

---

# ΑΣΚΗΣΗ 4

## Μέτρηση του Χρόνου Αντήχησης

### ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΑΣΚΗΣΗΣ

#### **Μέρος Α:**

Σκοπός του πρώτου μέρους της άσκησης είναι η μελέτη και μέτρηση του χρόνου αντήχησης με το ηχώμετρο σε μεγάλους χώρους. Θα παρατηρήσουμε επίσης ποια είναι η επίδραση της ύπαρξης ακροατηρίου σε ένα χώρο σε σχέση με τον ίδιο χώρο όταν είναι άδειος.

#### **Μέρος Β:**

Σκοπός δεύτερου μέρους της άσκησης είναι η μελέτη και μέτρηση του χρόνου αντήχησης με το ηχώμετρο σε μη διάχυτο πεδίο και στην περίπτωση της σύζευξης δύο χώρων. Θα παρατηρήσουμε επίσης ποια είναι η επίδραση ενός ανοιχτού παραθύρου στο χρόνο αντήχησης σε σχέση με αυτόν με κλειστά τα παράθυρα.



# 1. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΘΕΩΡΙΑΣ

## Ακουστική κλειστών χώρων

Όταν βρισκόμαστε σε ανοιχτό χώρο, χωρίς εμπόδια/ανακλαστικές επιφάνειες και θεωρώντας ότι η πηγή είναι σημειακή, η πίεση μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα ως προς την απόσταση από τη πηγή, ή αλλιώς έχουμε μείωση της στάθμης του κατά 6dB σε κάθε διπλασιασμό απόστασης.

Όταν όμως μελετούμε τη διάδοση του ήχου σε κλειστό χώρο θα πρέπει να λάβουμε υπόψη μας την αλληλεπίδρασή του με αυτόν.

Στην ακουστική διαχωρίζουμε τους χώρους σε δύο κατηγορίες:

- (1) Στους ακουστικά **μικρούς** χώρους, όπου  $\lambda \approx$  διαστάσεις του χώρου και
- (2) Στους ακουστικά **μεγάλους** χώρους, όπου  $\lambda \ll$  διαστάσεις του χώρου.

Στη πρώτη περίπτωση τα κυματικά φαινόμενα είναι πολύ έντονα και προσεγγίζουμε τη συμπεριφορά του ήχου σύμφωνα με τις αρχές τις **Κυματικής Ακουστικής**.

Στην δεύτερη περίπτωση τα κυματικά φαινόμενα είναι τόσο πολύπλοκα και η χωρική διακύμανση του ηχητικού πεδίου τόσο μικρή, που η προσέγγιση της συμπεριφοράς του ήχου γίνεται με στατιστικό τρόπο. Έτσι, θεωρούμε ότι ο ήχος διαδίδεται σε ευθεία γραμμή μεταξύ ανακλαστικών επιφανειών (ακτίνες), τα φαινόμενα περίθλασης αγνοούνται κι έτσι η μελέτη μπορεί να γίνει με βάση τις αρχές της **Γεωμετρικής Ακουστικής**.

Στην άσκηση αυτή θα ασχοληθούμε με τη μελέτη του χρόνου αντήχησης σε **μεγάλους χώρους**.

## Δημιουργία Αντηχητικού Πεδίου

Αντήχηση είναι η μη ακαριαία απόσβεση του ήχου με το σταμάτημα μιας πηγής και είναι αποτέλεσμα των πολλαπλών ανακλάσεων στα τοιχώματα (και άλλα αντικείμενα) ενός χώρου.

Όπως γνωρίζουμε, όταν ένα ηχητικό κύμα προσπέσει σε μία επιφάνεια, τότε ένα μέρος του απορροφάται από το υλικό (μετατρέπόμενο σε θερμική ενέργεια) και ένα μέρος του ανακλάται (με γωνία ίδια με τη γωνία της πρόσπτωσης), ενώ υπάρχει και ένα ποσό που υφίσταται περίθλαση.

Ο συντελεστής ανάκλασης,  $r$ , αντιπροσωπεύει το ποσοστό εκείνο της προσπίπτουσας ενέργειας (για όλες τις δυνατές γωνίες πρόσπτωσης) που ανακλάται κατά την πρόσπτωσή του στο υλικό και επιστρέφει στο χώρο, δηλαδή:

$$r = \frac{E_r}{E_i}$$

, όπου  $E_r$  η ανακλώμενη ενέργεια από το υλικό και  $E_i$  η προσπίπτουσα σε αυτό ενέργεια.

Ο συντελεστής απορρόφησης,  $a$ , αντιπροσωπεύει το ποσοστό εκείνο της προσπίπτουσας ενέργειας (για όλες τις δυνατές γωνίες πρόσπτωσης) που απορροφάται από το υλικό (μετατρέπόμενο σε θερμική ενέργεια). Είναι το υπόλοιπο ποσοστό της προσπίπτουσας ενέργειας που δεν ανακλάστηκε στο χώρο και μπορεί να υπολογιστεί μέσω του συντελεστή ανάκλασης ως εξής:

$$a = 1 - r \quad (1)$$

, εφόσον  $r + a = 1$ , δηλαδή το ποσοστό ανάκλασης και το ποσοστό απορρόφησης δίνουν το ολικό ποσοστό της ενέργειας, δηλαδή 1.

Για τον συντελεστή απορρόφησης,  $a$ , θα ισχύουν επομένως τα εξής:

1.  $0 \leq a \leq 1$  και
2.  $a$  αδιάστατη ποσότητα, που εξαρτάται από το μήκος κύματος.

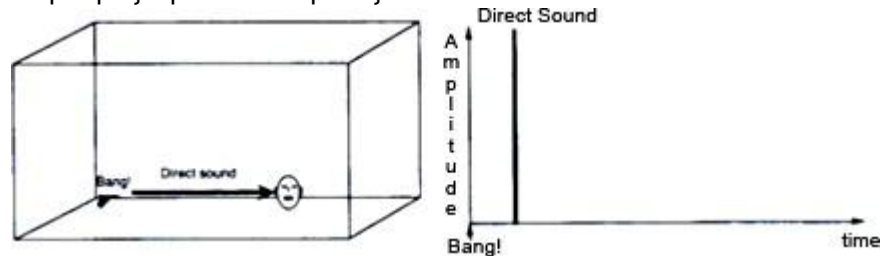
Η σταδιακή απόσβεση του ήχου μπορεί να φανεί με δύο τρόπους:

- (α) με έναν **παλμικό ήχο** ή
- (β) με μια πηγή που εκπέμπει **συνεχόμενα** ηχητική ενέργεια και διακόπτεται ξαφνικά.

## Παλμικός ήχος

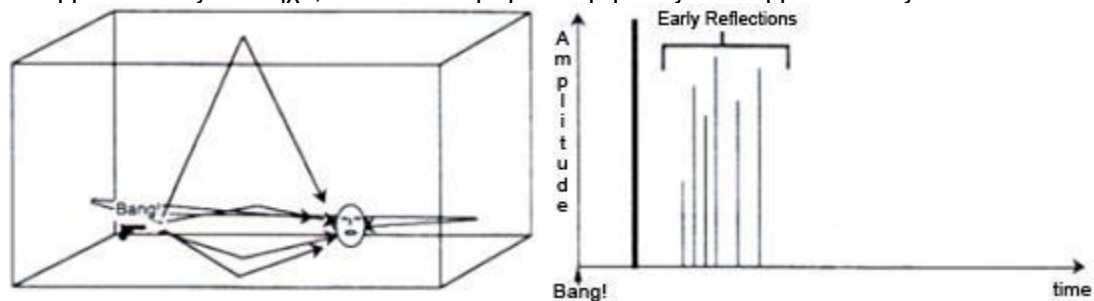
Έστω ένας παλμικός ήχος στο  $t=0$  sec σε κάποιο σημείο του χώρου.

- Ο πρώτος ήχος που φτάνει στον παρατηρητή είναι αυτός που θα διανύσει τη μικρότερη διαδρομή από την πηγή, δηλαδή ο **απευθείας ήχος**. Αυτός κινούμενος με ταχύτητα  $c=344\text{m/sec}$  θα φτάσει μετά από μικρό χρονικό διάστημα, που εξαρτάται από την απόστασή τους. Ο απευθείας ήχος συμπεριφέρεται όπως ο ήχος σε ελεύθερο πεδίο, αφού δεν έχει αλληλεπιδράσει με το χώρο, δηλαδή το πλάτος της πίεσής θα είναι αντιστρόφως ανάλογο προς την απόστασή τους.



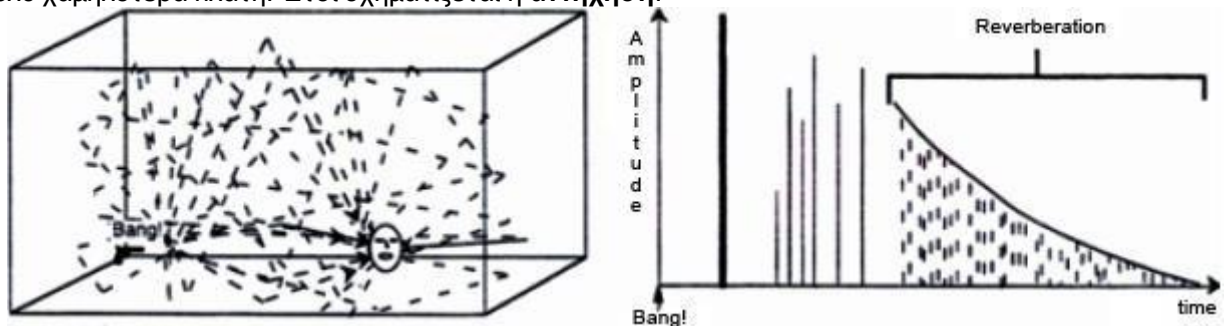
Σχήμα 1. Παλμική διέγερση ενός ιδανικού δωματίου - Απευθείας ήχος στη θέση του παρατηρητή [3]

- Αμέσως μετά και πολύ σύντομα θα φτάσουν στον παρατηρητή μία ή περισσότερες ανακλάσεις του ίδιου ήχου στα τοιχώματα (και άλλα αντικείμενα) του χώρου. Αυτοί οι ήχοι ονομάζονται **πρώτες ανακλάσεις (early reflections)** και είναι σχετικά διακριτοί ως προς το χρόνο άφιξης και ως προς την κατεύθυνσή τους σε σχέση με τον απευθείας. Αν η χρονική τους καθυστέρηση είναι μικρότερη από 35msec, τότε το αυτί μας τους αντιλαμβάνεται ως έναν ήχο, ενώ αν είναι μεγαλύτερη τους αντιλαμβάνεται ως echo.



Σχήμα 2. Πρώτες ανακλάσεις του χώρου [3]

- Τέλος, ακόμα πιο αργά φτάνουν όλες οι υπόλοιπες ανακλάσεις (**late reflections**). Ο αρχικός ήχος έχει ανακλαστεί πλέον τόσες πολλές φορές και από τόσες πολλές διαφορετικές κατευθύνσεις, που οι διαδοχικές ανακλάσεις φτάνουν με μεγάλη πυκνότητα στον παρατηρητή (μικρή χρονική απόσταση μεταξύ τους) και με πολύ χαμηλότερα πλάτη. Έτσι σχηματίζεται η **αντήχηση**.



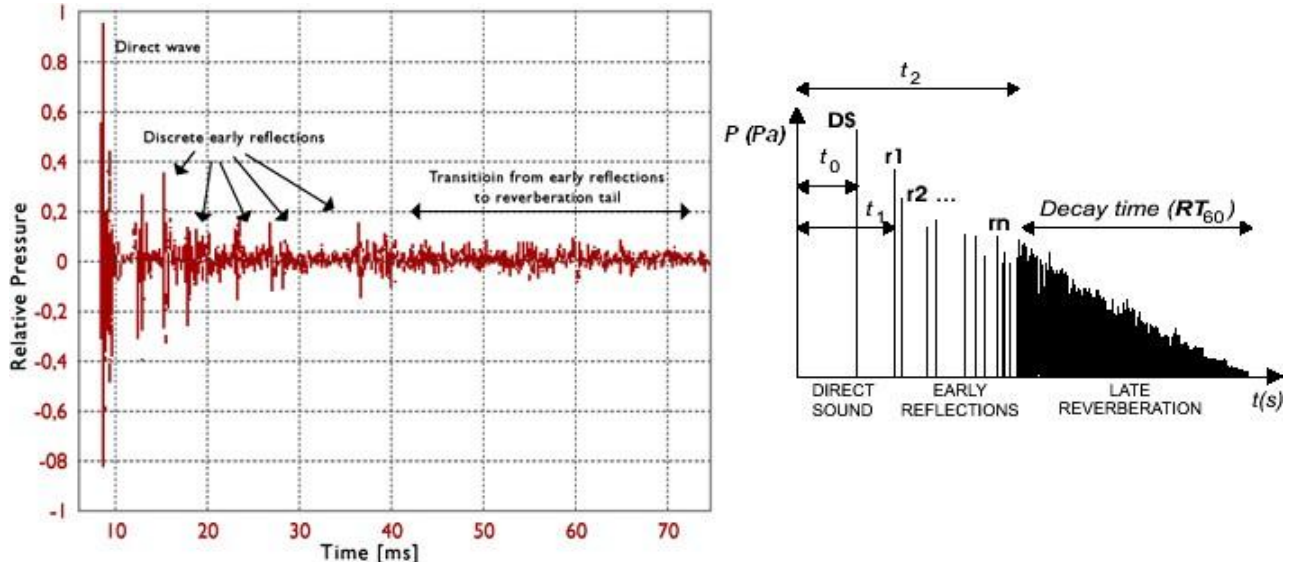
Σχήμα 3. Υπόλοιπες ανακλάσεις του χώρου [3]

Λόγω των πολλαπλών ανακλάσεων η ηχητική πίεση σε κάποιο σημείο του χώρου θα είναι μεγαλύτερη από ότι θα ήταν για την ίδια απόσταση από την πηγή σε ελεύθερο πεδίο. Για τον ίδιο λόγο, ο ήχος δεν αποσβένει αμέσως μετά την παύση του ήχου, αλλά εξασθενεί (λόγω διαδοχικών απορροφήσεων από τα τοιχώματα) σταδιακά. Αυτή η παράταση του ήχου είναι και το χαρακτηριστικό της αντήχησης. Μάλιστα, λόγω της μη-γραμμικής απορρόφησης των υλικών στις διάφορες συχνότητες, η χροιά του ήχου διαμορφώνεται από αυτές τις ανακλάσεις.

## Room Impulse Response (RIR)

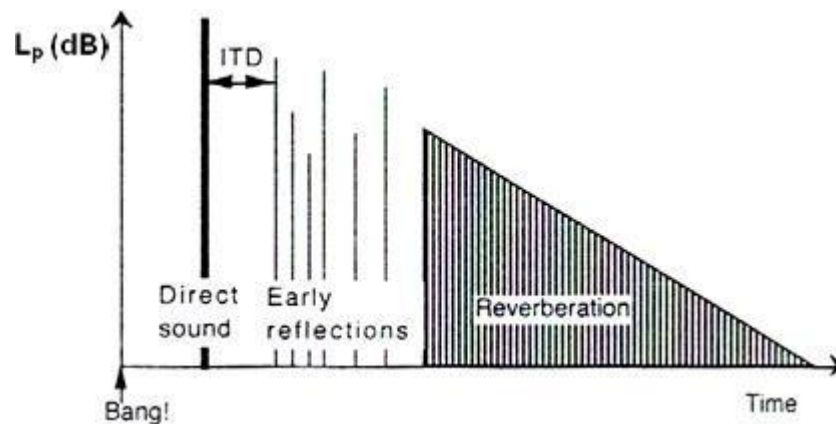
Ένας τρόπος να μετρήσουμε την αντήχηση ενός χώρου είναι να εκπέμψουμε σε ένα σημείο του έναν σύντομο (παλμικό) ήχο (πχ. πιστόλι, παλαμάκι, ή μπαλόνι που σκάει), να μετρήσουμε τη δημιουργούμενη πίεση σε άλλο σημείο του και να σχεδιάσουμε αυτήν ή τη στάθμη της ως προς το χρόνο. Το διάγραμμα που προκύπτει δείχνει την απόκριση του χώρου σε έναν παλμό, γι' αυτό και ονομάζεται **Room Impulse Response (RIR)**. Στην ιδανική περίπτωση όπου το πεδίο είναι τελείως διάχυτο:

- αν σχεδιάσουμε την πίεση ως προς το χρόνο παρατηρούμε ότι η απόσβεση αυτή είναι εκθετική:



Σχήμα 4. Διάγραμμα RIR ( $t - p$ ) [10]

- αν σχεδιάσουμε τη στάθμη πίεσης (λογαριθμική κλίμακα) ως προς το χρόνο παρατηρούμε ότι η απόσβεση αυτή είναι γραμμική:

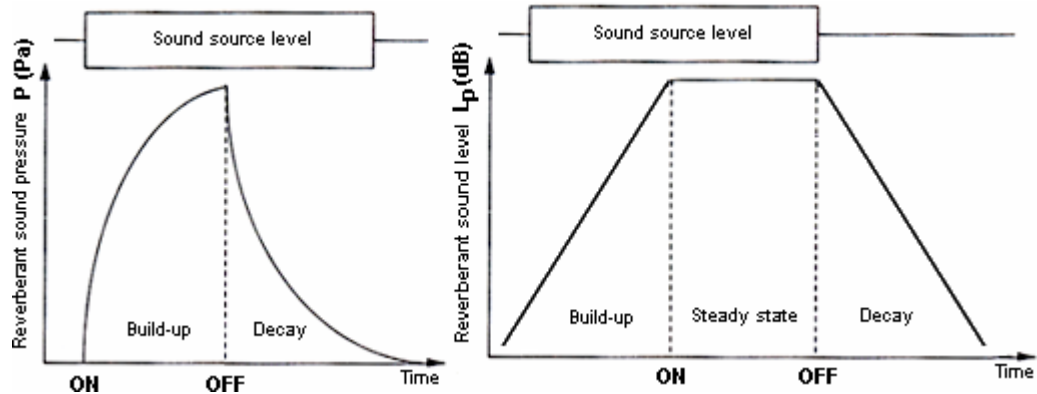


Σχήμα 5. Διάγραμμα RIR ( $t - L_p$ ) - διαχωρισμός σε Direct Sound, Early Reflections και Late Reverberation [3]

## Συνεχόμενα εκπεμπόμενος θόρυβος - απότομη διακοπή

Αν έχουμε έναν ήχο που εκπέμπει ηχητική ενέργεια σταθερά, τότε αυτή «αποθηκεύεται» στο χώρο και η ηχητική στάθμη αυξάνεται μέχρι ένα σημείο ισορροπίας, όπου το ποσό της ηχητικής ενέργειας που αποδίδεται από την πηγή είναι ίσο με το ποσό της ενέργειας που χάνεται από απορρόφηση. Όταν διακόψουμε την πηγή απότομα, η ηχητική ενέργεια μειώνεται σταδιακά μέχρι απόσβεσης.

Αν η ηχητική ενέργεια είναι κατανομημένη ομοιόμορφα στο χώρο, η μείωσή της θα είναι εκθετική ως προς το χρόνο. Αντίστοιχα, ο λογάριθμός της (στάθμη) θα παρουσιάζει γραμμική πτώση με το χρόνο. Η στάθμη της κατάστασης ισορροπίας, αλλά και οι ρυθμοί αύξησης στην αρχή και μείωσης μετά τη διακοπή εξαρτώνται από τα επίπεδα απορρόφησης και την κατανομή των απορροφητικών υλικών στο χώρο. Γι' αυτό και εξαρτώνται από το μέγεθός του (επιφάνεια απορροφητικών επιφανειών).



Σχήμα 6. Διαγράμματα  $t - p$ ,  $t - L_p$  για συνεχόμενα εκπεμπόμενο θόρυβο & μηδενισμό πηγής [3]

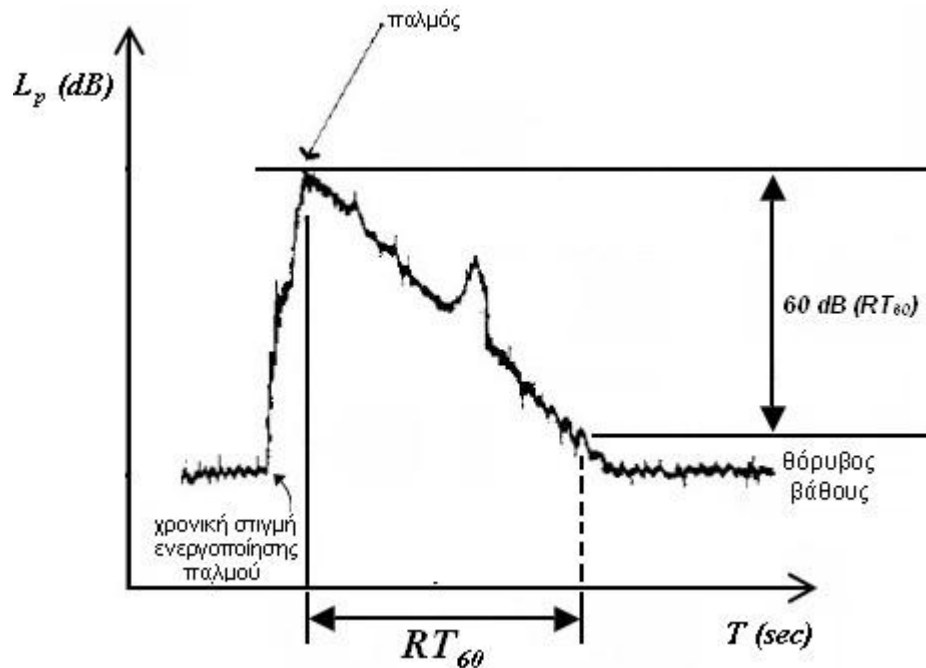
Στην περίπτωση αυτή μπορούμε να φανταστούμε το ηλεκτρικό ανάλογο του χώρου, ως έναν πυκνωτή σε ένα κύκλωμα που περιέχει επίσης πηγή και αντίσταση. Η χωρητικότητα του πυκνωτή είναι το ηλεκτρικό ανάλογο του χώρου, αφού συσσωρεύει ενέργεια σταδιακά μέχρι ενός σημείου. Η εκφόρτιση γίνεται εκθετικά με το χρόνο καθώς καταναλώνεται ως θερμότητα στην αντίσταση, που είναι το ηλεκτρικό ανάλογο της απορρόφησης των υλικών στην ηχητική ενέργεια. Η σταθερά χρόνου του κυκλώματος είναι το ηλεκτρικό ανάλογο του χρόνου αντήχησης, δηλαδή του χρόνου που απαιτείται μέχρι την απόσβεση.

(Στην περίπτωση του παλμικού ήχου η μείωση της στάθμης ξεκινάει αμέσως και δεν υπάρχει κατάσταση ισορροπίας).

## Χρόνος Αντήχησης, $RT_{60}$

Ως χρόνος αντήχησης  $RT_{60}$  ορίζεται το χρονικό διάστημα που απαιτείται ώστε η στάθμη του ήχου ( $L_p$ ), σε ένα κλειστό χώρο, να ελαττωθεί κατά **60dB** από την αρχική του τιμή.

Ο χρόνος αυτός είναι διαφορετικός για διαφορετικές συχνότητες, εφόσον τα διάφορα υλικά παρουσιάζουν διαφορετική απορρόφηση ανάλογα με τη συχνότητα.



Σχήμα 7. Χρόνος αντήχησης σε διάγραμμα RIR ( $t - L_p$ ) παλμού, από [6]

## **$RT_{60}$ - Προσεγγιστική σχέση υπολογισμού κατά Sabine**

Στην πρώτη σχέση για τον υπολογισμό του χρόνου αντήχησης κατέληξε εμπειρικά ο Wallace Sabine το 1898 όταν του δόθηκε η ευκαιρία να πραγματοποιήσει μια σειρά πειραμάτων διάρκειας 2 ετών με σκοπό τη βελτίωση της ακουστικής μιας αίθουσας διαλέξεων (του Fogg Art Museum) στο πανεπιστήμιο του Harvard, όπου εργαζόταν ως νέος καθηγητής φυσικής. Οι αίθουσες που χρησιμοποίησε για τις μελέτες του ήταν η προβληματική αίθουσα διαλέξεων, μια εξαιρετικής ακουστικής αίθουσα θεάτρου, ένας ιδιαίτερος αντηχητικός χώρος και μια αίθουσα με ανεκτή ακουστική. Ο Sabine χρησιμοποίησε τα μαξιλαράκια από τα καθίσματα του θεάτρου ως τα απορροφητικά υλικά για τις μελέτες του και κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η αντήχηση ενός χώρου εξαρτάται από τον όγκο του, τη γεωμετρία του και την ανακλαστικότητα των επιφανειών του. Η σχέση για τον υπολογισμό του χρόνου αντήχησης στην οποία κατέληξε είναι:

$$RT_{60} = \frac{0,161 \cdot V}{S \cdot \bar{a}} \quad (2)$$

ή αλλιώς  $RT_{60} = \frac{0,161 \cdot V}{A_S} \quad (3)$

, με απορρόφηση  $A_S = S \cdot \bar{a} \quad (4)$

, όπου:

$A_S$  η **απορρόφηση** του χώρου, σε [Sabins] ή [μετρικά Sabins] ή [m<sup>2</sup>] (SI), αλλιώς σε [feet-Sabins] ή [ft<sup>2</sup>]

$\bar{a}$  ο **μέσος συντελεστής απορρόφησης** του χώρου (αδιάστατος),

$S$  η συνολική επιφάνεια του χώρου που παρουσιάζει απορρόφηση, σε [m<sup>2</sup>] και

$V$  ο όγκος του χώρου, σε [m<sup>3</sup>].

(Οι μονάδες στη σχέση προκύπτουν σωστά, αν λάβουμε υπόψη μας ότι στον παρονομαστή της σχέσης υπάρχει και η ταχύτητα του ήχου (σε m/sec), της οποίας η τιμή έχει ήδη αντικατασταθεί).

Στη σχέση παρουσιάζεται μια μέση τιμή συντελεστή απορρόφησης κι αυτό, γιατί μέσα σε έναν χώρο υπάρχει πληθώρα διαφορετικών υλικών, με διαφορετικό συντελεστή απορρόφησης, ο οποίος μάλιστα είναι διαφορετικός για διαφορετικές συχνότητες και διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης της ακτίνας του ήχου. Η μέση τιμή υπολογίζεται από το γινόμενο των επιμέρους συντελεστών απορρόφησης με την αντίστοιχη επιφάνειά τους διαιρεμένη με τη συνολική επιφάνεια, δηλαδή:

$$\bar{a} = \frac{S_1 \cdot a_1 + S_2 \cdot a_2 + \dots + S_n \cdot a_n}{S} \quad (5)$$

, όπου  $S = S_1 + S_2 + \dots + S_n$

,  $a_i$  είναι ο συντελεστής απορρόφησης των επιμέρους επιφανειών και  $S_i$  τα αντίστοιχα εμβαδά τους.

Κατά τον Sabine η απορρόφηση του χώρου δίνεται από τον αριθμητή της σχέσης, δηλαδή:

$$A_S = S_1 \cdot a_1 + S_2 \cdot a_2 + \dots + S_n \cdot a_n \quad (6)$$

Η παραπάνω σχέση (2) του **Sabine ισχύει ικανοποιητικά για  $\bar{a} \ll 1$ , πχ.  $\bar{a} < 0.1$** , αφού τα

πειράματα του Sabine με τα οποία οδηγήθηκε σε αυτή τη σχέση έγιναν σε χώρο με μικρή απορρόφηση. Όπως θα δούμε παρακάτω, σε περιπτώσεις που η προϋπόθεση αυτή δεν ισχύει υπάρχουν πιο ακριβείς σχέσεις για τον υπολογισμό του  $RT_{60}$ .

Η σχέση (2) δείχνει ότι ο χρόνος αντήχησης εξαρτάται από δύο ανεξάρτητες παραμέτρους: το μέγεθος του χώρου και την απορρόφηση που παρουσιάζει στον ήχο.

Όσο μεγαλύτερος ο χώρος και χαμηλότερη η απορρόφηση, τόσο περισσότερο διαρκεί η εξασθένιση. Αυτό είναι και ένα από τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται από την ανθρώπινη ακοή, σε συνδυασμό με το 'Initial Time Delay gap' για τον προσδιορισμό του μεγέθους ενός χώρου.

## RT<sub>60</sub> - Σχέση υπολογισμού κατά Norris - Eyring

Η σχέση υπολογισμού του RT<sub>60</sub> που προτάθηκε από τους Norris και Eyring βασίζεται στη μέση ελεύθερη διαδρομή του ήχου μεταξύ δύο διαδοχικών ανακλάσεων και μπορεί να εξαχθεί κάνοντας κάποιες θεωρήσεις.

Η εξαγωγή της σχέσης βασίζεται στη γεωμετρική ακουστική, δηλαδή γίνεται η θεώρηση ότι ο ήχος διαδίδεται σε ακτίνες, δηλαδή σε ευθείες γραμμές μεταξύ δύο διαδοχικών ανακλάσεων. Επίσης γίνεται η υπόθεση ότι μετά από μεγάλο αριθμό ανακλάσεων το ηχητικό πεδίο του χώρου γίνεται διάχυτο μακριά από την πηγή, δηλαδή η πυκνότητα της ενέργειας είναι σταθερή σε ολόκληρο το χώρο μακριά από αυτήν και όλες οι κατευθύνσεις των ανακλάσεων έχουν ίση πιθανότητα.

Αυτό το μοντέλο είναι μια υπεραπλούστευση της πραγματικής συμπεριφοράς του ήχου σε ένα χώρο, ιδιαίτερα σε χαμηλές συχνότητες και υψηλές απορροφήσεις, γιατί απαιτεί έναν τεράστιο αριθμό ανακλάσεων για να μπορούμε να αγνοήσουμε την ύπαρξη στάσιμων κυμάτων, την ύπαρξη διαφορετικών υλικών και το σχήμα του χώρου. Για κατάλληλες πάντως τιμές του A μπορεί η παραπάνω σχέση (2) να μας οδηγήσει σε έγκυρα αποτελέσματα, ειδικά σε πολύ μεγάλους χώρους.

Με τη θεώρηση του διάχυτου πεδίου και τις ευθύγραμμες διάδοσης του ήχου μεταξύ ανακλαστικών επιφανειών, πάντως, έχουμε τα εξής:

Μπορεί να αποδειχτεί (δεν παρουσιάζουμε την απόδειξη εδώ) ότι η μέση ελεύθερη διαδρομή (MFP – Mean Free Path) δίνεται από τη σχέση  $MFP = \frac{4V}{S}$ , όπου S η συνολική επιφάνεια του χώρου που παρουσιάζει απορρόφηση, σε [m<sup>2</sup>], και V ο όγκος του χώρου, σε [m<sup>3</sup>], επομένως το πλήθος των ανακλάσεων σε χρόνο t

$$\text{θα είναι: } n = \frac{s}{MFP} = \frac{c \cdot t}{MFP} \Leftrightarrow n = t \cdot \frac{S \cdot c}{4 \cdot V} \quad (7)$$

- Έστω απευθείας ήχος με ένταση  $I_0$ .
  - 1<sup>η</sup> ανάκλαση: θα απορροφηθεί  $\bar{a}$  ποσοστό του  $I_0$ ,  
επομένως  $(1 - \bar{a})$  ποσοστό του θα επιστρέψει στο χώρο  $\Rightarrow I_1 = (1 - \bar{a}) \cdot I_0$
  - 2<sup>η</sup> ανάκλαση:  $I_2 = (1 - \bar{a}) \cdot I_1 = (1 - \bar{a}) \cdot (1 - \bar{a}) \cdot I_0 = (1 - \bar{a})^2 \cdot I_0$
  - 3<sup>η</sup> ανάκλαση:  $I_3 = (1 - \bar{a})^3 \cdot I_0$
  - ...
  - n<sup>η</sup> ανάκλαση:  $I_n = (1 - \bar{a})^n \cdot I_0$
- $$\Leftrightarrow \frac{I_n}{I_0} = (1 - \bar{a})^n, \text{ όπου } n \text{ το πλήθος των ανακλάσεων.}$$

Από τη σχέση (7) θα έχουμε:

$$\frac{I_n}{I_0} = (1 - \bar{a})^{t \cdot \frac{S \cdot c}{4 \cdot V}} \Leftrightarrow \log\left(\frac{I_n}{I_0}\right) = \log\left[(1 - \bar{a})^{t \cdot \frac{S \cdot c}{4 \cdot V}}\right] \Leftrightarrow 10 \cdot \log\left(\frac{I_n}{I_0}\right) = 10 \cdot \left(t \cdot \frac{S \cdot c}{4 \cdot V}\right) \cdot \log(1 - \bar{a})$$

$$\Leftrightarrow 10 \cdot \log\left(\frac{I_n}{I_{ref}} \cdot \frac{I_{ref}}{I_0}\right) = 10 \cdot \left(t \cdot \frac{S \cdot c}{4 \cdot V}\right) \cdot \log(1 - \bar{a})$$

$$\Leftrightarrow 10 \cdot \log\left(\frac{I_n}{I_{ref}}\right) - 10 \cdot \log\left(\frac{I_0}{I_{ref}}\right) = 10 \cdot \left(t \cdot \frac{S \cdot c}{4 \cdot V}\right) \cdot \log(1 - \bar{a})$$

$$\Leftrightarrow L_{I_n} - L_{I_0} = 10 \cdot \left(t \cdot \frac{S \cdot c}{4 \cdot V}\right) \cdot \log(1 - \bar{a})$$

$$\Leftrightarrow \Delta L_I = 10 \cdot \left(t \cdot \frac{S \cdot c}{4 \cdot V}\right) \cdot \frac{\ln(1 - \bar{a})}{\ln 10}$$



Ο χρόνος αντήχησης ορίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται για πτώση της στάθμης κατά 60dB, επομένως:

$$\text{Για } \Delta L_I = -60\text{dB} \Rightarrow -60 = 10 \cdot (RT_{60} \cdot \frac{S \cdot c}{4 \cdot V}) \cdot \frac{\ln(1-\bar{a})}{\ln 10}$$

Με επίλυση ως προς  $RT_{60}$  και αντικατάσταση της ταχύτητας του ήχου στον αέρα και του  $\ln 10 (=2,3)$ , έχουμε:

$$RT_{60} = \frac{0,161 \cdot V}{-S \cdot \ln(1-\bar{a})} \quad (8)$$

, δηλαδή μπορούμε να πούμε ότι ισχύει και πάλι:

$$RT_{60} = \frac{0,161 \cdot V}{A_{NE}} \quad (9)$$

$$\text{, αλλά με } A_{NE} = -S \cdot \ln(1-a) \quad (10)$$

Η σχέση αυτή των **Norris και Eyring** ισχύει **και για  $\bar{a} > 0.1$** .

Αποδεικνύεται εύκολα ότι η σχέση του Sabine είναι μια ειδική περίπτωση, που ισχύει μόνο για πολύ μικρούς μέσους συντελεστές απορρόφησης, δηλαδή  $\bar{a} \ll 1$ , εφόσον ο παράγοντας  $\ln(1-\bar{a})$  μπορεί να αναπτυχθεί σε αριθμητική σειρά ως:

$$-\ln(1-\bar{a}) = \bar{a} + \frac{\bar{a}^2}{2} + \frac{\bar{a}^3}{3} + \dots + \frac{\bar{a}^n}{n}$$

$$\Rightarrow \text{πχ.} \begin{cases} \text{για } \alpha = 0.1 \Rightarrow -\ln(1-\bar{a}) = 0.1 + \frac{0.01}{2} + \frac{0.001}{3} + \dots \rightarrow 0.105 \approx 0.1 \Rightarrow -\ln(1-\bar{a}) \rightarrow \bar{a} \\ \text{για } \alpha = 0.9 \Rightarrow -\ln(1-\bar{a}) = 0.9 + \frac{0.81}{2} + \frac{0.729}{3} + \dots \rightarrow 1.83 \gg 0.9 \Rightarrow -\ln(1-\bar{a}) \rightarrow \bar{a} \end{cases}$$

Βλέπουμε, λοιπόν, ότι για πολύ μικρά  $\bar{a}$  η σχέση του Sabine ισχύει και δίνει σχεδόν τα ίδια αποτελέσματα με τη σχέση των Norris-Eyring, ενώ για μεγάλα  $\bar{a}$  η απόκλιση στις τιμές είναι μεγάλη.

## **$RT_{60}$ – Απορρόφηση από τον αέρα**

Η πτώση της στάθμης του ήχου μετά τη διακοπή μιας πηγής οφείλεται εν γένει σε 3 παράγοντες:

- (1) Απόσταση από την πηγή (στο ελεύθερο πεδίο: -6dB για κάθε διπλασιασμό απόστασης),
- (2) Απορρόφηση από τοιχώματα και άλλα αντικείμενα ( $\bar{a}$ ) και
- (3) Απορρόφηση από τον αέρα ( $\bar{m}$ , μόνο σε τεράστιους χώρους).

Ειδικά στην περίπτωση που μιλάμε για τεράστιους χώρους (πχ. εκκλησίες, θέατρα κλπ) η παραπάνω σχέση του χρόνου αντήχησης (3) πρέπει να συμπληρωθεί με την απορρόφηση που οφείλεται στην απορρόφηση από τον αέρα και γίνεται:

$$RT_{60} = \frac{0,161V}{A + 4 \cdot m \cdot V} \quad (11)$$

, δηλαδή υπάρχει η προσθήκη του όρου  $4mV$ ,

όπου  $m$  ο συντελεστής εξασθένησης στον αέρα (αδιάστατο μέγεθος).

Η απορρόφηση από τον αέρα εξαρτάται από τη θερμοκρασία του, τη σύστασή του, τον σχηματισμό σταγονιδίων νερού (υγρασία) και τη συχνότητα του ήχου. Γίνεται μάλιστα πιο αισθητή στις μεσαίες και υψηλότερες συχνότητες, δηλαδή για  $f > 2kHz$ .

Σημειώνεται ότι η απορρόφηση του ήχου από τον αέρα είναι μοριακό φαινόμενο και έχει να κάνει με τις ενεργειακές στάθμες ταλάντωσης των μορίων υδρατμών που υπάρχουν στον αέρα.

## **$RT_{60}$ - Σχέση υπολογισμού του Fitzroy**

Στην περίπτωση ανομοιόμορφης απορρόφησης, δηλαδή στην περίπτωση ύπαρξης σε μία ή περισσότερες κατευθύνσεις ισχυρά ανακλαστικών επιφανειών όπως οι υαλοπίνακες και ειδικά για ορθογώνιους χώρους, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε για τον υπολογισμό του χρόνου αντήχησης τον προσεγγιστικό τύπο του Fitzroy, ο οποίος χωρίζει τον υπολογισμό του χρόνου αντήχησης στους 3 άξονες:

$$\text{Για } \bar{a} \ll 0.1: \quad RT_{60} = \frac{0.161 \cdot V}{S^2} \cdot \left( \frac{S_X}{\bar{a}_X} + \frac{S_Y}{\bar{a}_Y} + \frac{S_Z}{\bar{a}_Z} \right) \quad (12)$$

$$\text{Για } \bar{a} \geq 0.1: \quad RT_{60} = \frac{0.161 \cdot V}{S^2} \cdot \left( \frac{S_X}{\ln(1 - \bar{a}_X)^{-1}} + \frac{S_Y}{\ln(1 - \bar{a}_Y)^{-1}} + \frac{S_Z}{\ln(1 - \bar{a}_Z)^{-1}} \right) \quad (13)$$

Για ορθογώνιο χώρο θα έχουμε:

$$S_X = 2 \cdot X \cdot Y$$

$$S_Y = 2 \cdot X \cdot Z$$

$$S_Z = 2 \cdot Y \cdot Z$$

## **$RT_{60}$ - Σχέση υπολογισμού των Sette - Millington**

Όταν σε έναν κλειστό χώρο υπάρχουν επιφάνειες με ιδιαίτερα μεγάλο συντελεστή απορρόφησης ( $a > 0.63$ ), ο τύπος των Norris-Eyring μπορεί να δώσει ως αποτέλεσμα συντελεστές απορρόφησης μεγαλύτερους της μονάδας (1)! Στις περιπτώσεις αυτές, όπου δηλαδή υπάρχουν μεγάλες διαφορές στους συντελεστές απορρόφησης των διαφόρων επιφανειών του χώρου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο τύπος των Sette - Millington που δίνει πάντα συντελεστή απορρόφησης μικρότερο της μονάδας.

$$RT_{60} = \frac{0,161 \cdot V}{A_M} \quad (14)$$

$$\text{, όπου } A_M = -[S_1 \cdot \ln(1 - a_1) + S_2 \cdot \ln(1 - a_2) + \dots] \quad (15)$$

## RT<sub>60</sub> – Σχέσεις υπολογισμού RT<sub>60</sub> – συνοπτικός πίνακας

Όπως είδαμε, η γενική σχέση που δίνει το χρόνο αντήχησης σε χώρο όπου δεν παρουσιάζει απορρόφηση ο αέρας είναι:

$$RT_{60} = \frac{0,161 \cdot V}{A} \quad (16)$$

, όπου η απορρόφηση  $A$  δίνεται από διαφορετικές σχέσεις ανάλογα με την περίπτωση.

Συνοπτικά μπορούμε να πούμε ότι οι παρακάτω σχέσεις δίνουν έγκυρα αποτελέσματα στις αναγραφόμενες συνθήκες:

	(μέσος) συντελεστής απορρόφησης $\bar{a}$	Απορρόφηση $A$ (Sabine)	Χρόνος αντήχησης $RT_{60}$ (sec)
Sabine	$\bar{a} \ll 0.1$	$\sum_i (S_i \cdot a_{i,f})$ <i>επιφάνεια</i>	$RT_{60} = \frac{0,161 \cdot V}{A_S}$
Norris-Eyring	$\bar{a} \geq 0.1$ και $a_{i,f} \rightarrow 1$	$-S \cdot \ln \left[ 1 - \sum_i \frac{S_i \cdot a_{i,f}}{S} \right]$ <i>επιφάνεια</i>	$RT_{60} = \frac{0,161 \cdot V}{A_{NE}}$
Sette - Millington	$\bar{a} \geq 0.1$ με $a > 0.63$	$\sum_i [S_i \cdot \ln(1 - a_{i,f})^{-1}]$ <i>επιφάνεια</i>	$RT_{60} = \frac{0,161 \cdot V}{A_M}$
Fitzroy	σύμφωνα με τα παραπάνω	σύμφωνα με τα παραπάνω	$RT_{60} = \frac{0,161 \cdot V}{S^2} \cdot \left( \frac{S_X}{\bar{a}_X} + \frac{S_Y}{\bar{a}_Y} + \frac{S_Z}{\bar{a}_Z} \right)$
με απορρόφηση από τον αέρα	σύμφωνα με τα παραπάνω	σύμφωνα με τα παραπάνω	$RT_{60} = \frac{0,161 V}{A + 4 \cdot m \cdot V}$

, όπου:

$S_i$  το εμβαδόν της επιφάνειας του υλικού  $i$  [m<sup>2</sup>] και

$a_{i,f}$  ο συντελεστής απορρόφησης που παρουσιάζει η επιφάνεια  $i$  στη συχνότητα  $f$ .

Πίνακας 1.

Συνοπτικός πίνακας σχέσεων υπολογισμού RT<sub>60</sub> για διάφορες συνθήκες

Για την αποφυγή σύγχυσης σημειώνουμε επίσης τα εξής:

	όνομα	τιμές	διαστάσεις	επεξήγηση
$\alpha$	συντελεστής απορρόφησης (absorption coefficient)	$0 \leq a \leq 1$	αδιάστατο	χαρακτηρίζει το υλικό και δίνει το ποσοστό της προσπίπτουσας ηχητικής ενέργειας που το υλικό απορροφά
$\bar{a}$	μέσος συντελεστής απορρόφησης (average absorption coefficient)	$0 \leq \bar{a} \leq 1$	αδιάστατο	η μέση τιμή των συντελεστών από όλα τα υλικά του χώρου (σχέση (5))
$A$	Απορρόφηση (effective absorption area)	$\geq 0$	[Sabine] (μετρικά ή σε πόδια) ή [m <sup>2</sup> ] ή [ft <sup>2</sup> ]	το γινόμενο του συντελεστή απορρόφησης ενός υλικού με την αντίστοιχη επιφάνειά του

Πίνακας 2. Επεξηγηματικός πίνακας: συντελεστής απορρόφησης  $a$ , μέσος συντελεστής απορρόφησης  $\bar{a}$ , απορρόφηση  $A$

## Εξάρτηση $RT_{60} - \bar{a}$

Σύμφωνα με τις παραπάνω σχέσεις (Sabine, Norris-Eyring κλπ), βλέπουμε ότι ο χρόνος αντήχησης εξαρτάται από τον όγκο και τον μέσο συντελεστή απορρόφησης, δηλαδή:  $RT_{60} = f(V, \bar{a})$ .

Αυτό σημαίνει ότι αν βρισκόμαστε σε ένα χώρο με κάποιον μέσο συντελεστή απορρόφησης,  $\bar{a}$ , και εισάγουμε κάποιο επιπλέον απορροφητικό υλικό, ο μέσος συντελεστής απορρόφησης θα αυξηθεί και αντίστοιχα θα μειωθεί ο χρόνος αντήχησης.

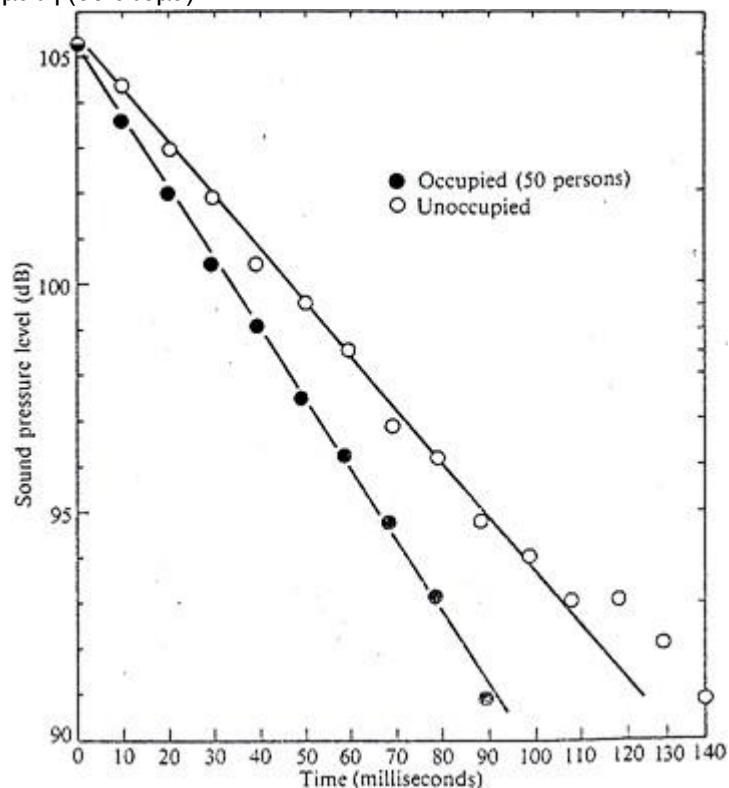
Σύμφωνα με τον Πίνακα 3, βλέπουμε ότι και ο άνθρωπος παρουσιάζει κάποια απορρόφηση στον ήχο, η οποία μάλιστα είναι μεγαλύτερη στις υψηλότερες συχνότητες. Αυτός είναι ο λόγος που η ακουστική μιας άδειας αίθουσας αλλάζει αισθητά με την παρουσία του κοινού.

Με την είσοδο του κοινού αυξάνεται η απορρόφηση και άρα θα πρέπει να αναμένεται μείωση του αντίστοιχου χρόνου αντήχησης.

Έτσι, σε έναν χώρο με ακροατήριο ο ήχος αποσβένει γρηγορότερα από ότι αν αυτός είναι άδειος.

Η χροιά του ήχου μιας γεμάτης αίθουσας επηρεάζεται επίσης, σύμφωνα με τη μη γραμμική απορρόφηση που παρουσιάζει ένα άτομο ως προς τη συχνότητα.

Εδώ φαίνονται τα διαγράμματα πτώσης του αντηχητικού πεδίου σε μια αίθουσα συναυλιών, όταν αυτή είναι άδεια και όταν είναι γεμάτη (50 άτομα).



Σχήμα 8. Πτώση αντηχητικού πεδίου στην άδεια και γεμάτη (50 άτομα) αίθουσα [2]

Τα παραπάνω ισχύουν και στην περίπτωση που σε ένα δωμάτιο ανοίξουμε παράθυρό του.

Θεωρητικά ένα **ανοιχτό παράθυρο** παρουσιάζει μέγιστη απορρόφηση,  $\alpha=1$

, αφού όλο το ποσό της ενέργειας διαφεύγει από αυτό χωρίς επιστροφή.

Έτσι, ανοίγοντας ένα παράθυρο αυξάνουμε το μέσο συντελεστή απορρόφησης του χώρου.

## Εξάρτηση $RT_{60} - f$

Η μη προφανής εξάρτηση είναι αυτή της συχνότητας. Τα διάφορα υλικά παρουσιάζουν μη-γραμμική συμπεριφορά στην απορρόφηση των διαφόρων συχνοτήτων, δηλαδή απορροφούν διαφορετικά ποσοστά της προσπίπτουσας ηχητικής ενέργειας ανάλογα με τη συχνότητα. Αυτό σημαίνει ότι:  $\bar{a} = g(f)$

$$\Rightarrow RT_{60} = f(V, \bar{a}, f)$$

Στην ειδική περίπτωση, μάλιστα, που έχουμε και σημαντική απορρόφηση από τον αέρα, ο χρόνος αντήχησης θα εξαρτάται και από τον συντελεστή εξασθένησής του,  $m$ , ο οποίος επίσης εξαρτάται από τη συχνότητα  $\Rightarrow RT_{60} = f(V, \bar{a}, m, f)$

Αυτό σημαίνει ότι η απόκριση του δωματίου θα πρέπει να αλλάζει με τη συχνότητα, δηλαδή το RIR θα πρέπει να παρουσιάζει διαφορετικούς ρυθμούς μείωσης για τις διάφορες συχνότητες (δηλαδή διαφορετικές κλίσεις στην ευθεία της πτώσης), μιλώντας πάντοτε για τον ίδιο χώρο.

Κατά συνέπεια, λόγω της μη-γραμμικής συμπεριφοράς των διαφόρων υλικών στις διάφορες συχνότητες, το αντηχητικό πεδίο διαμορφώνει και τη χροιά του τελικά παραγόμενου ήχου.

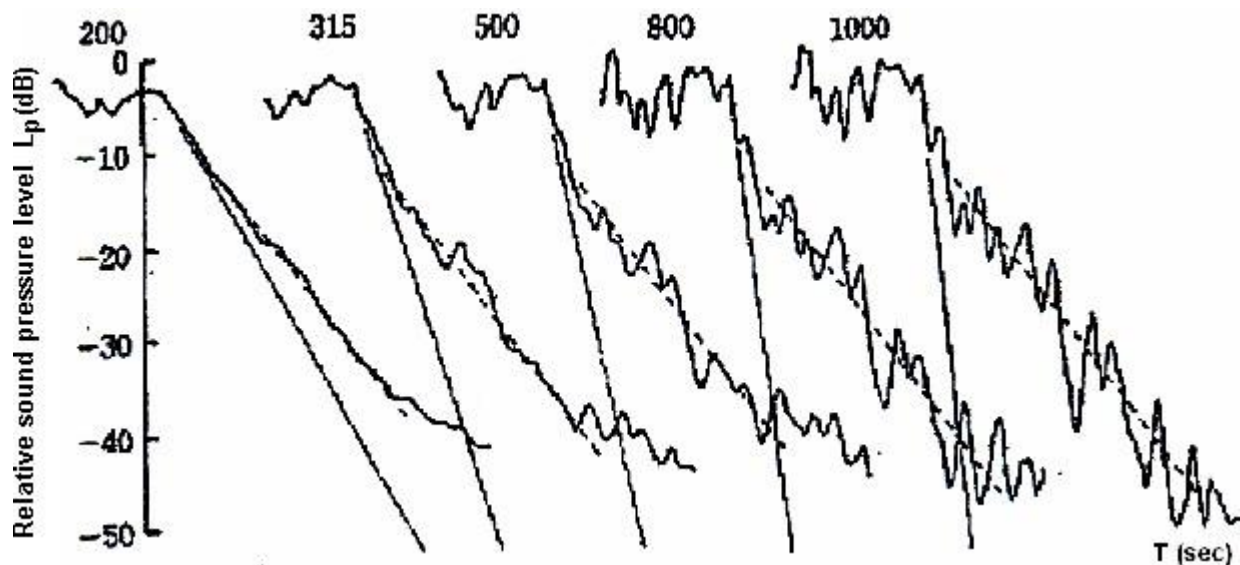
Για παράδειγμα, έστω η ακραία περίπτωση όπου μία συχνότητα έχει πολύ πιο αργό ρυθμό μείωσης από όλες τις άλλες. Τότε μετά από κάποιο χρονικό διάστημα μπορεί όλες οι άλλες συχνότητες να έχουν αποσβεστεί και να παραμείνει μόνο αυτή στο χώρο.

Για τους παραπάνω λόγους:

Όταν κάνουμε ακουστικές μελέτες σε κλειστούς χώρους, δίνουμε το χρόνο αντήχησης **σε κάθε οκτάβα**.

Όταν δίνεται ένας και μοναδικός αριθμός αυτός εξ' ορισμού αναφέρεται στη συχνότητα των **500 Hz**.

Αυτό προέρχεται από τις αποκλειστικές μελέτες αντήχησης του Sabine στα 512 Hz. Αν και η συμπεριφορά του αντηχητικού ήχου είναι ιδιαίτερος πολύπλοκη για να περιγραφεί από έναν μόνο αριθμό, ο χρόνος αντήχησης των 500 Hz είναι αρκετά ενδεικτικός της «ζωντανιάς» του χώρου.



Σχήμα 9. Πτώση αντηχητικού πεδίου για διάφορες συχνότητες [5]

## Προϋποθέσεις ισχύος των σχέσεων υπολογισμού $RT_{60}$

Το θεωρητικό μοντέλο από το οποίο προήλθαν όλες οι παραπάνω εξισώσεις προϋποθέτουν 2 πράγματα:  
 (1) **Μεγάλο χώρο**, για την έγκυρη χρήση των αρχών της Γεωμετρικής Ακουστικής και  
 (2) το **αντηχητικό πεδίο** να είναι απολύτως **διάχυτο**, δηλαδή η κατανομή της ηχητικής ενέργειας μέσα στο χώρο να είναι ομοιόμορφη (και η μείωση της στάθμης να είναι γραμμική).

Στην πράξη, αυτή η προϋπόθεση εκπληρώνεται επαρκώς όταν:

- (α) οι διαστάσεις του χώρου δεν είναι ιδιαίτερες διαφορετικές μεταξύ τους,
- (β) οι διαστάσεις του χώρου είναι πολύ μεγαλύτερες από το μήκος κύματος και
- (γ) η απορρόφηση είναι κατανεμημένη αρκετά ομοιόμορφα σε όλη την επιφάνεια των τοιχωμάτων.

## Σφάλματα – αποκλίσεις

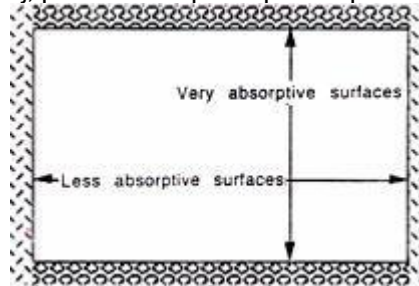
Τις περισσότερες φορές παρουσιάζονται αποκλίσεις από την ιδανική συμπεριφορά, με αποτέλεσμα ο ρυθμός μείωσης του θορύβου με το χρόνο να μην είναι ομαλός, δηλαδή η πτώση να μην είναι απολύτως ευθύγραμμη.

### (I) Απόκριση δωματίου με διπλή κλίση

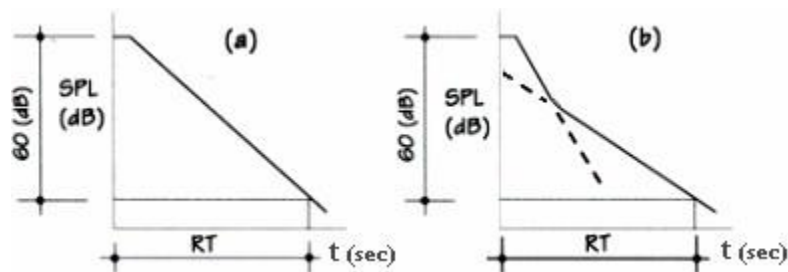
Συχνά η πτώση της στάθμης του αντηχητικού πεδίου εμφανίζει ένα σημείο καμπής, δηλαδή δύο κλίσεις, ιδιαίτερες στην αρχή της πτώσης. Αυτό οφείλεται σε ανισότροπη απορρόφηση του ήχου από το χώρο και μπορεί να οφείλεται σε δύο λόγους:

#### (I.1) Μη διάχυτο αντηχητικό πεδίο

Όταν η απορρόφηση που παρουσιάζει ο χώρος στον ήχο είναι ανισότροπη, δηλαδή η κατανομή των απορροφητικών υλικών στο χώρο δεν είναι ομοιόμορφη, τότε το δημιουργούμενο πεδίο δεν είναι διάχυτο. Για παράδειγμα, όταν δύο παράλληλες επιφάνειες του χώρου (π.χ δύο απέναντι τοίχοι) παρουσιάζουν πολύ μεγαλύτερη απορρόφηση από τις υπόλοιπες, τότε ο ήχος αποσβένει πολύ γρηγορότερα από αυτές τις επιφάνειες από ότι από τις υπόλοιπες, με αποτέλεσμα να βλέπουμε δύο διαφορετικές κλίσεις στο RIR.



Σχήμα 10. Δωμάτιο με δύο πλευρές μεγάλης απορρόφησης στον ήχο [3]



Σχήμα 11. Τρεις διαφορετικές περιπτώσεις εξασθένισης του αντηχητικού πεδίου:

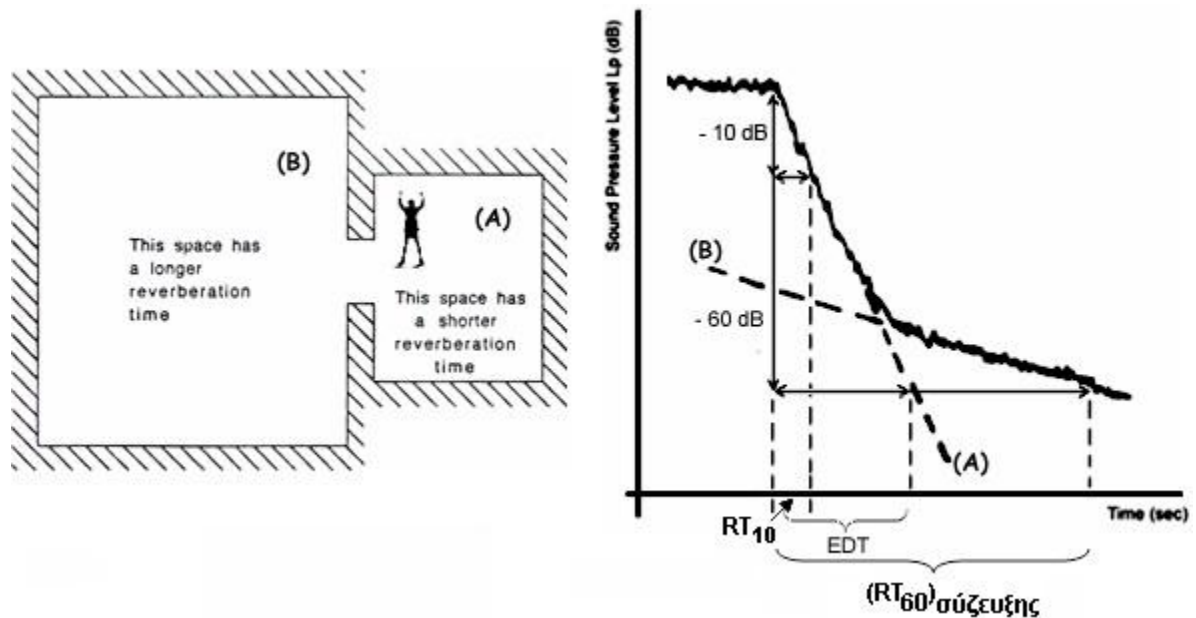
- (α) ομοιόμορφη πτώση ιδανικά διάχυτου αντηχητικού πεδίου,
- (β) διπλή κλίση σε μη διάχυτο πεδίο, με απότομη αρχική πτώση [11]

Έτσι, συχνά αντί να μετράμε το συνολικό ρυθμό πτώσης, μετράμε μόνο τον πρώιμο, ο οποίος περιλαμβάνει τις πρώτες ανακλάσεις. Αυτή είναι και η ανακλώμενη ηχητική ενέργεια που παίζει τον ουσιαστικότερο ρόλο στη διαμόρφωση της ακουστικής, αφού οι καθυστερημένες ανακλάσεις χάνουν μεγάλο μέρος της ενέργειάς τους.

### (β) Σύζευξη δύο χώρων

Στην περίπτωση που έχουμε δύο χώρους που συγκοινωνούν (όπως ο κυρίως ναός και μια πτέρυγά του ή δύο διαφορετικά δωμάτια με την ενδιάμεση πόρτα τους ανοιχτή), η ηχητική ενέργεια παρουσιάζει δύο διαφορετικούς ρυθμούς πτώσης, που προέρχονται από τους δύο χώρους (λόγω διαφορετικών απορροφήσεων και διαστάσεων). Αυτή η καμπύλη με τις δύο ευθύγραμμες πτώσεις προκύπτει, επειδή τα ηχητικά κύματα με την ταχύτερη εξασθένηση αποσβένουν γρηγορότερα από ότι αυτά με την πιο αργή εξασθένηση και έτσι κυριαρχούν προς το τέλος του χρόνου.

Στην περίπτωση που βρισκόμαστε μέσα σε ένα χώρο με μικρό χρόνο αντήχησης και ανοίξουμε την πόρτα σε έναν περισσότερο αντηχητικό χώρο, η σύζευξη των δύο προκαλεί αύξηση του χρόνου αντήχησης. Δηλαδή ανοίγοντας την πόρτα και εφόσον βρισκόμαστε κοντά στο άνοιγμα, θα ακούσουμε δύο ρυθμούς πτώσης και ο χώρος θα γίνει συνολικά πιο ζωντανός.

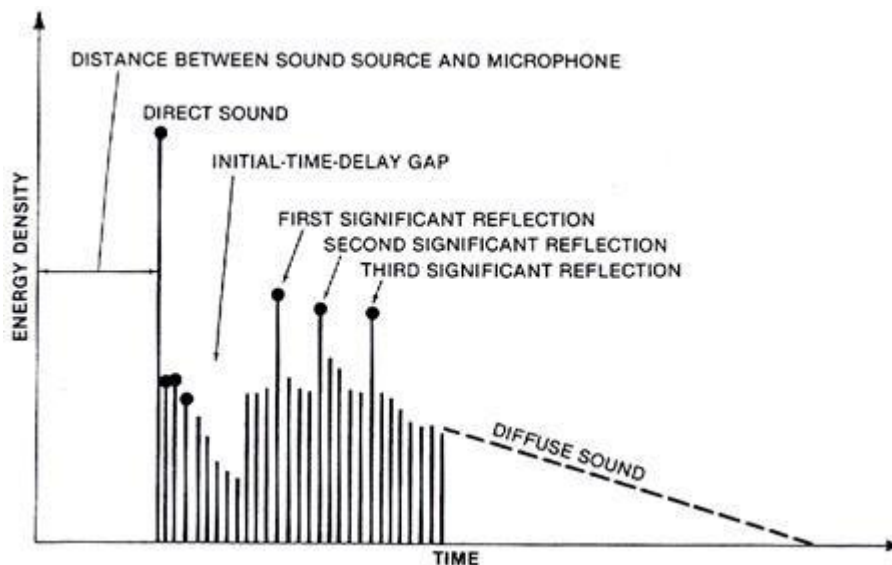


Σχήμα 12. Παρατηρητής μέσα σε δωμάτιο με μικρή αντήχηση – σύζευξη με περισσότερο αντηχητικό δωμάτιο, από [6]

Στην αντίθετη περίπτωση που βρισκόμαστε μέσα σε ένα χώρο με μεγάλο χρόνο αντήχησης και ανοίξουμε την πόρτα σε έναν λιγότερο αντηχητικό χώρο, η σύζευξη των δύο προκαλεί μείωση του χρόνου αντήχησης.

## (II) Παρουσία κορυφών στο RIR

Η εμφάνιση κορυφών στο διάγραμμα μαρτυρεί είτε την αποθήκευση ενέργειας στο χώρο με τη μορφή συντονισμών (στάσιμων κυμάτων) κυρίως στις χαμηλές συχνότητες ή την παρουσία echo.



Σχήμα 13. Παρουσία κορυφών στο RIR λόγω δημιουργίας στάσιμων κυμάτων (κυρίως στις χαμηλές συχνότητες) [1]

## RIR – αντίληψη του ήχου σε κλειστό χώρο

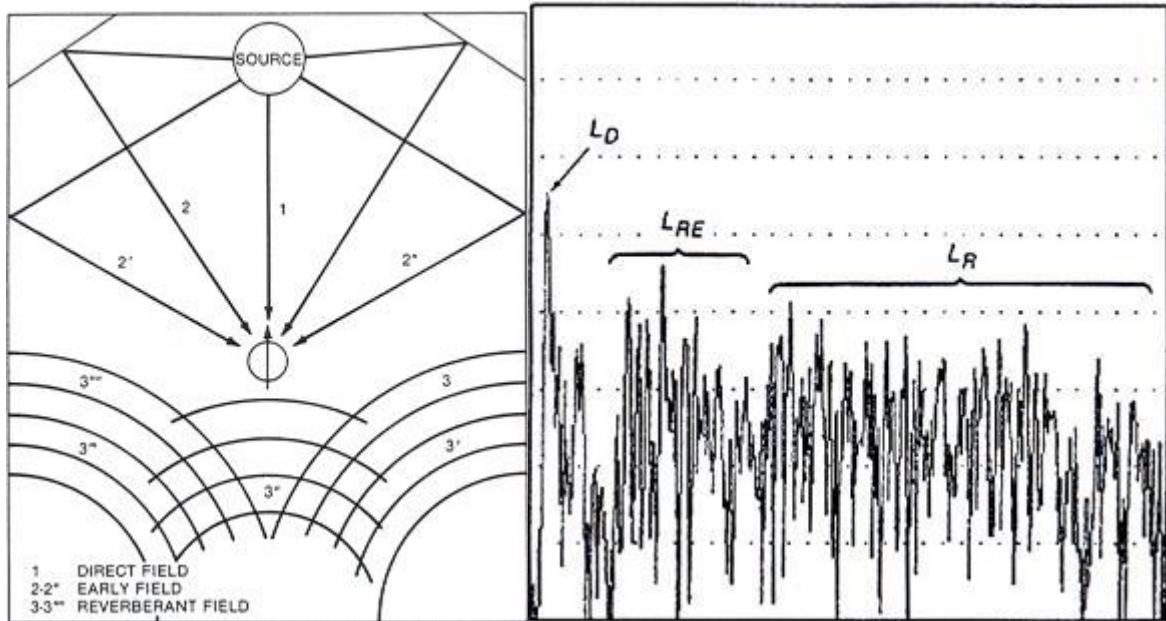
Όπως είδαμε, το διάγραμμα RIR μπορεί να χωριστεί σε τρεις περιοχές:

(1) Απευθείας Ήχο (Direct Sound - DS),

(2) (Διακριτές) Πρώτες Ανακλάσεις (Early Sound - ES): ανακλάσεις που φτάνουν σε 50-80msec από τον απευθείας ήχο και

(3) Καθυστερημένες Ανακλάσεις (Late Reverberation): Απαιτείται κάποιος χρόνος για τη δημιουργία και στη συνέχεια την απόσβεσή του.

Η ανάλυση της ακουστικής χώρων πολλές φορές βασίζεται σε αυτά τα τρία κομμάτια.



Σχήμα 14. Διαχωρισμός RIR σε: Direct Sound, Early Reflections και Late Reverberation [1]

Ο απευθείας ήχος και οι πρώτες ανακλάσεις μπορούμε να πούμε ότι συμπεριφέρονται όπως ο ήχος σε ελεύθερο πεδίο, δηλαδή τα πλάτη τους είναι αντιστρόφως ανάλογα ως προς την απόσταση από την πηγή (στις πρώτες ανακλάσεις λαμβάνουμε υπόψη μας και την επίδραση των απορροφήσεων από ανακλάσεις στα πλάτη τους, τα οποία αλλάζουν ανάλογα με τη θέση μας στο χώρο).

Αντίθετα, το καθαρά αντηχητικό κομμάτι του ήχου (late reflections) παραμένει σταθερό, ανεξάρτητα από τη θέση του παρατηρητή στο χώρο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι εμφανίζονται πλέον όλες οι δυνατές ανακλάσεις και αθροίζονται σε κάθε σημείο του με όλες τις δυνατές καθυστερήσεις, πλάτη και κατευθύνσεις, με αποτέλεσμα ο μέσος όρος τους να είναι ο ίδιος παντού.

### Απευθείας ήχος (Direct Sound)

- Η στάθμη του σε κάποιο σημείο του χώρου (παρατηρητής) εξαρτάται μόνο από την απόσταση από την πηγή (λειτουργεί όπως ο ήχος στο ελεύθερο πεδίο, δηλαδή έχει μείωση στάθμης κατά 6dB για κάθε διπλασιασμό απόστασης).

- Το αυτί χρησιμοποιεί τον απευθείας ήχο για τον εντοπισμό της θέσης της πηγής ήχου (Hass, 1951, referenced in [Bar93]). Έχει μάλιστα την ιδιότητα να την εντοπίζει ακόμα και αν πρώτες ανακλάσεις είναι κάπως πιο δυνατές από αυτόν.

- Όπως προαναφέραμε, το ανθρώπινο ακουστικό σύστημα εντοπίζει τη θέση της πηγής του ήχου στη διεύθυνση από την οποία ήρθε ο απευθείας ήχος, με την προϋπόθεση όμως ότι οι πρώτες ανακλάσεις:

(α) φθάνουν εντός 35msec από τον απευθείας ήχο,

(β) δεν είναι πολύ πιο δυνατές από τον απευθείας ήχο και

(γ) έχουν φάσματα και χρονικές περιβάλλουσες αρκετά πανομοιότυπες με τον απευθείας ήχο.

## **Πρώτες Ανακλάσεις (Early reflections)**

- Το ανθρώπινο αυτί έχει την ικανότητα να διαχωρίζει τον απευθείας ήχο από τις ανακλάσεις, γιατί οι ανακλάσεις:
  - (α) έχουν χρονική καθυστέρηση,
  - (β) έχουν συνήθως χαμηλότερη στάθμη και
  - (γ) έχουν επηρεαστεί φασματικά λόγω της απορρόφησης στον αέρα και στα απορροφητικά υλικά, η οποία συχνά είναι μεγαλύτερη στις υψηλές συχνότητες (λειτουργεί σαν χαμηλοπερατό φίλτρο) [Roa96].

*Μελέτες έχουν οδηγήσει στο συμπέρασμα ότι κάποια από τα πιο ενδιαφέροντα ακουστικά χαρακτηριστικά σχετίζονται με το πρώτο κομμάτι της κρουστικής απόκρισης του δωματίου, δηλαδή τις Πρώτες Ανακλάσεις.*

- Συγκεκριμένα, το χρονικό διάστημα εμφάνισης (της τάξης των μερικών δεκάδων msec) και το ενεργειακό περιεχόμενο των πρώτων ανακλάσεων (οι στάθμες τους) αποτελούν σημαντικά στοιχεία, γιατί επηρεάζουν την αίσθηση της γεωμετρίας και του μεγέθους του χώρου.

• Η καθυστέρηση των πρώτων ανακλάσεων ('Initial Time Delay' gap – ITD) δίνει την αίσθηση του μεγέθους του χώρου.

• Ο λόγος των σταθμών απευθείας ήχου - πρώτων ανακλάσεων δίνει την αίσθηση της απόστασης πηγής - παρατηρητή.

- Σε έναν μεγαλύτερο χώρο ο ήχος κάνει περισσότερο χρόνο να φτάσει σε ένα ανακλαστικό του τοίχωμα και γι' αυτό το χρονικό διάστημα μεταξύ των ανακλάσεων είναι μεγαλύτερο. Όταν οι πρώτες ανακλάσεις φτάσουν στο ανθρώπινο αυτί εντός 35msec, αυτό δεν τους αντιλαμβάνεται ως ξεχωριστούς ήχους. Αντίθετα ενισχύουν τον απευθείας ήχο, πράγμα σημαντικό για έναν ακροατή που βρίσκεται μακριά από την πηγή. Αν ο χώρος είναι πολύ μεγάλος, η καθυστέρηση μπορεί να είναι πολύ μεγάλη (>50msec) και οι πρώτες ανακλάσεις να ακουστούν ως ξεχωριστά echo. Αντίστροφα, πολύ μικρή καθυστέρηση (<5msec) μπορεί να δημιουργήσει την αίσθηση στον ακροατή ότι ο χώρος είναι μικρός [DJ97].

- Οι στάθμες των πρώτων ανακλάσεων εξαρτώνται από την απόσταση πηγής – παρατηρητή και από την απορροφητικότητα των υλικών στα οποία έχουν υποστεί ανάκλαση [HA96]. Επειδή όσο απομακρυνόμαστε από την πηγή τόσο μειώνεται η διαφορά διαδρομών μεταξύ του απευθείας ήχου και των πρώτων ανακλάσεων, γι' αυτό και μειώνεται η καθυστέρηση και η διαφορά των σταθμών τους στο RIR [HA96].

- Το κομμάτι του διαγράμματος RIR που συμβάλλει στην καταληπτότητα του λόγου είναι τα πρώτα περίπου 50msec, ενώ η διαύγεια της μουσικής τα πρώτα περίπου 80msec (από το t=0sec).

## **Καθυστερημένες ανακλάσεις (Late Reverberation)**

- Σε αντίθεση με τον απευθείας ήχο και τις πρώτες ανακλάσεις, οι καθυστερημένες ανακλάσεις καταφτάνουν σε κάθε σημείο με πολύ μικρή χρονική καθυστέρηση μεταξύ τους και η στάθμη τους (δηλαδή της ουράς στο διάγραμμα της απόκρισης δωματίου) είναι σταθερή σε όλα τα σημεία του χώρου μακριά από την πηγή ανεξάρτητα από την απόσταση πηγής – παρατηρητή. Αυτό βεβαίως ισχύει κατά βάση σε ένα ιδανικά διάχυτο πεδίο.

- Εν γένει τα απορροφητικά υλικά των τοιχωμάτων κλειστών χώρων έχουν μεγαλύτερη απορροφητικότητα στις υψηλές συχνότητες, με αποτέλεσμα αυτές να φθίνουν πιο γρήγορα από ότι οι χαμηλές. Το ίδιο ισχύει και στην περίπτωση της απορρόφησης στον αέρα.

## Στοιχεία καλής ακουστικής

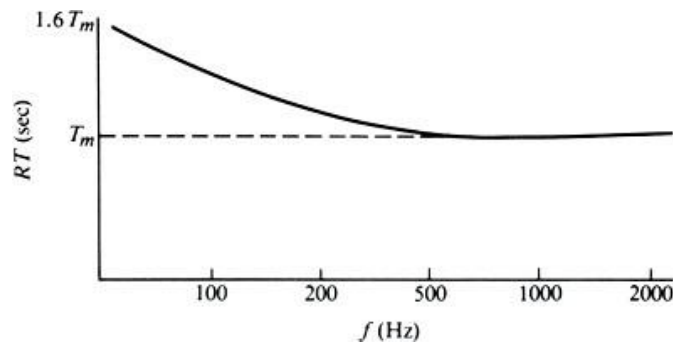
Ο χρόνος αντήχησης είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό της ακουστικής των χώρων. Αν είναι μεγάλος, μας δίνει την εντύπωση ενός 'ζωντανού' χώρου, ενώ αν είναι μικρός μας δίνει την εντύπωση ενός 'νεκρού' χώρου.

Η ιδανική απόκριση του χώρου εξαρτάται από τη χρήση του. Για παράδειγμα, στις αίθουσες συναυλιών (μουσική) θέλουμε μεγαλύτερη αντήχηση ('ζωντάνια') ιδιαίτερα στις χαμηλές συχνότητες (η έντονη παρουσία των μπάσων είναι απαραίτητη στη μουσική), ενώ σε μία αίθουσα ομιλιών χρειαζόμαστε μικρότερους χρόνους αντήχησης. Επίσης 'νεκρός' χώρος προτιμάται όταν αναπαράγουμε μουσική, δεδομένου ότι η αντήχηση του χώρου στον οποίο πραγματοποιήθηκε η ηχογράφηση είναι ήδη καταγεγραμμένη. Η αντήχηση προσθέτει στην αίσθηση της ζωντάνιας του ήχου, αλλά επιπλέον αυξάνει την αλληλοεπικάλυψη των ήχων, που σημαίνει ότι μειώνει την αντίληψή τους.

Ο βέλτιστος χρόνος αντήχησης είναι ένας συμβιβασμός μεταξύ καταληπτότητας του ήχου (που απαιτεί μικρό χρόνο αντήχησης), της έντασης της αντήχησης (που απαιτεί υψηλή στάθμη του αντηχητικού πεδίου) και της ζωντάνιας (που απαιτεί μεγάλο χρόνο αντήχησης).

Κάποιες βασικές απαιτήσεις ενός χώρου με καλή ακουστική αποτελούν η επαρκής ακουστότητα, η ομοιόμορφη συμπεριφορά του ήχου στο χώρο, η καταληπτότητα του ήχου, η αίσθηση του ακροατή ότι περιβάλλεται από αυτόν (αντήχηση), η έλλειψη echo's και ο ελάχιστος θόρυβος βόθους.

Για παράδειγμα, στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η σχέση του χρόνου αντήχησης και της συχνότητας σε μία αίθουσα συναυλιών με καλή ακουστική.



Σχήμα 15. Συχνότητα - χρόνος αντήχησης σε αίθουσα συναυλιών με καλή ακουστική (ισορροπημένα μπάσα) [2]

## EDT – ‘Early Decay Time’

Πειραματικές μελέτες (Schröder) έχουν οδηγήσει στο συμπέρασμα ότι κάποια από τα πιο ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά της ακοής μας σχετίζονται με το πρώτο κομμάτι της πτώσης στο διάγραμμα της κρουστικής απόκρισης του δωματίου (RIR), δηλαδή με τις Πρώτες Ανακλάσεις.

Έχει παρατηρηθεί ότι ο **πρώιμος** ρυθμός πτώσης του ανακλώμενου ήχου (μέχρι τα πρώτα 20-30dB) παίζει πιο σημαντικό ρόλο στην ανθρώπινη ακοή από ότι ο συνολικός χρόνος αντήχησης (μη διάχυτο πεδίο). Συγκεκριμένα έχει διαπιστωθεί ότι η πλειοψηφία των ακροατών όταν χαρακτηρίζουμε ένα χώρο ως ζωντανό το κάνουμε βασιζόμενοι στη χρονική καθυστέρηση των πρώτων ανακλάσεων ως προς τον απευθείας ήχο και στις στάθμες των πρώτων ανακλάσεων και όχι το υπόλοιπο κομμάτι της απόκρισης του δωματίου.

Ο χρόνος πτώσης που αντιστοιχεί στις πρώτες ανακλάσεις του RIR ονομάζεται **‘Early Decay Time’ (EDT)** και αντιπροσωπεύει συνήθως την αίσθηση που έχουμε όταν διακόπτουμε απότομα μια πηγή, αλλά εξακολουθούμε να την ακούμε για λίγη ώρα μέχρι να σβήσει τελείως.

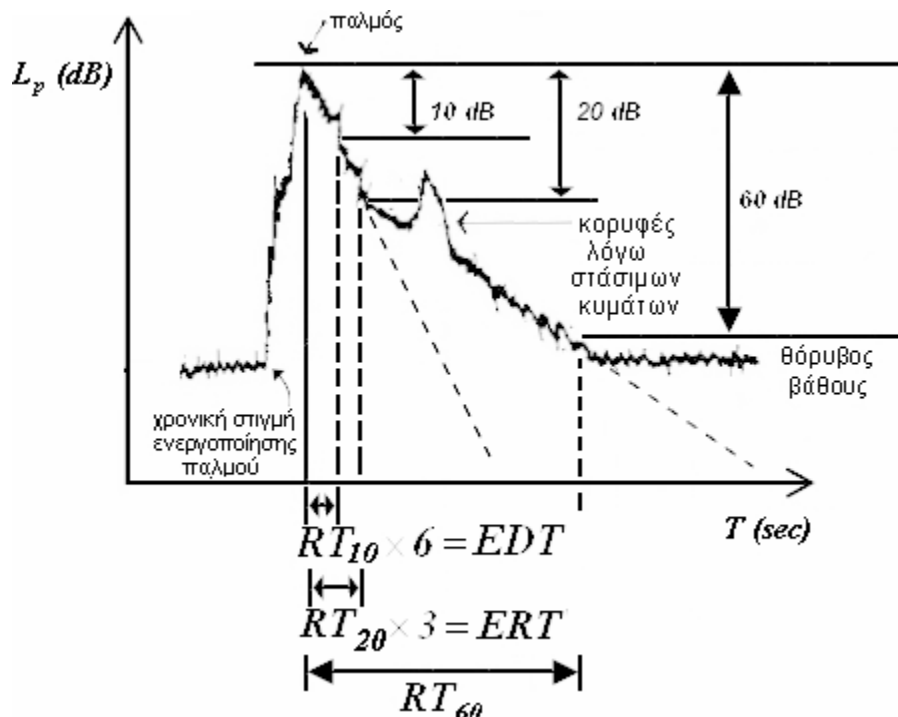
Ο χρόνος αντήχησης  $RT_{60}$ , από την άλλη, που περιλαμβάνει τις καθυστερημένες ανακλάσεις, αντιστοιχεί στην αίσθηση του ‘γεμάτου’ ήχου (λόγω των πολλαπλών ανακλάσεων).

Το **EDT** ορίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται για την πτώση των **πρώτων 10dB** στη στάθμη του ήχου ( $\times 6$ ).

Το **EDT** συνδέεται περισσότερο με την υποκειμενική αίσθηση της αντήχησης ενός χώρου από ότι ο παραδοσιακός χρόνος αντήχησης ( $RT_{60}$ ).

Το EDT αναφέρεται σε μεμονωμένες πρώτες ανακλάσεις, σε αντίθεση με το  $RT_{60}$  που αποτελείται από ένα μεγάλο πλήθος τυχαίων ανακλάσεων. Γι’ αυτό το λόγο το EDT αποκαλύπτει στοιχεία της γεωμετρίας του χώρου (αφού οι πρώτες ανακλάσεις προέρχονται από συγκεκριμένες επιφάνειες), σε αντίθεση με το  $RT_{60}$ , όπου οι ανακλάσεις προέρχονται από πρακτικά όλες τις επιφάνειες του χώρου, με αποτέλεσμα αυτό να είναι ανεξάρτητο τις γεωμετρίας του.

Αν οι πρώτες ανακλάσεις παρουσιάζουν μεγαλύτερη κλίση από τις καθυστερημένες, δηλαδή  $EDT < RT_{60}$ , ένα τέτοιο σημείο καμπής θα μας κάνει να αντιληφθούμε τον ήχο πιο στεγνό από ότι μας δείχνει ο υπολογισμός του  $RT_{60}$ .



Σχήμα 16.  $EDT \neq RT_{60}$  στην περίπτωση δύο κλίσεων (μη διάχυτο πεδίο), από [6]

## Μέτρηση $RT_{60}$ μέσω $RT_{10}$ – $RT_{20}$ – $RT_{30}$

Συχνά η στάθμη του θορύβου βάθους είναι αρκετά υψηλή, με αποτέλεσμα να μην μπορούμε να πέσουμε κατά 60dB (πέφτουμε κάτω από το θόρυβο βάθους, οπότε μια τέτοια μέτρηση θα ήταν εσφαλμένη). Σε αυτή την περίπτωση συνηθίζουμε να μετράμε το χρόνο που αντιστοιχεί σε μικρότερη πτώση (20-30dB) και να ανάγουμε αυτή την τιμή στην πτώση των 60dB πολλαπλασιάζοντας κατάλληλα. Δηλαδή κάνουμε ένα είδος extrapolation θεωρώντας ότι η πτώση είναι γραμμική, δηλαδή το πεδίο είναι διάχυτο.

Στην πράξη το αντηχητικό πεδίο δεν είναι ποτέ απολύτως διάχυτο, δηλαδή έχουμε αποκλίσεις από την ευθύγραμμη πτώση. Γι' αυτό το λόγο όσο μεγαλύτερη δυναμική περιοχή μέτρησης διαθέτουμε, δηλαδή όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά σταθμών μεταξύ παλμού/θορύβου και θορύβου βάθους, τόσο ασφαλέστερη η μέτρηση.

Έτσι, ορίζουμε τους παρακάτω χρόνους:

- **EDT - 'Early Decay Time':**

Το EDT ορίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται για την πτώση των πρώτων 10dB στη στάθμη του ήχου (x 6).

- **ERT - 'Extended Reverberation Time':**

Το ERT ορίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται για την πτώση του ήχου από -5dB έως -35dB (x 2).

**$RT_{20}$ :**

Ορίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται για την πτώση του ήχου από από -5dB έως -25dB (x 3).

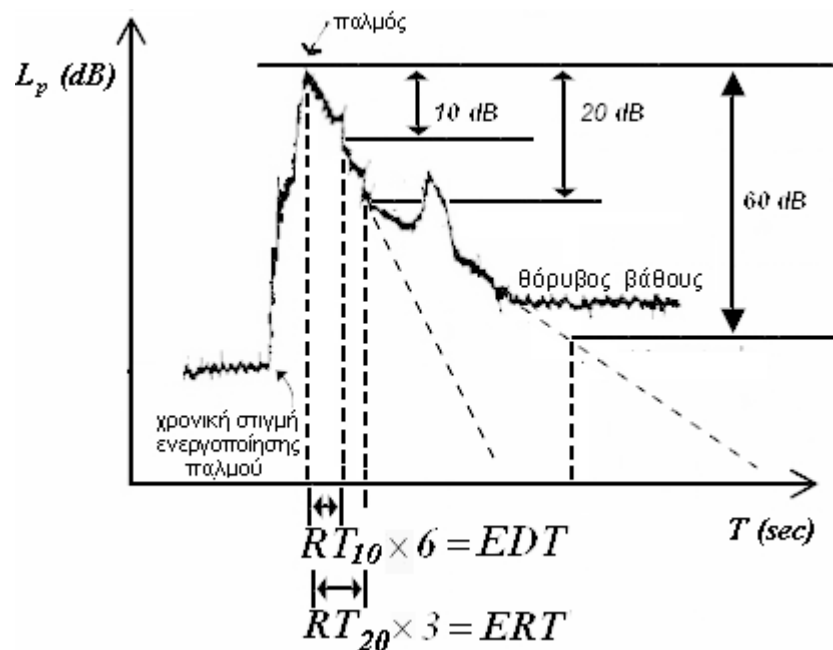
- **$RT_{10}$ :**

Ορίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται για την πτώση του ήχου από από -5dB έως -15dB (x 6).

Όλοι οι παραπάνω χρόνοι ορίζονται για κάθε συχνότητα, όπως ακριβώς και ο χρόνος αντήχησης  $RT_{60}$ .

Αν το αντηχητικό πεδίο είναι διάχυτο όλοι οι παραπάνω χρόνοι είναι ίδιοι.

Αν το αντηχητικό πεδίο δεν είναι διάχυτο (πραγματική περίπτωση), οι παραπάνω χρόνοι διαφέρουν.



Σχήμα 17. Υψηλός θόρυβος βάθους

## Μέθοδοι μέτρησης χρόνου αντήχησης

Για να μετρήσουμε το χρόνο αντήχησης χρειαζόμαστε καταρχήν μια πηγή ήχου για τη διέγερση του χώρου και τη δημιουργία του αντηχητικού πεδίου. Υπάρχουν τρεις βασικές μέθοδοι μέτρησης του χρόνου αντήχησης:

### (α) Μέθοδος του Παλμού

Διεγείρουμε ένα χώρο με έναν παλμό, για παράδειγμα πιστόλι (πρόχειρα με παλαμάκι ή μπαλόνι που σκάει) και καταγράφουμε απευθείας τη μείωση της ηχοστάθμης του αντηχητικού πεδίου συναρτήσει του χρόνου μέχρι το μηδενισμό του. Για την καταγραφή χρησιμοποιούμε ένα ηχόμετρο με φασματικό αναλυτή, έτσι ώστε να γίνεται ξεχωριστή μέτρηση στις διάφορες οκτάβες (διαφορετικός ρυθμός πτώσης με συχνότητα). Από τις κλίσεις των καμπύλων υπολογίζουμε και παρουσιάζουμε το χρόνο αντήχησης  $RT_{60}$  (ή  $RT_{10} \rightarrow EDT$ ) σε κάθε οκτάβα.

Η μέθοδος αυτή έχει δύο μειονεκτήματα:

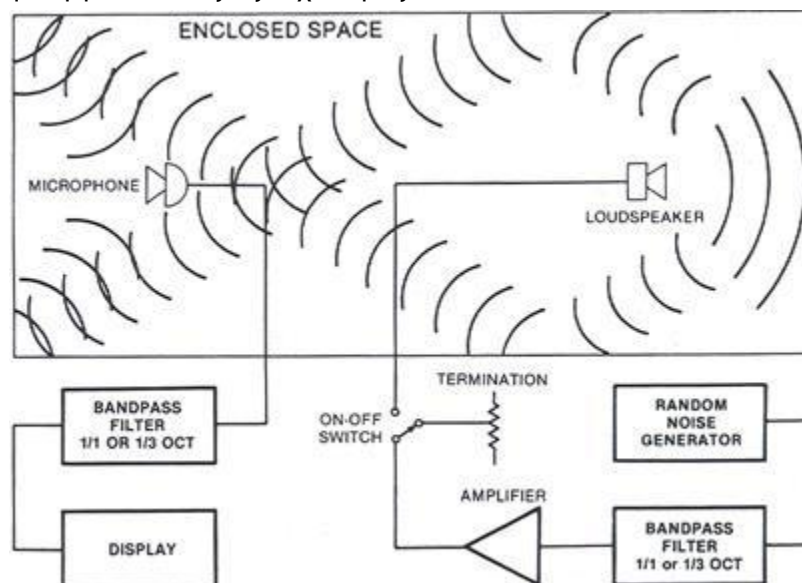
- (1) Έλλειψη ηχητικής ενέργειας στις χαμηλές συχνότητες (εκτός και αν χρησιμοποιηθούν εκρηκτικές ύλες) και
- (2) Αδυναμία ακριβούς επαναληψιμότητας.

### (β) Μέθοδος του μηδενισμού της πηγής (θορύβου)

Διεγείρουμε ένα χώρο με θόρυβο, λευκό ή ροζ, μέχρι την κατάσταση ισορροπίας (ο χρόνος αυτός διαφέρει ανάλογα με το χώρο) και στη συνέχεια τον διακόπτουμε ακαριαία. Ακολουθούμε την ίδια διαδικασία με τη μέθοδο του παλμού από τη στιγμή της διακοπής της πηγής.

Πλεονεκτήματα:

- (1) Η πηγή θορύβου παράγει μεγαλύτερα ποσά ηχητικής ενέργειας (απαραίτητη προϋπόθεση για μετρήσεις σε χώρους με υψηλή στάθμη θορύβου βάθους) και
- (2) Εκπέμπει ηχητική ενέργεια σε όλες τις συχνότητες.



Σχήμα 18. Πειραματική διάταξη μέτρησης  $RT_{60}$  / EDT [1]

### (γ) Μέθοδος ακολουθίας μεγίστου μήκους (MLS – Maximum Length Sequence)

Για τον προσδιορισμό της απόκρισης σε κλειστός χώρους αναπτύχθηκε από τους Schröder και Alrutz η μέθοδος της εκπομπής μιας ψευδοτυχαίας ακολουθίας που έχει παρόμοιες ιδιότητες με τον τυχαίο θόρυβο. Η ακολουθία αυτή ονομάζεται μεγίστου μήκους MLS – Maximum Length Sequence. Η μέτρηση του χρόνου αντήχησης με τη μέθοδο MLS έχει το πλεονέκτημα ότι είναι πολύ λίγο ευαίσθητη σε εξωτερικούς θορύβους, δηλαδή επιτυγχάνουμε μεγάλο λόγο σήματος προς θόρυβο (S/N).

Η ακολουθία είναι στάσιμη και έχει περίοδο  $l = 2^n - 1$  (όπου  $n$  θετικός αριθμός). Κάθε δείγμα της ακολουθίας έχει τιμή +1 ή -1, αποτελείται δηλαδή από συναρτήσεις δέλτα του Dirac.

---

## **Παρατηρήσεις για τη διαδικασία μέτρησης του $RT_{60}$**

- Η πηγή διέγερσης πρέπει να είναι μεγάφωνο όσο το δυνατόν μη κατευθυντικό.
- Οι μετρήσεις πρέπει να γίνουν σε τρεις (3) τουλάχιστον θέσεις του ηχομέτρου και από αυτές να υπολογίσουμε μέσες τιμές, αφού όπως είδαμε τις περισσότερες φορές το αντηχητικό πεδίο δεν είναι διάχυτο.
- Το ηχώμετρο θα πρέπει:
  - (α) να βρίσκεται καθαρά στο αντηχητικό πεδίο, δηλαδή μακριά από την πηγή, ανάλογα με το χώρο,
  - (β) να βρίσκεται τουλάχιστον 1 m μακριά από τους τοίχους και από οποιοδήποτε άλλο εμπόδιο (πχ. τον παρατηρητή).
- Ο εκπεμπόμενος θόρυβος θα πρέπει να είναι αρκετά μεγαλύτερος από το θόρυβο βάρους, ώστε να μπορούμε να κάνουμε μια ασφαλή μέτρηση του χρόνου αντήχησης (με extrapolation).

## Συντελεστές απορρόφησης και απορρόφηση διάφορων υλικών

Description	Frequency (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
	<i>Sabine Absorptivity a</i>					
Occupied audience, orchestra, chorus	0.40	0.55	0.80	0.95	0.90	0.85
Upholstered seats, cloth-covered, perforated bottoms	0.20	0.35	0.55	0.65	0.60	0.60
Upholstered seats, leather-covered	0.15	0.25	0.35	0.40	0.35	0.35
Carpet, heavy on undercarpet (1.35 kg/m <sup>2</sup> felt or foam rubber)	0.08	0.25	0.55	0.70	0.70	0.75
Carpet, heavy on concrete	0.02	0.06	0.14	0.35	0.60	0.65
Acoustic plaster (approximate)	0.07	0.17	0.40	0.55	0.65	0.65
Acoustic tile on rigid surface	0.10	0.25	0.55	0.65	0.65	0.60
Acoustic tile, suspended (false ceiling)	0.40	0.50	0.60	0.75	0.70	0.60
Curtains, 0.48 kg/m <sup>2</sup> velour, draped to half area	0.07	0.30	0.50	0.75	0.70	0.60
Wooden platform with airspace	0.40	0.30	0.20	0.17	0.15	0.10
Wood paneling, 3/8–1/2 in. over 2–4 in. airspace	0.30	0.25	0.20	0.17	0.15	0.10
Plywood, 1/4 in. on studs, fiberglass backing	0.60	0.30	0.10	0.09	0.09	0.09
Wooden walls, 2 in.	0.14	0.10	0.07	0.05	0.05	0.05
Floor, wooden	0.15	0.11	0.10	0.07	0.06	0.07
Floor, linoleum, flexible tile, on concrete	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02
Floor, linoleum, flexible tile, on subfloor	0.02	0.04	0.05	0.05	0.10	0.05
Floor, terrazzo	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
Concrete (poured, unpainted)	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
Gypsum, 1/2 in. on studs	0.30	0.10	0.05	0.04	0.07	0.09
Plaster, smooth on lath	0.14	0.10	0.06	0.04	0.04	0.03
Plaster, smooth on lath on studs	0.30	0.15	0.10	0.05	0.04	0.05
Plaster, 1 in. damped on concrete block, brick, lath	0.14	0.10	0.07	0.05	0.05	0.05
Glass, heavy plate	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
Glass, windowpane	0.35	0.25	0.18	0.12	0.07	0.04
Brick, unglazed, no paint	0.03	0.03	0.03	0.04	0.05	0.07
Brick, smooth plaster finish	0.01	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05
Concrete block, no paint	0.35	0.45	0.30	0.30	0.40	0.25
Concrete block, painted	0.10	0.05	0.06	0.07	0.09	0.08
Concrete block, smooth plaster finish	0.12	0.09	0.07	0.05	0.05	0.04
Concrete block, slotted two-well	0.10	0.90	0.50	0.45	0.45	0.40
Perforated panel over isolation blanket, 10% open area	0.20	0.90	0.90	0.90	0.85	0.85
Fiberglass, 1 in. on rigid backing	0.08	0.25	0.45	0.75	0.75	0.65
Fiberglass, 2 in. on rigid backing	0.21	0.50	0.75	0.90	0.85	0.80
Fiberglass, 2 in. on rigid backing, 1 in. airspace	0.35	0.65	0.80	0.90	0.85	0.80
Fiberglass, 4 in. on rigid backing	0.45	0.90	0.95	1.00	0.95	0.85
	<i>Sound Absorption A in m<sup>2</sup></i>					
Single person or heavily upholstered seat ( $\pm 0.10$ m <sup>2</sup> )	0.40	0.70	0.85	0.95	0.90	0.80
Wooden chair, table, furnishing, for one person	0.02	0.03	0.05	0.08	0.08	0.05

Πίνακας 3. Συντελεστές απορρόφησης ( $\alpha$ ) υλικών & απορρόφηση ( $A$ ) ανά άτομο ως προς συχνότητα [4]

## Συντελεστές απορρόφησης του αέρα

Σχετική υγρασία %	Θερμοκρασία (°)	Κεντρικές συχνότητες οκτάβων (Hz)			
		2000	4000	6300	8000
30%	15	0.0143	0.0486	0.1056	0.1360
	20	0.01190	0.0379	0.0840	0.1360
	25	0.0114	0.0313	0.685	0.1360
	30	0.0281	0.0281	0.0564	0.1360
50%	15	0.0099	0.0286	0.0626	0.0860
	20	0.0096	0.0244	0.0503	0.0860
	25	0.0095	0.0235	0.0444	0.0860
	30	0.0092	0.0233	0.0426	0.0860
70%	15	0.0088	0.0223	0.0454	0.0600
	20	0.0085	0.0213	0.0399	0.0600
	25	0.0084	0.0211	0.0388	0.0600
	30	0.0082	0.0207	0.0383	0.0600

Πίνακας 4. Συντελεστές εξασθένησης (4m) του αέρα ως προς θερμοκρασία, υγρασία και συχνότητα [8]

---

## 2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

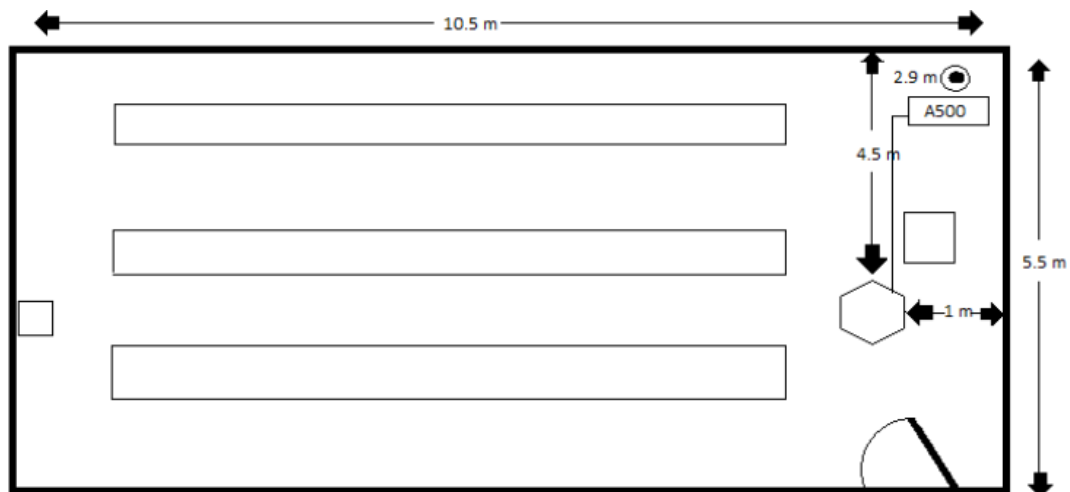
- [1] Davis D., Davis C. (1997), "Sound system engineering"
- [2] Rossing T., Moore R., Wheeler P. (2002). "The science of sound"
- [3] Howard D., Angus J. (1996), "Acoustics and Psychoacoustics"
- [4] Kinsler L. E., Frey A. R., Coppens A. B., Sanders J. V. (2000), "Fundamentals of Acoustics"
- [5] Κουτσοδημάκης Χ., Σηφάκης Μ., "Εργαστηριακό Φυλλάδιο Μηχανικής Ήχου Ι"
- [6] Egan D. (1988), "Architectural acoustics"
- [7] Brüel & Kjær. (1998), "Measurements in building acoustics". At: <http://www.bksv.com/3975.asp>
- [8] Σκαρλάτος Δ. (2003), "Εφαρμοσμένη ακουστική"
- [9] Roads C. (1996), "The computer music tutorial"
- [10] Vaananen R. (2003), "Parametrization, Auralization and Authoring of Room Acoustics for Virtual Reality Applications", PhD thesis, University of Helsinki. Available at: <http://lib.hut.fi/Diss/2003/isbn9512265443/>
- [11] Mehta M., Johnson J., Rocafort J. (1999), "Architectural Acoustics Principles and Design", New Jersey, Prentice-Hall.

### 3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΜΕΡΟΣ – Α

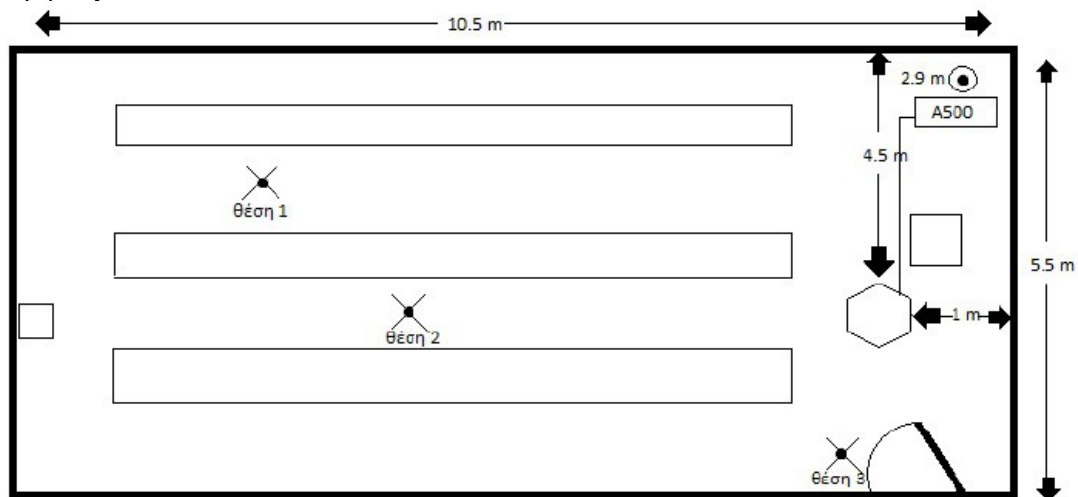
#### Πειραματική διάταξη

- Χρησιμοποιούμενες συσκευές: {1},{2},{3},{5}
- Σχήμα / κάτοψη χώρου (να γίνει κατά τη διάρκεια του εργαστηρίου)

Για τη μέτρηση 4:



Για τις μετρήσεις 5 και 6:



[από παλιότερη εργασία φοιτητή]

### Πειραματική διαδικασία

1. Να γίνει βαθμονόμηση του ηχομέτρου (calibration).
2. Να μετρηθεί η στάθμη θορύβου βάρους (background noise) της αίθουσας:  $B = \dots\dots\dots$  dB.
3. Να μετρηθούν οι διαστάσεις της αίθουσας.
4. Να μετρηθεί ο χρόνος αντήχησης  $RT_{60}$  της αίθουσας διδασκαλίας με χρήση της μεθόδου *παλμικής διέγερσης* (με μπαλόνι):

Freq (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
$RT_{60}$ (sec)								

5. Να μετρηθεί ο χρόνος αντήχησης της ίδιας αίθουσας με τη μέθοδο της *διακοπτόμενης πηγής* (με λευκό θόρυβο) για τρεις διαφορετικές θέσεις του μικροφώνου μέσα σε αυτήν και με τους φοιτητές καθισμένους σε 2 σειρές στο πίσω μέρος της αίθουσας. Να σημειωθούν ο αριθμός των ατόμων μέσα στην αίθουσα και ο μέσος όρος για κάθε περιοχή συχνότητων:

Freq (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
$RT_{60-1}$ (sec)								
$RT_{60-2}$ (sec)								
$RT_{60-3}$ (sec)								
$RT_{60}$ – μέσος όρος (sec), γεμ								

6. Να επαναληφθεί η ίδια μέτρηση χωρίς τους φοιτητές μέσα στην αίθουσα:

Freq (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
$RT_{60-1}$ (sec)								
$RT_{60-2}$ (sec)								
$RT_{60-3}$ (sec)								
$RT_{60}$ – μέσος όρος (sec), αδ.								

### Επεξεργασία μετρήσεων

1. Αφού υπολογίσετε τις μέσες τιμές ανά συχνότητα για κάθε περίπτωση, να συγκρίνετε ποιοτικά τις τιμές της παλιάς (παλμική διέγερση) και της νέας (διακοπτόμενη πηγή) μεθόδου (συμβαδίζουν;).
2. Από τους μέσους όρους του χρόνου αντήχησης ανά συχνότητα της μέτρησης 5 να υπολογίσετε τη μέση απορρόφηση της γεμάτης αίθουσας (ανά συχνότητα).
3. Από τους μέσους όρους του χρόνου αντήχησης ανά συχνότητα της μέτρησης 6 να υπολογίσετε τη μέση απορρόφηση της άδειας αίθουσας (ανά συχνότητα).
4. Από τις τιμές απορρόφησης της γεμάτης και άδειας αίθουσας να υπολογίσετε τη μέση απορρόφηση ανά άτομο (ανά συχνότητα). Σχολιασμός: είναι λογικές οι τιμές αυτές;

### 3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΜΕΡΟΣ – Β

#### Πειραματική διάταξη

- Χρησιμοποιούμενες συσκευές
- Σχήμα / κάτοψη χώρου (να γίνει κατά τη διάρκεια του εργαστηρίου)

#### Πειραματική διαδικασία

1. Να γίνει βαθμονόμηση του ηχομέτρου (calibration).
2. Να μετρηθεί η στάθμη θορύβου βάθους (background noise) της αίθουσας:  $B = \dots\dots\dots$  dB.
3. Να μετρηθούν οι διαστάσεις της αίθουσας του εργαστηρίου και το συνολικό εμβαδόν των ανοιχτών παραθύρων.
4. (α) Να μετρηθεί ο χρόνος αντήχησης  $RT_{60}$  της αίθουσας σε μία θέση κοντά στην πόρτα εξόδου, με την πόρτα κλειστή.  
(β) Να μετρηθεί ο χρόνος αντήχησης  $RT_{60}$  της αίθουσας σε μία θέση κοντά στην πόρτα εξόδου, με την πόρτα ανοιχτή.  
(γ) Να μετρηθεί ο χρόνος αντήχησης  $RT_{60}$  του διαδρόμου κοντά στην πόρτα, με την πόρτα κλειστή.

	Freq (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
(α)	$RT_{60-1}$ (sec), μέσα στο δωμάτιο με κλειστή την πόρτα						
(β)	$RT_{60-2}$ (sec), μέσα στο δωμάτιο με ανοιχτή την πόρτα						
(γ)	$RT_{60-3}$ (sec), στο διάδρομο με κλειστή την πόρτα						

5. Να μετρηθεί ο χρόνος αντήχησης και το early decay time της αίθουσας με ανοιχτά παράθυρα και σε θέση μακριά από αυτά.

Freq (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
$RT_{60}$ (sec)						
EDT (sec)						

## **Επεξεργασία μετρήσεων**

1. Να συγκρίνετε (ποιοτικά) τους χρόνους αντήχησης των περιπτώσεων α, β και γ για κάθε συχνότητα. Τι παρατηρείτε; Συμφωνούν οι μετρήσεις με τη θεωρία (τι περιμέναμε;); Τι συμπεράσματα βγάζουμε για τους δύο χώρους, το δωμάτιο και τον διάδρομο (απορροφητικότητα);
2. Να υπολογιστεί η συνολική απορρόφηση των περιπτώσεων α και β της μέτρησης 4, δηλαδή του δωματίου με κλειστή και ανοιχτή την πόρτα προς το διάδρομο (κατά σύμβαση στα 500 Hz). Συμφωνούν οι τιμές με τη θεωρία;
3. Να υπολογιστεί η συνολική απορρόφηση  $A_{\delta\omega\mu, \text{αν. παρ.}}$  για τη μέτρηση 5 του δωματίου με ανοιχτά τα παράθυρα (κατά σύμβαση στα 500 Hz).
4. Από τη διαφορά απορρόφησης του δωματίου, με ανοιχτά και κλειστά τα παράθυρα, να υπολογιστεί ο συντελεστής απορρόφησης του ανοιχτού παραθύρου (κατά σύμβαση στα 500 Hz). Συμφωνεί η τιμή αυτή με τη θεωρία; Τι περιμέναμε και γιατί;
5. Να συγκρίνετε ποιοτικά τις τιμές  $RT_{60}$  και EDT για τη μέτρηση 5, του δωματίου με ανοιχτά τα παράθυρα. Είναι ίδιοι ή διαφέρουν; Τι αναμέναμε θεωρητικά;

*Σημείωση: Για τον υπολογισμό του συντελεστή απορρόφησης του ανοιχτού παραθύρου να χρησιμοποιηθεί η ακριβέστερη σχέση των Norris-Eyring και όχι η προσεγγιστική του Sabine.*