΤΕΛΕΤΩΝ	45
4.1 Κτίριο Αβέρωφ – Ιστορικά στοιχεία	45
4.2 Αίθουσα τελετών «Λύσανδρος Κανταντζόγλου»	49
5 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΣΤΟΝ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟ ΚΑΙ ΣΤΟΝ ΟΙΩΝΙ	
ΧΩΡΟ	51
5.1 Παρατηρήσεις εργασίας	51
5.2 Μετρήσεις στον πραγματικό χώρο	52
5.3 Μετρήσεις στον οiwνί χώρο με τη βοήθεια του προγράμματος ODEON	54
5.3.1 Λογισμικό ODEON	54
5.3.2 Επιλογές τρόπου υπολογισμού	54
5.3.3 Γεωμετρική απεικόνιση των χώρων στο Odeon	58
5.3.4 Σύνθεση του εσωτερικού χώρου	58
5.3.5 Προσομοίωση της διαδικασίας των φυσικών μετρήσεων	58
5.3.6 Ρύθμιση παραμέτρων του προγράμματος	61
6 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	63
6.1 Σχέδια και φωτογραφίες	63
6.2 Αποτελέσματα μετρήσεων	64
6.2.1 Διαγράμματα χρόνου αντήχησης	64
6.2.2 Διαγράμματα EDT	69
6.2.3 Διαγράμματα EEF50	74

6.2.4 Διαγράμματα C-80	75
7 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	78
7.1 Χρόνος αντήχησης RT	79
7.2 Χρόνος πρώτων ανακλάσεων EDT	80
7.3 Κλάσμα πρώτων ανακλάσεων EEF50	80
7.4 Λόγος πρώτων προς τις καθυστερημένες ανακλάσεις C-80	81
7.5 Γενικές παρατηρήσεις των αποτελεσμάτων	81
8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΘΕΜΑΤΑ ΠΡΟΣ ΣΥΖΗΤΗΤΗ	83
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	85
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	103

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία έχει ως αντικείμενό την αίθουσα τελετών "Λύσανδρος Καυταντζόγλου" της Σχολής Αρχιτεκτόνων, στο κτιρίου Αβέρωφ του Ε. Μ. Πολυτεχνείου. Η αίθουσα είναι ηλικίας άνω των 100-ετών και ως εκ του νεοκλασικού χαρακτήρα της παρουσιάζει προβλήματα στην ακουστική της, ακόμη και μετά την πρόσφατη ανακαίνιση της. Η παρούσα εργασία είναι μέρος της ευρύτερης μελέτης διόρθωσης της ακουστικής της αίθουσας. Βασικό εργαλείο στη μελέτη για την πρόβλεψη των αποτελεσμάτων της επέμβασης, και για την προσομοίωση, της αντίληψης του ήχου (auralisation) στην αίθουσα μετά την επέμβαση, είναι το 'Odeon room acoustics' πρόγραμμα για το οποίο σχολιάζεται η ικανότητα του ως προσομοιωτού, μέσα από σύγκριση ακουστικών μετρήσεων που έγιναν στην παρούσα φάση δηλαδή πριν την επέμβαση, αφ' ενός στην αίθουσα, και αφ' ετέρου στον οωνί χώρο.

ABSTRACT

This paper refers to the multipurpose auditorium "Lyssandros Kautantzoglou" of the School of Architecture, which is in the 'Averof' building of the Tech. Univ. Athens. The auditorium is over 100-years old, and acoustic problems are associated with the hall's neoclassical character, even after a recent restoration. This study is part of a research work which aims to remedy the acoustics of the auditorium. The basic tool, used in this study for predicting as well as for simulating (auralising) the auditorium's response after treatment, is the 'Odeon room acoustics' software. 'Odeon' is tested in this study with respect to its capabilities as simulator; this is implemented through comparisons of acoustic measurements before treatment, which were carried out on the one hand in the field, and on the other hand in the virtual space.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ακουστική είναι η επιστήμη των ήχων. Η επιστήμη της ακουστικής ασχολείται με την πορεία των ηχητικών κυμάτων και την αλληλεπίδρασή τους μεταξύ των και με τα υλικά του χώρου μέσα στον οποίο κινούνται. Η ακουστική των χώρων είναι ένα θέμα που απασχόλησε τον άνθρωπο από τα αρχαία χρόνια. Μέχρι τον 19ο αιώνα, ωστόσο, δεν δινόταν ιδιαίτερη προσοχή στην ακουστική των κλειστών χώρων. Εκείνος που έφερε "επανάσταση" στην ακουστική κλειστών χώρων ήταν ο Wallace Sabine, καθηγητής στο Harvard University. Ο Sabine αντιλήφθηκε τη σημασία της αντήχησης για την ακουστική ποιότητα των χώρων και την επίδραση της απορρόφησης των υλικών στην αντήχηση των χώρων (1915).

Η μελέτη της ακουστικής κλειστών χώρων παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τον μηχανικό, καθώς σχετίζεται τόσο με την ποιότητα του ήχου που φτάνει στη θέση του δέκτη όσο και με την παρατηρούμενη στάθμη η οποία επηρεάζεται από τις διαδοχικές ανακλάσεις. Μέχρι πρότινος ο μηχανικός μπορούσε να χρησιμοποιήσει μια πλειάδα μεθόδων πρόβλεψης που υπάρχουν στη βιβλιογραφία [1] οι οποίες στηρίζονται σε αλγοριθμικές σχέσεις. Στη πράξη όμως συχνά, ότι οι αποκλίσεις από την πραγματικότητα είναι μεγάλες.

Σήμερα, με την εξέλιξη της επιστήμης και της τεχνολογίας, έχει γίνει δυνατή η προσομοίωση του πραγματικού χώρου με τη χρήση του ηλεκτρονικού υπολογιστή, το οποίο μας επιτρέπει ανέξοδα να κάνουμε ακουστικές μετρήσεις στον οιονί χώρο. Στο εμπόριο υπάρχουν ήδη αρκετά προγράμματα που έχουν ως αντικείμενο τη προσομοίωση του πραγματικού χώρου σε ψηφιακό, για την εξαγωγή αποτελεσμάτων ως προς την ακουστική του χώρου· ένα από αυτά είναι το 'Odeon Room Acoustics Program' με πολλαπλές δυνατότητες χρήσης.

Στη παρούσα εργασία έγινε προσπάθεια σύγκρισης, μεταξύ των αποτελεσμάτων που εξάγαμε μετά από φυσικές ακουστικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στην αίθουσα τελετών του κτιρίου Αβέρωφ του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και εξαγόμενων αποτελεσμάτων στον οιονί χώρο μετά από προσομοίωση της ανωτέρω αίθουσας στο 'Odeon Room Acoustics Program'· σκοπός ήταν να αντιληφθούμε την ακρίβεια με την οποία είναι δυνατή αυτή η προσομοίωση.

1. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ

2.1. Ήχος και ηχητικές παράμετροι

Ως ήχος ορίζεται η μηχανική διαταραχή που διαδίδεται μέσα σε ελαστικό μέσο με ορισμένη ταχύτητα και έχει τέτοιο χαρακτήρα, ώστε να μπορεί να διεγείρει το αισθητήριο της ακοής και να προκαλέσει ακουστικό αίσθημα. Η πιο κοινή περίπτωση είναι ο ήχος που διαδίδεται στον ατμοσφαιρικό αέρα.

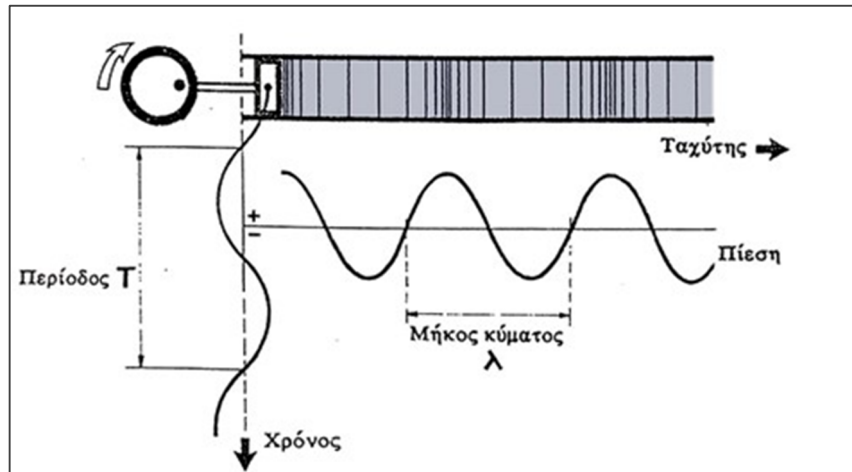
Το φάσμα συχνοτήτων στο οποίο μπορεί να κυμαίνεται ένας ήχος είναι πολύ μεγάλο. Για παράδειγμα η συχνότητα μιας ανθρώπινης φωνής ποικίλει μεταξύ 70Hz και 2.000Hz, ο ήχος ενός πιάνου μεταξύ 30Hz και 3.500Hz ενώ ο ήχος μιας νυχτερίδας κυμαίνεται σε επίπεδα άνω των 20.000Hz. Ένας άνθρωπος χωρίς πρόβλημα ακοής ανταποκρίνεται σε ήχους μεταξύ 20Hz και 20.000Hz. Συχνότητες πάνω από 10.000Hz θεωρούνται αμελητέας σημασίας.

Οι φυσικές ιδιότητες του ήχου συνοψίζονται στην ταχύτητά του c , στην περίοδο T , τη συχνότητα f και το μήκος κύματος λ .

Ταχύτητα του ήχου, c , είναι η ταχύτητα με την οποία διαδίδονται τα ηχητικά κύματα. Μονάδα μέτρησης είναι το μέτρο ανά δευτερόλεπτο (m/s). Η ταχύτητα του ήχου διαφέρει από στερεό σε στερεό και από υγρό σε υγρό σε σχέση με τον αέρα. Έτσι στο θαλασσινό νερό η ταχύτητα του ήχου φτάνει τα 1.500m/s ενώ στο νερό των ποταμών τα 1.440m/s και στο ξύλο τα 4.000m/s σε αντίθεση με το σίδηρο που φτάνει τα 5.100m/s. Ένας επιπλέον παράγοντας που επηρεάζει την ταχύτητα του ήχου είναι και η θερμοκρασία που επικρατεί στο εκάστοτε ελαστικό μέσο. Όσον αφορά στην ακουστική χώρων, που είναι το αντικείμενό μας, λαμβάνουμε ως ταχύτητα ήχου ίση με 340m/s που αντιστοιχεί στη ταχύτητα ήχου στον αέρα δωματίου σε 20°C και είναι ίδια σε όλες τις συχνότητες.

Περίοδος, T , είναι η χρονική διάρκεια ενός κύκλου μεταβολής ενός περιοδικού μεγέθους. Μονάδα μέτρησης είναι το δευτερόλεπτο (s).

Η **συχνότητα, f** , είναι το αντίστροφο της περιόδου, δηλαδή $f=1/T$ και εκφράζει «το ρυθμό με τον οποίο πάλλονται τα σωματίδια του αέρα». Ως μονάδα έχει το Hertz (Hz). Το παράδειγμα που ακολουθεί φανερώνει τη σχέση ανάμεσα στη φυσική και τη μουσική: μια χορδή που πάλλεται 440 φορές σε ένα δευτερόλεπτο θα παράγει στον ακροατή τον υποκειμενικό τόνο της νότας λα. Αξίζει να σημειωθεί πως «το ακουστό φάσμα συχνοτήτων (για το ανθρώπινο αυτί είναι το 20 Hz έως 20 kHz)».



Σχηματική παράσταση των φυσικών ιδιοτήτων του ήχου

Εικόνα Error! No text of specified style in document..1 – Σωτηροπούλου 1996

Μήκος

κύματος, λ , ενός ημιτονοειδούς επιπέδου διαδιδόμενου κύματος, είναι η απόσταση ανάμεσα σε δύο μέτωπα του κύματος που έχουν μεταξύ τους διαφορά ίση με μία περίοδο. Μονάδα μέτρησης είναι το μέτρο (m).

Εκτός των παραπάνω ιδιοτήτων του, ο ήχος εμφανίζει και επιπλέον χαρακτηριστικά, εκ των οποίων τα πιο σημαντικά είναι η ηχητική πίεση και η έντασή της, καθώς και η ακουστότητα.

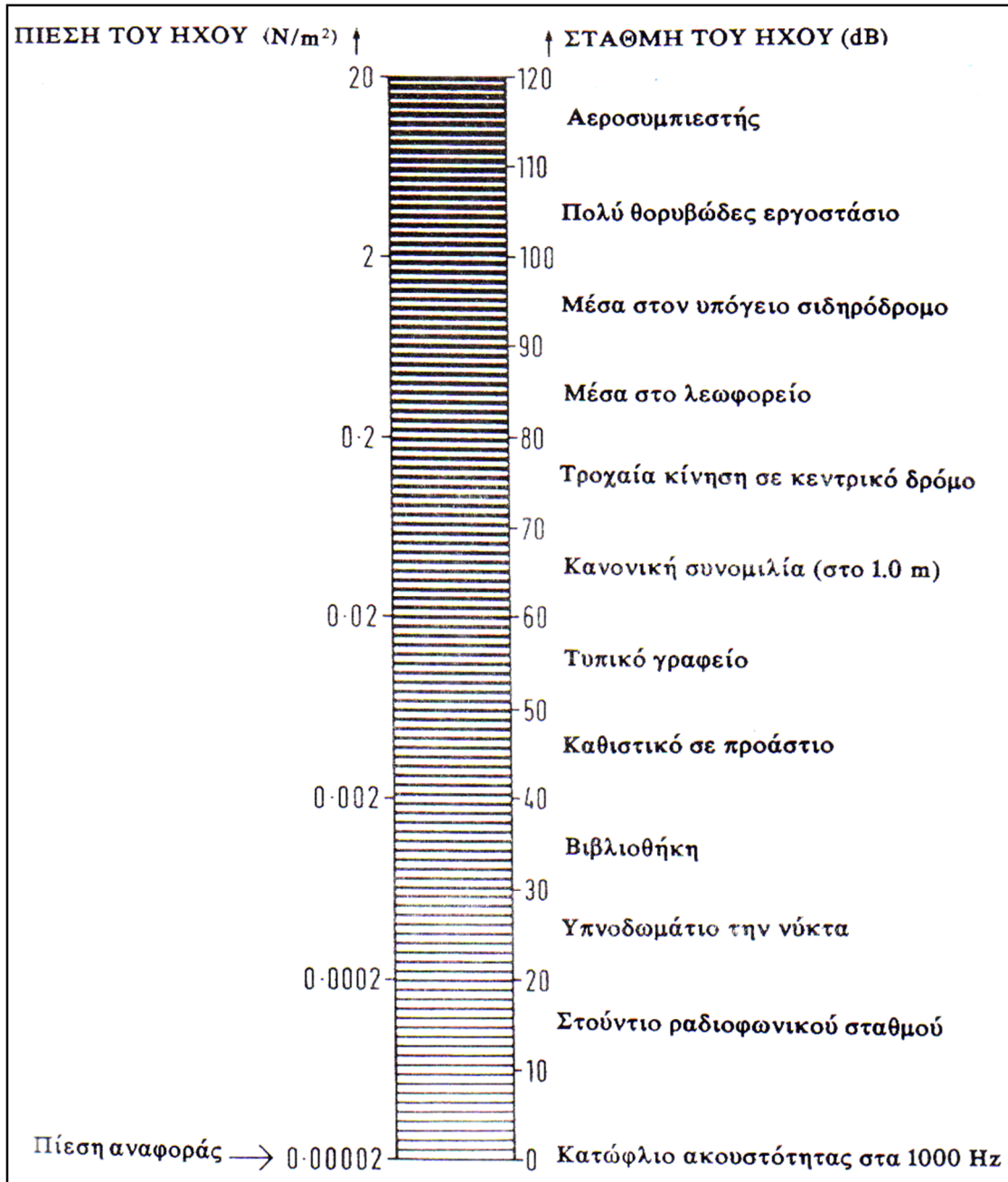
Ηχητική πίεση, p , σε ένα σημείο του ηχητικού πεδίου είναι η διαφορά της στατικής πίεσης του μέσου, από την ολική πίεση που υπάρχει στο σημείο αυτό. Μονάδα μέτρησης είναι το Pascal (Pa).

Ως ηχητική στάθμη ορίζεται το μέγεθος $10 \log \frac{P^2}{P_0^2}$, όπου P η ενεργός τιμή της ηχητικής πίεσης και P_0 η ηχητική πίεση αναφοράς για την οποία στον αέρα ισχύει $P_0 = 20 \mu\text{Pa}$ ή $0,00002 \text{N/m}^2$.

$$\text{ΣΤΑΘΜΗ ΤΟΥ ΗΧΟΥ} = 10 \log \left(\frac{\text{ΗΧΗΤΙΚΗ ΠΙΕΣΗ}}{\text{ΗΧΗΤΙΚΗ ΠΙΕΣΗ ΑΝΑΦΟΡΑΣ}} \right)^2, (\text{dB})$$

Ως μονάδα μέτρησης της στάθμης ήχου χρησιμοποιείται το decibel (db). Ο λογάριθμος χρησιμοποιείται διότι συμβαδίζει απόλυτα με τον λογαριθμικό τρόπο λειτουργίας του οργάνου της ακοής, του αυτιού. Δηλαδή ίσες μεταβολές στην αντίληψη ενός φυσικού ακουστικού μεγέθους αντιστοιχούν σε ίσες μεταβολές του

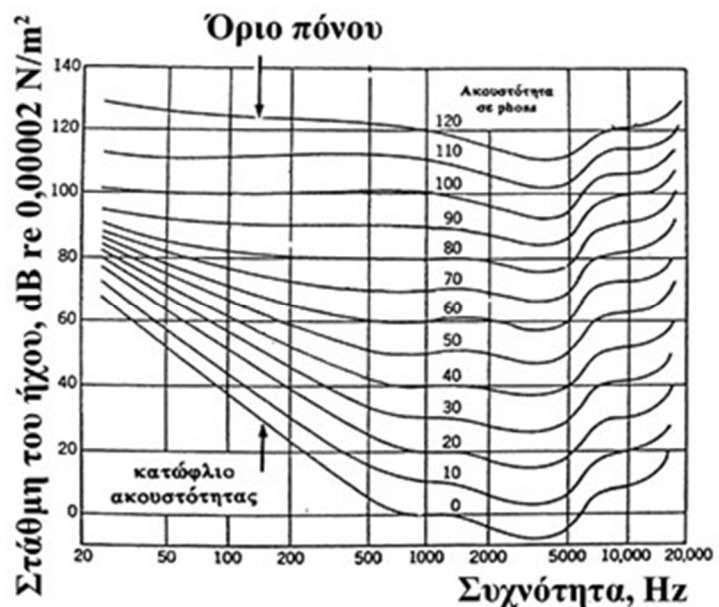
λόγου του φυσικού μεγέθους. Όσον αφορά τους συνεχείς ήχους τα 3db είναι η μικρότερη αλλαγή της στάθμης της ηχητικής πίεσης η οποία μπορεί να γίνει αντιληπτή. Παρακάτω φαίνεται η στάθμη του ήχου σε σχέση με την πίεση του ήχου σε κάποιες χαρακτηριστικές στάθμες.



Σχηματική απεικόνιση της πίεσης του ήχου με τη στάθμη του ήχου

Εικόνα Error! No text of specified style in document..2 –
Σωτηροπούλου 1996

Ακουστότητα είναι η αντίληψη του ήχου υποκειμενικά. Δύο ήχοι της ίδιας στάθμης είναι δυνατόν να μην έχουν την ίδια ακουστότητα, αν ανήκουν σε διαφορετικές συχνότητες», καθώς η ευαισθησία του οργάνου της ακοής είναι μέγιστη μεταξύ των 3000 Hz και 4000 Hz, ενώ ελαττώνεται στις χαμηλές συχνότητες [2].



Καμπύλες ισοακουστότητας (γεωμετρικός τόπος ήχων της αυτής ακουστότητας) καθαρών τόνων κατά Fletcher και Munson, 1993.

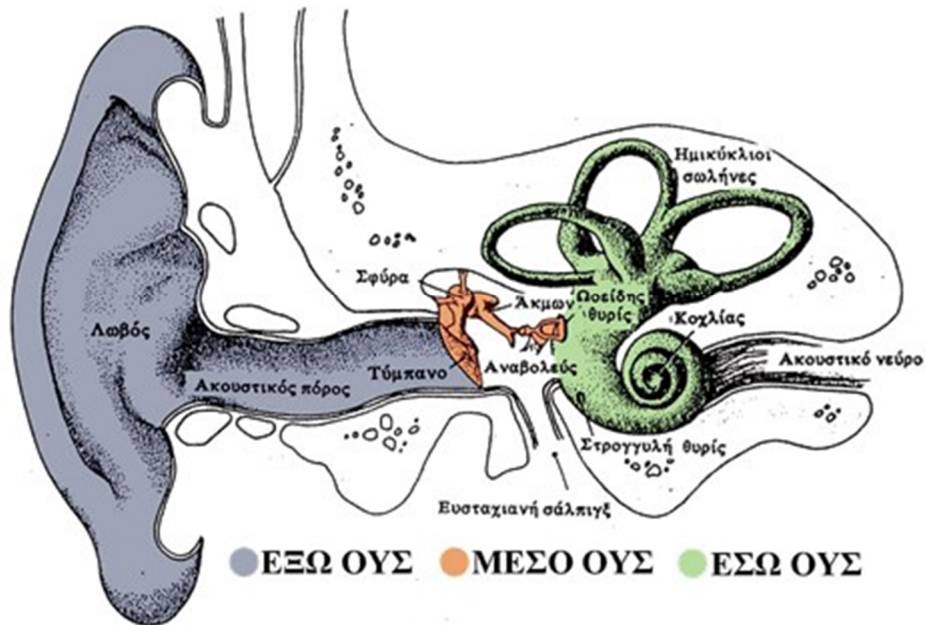
Εικόνα Error! No text of specified style in document..3

Σύμφωνα με το διάγραμμα των καμπύλων ισοακουστότητας μπορούμε να εξάγουμε τα εξής συμπεράσματα [3]:

- Όσο προχωράμε σε χαμηλές συχνότητες, τόσο μειώνεται σταδιακά η ευαισθησία του οργάνου της ακοής
- Μεταξύ των 3.000Hz και των 4.000Hz παρατηρείται η μέγιστη ευαισθησία του οργάνου της ακοής
- Ήχοι με την ίδια στάθμη δεν είναι απαραίτητο να ανήκουν στην ίδια καμπύλη ισοακουστότητας, αν αντιστοιχούν σε διαφορετικές συχνότητες

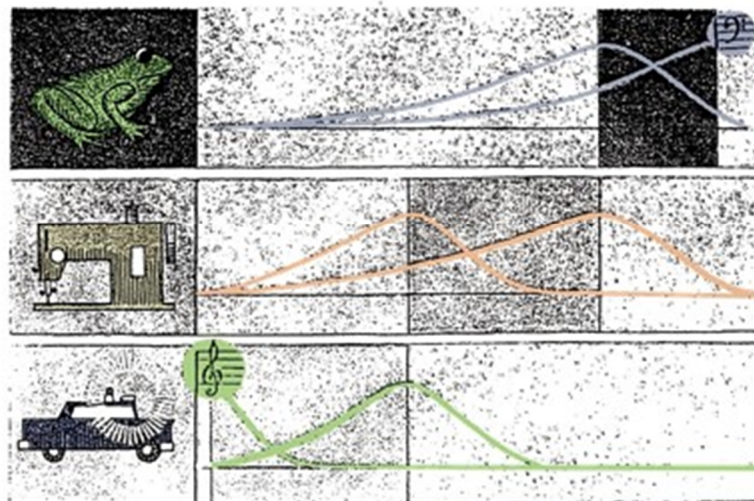
Ως **ηχοστάθμη** καλείται εκείνο το φυσικό μέγεθος που μετρά τη στάθμη του ήχου σε dB ενώ παράλληλα λαμβάνει υπόψη την ποικιλία ευαισθησίας του αυτιού σε διάφορες συχνότητες. Μονάδα μέτρησης της ηχοστάθμης είναι το dBA [2]. Η στάθμη ενός ήχου σε dBA είναι δυνατόν να μετρηθεί με τη χρήση ενός ηχομέτρου.

Για την καλύτερη κατανόηση του κεφαλαίου, παρατίθεται συνοπτικά και η λειτουργία του ανθρώπινου αυτιού. Το έξω ους συλλέγει τα ηχητικά κύματα, τα οποία μέσω του ακουστικού πόρου μεταφέρονται στο τύμπανο. Τα ηχητικά κύματα προκαλούν δονήσεις στο τύμπανο, οι οποίες ανιχνεύονται από τα οστάρια (σφύρα, άκμονας και αναβολέας) του μέσου ωτός. Οι δονήσεις περνούν μέσω της ωοειδούς θυρίδας στον κοχλία, θέτοντας το υγρό του κοχλία σε κίνηση, γεγονός που προκαλεί τον μετασχηματισμό των ηχητικών κυμάτων σε ηλεκτρικούς παλμούς. Το ακουστικό νεύρο μεταδίδει αυτούς τους παλμούς στον εγκέφαλο, όπου και γίνονται αντιληπτοί σαν ήχος.



Εικόνα Error! No text of specified style in document..4 - Σωτηροπούλου 1996

Τέλος, αναλόγως της συχνότητας (του ήχου που εκπέμπεται), μια ορισμένη περιοχή της βασικής μεμβράνης (του τυμπάνου) τίθεται σε παλμική κίνηση. Η περιοχή αυτή λέγεται κρίσιμη ζώνη και όσο πιο οξύς είναι ο ήχος, τόσο πιο στενή είναι η κρίσιμη ζώνη [2]. Η κρίσιμη ζώνη σχετίζεται με το φαινόμενο της επικάλυψης, αφού ο εντονότερος ήχος επικαλύπτει ηχητικά τον ασθενέστερο και ο βαθμός της ηχητικής επικάλυψης εξαρτάται από το βαθμό επικάλυψης των κρίσιμων ζωνών.



Στο διάγραμμα φαίνεται το τμήμα της βασικής μεμβράνης που προσβάλλει ο κάθε ένας από τους τρεις ήχους.

Εικόνα Error! No text of specified style in document..5 -- Σωτηροπούλου 1996

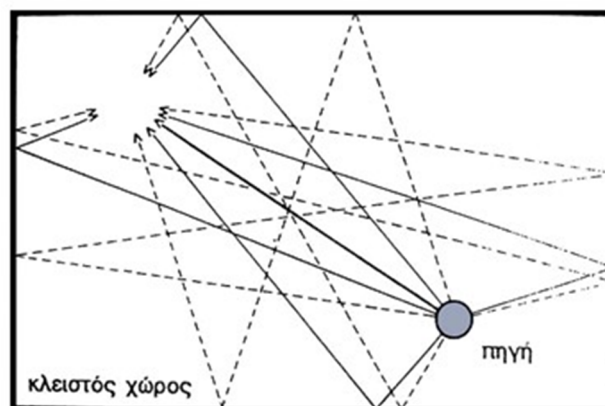
2.2. Η συμπεριφορά του ήχου σε κλειστό χώρο

Ο ήχος σε κλειστό χώρο εμφανίζει συγκεκριμένη συμπεριφορά. Η ηχητική ενέργεια σε κάθε διαδοχικό στάδιο μειώνεται συνεχώς αυξανομένης της απόστασης από την πηγή. Εφόσον η διάδοση του ηχητικού κύματος συναντά εμπόδιο υπό τη μορφή των ορίων κάποιου χώρου, τότε κατά ένα ποσοστό ανακλάται, απορροφάται ή διέρχεται μέσα από αυτά. Ο ακροατής που βρίσκεται εντός του χώρου δέχεται άμεσο (πρωτογενή) και ανακλώμενο ήχο. Ο άμεσος ήχος από την πηγή στον ακροατή εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ τους (η στάθμη μειώνεται κατά 6dB σε κάθε διπλασιασμό της απόστασης). Ο άμεσος ήχος θεωρείται πως συμπεριφέρεται όπως στο ελεύθερο πεδίο, μιά και δεν έχει προλάβει να αλληλεπιδράσει με στοιχεία του δωματίου ακρόασης. Η διαφορά στο χρόνο άφιξης μεταξύ άμεσου και ανακλώμενου ήχου και η κατεύθυνση των ανακλάσεων καθορίζεται από τις διαστάσεις του χώρου και τη διαρρύθμιση του συστήματος εντός αυτού. Το ποσοστό της ανακλώμενης ενέργειας εξαρτάται από τη δομή και την υφή των επιφανειών του δεδομένου χώρου.

Όταν ένα ηχητικό κύμα συναντά στην πορεία του ένα εμπόδιο δεν εξαλείφεται. Τα ακουστικά φαινόμενα που συναντώνται σε αυτή την περίπτωση είναι η ανάκλαση, η διάχυση, η περίθλαση, η ηχοαπορρόφηση και η αντήχηση, ενώ τα προβλήματα που μπορούν να δημιουργούν αφορούν στην ηχώ, το συντονισμό, τον πλαταγισμό και τον εστιασμό.

2.2.1 Ανάκλαση

Ανάκλαση του ήχου λέγεται το φαινόμενο, κατά το οποίο ένα ηχητικό κύμα που προσπίπτει στη διαχωριστική επιφάνεια δύο μέσων επιστρέφει από αυτή με γωνία, ως προς την κάθετο, ίση με τη γωνία με την οποία προσπίπτει.



Παράσταση ανακλάσεων

Εάν η διάσταση χ της ανακλαστικής επιφάνειας είναι μεγαλύτερη από το διπλάσιο ή το τετραπλάσιο του μήκους κύματος λ του προσπίπτοντος ηχητικού κύματος, τότε η γωνία πρόσπτωσης i ισούται με τη γωνία ανάκλασης r .

Οι ανακλαστήρες είναι επιφάνειες με την ιδιότητα να ανακλούν τον ήχο που προσπίπτει πάνω τους. Η χρήση των ανακλαστήρων κατά το σχεδιασμό χώρων ακρόασης ομιλίας έχει σαν αποτέλεσμα την αξιοποίηση του φαινομένου της ανάκλασης.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι ανακλαστήρων μερικοί από τους οποίους έχουν ευεργετικά αποτελέσματα ανάλογα με τη μορφή τους. Στην περίπτωση που η διαχωριστική επιφάνεια είναι κυρτή, προκύπτει η διασπορά του ήχου. Αντίθετα, η κοίλη επιφάνεια οδηγεί σε εστιασμό του ήχου.



Εικόνα Error! No text of specified style in document..7 – Σωτηροπούλου 1996

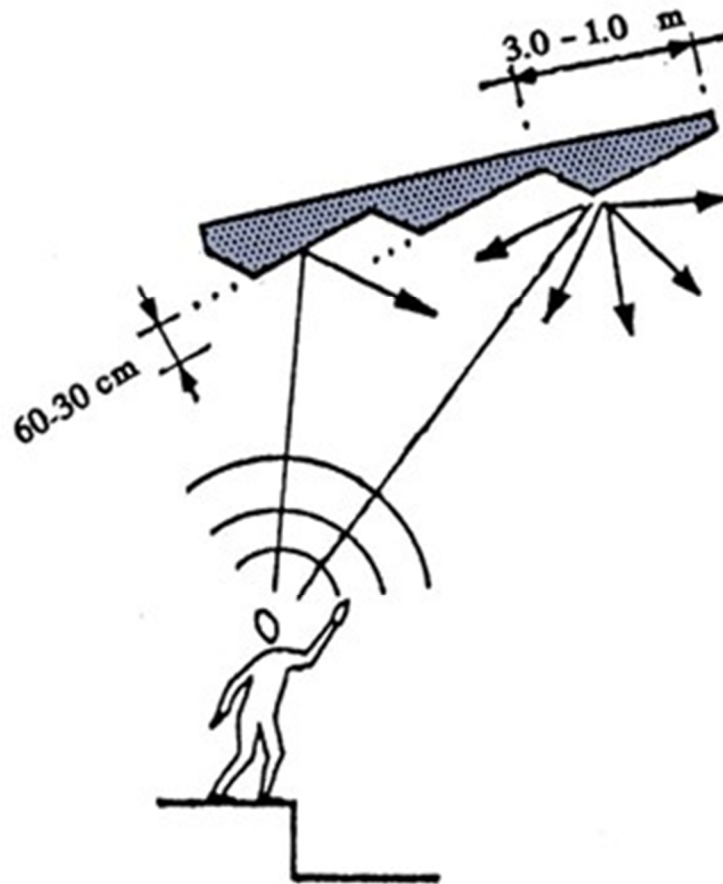
Στο σχεδιασμό αιθουσών ακρόασης μουσικής ισχύει:



Εικόνα Error! No text of specified style in document..8 – Σωτηροπούλου 1996

2.2.2 Διάχυση

Με τον όρο διάχυση καλείται ο σκεδασμός μιας ανακλώμενης ηχητικής ακτίνας σε ασθενέστερες ακτίνες τυχαίας κατανομής και υφίσταται όταν το μήκος κύματος λ του ήχου ισούται με το μέγεθος χ της ανακλαστικής επιφάνειας. Διάχυση μπορεί να επιτευχθεί με την τοποθέτηση ανομοιόμορφων επιφανειών, αλλά και με την απλή εναλλαγή των υλικών.



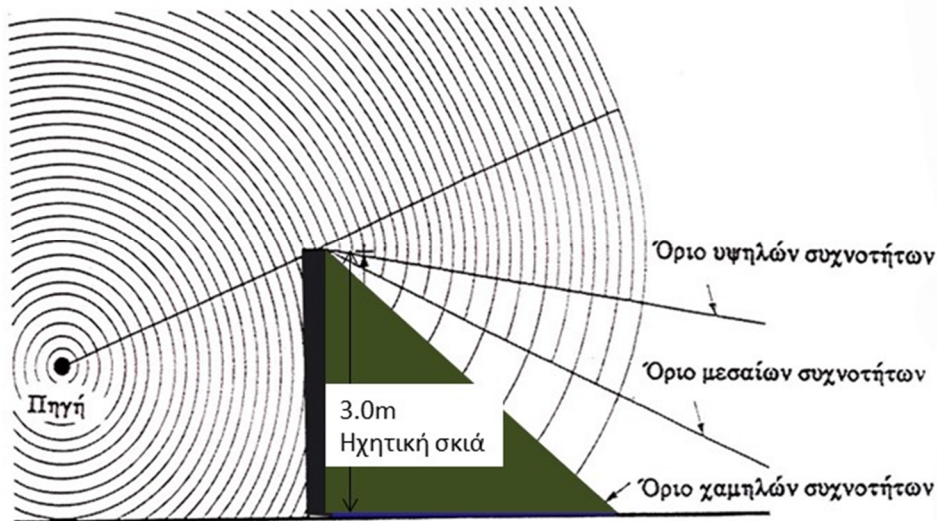
Διάχυση (Egan 1972)

Εικόνα Error! No text of specified style in document..9

Σε αίθουσες ακρόασης μουσικής, η διάχυση είναι συστατικό καλής ακουστικής. Ο ακροατής πρέπει να έχει την αίσθηση ότι ο ήχος έρχεται από παντού, επιβάλλεται να έχει πολύ υψηλό ποσοστό. Αντίθετα, σε αίθουσες ακρόασης ομιλίας, ένα μικρό ποσοστό διάχυσης επαρκεί και μπορεί να επιτευχθεί ακόμα και με την εναλλάξ χρήση ανακλαστικού και απορροφητικού υλικού.

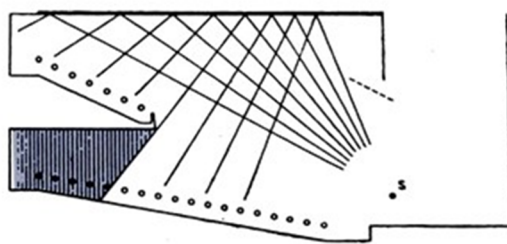
2.2.3 Περίθλαση

Περίθλαση είναι η αλλαγή της διεύθυνσης ηχοδιάδοσης, που συμβαίνει κοντά σε ασυνέχειες του μέσου διάδοσης. Αποτέλεσμα της περίθλασης είναι η δημιουργία ασαφούς ηχητικής σκιάς. Παράδειγμα ηχητικής σκιάς από περίθλαση είναι οι εξώστες μεγάλου βάθους στις αίθουσες ακροατηρίου όπου ακούγονται μόνο οι χαμηλες συχνότητες.

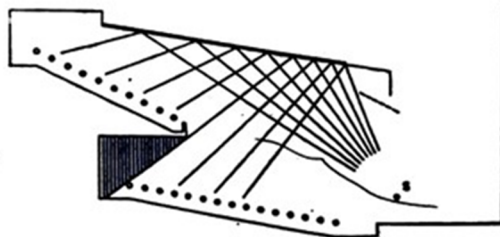


Φωτογραφία κυμάτων νερού που προσπίτουν σε εμπόδιο, δημιουργώντας ένα τραπέζιο ηχητικής σκιάς. -- Σωτηροπούλου 1996

Εικόνα Error! No text of specified style in document..10



BAΘΥΣ ΕΞΩΣΤΗΣ - ΛΑΘΟΣ

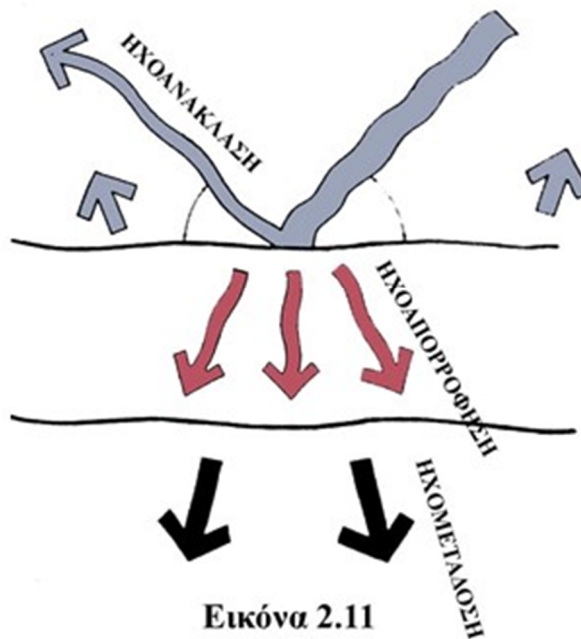


ΑΒΑΘΗΣ ΕΞΩΣΤΗΣ - ΣΩΣΤΟ

Εικόνα Error! No text of specified style in document..11-- Σωτηροπούλου 1996

2.2.4 Ηχοαπορρόφηση

Ηχοαπορρόφηση είναι η ιδιότητα των υλικών και αντικειμένων να απορροφούν την ηχητική ενέργεια, μετατρέποντας τη σε άλλη μορφή, συνήθως σε θερμότητα, κατά τη διάδοση του ηχητικού κύματος σε ένα μέσο, ή κατά την πρόσπτωσή του σε μία επιφάνεια.



Το ποσοστό του ήχου που απορροφά μία επιφάνεια το δηλώνει ο συντελεστής ηχοαπορρόφησης. 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 το 0 έως το 1, με την τιμή 0 να την έχουν οι πλήρως ανακλαστικές επιφάνειες και τη τιμή 1 οι πλήρως ηχοαπορροφητικές επιφάνειες.

Ο χρόνος αντήχησης δίνεται από τον [όπου $R.T.$: χρόνος αντήχησης (s), V : όγκος της αίθουσας (m^3), A : ηχοαπορρόφηση του συνόλου των υλικών της αίθουσας (m^2Sab) και α : ηχοαπορρόφηση του αέρα ανά μονάδα όγκου (m^2Sab/m^3), υπό την προϋπόθεση το ηχητικό πεδίο να είναι διαχυτικό].

Κατά τον υπολογισμό της ηχοαπορρόφησης, ο χρόνος αντήχησης αποτελεί σημαντικό παράγοντα. Με τον όρο **αντήχηση** καλείται το σύνολο των ανακλάσεων των επιφανειών ενός χώρου, που φτάνουν στο δέκτη με καθυστέρηση μικρότερη από $1/25$ sec, με τη προϋπόθεση αυτές οι ανακλάσεις να μην προκαλούν ηχώ. Ως **χρόνος αντήχησης (R.T)** καλείται ο χρόνος (s) που χρειάζεται ο ήχος για να χάσει 60 dB από

την αρχική του ένταση, από τη στιγμή της διακοπής παραγωγής του μέσα σε ένα χώρο.

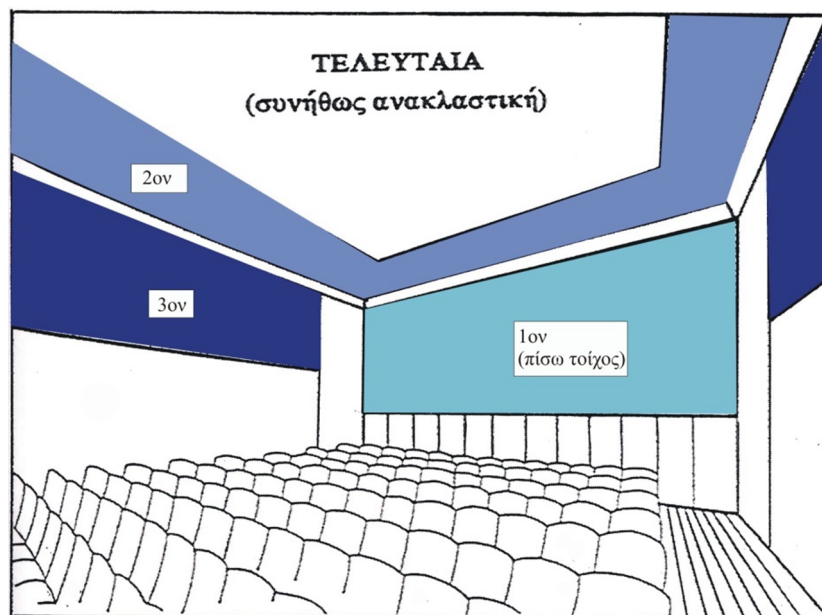
Γνωρίζοντας το βέλτιστο χρόνο αντήχησης του χώρου που σχεδιάζουμε, μπορούμε με τη χρήση του τύπου του Wallace Clement Sabine, καθηγητή του Harvard, να προσδιορίσουμε με μια πρώτη προσέγγιση, το εμβαδόν των ηχοαπορροφητικών επιφανειών που απαιτούνται. Απαραίτητη προϋπόθεση για να ισχύει ο τύπος του χρόνου αντήχησης κατά τον Sabine, είναι η επάρκεια ηχοδιάχυσης στο χώρο.

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

- $R.T.$ [s] είναι ο χρόνος αντήχησης
- V [m^3] είναι ο όγκος του χώρου
- F_i [m^2] είναι η επιφάνεια του νιοστού υλικού του χώρου
- a_i [Sab] είναι ο συντελεστής ηχοαπορρόφησης του νιοστού υλικού του χώρου
- x [$m^2 Sab / m^3$] είναι η ηχοαπορρόφηση του αέρα ανά μονάδα όγκου
- v είναι το πλήθος των ηχοαπορροφητικών υλικών του χώρου

Ο παραπάνω τύπος δηλώνει ότι ο χρόνος αντήχησης μιας αίθουσας είναι ανάλογος του όγκου της και αντιστρόφως ανάλογος της συνολικής της ηχοαπορρόφησης. Απαραίτητη προϋπόθεση για να ισχύει ο τύπος του χρόνου αντήχησης κατά τον Sabine, είναι η επάρκεια ηχοδιάχυσης στο χώρο.

Πολύ σημαντικό ρόλο παίζει η θέση, στην οποία τοποθετούνται τα ηχοαπορροφητικά υλικά. Σκοπός μας είναι αυτά τα υλικά να συμβάλουν στην καλύτερη ακουστική του χώρου και όχι να μας δημιουργούν πρόβλημα. Συνήθως, προτιμάμε να τα τοποθετούμε στα τμήματα του χώρου με σειρά προτεραιότητας. 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 του ήχου, που προέρχεται από τον ομιλητή, από την οροφή.



Τοποθέτηση ηχοαπορροφητικών υλικών στο χώρο

Εικόνα Error! No text of specified style in document..12 – Σωτηροπούλου 1996

Ο συντελεστής ηχοαπορρόφησης ενός υλικού μεταβάλλεται συναρτήσει της συχνότητας και της γωνίας προσπτώσεως επί της υλικού. Ο τρόπος τοποθέτησης του ηχοαπορροφητικού υλικού επιδρά σημαντικά στις ηχοαπορροφητικές του ιδιότητες. Για παράδειγμα, προκύπτει ότι άλλη ηχοαπορρόφηση έχει ένα επίχρισμα τοποθετημένο επάνω σ' ένα δρομικό τοίχο και άλλη, όταν χρησιμοποιείται σαν ψευδοροφή καλύπτοντας ένα μεταλλικό πλέγμα. Για το λόγο αυτό θα πρέπει να οι συντελεστές ηχοαπορρόφησης, που δίνονται στους διάφορους πίνακες, να λαμβάνονται σαν αντιπροσωπευτικοί μόνο και όχι σαν ακριβή στοιχεία για τις ιδιότητες ενός ηχοαπορροφητικού υλικού. Τα ηχοαπορροφητικά υλικά κατατάσσονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες:

- Τα πορώδη υλικά μεσαίων έως υψηλών συχνοτήτων
- συνηχητές μεμβράνης χαμηλών συχνοτήτων
- συνηχητές κοιλότητας μεσαίων συχνοτήτων

2.2.4.1 Πορώδη υλικά

Η ηχοαπορρόφηση στα πορώδη ηχοαπορροφητικά υλικά οφείλεται στην ύπαρξη πόρων στο υλικό, οι οποίοι επικοινωνούν με τον εξωτερικό αέρα και μεταξύ τους. Τα ηχητικά κύματα κατά την πρόσπτωσή τους στο υλικό εισέρχονται στους πόρους του και εκεί χάνουν μέρος της ηχητικής ενέργειάς τους, που μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια, λόγω εσωτερικής τριβής και θερμικών διεργασιών. Τα πορώδη ηχοαπορροφητικά υλικά παρουσιάζουν σημαντική ηχοαπορρόφηση στην περιοχή των υψηλών συχνοτήτων, μέτρια στις μεσαίες και μικρή στις χαμηλές συχνοτήτες. Συνήθως τα πορώδη ηχοαπορροφητικά υλικά που χρησιμοποιούνται κατασκευάζονται από βαμβάκι (που είναι εξαιρετικός απορροφητής ήχου) και χνουδωτά ινώδη υλικά σε μορφή ταμπλό, υφασμάτων, χαλιών κ.α. Άλλα γνωστά

ηχοαπορροφητικά υλικά είναι το υαλόνημα σε μορφή ταμπλό (με ίνες από γυαλί που αποτελούνται από ειδικά υλικά μεγάλης πυκνότητας), οι αφροί από πολυουρεθάνη (αφρολέξ), και οι κουρτίνες που λειτουργούν σαν ηχοαπορροφητές ήχου ανάλογα με το βάρος του υλικού που είναι κατασκευασμένες, τον βαθμό πτύχωσης (ζάρες) και την απόσταση τους από τον τοίχο. Τα χαλιά τα οποία χρησιμοποιούνται συνήθως για την αισθητική στο χώρο απορροφούν τον ήχο συνήθως στις υψηλές συχνότητες.

2.2.4.2 Συνηχητές μεμβράνης

Οι συνηχητές μεμβράνης ή αλλιώς οι ηχοαπορροφητές με διαφράγματα, σε αντίθεση με τους πορώδεις απορροφητές οι οποίοι απορροφούν τον ήχο σε υψηλές και μεσαίες συχνότητες, έχουν τη δυνατότητα απορρόφησης του ήχου σε χαμηλές συχνότητες. Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στη μηχανική δόνηση της επιφάνειας που πάλλεται, όταν ο ήχος προσπίπτει πάνω της και έτσι αποσβένει τον κραδασμό. Η ανάγκη για την παρουσία ηχοαπορροφητών με διάφραγμα σε χώρους ακροατηρίου είναι απαραίτητη αφού οι ακροατές και τα περισσότερα υλικά απορροφούν μεσαίες και υψηλές συχνότητες. Τα υλικά κατασκευής των συνηχητών είναι συνήθως υποπροϊόντα του ξύλου όπως νοβοπάν και κόντρα πλακέ.

2.2.4.3 Συνηχητές κοιλότητας

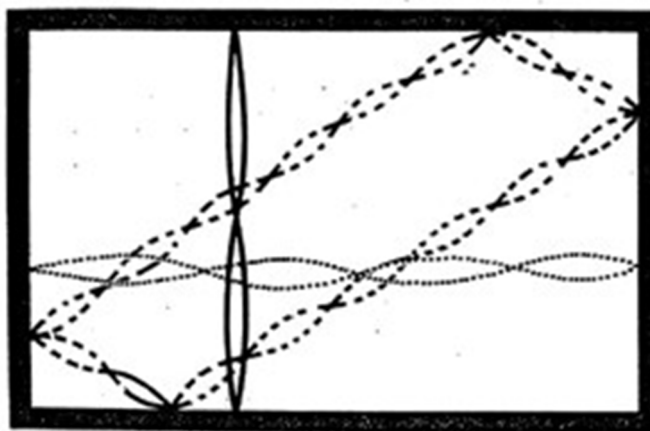
Ο πιο απλός συνηχητής κοιλότητας είναι ένα μπουκάλι αέρα με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά ως προς την κατασκευή του. Φυσώντας στο μπουκάλι αυτό, όντας άδειο, ακούγεται μία νότα, η συχνότητα συνήχησης, η οποία μετατοπίζεται προς υψηλότερες συχνότητες όσο εμείς τοποθετούμε στο μπουκάλι όλο και μεγαλύτερη 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 Προβλήματα ακουστικής σε κλειστό χώρο

Η διάδοση του ήχου σε κλειστό χώρο μπορεί να παρουσιάσει αρκετά προβλήματα όπως είναι ο συντονισμός, η ηχώ, ο πλαταγιασμός και ο εστιασμός του ήχου. Κατά τον ακουστικό σχεδιασμό λαμβάνουμε μέτρα αντιμετώπισης τους ή ακόμα καλύτερα, αποφυγή τους.

2.3.1 Συντονισμός

Ο συντονισμός εμφανίζεται σε κλειστό χώρο όταν η συχνότητα του εκπεμπόμενου ήχου είναι ίδια με την ιδιοσυχνότητα κάποιου από τα υλικά του χώρου. Η παρουσία μιας συχνότητας συντονισμού σε κλειστό χώρο μειώνει την ακουστική ποιότητα και οδηγεί σε χρωματική αλλοίωση του ήχου. Η εμφάνιση του φαινομένου του συντονισμού δεν μπορεί να αποτραπεί, παρόλα αυτά, μέσω του σχεδιασμού, μπορούν να αποφευχθούν οι δυσάρεστες συνέπειες, χρησιμοποιώντας, για παράδειγμα ακανόνιστα σχήματα χώρων.

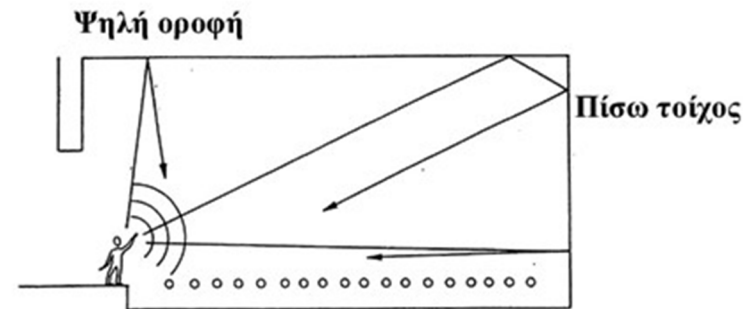


Εικόνα Error! No text of specified style in document..13 – SRL 1976

Αν ο χώρος που σχεδιάζουμε έχει διαστάσεις μεγαλύτερες από 8,5 m, ο συντονισμός δε δημιουργεί προβλήματα, καθώς η χαμηλότερη συχνότητα συντονισμού βρίσκεται κάτω από το όριο ακουστών συχνοτήτων. Όταν όμως οι διαστάσεις του χώρου είναι μικρότερες κρίνεται απαραίτητη η λήψη μέτρων για την αντιμετώπιση του φαινομένου. Ένα από τα μέτρα είναι η χρήση απορροφητικών υλικών.

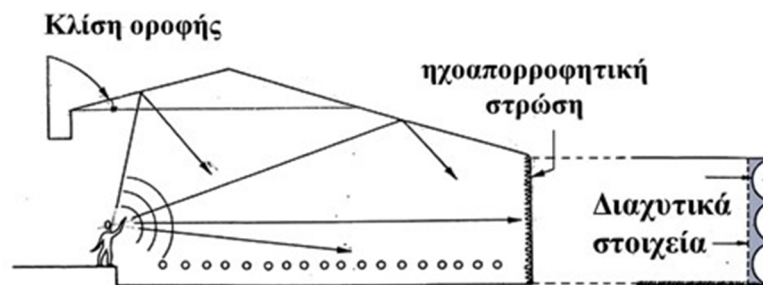
2.3.2 Ηχώ

Η ηχώ είναι μία καθυστερημένη ανάκλαση, σχετικά έντονη, η οποία είναι διακριτή σε σχέση με τον απευθείας ήχο. Η παρουσία ηχούς σε ένα χώρο είναι από τα πιο ανεπιθύμητα ακουστικά λάθη σχεδιασμού και το πιο υπεύθυνο για την εξαφάνιση της διαύγειας.



ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ ΠΟΥ ΔΗΜΙΟΥΡΓΟΥΝ ΗΧΩ

Εικόνα Error! No text of specified style in document..14 – Σωτηροπούλου 1996

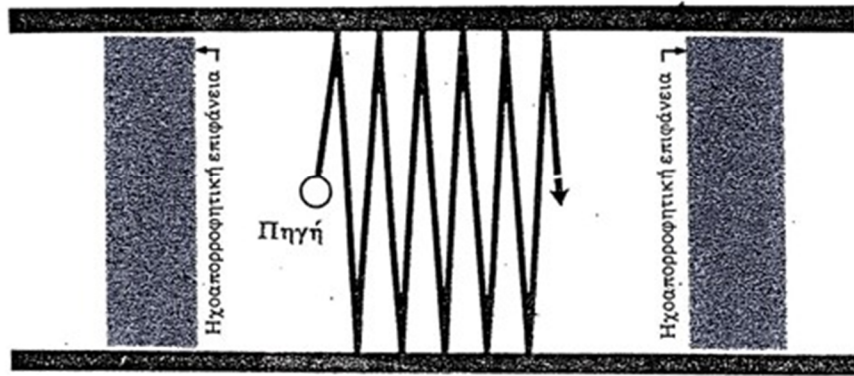


ΤΡΟΠΟΙ ΑΠΟΦΥΓΗΣ ΗΧΟΥΣ

Εικόνα Error! No text of specified style in document..15

2.3.3 Πλαταγισμός

Πλαταγισμός είναι το αποτέλεσμα μιας επαναλαμβανόμενης ανάκλασης σχετικά υψηλής έντασης και συνοδεύεται από χρωματική αλλοίωση του ήχου διότι κάποιες συχνότητες αυτού αντιστοιχούν σε συχνότητες συντονισμού του χώρου. Ο πλαταγισμός συνήθως συνοδεύεται από κάποια χρωματική αλλοίωση του ήχου διότι κάποιες συχνότητες αυτού αντιστοιχούν σε συχνότητες συντονισμού του χώρου.



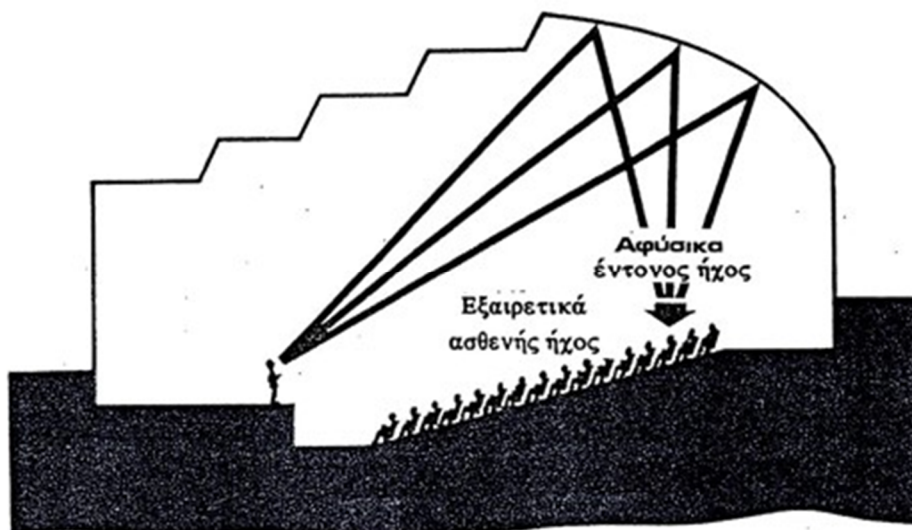
Εικόνα Error! No text of specified style in document..16 – SRL 1976

Υπάρχουν τρόποι με τους οποίους μπορούμε να αποφύγουμε την εμφάνιση του φαινομένου του πλαταγιασμού:

- Οι αντικριστές παρειές του χώρου να μη σχεδιάζονται παράλληλες
- Να τοποθετούνται ηχοαπορροφητικές επενδύσεις σε μια από τις δύο παράλληλες παρειές
- Να τοποθετούνται διαχύτες σε μια από τις παράλληλες παρειές

2.3.4 Εστιασμός

Ο εστιασμός είναι το αποτέλεσμα της συγκέντρωσης του ήχου προς συγκεκριμένο εστιακό σημείο. Η κύρια ανεπιθύμητη συνέπεια αυτού του φαινομένου είναι ο αφύσικα έντονος ήχος που εμφανίζεται στο εστιακό σημείο.



Εικόνα Error! No text of specified style in document..17 – SRL 1976

Ένας τρόπος αντιμετώπισης του φαινομένου του εστιασμού του ήχου είναι η αποφυγή χρήσης κοίλων επιφανειών στους χώρους. Σε περίπτωση όμως ύπαρξής τους, τοποθετούμε σε αυτές διαχύτες ή ηχοαπορροφητικές επενδύσεις. Τέλος, μπορούμε να σχεδιάσουμε το χώρο έτσι ώστε τα εστιακά σημεία της κοίλης επιφάνειας να βρίσκονται πάνω από το επίπεδο ακρόασης κάτι που επιτυγχάνεται με τον σχεδιασμό υψηλής οροφής.

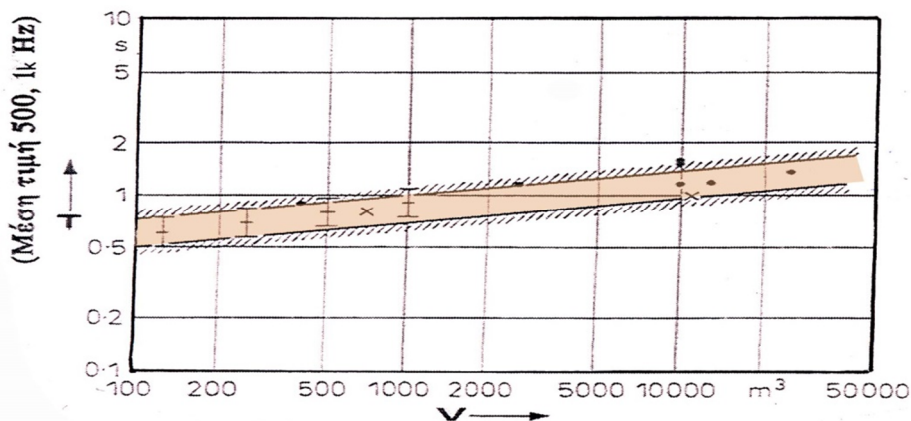
2.4 Ακουστικά κριτήρια αιθουσών ακρόασης ομιλίας

Κατά τον σχεδιασμό των αιθουσών ακρόασης ομιλίας, προτεραιότητα δίνεται στην ευκρίνεια του ήχου της ομιλίας ώστε οι ακροατές να ακούνε καθαρά και να αντιλαμβάνονται την ομιλία.

2.4.1 Φυσικά κριτήρια ευκρίνειας ήχου ομιλίας

Τα φυσικά ακουστικά κριτήρια που χρησιμοποιούνται, είναι τα εξής [2]:

- Το **κλάσμα των πρώτων ανακλάσεων**. Οι πρώτες ανακλάσεις, που φτάνουν αμέσως μετά τον απευθείας ήχο, σε χρονικό διάστημα 50 msec, ενισχύουν τον απευθείας 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 EEF50 και ισούται με το λόγο της ηχητικής ενέργειας, που φτάνει στον ακροατή εντός 50 msec προς τη συνολική ηχητική ενέργεια, που φτάνει στον ακροατή, μετρώντας το χρόνο από τη στιγμή άφιξης του απευθείας ήχου στον ακροατή. Όσο αυξάνεται το ποσοστό της ηχητικής ενέργειας, που φτάνει στον ακροατή, σε σύγκριση με τη συνολική ενέργεια που εκπέμπεται σε μικρότερο χρονικό διάστημα, τόσο καλύτερες συνθήκες ευκρίνειας επικρατούν. Η βέλτιστη τιμή του κλάσματος των πρώτων ανακλάσεων είναι $D50=0,50$.
- 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 παρειαδύων 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 2.18) [2]



Επιθυμητές τιμές του χρόνου αντήχησης ανάλογα με τον όγκο του χώρου. Στο άνω όριο επιτυγχάνουμε υψηλές στάθμες ήχου ενώ στο κάτω όριο υψηλή υποκειμενική ευκρίνεια.

Σχήμα 2.18

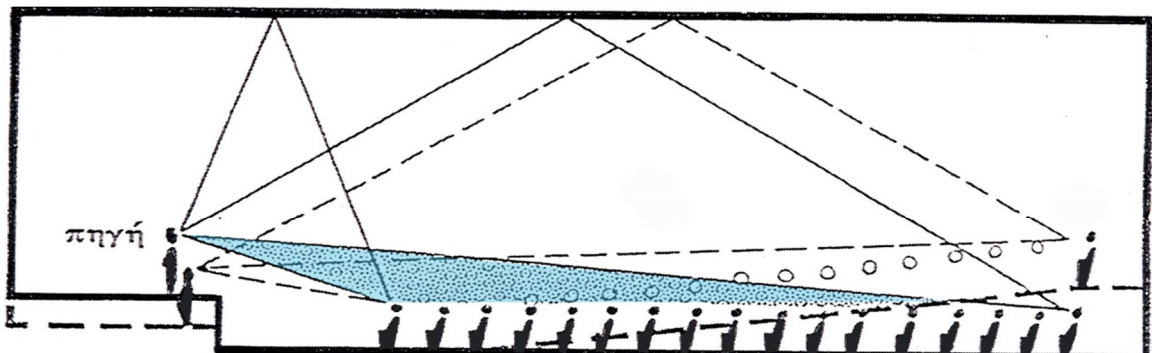
2.5 Αρχές ακουστικού σχεδιασμού των χώρων ακρόασης ομιλίας

2.5.1 Βελτιστοποίηση του απευθείας ήχου

Δύο είναι οι βασικοί στόχοι κατά το σχεδιασμό βελτιστοποίησης του απευθείας ήχου. Πρώτος στόχος είναι η εξασφάλιση της απρόσκοπτης πορείας του ήχου και δεύτερος στόχος είναι η ελαχιστοποίηση της απόστασης του ομιλητή από το ακροατήριο.

Εφαρμόζοντας τις παρακάτω τεχνικές, κάθε μία ξεχωριστά ή και συνδυασμένα, στόχο μας είναι να εξασφαλίσουμε την *απρόσκοπτη πορεία του απευθείας ήχου*:

- Τοποθετούμε τον ομιλητή σε μία εξέδρα ώστε να βρίσκεται σε υψηλότερο επίπεδο από αυτό του ακροατηρίου
- 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 δε κρύβεται πίσω από το προηγούμενο ακροατή ούτε απορροφάται από αυτόν. Επιπλέον, εξασφαλίζουμε καλές οπτικές συνθήκες σε όλους τους ακροατές.



ΤΟΜΗ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ

Σχεδιασμός με σκοπό τη βελτιστοποίηση του απ' ευθείας ήχου.

Σχήμα 2.19

Όσο πιο μεγάλη είναι η γωνία εκπομπής του ήχου από τον ομιλητή προς τους ακροατές, τόσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό του απευθείας ήχου που φτάνει στους ακροατές. Η στάθμη της έντασης του απευθείας ήχου της ομιλίας μειώνεται καθώς αυξάνεται η απόσταση από τον ομιλητή.

Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα, 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 μιας, θεωρητικά, κανονικής ηχοστάθμης 50dB(A) μειώνεται στα 30 dB(A) στην τελευταία σειρά του ακροατηρίου, η οποία αντιστοιχεί σε χαμηλότερη τιμή από το θόρυβο, με τους ακροατές να διατηρούν απόλυτη ησυχία.

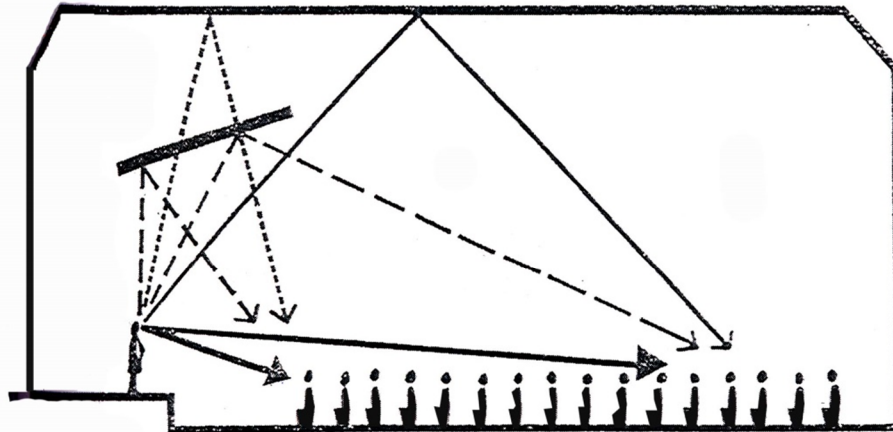
Είναι σημαντική η ελαχιστοποίηση των αποστάσεων ανάμεσα στον ομιλητή και στο ακροατήριο. Η μέγιστη αποδεκτή απόσταση στους χώρους διαλέξεων ισούται με 20m, ενώ για την ενίσχυση του ήχου τοποθετούμε ανακλαστήρες μετά τα 8m. Οι τεχνικές που χρησιμοποιούμε σε αυτή την περίπτωση είναι:

- 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
- 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 Εξασφάλιση άφθονων πρώτων ανακλάσεων

Κάθε ακροατής, σε όποιο σημείο και να βρίσκεται μέσα στην αίθουσα ομιλίας, πρέπει να ενισχύεται με ανακλώμενο ήχο, ειδικά αν το σημείο αυτό είναι προς τις τελευταίες σειρές. Αυτό επιτυγχάνεται με τη τοποθέτηση ανακλαστικών επιφανειών στα εξής σημεία:

- Πάνω από τον ομιλητή
- Στην οροφή της αίθουσας



Τοποθέτηση ανακλαστήρα πάνω από τη θέση του ομιλητή.

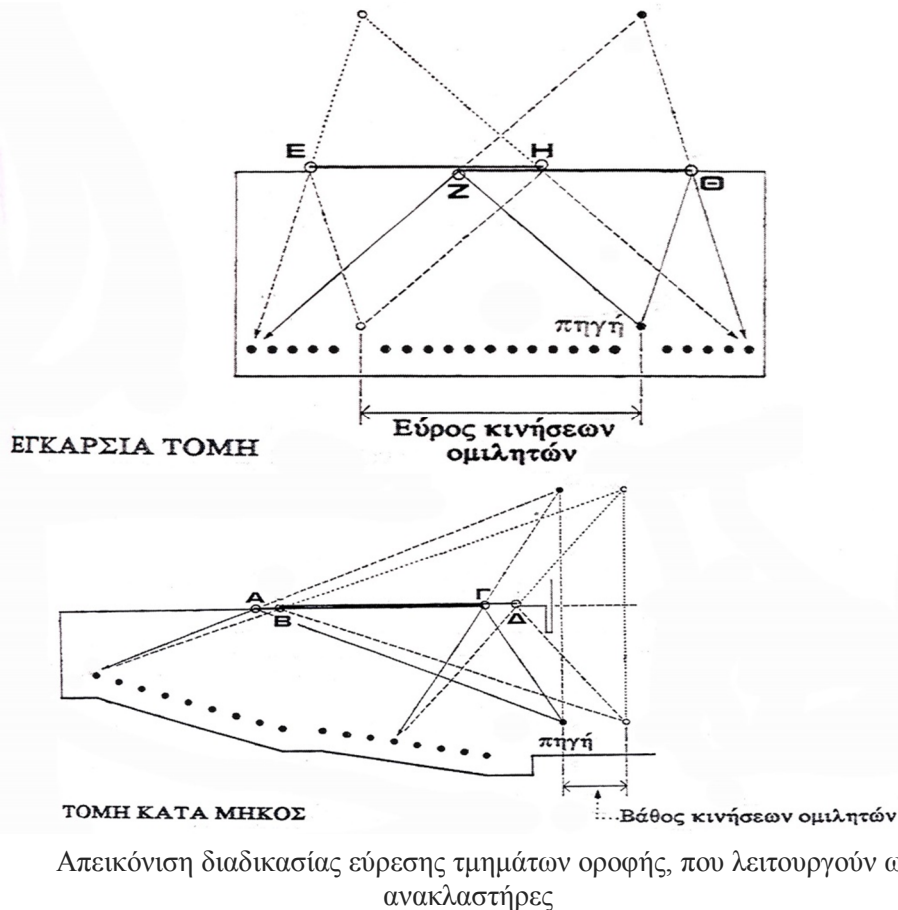
Εικόνα Error! No text of specified style in document..20

- 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, πρέπει να είναι άκαμπτα με λείο και σκληρό τελείωμα, όπως επίχρισμα, γυψοσανίδες, παχύ φύλλο κόντρα πλακέ και πλεξιγκλάς.

2.5.2.1 Σχεδιασμός της οροφής των χώρων διδασκαλίας

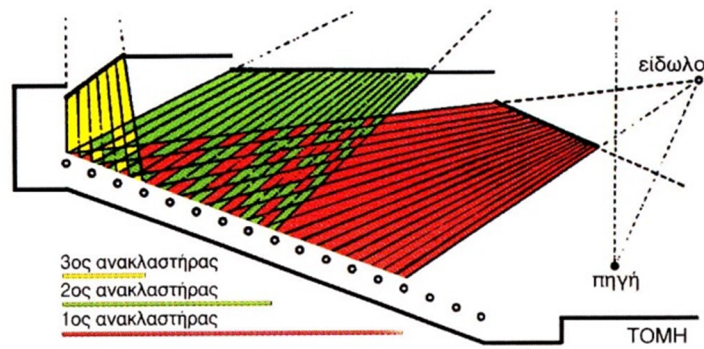
Ένας τρόπος που χρησιμοποιούμε για το σχεδιασμό της οροφής ενός χώρου, με την προϋπόθεση ότι δεν είναι πολύ ψηλή, είναι να προσδιορίσουμε εκείνα τα τμήματα τα οποία λειτουργούν ως ανακλαστήρες, μέσω της εύρεσης του ειδώλου της πηγής και αφού το ενώσουμε με τη τελευταία και τη Πέμπτη σειρά των ακροατών.



Εικόνα Error! No text of specified style in document..21

Σημαντικό είναι να λάβουμε 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 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 της οροφής.



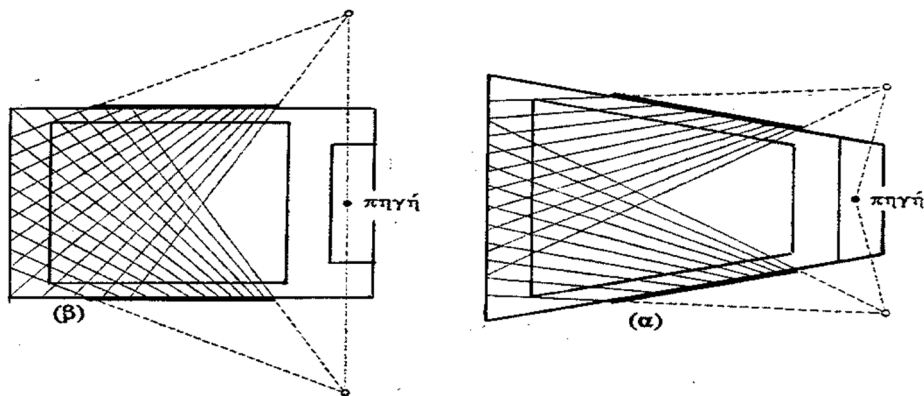
Σχεδιασμός ανακλαστικής ψευδοροφής

Εικόνα Error! No text of specified style in document..22

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.

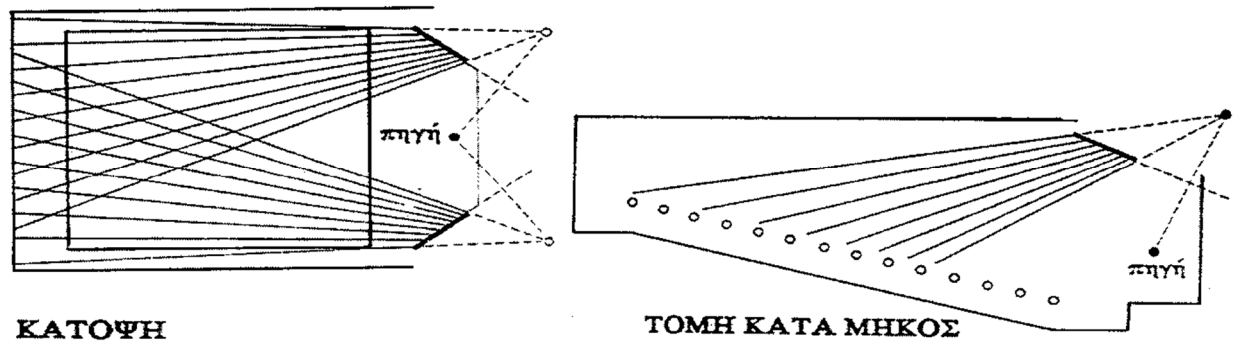


Απεικόνιση διαδικασίας εύρεσης τμημάτων πλευρικών παρειών, που λειτουργούν ως ανακλαστήρες

Εικόνα Error! No text of specified style in document..23

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



Τοποθέτηση ανακλαστήρων γύρω από τον ομιλητή

Εικόνα 2.24

2.5.3 Σχεδιασμός ελαχιστοποίησης θορύβου βάθους

Ο θόρυβος βάθους 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.

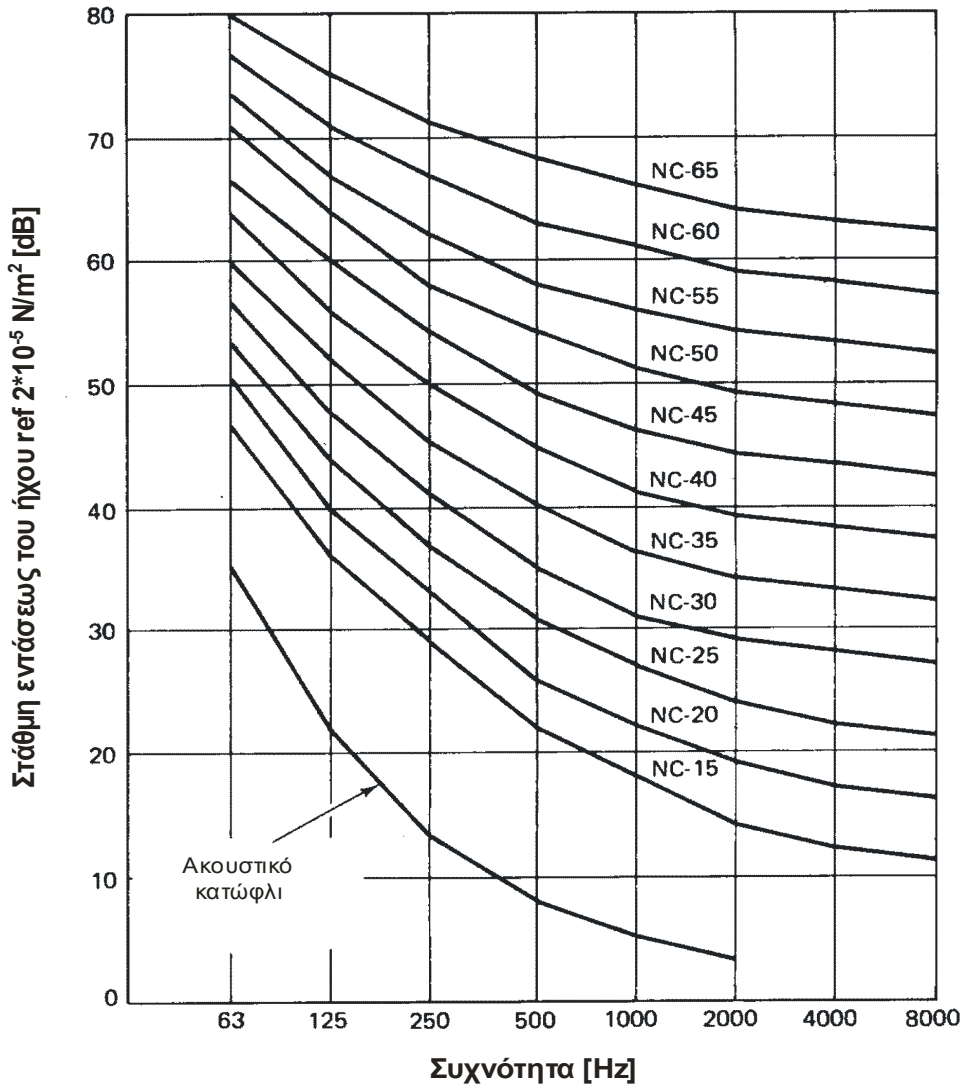
Η εκτίμηση της ανεκτής στάθμης θορύβου δεν είναι ιδιαίτερα εύκολη, διότι σημαντικό ρόλο στο θέμα αυτό παίζει ο υποκειμενικός παράγοντας. Βέβαια, έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία τιμές ανεκτής στάθμης θορύβου σε συνάρτηση με τη χρήση του χώρου και ονομάζονται κριτήρια θορύβου (Noise Criteria - NC).

Δραστηριότητα	NC
Αποδεκτές συνθήκες εργασίας με την ελάχιστη λεκτική παρέμβαση. (Βιομηχανικές περιοχές, εμπορικές περιοχές, όπως γκαράζ, κλειστά πάρκινγκ αυτοκινήτων, πλυντήρια, κ.τ.λ.)	45 - 55
Αποδεκτές οι μέτριες συνθήκες ακουστικής. (Χώροι με μηχανήματα γραφείου, καφετέριες, χώροι εργοστασίων, διάδρομοι, μπάνια, κ.τ.λ.)	40 - 45
Απαιτούμενες οι σχετικά καλές συνθήκες ακουστικής. (Μεγάλα γραφεία, εστιατόρια, κ.τ.λ.)	35 - 40
Απαιτούμενες οι καλές συνθήκες ακουστικής. (Ιδιωτικά γραφεία, τάξεις, βιβλιοθήκες, κ.τ.λ.)	30 - 35
Ύπνος, ξεκούραση. (Σπίτια, διαμερίσματα, ξενοδοχεία, νοσοκομεία, κ.τ.λ.)	20 - 30
Απαιτούμενες οι πολύ καλές συνθήκες ακουστικής. (Αμφιθέατρα, θέατρα, εκκλησίες, κ.τ.λ.)	25
Απαιτούμενες οι άριστες συνθήκες ακουστικής. (Αίθουσες συναυλιών, τηλεοπτικά στούντιο.)	20
Απαιτούμενες οι εξειδικευμένες συνθήκες ακουστικής. (Πειραματικά ακουστικά εργαστήρια, κ.τ.λ.)	15

Κριτήρια θορύβου (αποδεκτές τιμές θορύβου) ανάλογα με τη λειτουργία του χώρου

Εικόνα Error! No text of specified style in document..25

Έχει καθιερωθεί το διάγραμμα καμπύλων κριτηρίων θορύβου (σχήμα 2.38), 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 2.37), για να διαπιστώσουμε αν την υπερβαίνει ή όχι.



Καμπύλες κριτηρίων θορύβου.(SRL 1976)

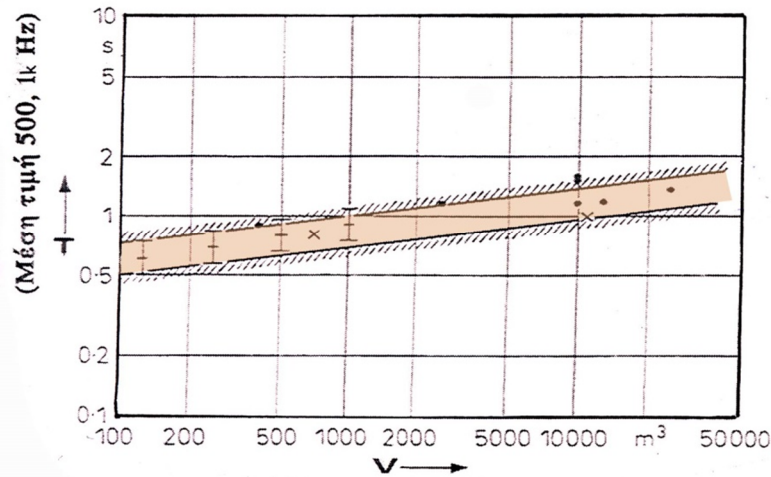
Σχήμα 2.26

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.



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. –

Cremer et al 1982

Σχήμα 2.27

Ο όγκος του χώρου σχετίζεται με την τιμή του όγκου ανά ακροατή και του αριθμού των ακροατών [2]. Οι συνιστώμενες τιμές του όγκου ανά ακροατή σε ένα χώρο ακρόασης ομιλίας κυμαίνονται από $2,3 - 4,3 m^3$ με βέλτιστη τιμή τα $3,1 m^3$. 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.

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 [5].

3 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Στις 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 τις επιστήμες που επωφελήθηκε με την χρήση του ηλεκτρονικού υπολογιστή είναι και η επιστήμη της ακουστικής. Κατά τη διάρκεια των περασμένων δεκαετιών χρησιμοποιήθηκαν αρκετές τεχνικές με σκοπό την ακουστική προσομοίωση των χώρων.

Αρχικά, οι μελετητές της ακουστικής κατασκεύαζαν ένα πρόπλασμα του χώρου υπό κλίμακα. Αυτή η διαδικασία ήταν αρκετά δαπανηρή και χρονοβόρα σε σύγκριση με τα ψηφιακά προγράμματα. Βασιζόταν στην αντιστοίχιση υλικών με τις ιδιότητες των πραγματικών υλικών· παραδείγματος χάρη η ηχοαπορρόφηση στο υπό μελέτη φάσμα, αποδοσμένη στην κλίμακα του μοντέλου. Αυτή η διαδικασία δεν μπορούσε παρά να είναι μόνο προσέγγιση της πραγματικότητας, δηλ. σχετικά λιγότερο ακριβής από την ψηφιακή προσομοίωση που υλοποιείται σήμερα. Για την επιτυχή λειτουργία του κατάλληλου μοντέλου, επίσης ήταν απαραίτητη η αυστηρή τήρηση ορισμένης σταθερής υγρασίας και θερμοκρασίας του χώρου [1]. Ένα ακόμα μειονέκτημα σε σύγκριση με την προσομοίωση του χώρου είναι ότι δεν προσέφερε την δυνατότητα επέμβασης στη γεωμετρία του χώρου και η αλλαγή των υλικών του ήταν πολύ δύσκολη. Μέχρι την δεκαετία '80 η επιστήμη της ακουστικής εξελίχθηκε με την κατασκευή των μοντέλων και η συνεισφορά αυτής της μεθόδου υπήρξε μεγάλη. Η εισαγωγή σύγχρονων υπολογιστικών μεθόδων στον τομέα του ακουστικού σχεδιασμού κλήθηκε να επιλύσει τα παραπάνω προβλήματα.

Το θέμα όμως της σύγκρισης ακουστικών παραμέτρων στον πραγματικό και στον οωνί χώρο, είναι παρθένο ακόμα και για την επιστημονική βιβλιογραφία. Μία δημοσίευση των Hodgson et al (2008) [6] έχει ως αντικείμενο τη σύγκριση μετρήσεων στον πραγματικό και στον οωνί χώρο. Στη μελέτη αυτή χρησιμοποιούνται δύο όμοιοι πειραματικοί χώροι 480 m³ ο καθένας με μόνη διαφορά ότι ο ένας είναι τελείως κενός από ηχοαπορροφητικά υλικά ενώ ο άλλος είναι επενδεδυμένος με ένα συγκεκριμένο και γνωστό στον μελετητή ηχοαπορροφητικό υλικό. Για κάθε έναν από τους δύο αυτούς πειραματικούς χώρους γίνονται μετρήσεις των ακουστικών παραμέτρων τόσο στον πραγματικό, με επί τόπου μετρήσεις, όσο και στον οωνί χώρο, μέσω της προσομοίωσης τους στον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Οι συγγραφείς καταλήγουν στο ότι η προσομοίωση με ηλεκτρονικό υπολογιστή δε δίνει ακριβή αποτελέσματα στη περίπτωση χαμηλού χρόνου αντήχησης ή υψηλού θορύβου βάθους.

Μία ακόμα δημοσίευση από τους Astolfi et al [7] (2008) παρουσιάζει τη σύγκριση μεταξύ μετρημένων και υπολογισμένων ακουστικών παραμέτρων σε οκτώ αίθουσες διδασκαλίας γυμνασίων, με και χωρίς παρουσία μαθητών, με σκοπό να παρουσιάσει ποιος τρόπος υπολογισμού προσεγγίζει την πραγματικότητα για κάθε μία από τις

ακουστικές παραμέτρους με τις οποίες ασχολείται η δημοσίευση. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στον πραγματικό χώρο ενώ οι προβλέψεις έγιναν με διάφορα προγράμματα προσομοίωσης όπως το Odeon Room Acoustics Program και με εμπειρικές αλγοριθμικές σχέσεις όπως ο τύπος του χρόνου αντήχησης κατά Sabine, κατά Eyring και κατά Hodgson. Οι συγγραφείς καταλήγουν ότι σε περίπτωση αίθουσας άδειας από μαθητές τότε ο πραγματικός χρόνος αντήχησης που μετρήθηκε στην αίθουσα προσεγγίζεται καλύτερα μέσα από το πρόγραμμα του Odeon καθώς και από τον εμπειρικό τύπο του Sabine με αποκλίσεις της τάξης των 8,1% και 9,7% αντίστοιχα. Στην περίπτωση όμως γεμάτης αίθουσας από μαθητές τότε οι εμπειρικοί τύποι των Eyring, Sabine και Hodgson προσεγγίζουν καλύτερα τον πραγματικό χρόνο αντήχησης με αποκλίσεις από αυτόν της τάξης του 11,1%, 13,2% και 13,6% αντίστοιχα.

Η εργασία των Ν. Λεμπέση και Ι. Ταμβάκου [4] (2009) είχε ως αντικείμενο την σύγκριση μετρήσεων στον πραγματικό και στον οιονί χώρο. Έγιναν φυσικές μετρήσεις σε έξι χώρους διδασκαλίας του Ε.Μ.Π. οι οποίες καλύπτan ένα φάσμα συνθηκών από πολύ ηχοαπορροφητικές έως καθόλου ηχοαπορροφητικές. Οι παράμετροι που αξιολογήθηκαν ήταν το RT, το EDT και το EEF₅₀, δηλαδή παράμετροι που περιγράφουν με επάρκεια τη φυσική κατάσταση του ήχου για χώρους διδασκαλίας. Η σύγκριση μετρήσεων μεταξύ του πραγματικού και του οιονί χώρου για κάθε μία από τις παραμέτρους, έδειξε ότι οι αποκλίσεις των μετρήσεων στη συντριπτική τους πλειοψηφία βρίσκονται κάτω από το ελάχιστο όριο που είναι υποκειμενικά αντιληπτό (difference limen).

Μία ακόμα δημοσίευση, είναι αυτή των Passero και Zannin (2010) [8] η οποία αξιολογεί διάφορες διαδικασίες για τον καθορισμό του χρόνου αντήχησης, RT, σε μια τάξη. Αυτές οι διαδικασίες είναι οι εξής: (1) μέτρηση με τη μέθοδο κρουστικής απόκρισης (impulse response), (2) μέτρηση με διακοπτόμενο θόρυβο, (3) προσομοίωση σε υπολογιστή χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα ODEON και (4) υπολογισμοί χρησιμοποιώντας τους τύπους Sabine, Eyring, και Arau-Puchades. Τα δεδομένα που προκύπτουν αναλύονται στατιστικά για να εξακριβωθεί η ομοιότητα τους. Όσον αφορά στην προσομοίωση σε υπολογιστή χρησιμοποιώντας το λογισμικό Odeon, δεν υπήρχε καμία διαφορά μεταξύ αυτής της μεθόδου και των δύο μετρήσεων, όταν το RT αξιολογήθηκε στη συχνότητα των 500 Hz και στη μέση τιμή στις οκτάβες από 125 έως 4.000 Hz. Ωστόσο, όταν η μέση τιμή RT στις συχνότητες 500, 1000, και 2000 Hz αξιολογήθηκε, οι τιμές της προσομοίωσης διέφεραν από τις τιμές που μετρήθηκαν με τη μέθοδο διακοπτόμενου θορύβου.

Η έλλειψη μελετών στη βιβλιογραφία είναι ενδεικτική του ότι, η προσέγγιση του συγκεκριμένου ζητήματος δεν είχε μέχρι τώρα την ανάλογη προτεραιότητα την οποία όφειλε να έχει μιας και για τον πολιτικό μηχανικό παίζει μεγάλη σημασία η πιστότητα και η ακρίβεια των αποτελεσμάτων του.