

## 7. ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΜΕΓΑΛΩΝ ΚΛΕΙΣΤΩΝ ΧΩΡΩΝ

### 7.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα ασχοληθούμε με τη μελέτη των μεγάλων κλειστών χώρων. Ένας χώρος θεωρείται ακουστικά μεγάλος όταν η μικρότερη διάστασή του είναι δύο μήκη κύματος μεγαλύτερη από το μήκος κύματος της συχνότητας που ενδιαφέρει. Στους μεγάλους χώρους εφαρμόζεται η γεωμετρική ακουστική (ray tracing) καθώς επίσης και οι αρχές της στατιστικής ακουστικής κατά τον υπολογισμό τύπων. Η αρχιτεκτονική ακουστική είναι μια σχετικά πρόσφατη επιστήμη. Ιστορικά, ο νεαρός φυσικός W. C. Sabine το 1898 στο πανεπιστήμιο Harvard είχε τελειώσει την έρευνά του στους κλειστούς χώρους βελτιώνοντας την ακουστική της αίθουσας διδασκαλίας Fogg Art Museum. Ήταν η πρώτη φορά που η ακουστική αντιμετωπίστηκε με επιστημονικό τρόπο. Ο Sabine χρησιμοποιώντας μαξιλαράκια των θέσεων ενός θεάτρου ως φορητούς απορροφητές, σφυρίχτρες ως ηχητικές πηγές και ένα χρονόμετρο, κατέληξε σε μια σχέση μεταξύ του όγκου του δωματίου και της απορρόφησης που χρειάζεται για συγκεκριμένο χρόνο αντήχησης.

### 7.2 Χρόνος αντήχησης $RT_{60}$ – Τύπος Sabine

Ως χρόνος αντήχησης  $RT_{60}$  (Reverberation time) ορίζεται ο χρόνος που απαιτείται ώστε η στάθμη ηχητικής πίεσης  $L_p$  σε κάποιο σημείο ενός κλειστού χώρου να ελαττωθεί κατά  $60dB$ , μετά το μηδενισμό της ηχητικής ακτινοβολίας από την πηγή. Ο εμπειρικός τύπος στον οποίο κατέληξε ο Sabine είναι:

$$RT_{60} = 0.161 \frac{V}{S\bar{a}} \quad (7.1)$$

όπου:

$RT_{60}$ : ο χρόνος αντήχησης σε δευτερόλεπτα (*sec*)

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

$S$ : η ολική επιφάνεια του δωματίου σε τετραγωνικά μέτρα ( $m^2$ )

$\bar{a}$ : ο μέσος συντελεστής απορρόφησης των επιφανειών του δωματίου

$S\bar{a}$ : η συνολική απορρόφηση σε Sabines

Σημαντικές παρατηρήσεις σχετικές με το χρόνο αντήχησης:

- Ο τύπος του Sabine ισχύει ικανοποιητικά για  $\bar{a} < 0.1$ .
- Ο χρόνος αντήχησης για τον ίδιο χώρο, εξαρτάται από τη συχνότητα του ήχου και γι' αυτό το λόγο ορίζεται για κεντρικές συχνότητες ζώνης.
- Ο χρόνος αντήχησης μετριέται σε δευτερόλεπτα (*sec*) και αποτελεί τη σπουδαιότερη παράμετρο που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της ακουστικής ποιότητας χώρων.

### 7.2.1 Απόδειξη του τύπου υπολογισμού του χρόνου αντήχησης

Στους μεγάλους ακουστικά χώρους μπορούμε να οπτικοποιήσουμε τις ακουστικές συνθήκες αν φανταστούμε ότι το ακουστικό κύμα ταξιδεύει περιμετρικά εντός του χώρου. Το κύμα αυτό ταξιδεύει σε ευθεία κατεύθυνση, ωστόσο συναντήσει μια επιφάνεια. Έπειτα ανακλάται από την επιφάνεια σε γωνία ίση με τη γωνία πρόσπτωσης και ταξιδεύει στην καινούργια του διεύθυνση, ωστόσο χτυπήσει σε κάποια άλλη επιφάνεια. Επειδή ο ήχος ταξιδεύει με  $340\text{m/s}$  θα συμβούν πολλές ανακλάσεις κατά τη διάρκεια ενός δευτερολέπτου.

Σύμφωνα με τις αρχές της στατιστικής, ορίζεται ως μέση ελεύθερη απόσταση, η μέση απόσταση που ταξιδεύει ένα ηχητικό κύμα μέσα σε ένα χώρο ανάμεσα στις ανακλάσεις και τις οριακές επιφάνειες. Ο Knudsen ορίσε πραγματικά τη μέση ελεύθερη απόσταση (mean free path) σε 11 διαφορετικούς μεγάλους χώρους και κατέληξε στο ότι μπορεί να υπολογιστεί με αρκετή ακρίβεια με βάση τον τύπο:

$$MFP = \frac{4V}{S} \quad (7.2)$$

όπου:

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

$S$ : η ολική επιφάνεια του δωματίου σε τετραγωνικά μέτρα ( $m^2$ )

Ο αριθμός των ανακλάσεων ανά δευτερόλεπτο (Reflection Per Second):

$$RPS = \frac{c}{MFP} \quad \text{ή} \quad RPS = \frac{cS}{4V} \quad (7.3)$$

όπου  $c$  η ταχύτητα του ήχου στον αέρα.

Αν θεωρήσουμε  $60\text{dB}$  μείωση, όπου  $e^{6 \ln 10} = 1000000$ , τότε  $6 \ln[10 (1/\bar{a})]$  είναι ο συνολικός αριθμός των ανακλάσεων ( $N$ ) κατά τη διάρκεια της πτώσης των  $60\text{dB}$ .

Έτσι:

$$RT_{60} = \frac{N}{RPS} = \frac{\frac{6 \ln 10}{\bar{a}}}{\frac{4V}{S}} \quad (7.4)$$

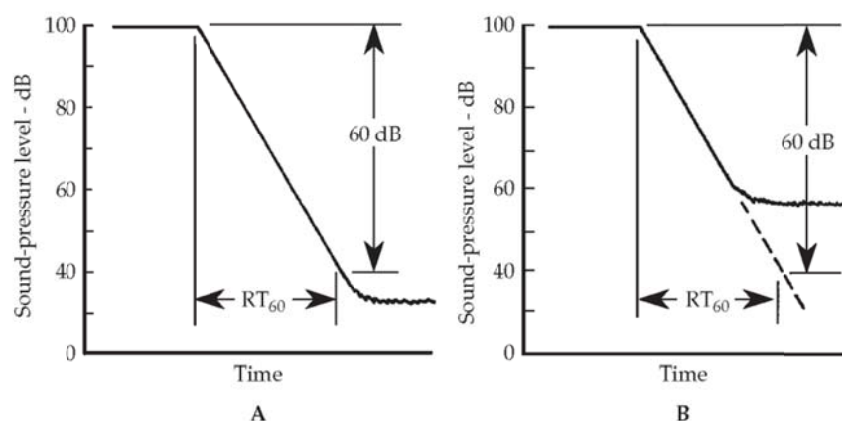
Άρα  $\frac{4(6 \ln 10)}{344} = 0.161$  η μετρητική σταθερά που έχει διαστάσεις ( $S/m$ ).

Έτσι, ο χρόνος αντήχησης

$$RT_{60} = \frac{m^3}{m^2} \left( \frac{S}{m} \right) = s$$

έχει μονάδες τα δευτερόλεπτα.

Στο σχήμα 7.1 φαίνεται ο υπολογισμός του χρόνου αντήχησης γραφικά:



**Σχήμα 7.1 Υπολογισμός της πτώσης κατά 60dB του ηχητικού πεδίου απευθείας (A) και με extrapolation (B)**

Ο χρόνος αντήχησης ορίζεται για την κεντρική συχνότητα κάθε συχνοτικής ζώνης υπολογισμού, επειδή τα υλικά παρουσιάζουν ανομοιομορφη συχνοτικά απορρόφηση. Οι οκτάβες στις οποίες αναφέρεται ο χρόνος αντήχησης είναι: 125, 250, 500, 1000, 2000 και 4000Hz. Στην περίπτωση που δεν προσδιορίζεται η συχνοτική ζώνη, ο χρόνος αντήχησης που δίδεται, αναφέρεται στη ζώνη με κεντρική συχνότητα 500Hz.

### 7.2.2 Μέσος συντελεστής απορρόφησης – Απορρόφηση δωματίου

Ο μέσος συντελεστής απορρόφησης για έναν κλειστό χώρο ορίζεται από τη σχέση:

$$\bar{\alpha} = \frac{\alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots + \alpha_n S_n}{S_1 + S_2 + \dots + S_n} \quad (7.5)$$

Η απορρόφηση δωματίου ορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$S\bar{\alpha} = A = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots + \alpha_n S_n \quad (7.6)$$

όπου:

$S_1, S_2, \dots, S_n$ : το εμβαδόν κάθε επιμέρους επιφάνειας.

$\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ : οι αντίστοιχοι συντελεστές απορρόφησης.

Τόσο η απορρόφηση όσο και ο μέσος συντελεστής απορρόφησης ορίζονται για την κεντρική συχνότητα της χρησιμοποιούμενης συχνοτικής ζώνης.

### 7.2.3 Απορρόφηση ανθρώπου

Ο άνθρωπος, όπως και τα υπόλοιπα υλικά, παρουσιάζει απορρόφηση, η οποία όμως λόγω της ανθρώπινης φυσιολογίας δεν έχει σημασία εάν εκφράζεται μέσω του συντελεστή απορρόφησης. Κατά συνέπεια, έχει νόημα ο ορισμός της συνολικής

απορρόφησης που προσφέρει ένας άνθρωπος. Ενδεικτικές τιμές της απορρόφησης του ανθρώπου παρατίθενται στον πίνακα 7.1.

125Hz	500Hz	2000Hz
0.17/άτομο	0.43/άτομο	0.47/άτομο

Πίνακας 7.1: Απορρόφηση του ατόμου για διάφορες οκτάβες

### 7.3 Θεωρητικός υπολογισμός του χρόνου αντήχησης

Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τον προσεγγιστικό τύπο του Sabine για να υπολογίσουμε το χρόνο αντήχησης ενός χώρου ανάλογα με τα υλικά που υπάρχουν εντός του.

Στον πίνακα 7.2 φαίνεται η μεθοδολογία με την οποία υπολογίζεται ο χρόνος αντήχησης για ένα δωμάτιο διαστάσεων 23.3 x 16 x 10 ft → 7.1 x 4.8 x 3.04 m, όπου το πάτωμα είναι κατασκευασμένο από οπλισμένο σκυρόδεμα και οι τοίχοι από γυψοσανίδα πάχους 1/2 in.

		Size	23.3 × 16 × 10 ft										
		Treatment	None										
		Floor	Concrete										
		Walls/ceiling	Gypsum board, 1/2", on frame construction										
		Volume	(23.3)(16)(10) = 3,728 cu ft										
Material	S sq ft	125 Hz		250 Hz		500 Hz		1 kHz		2 kHz		4 kHz	
			S		S		S		S		S		S
Concrete	373	0.01	3.7	0.01	3.7	0.015	5.6	0.02	7.5	0.02	7.5	0.02	7.5
Gypsum board	1,159	0.29	336.1	0.10	115.9	0.05	58.0	0.04	46.4	0.07	81.1	0.09	104.3
Total absorption (sabins)		339.8		119.6		63.6		53.9		88.6		111.8	
Reverberation time (seconds)		0.54		1.53		2.87		3.39		2.06		1.63	
<p>S = area of material = absorption coefficient for that material and for that frequency A = S absorption units, sabins</p> $RT_{60} = \frac{(0.049)(3728)}{A} = \frac{182.7}{A}$ <p>Example: For 125 Hz, <math>RT_{60} = \frac{182.7}{339.8} = 0.54</math> second</p>													

Πίνακας 7.2 Μέθοδος υπολογισμού του χρόνου αντήχησης ενός δωματίου με βάση τον τύπο του Sabine για συχνότητες από 125 έως 4000Hz

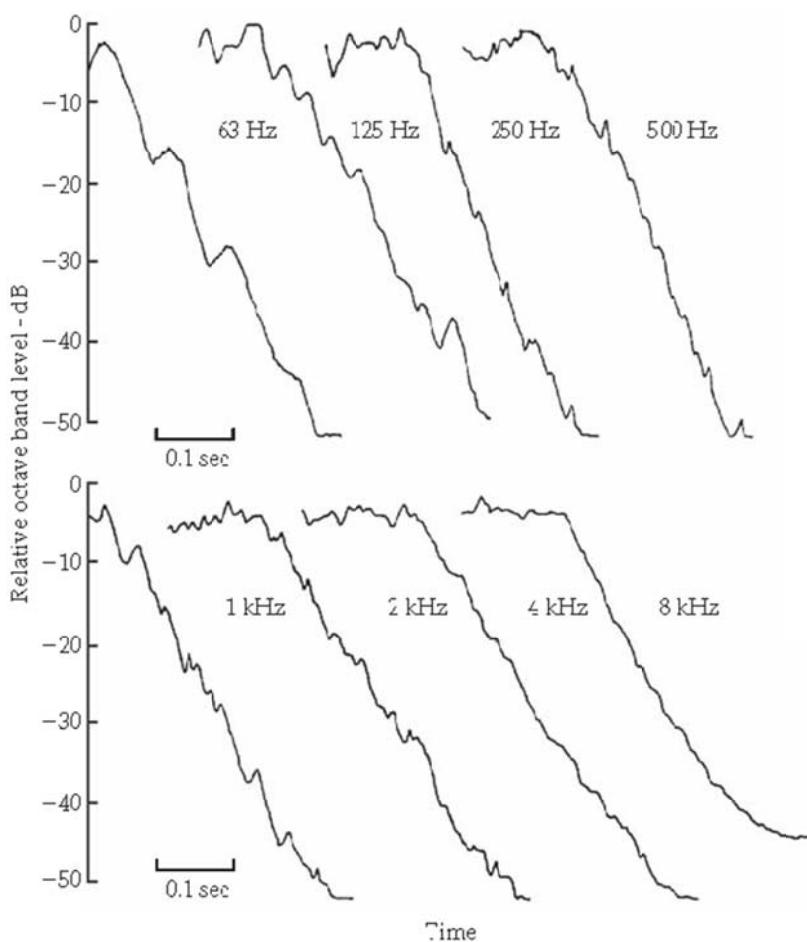
### 7.4 Μέτρηση του χρόνου αντήχησης

Ο χρόνος αντήχησης είναι η πιο σπουδαία παράμετρος για το χαρακτηρισμό της ακουστικής ποιότητας ενός χώρου και υπολογίζεται μετρώντας τη χρονική απόκριση του χώρου έπειτα από παλμική διέγερση. Οι μετρήσεις του χρόνου αντήχησης περιγράφονται στο πρότυπο ISO 3382-1975.

Στις σύγχρονες συσκευές μέτρησης του χρόνου αντήχησης υπάρχει η δυνατότητα απεικόνισής του στις συχνοτικές ζώνες 125- 4000Hz ταυτόχρονα.

Μια απεικόνιση της πτώσης της ηχητικής στάθμης συναρτήσει του χρόνου για διάφορες συχνοτικές ζώνες φαίνονται στο σχήμα 7.2.

Παρατηρώντας το σχήμα 7.1 (A) βλέπουμε πως θεωρητικά χρειάζεται μια πτώση της αρχικής ηχητικής στάθμης πίεσης κατά 60dB. Στην πραγματικότητα αυτό είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθεί γιατί η στάθμη του θορύβου βάθους (background noise) δεν επιτρέπει την πτώση κατά 60dB. Μια ηχητική πηγή είναι πολύ δύσκολο να παράγει ηχητικό πεδίο με στάθμη πίεσης 120dB. Στην πραγματικότητα, γίνονται μετρήσεις για πτώσεις ηχητικής στάθμης 30-40dB και εν συνεχεία υπολογίζεται γραφικά ο χρόνος αντήχησης όπως φαίνεται στο σχήμα 7.1 (B).



**Σχήμα 7.2 Πτώση στάθμης ηχητικού πεδίου για διάφορες οκτάβες**

Παρακάτω περιγράφονται οι τρεις μέθοδοι μέτρησης χρόνου αντήχησης.

#### **7.4.1 Μέθοδος του μηδενισμού της πηγής**

Ένας χώρος διεγείρεται με θόρυβο (ροζ ή λευκός) που μηδενίζεται ακαριαία. Ένας αναλυτής και ένα ηχόμετρο καταγράφει τη μείωση της στάθμης του ηχητικού πεδίου

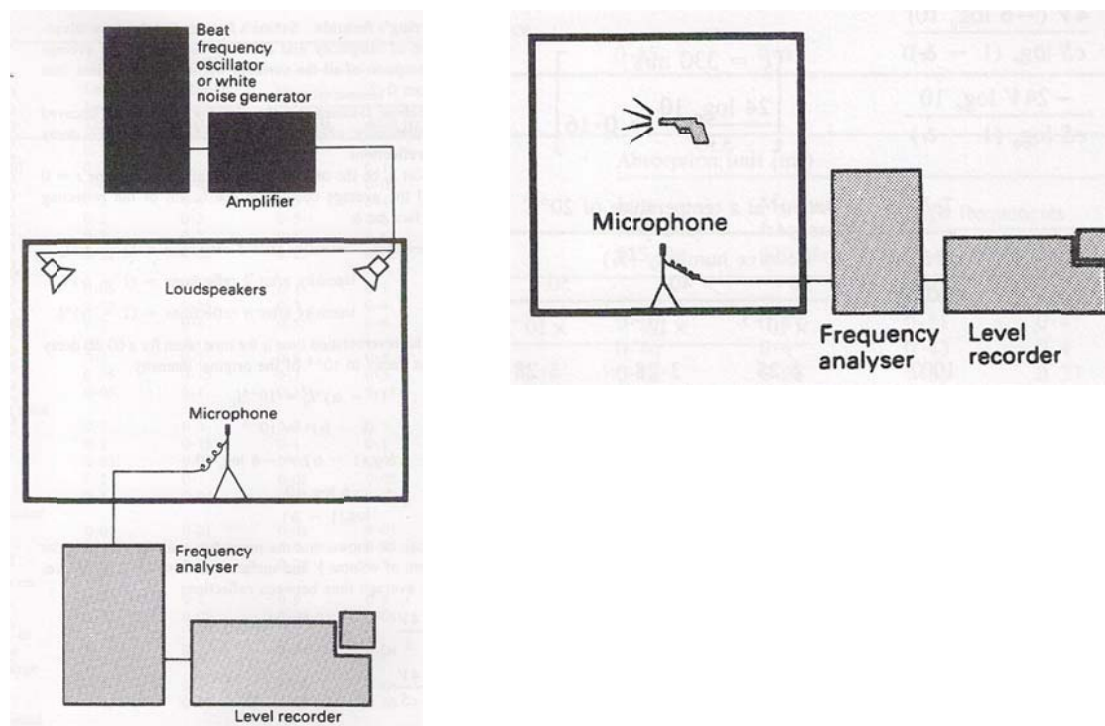
συναρτήσεως του χρόνου μέχρι το μηδενισμό του. Από την κλίση της καμπύλης υπολογίζεται ο χρόνος αντήχησης.

#### 7.4.2 Μέθοδος της παλμικής διέγερσης (impulse response)

Είναι παρόμοια με την παραπάνω μέθοδο με τη διαφορά ότι η διέγερση του χώρου πραγματοποιείται μέσω κάποιου παλμού (π.χ. πιστόλι).

#### 7.4.3 Μέθοδος ακολουθίας μέγιστου μήκους (MLS - Maximum Length Sequence)

Για τον προσδιορισμό της απόκρισης σε κλειστούς χώρους αναπτύχθηκε πρόσφατα από τους Schroeder και Alutz η μέθοδος της εκπομπής μιας ψευδοτυχαίας ακολουθίας που έχει παρόμοιες ιδιότητες με τον τυχαίο θόρυβο. Η ακολουθία αυτή ονομάζεται ακολουθία μέγιστου 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 με μήκος  $l = 2^n - 1$  (όπου  $n$  ακέραιος θετικός αριθμός). Κάθε δείγμα, πλην του πρώτου που είναι εξ' ορισμού μονάδα, της ακολουθίας έχει τιμή 0 ή 1, αποτελείται δηλαδή από συναρτήσεις δέλτα (Dirac Delta Functions).



**Σχήμα 7.3** Σχηματική απεικόνιση του χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού για τη μέτρηση του χρόνου αντήχησης με τη μέθοδο της διακοπτόμενης πηγής (αριστερά) και της παλμικής διέγερσης (δεξιά).

## 7.5 Άλλοι τύποι υπολογισμού του χρόνου αντήχησης $RT_{60}$

### 7.5.1 Τύπος των Norris - Eyring

Όταν για το μέσο συντελεστή απορρόφησης ισχύει  $\bar{a} > 0.1$ , ο προσεγγιστικός τύπος του Sabine δεν παρέχει ορθά αποτελέσματα. Σε αυτή την περίπτωση, χρησιμοποιείται ο ακόλουθος τύπος:

$$RT_{60} = \frac{0.161V}{-S \ln(1 - \bar{a})} \quad (7.7)$$

όπου:

$RT_{60}$ : ο χρόνος αντήχησης σε δευτερόλεπτα (*sec*)

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

$S$ : η ολική επιφάνεια του δωματίου σε τετραγωνικά μέτρα ( $m^2$ )

$\bar{a}$ : ο μέσος συντελεστής απορρόφησης των επιφανειών του δωματίου

Για  $a < 0.1$  έχουμε  $-\ln(1 - a) = a + \frac{a^2}{2} + \frac{a^3}{3} + \dots + \frac{a^n}{n} \approx a$  οπότε ο παραπάνω τύπος παίρνει τη μορφή του τύπου του Sabine.

### 7.5.2 Τύπος του Fitzroy

Στην περίπτωση ανομοιομόρφης απορρόφησης, δηλαδή στην περίπτωση ύπαρξης σε μία ή περισσότερες κατευθύνσεις ισχυρά ανακλαστικών επιφανειών, όπως υαλοπίνακες, ο χρόνος αντήχησης υπολογίζεται με βάση τον ακόλουθο τύπο:

$$RT_{60} = \frac{0.161V}{S^2} \left[ \frac{S_{XY}}{a_{XY}} + \frac{S_{XZ}}{a_{XZ}} + \frac{S_{YZ}}{a_{YZ}} \right] \quad (7.8)$$

όπου:

$RT_{60}$ : ο χρόνος αντήχησης σε δευτερόλεπτα (*sec*)

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

$S$ : η ολική επιφάνεια του δωματίου σε τετραγωνικά μέτρα ( $m^2$ )

$S_{XY}, S_{XZ}, S_{YZ}$ : η ολική επιφάνεια επί των αξόνων  $XY, XZ, YZ$  του δωματίου αντίστοιχα

$a_{XY}, a_{XZ}, a_{YZ}$ : ο μέσος συντελεστής απορρόφησης επί των αξόνων  $XY, XZ, YZ$  του δωματίου αντίστοιχα

Ο τύπος αυτός ισχύει για χώρους όπου η απορρόφηση δεν είναι ομοιόμορφη. Επίσης είναι εφαρμόσιμος στις περισσότερες πραγματικές περιπτώσεις (π.χ. χαλί στο πάτωμα, ακουστικό πλακάκι στην οροφή, όλοι οι άλλοι τοίχοι ανακλαστικοί).

### 7.5.3 Απορρόφηση από τον αέρα

Στην περίπτωση που ο χώρος είναι εξαιρετικά μεγάλων διαστάσεων (π.χ. εκκλησίες, θέατρα) πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν και η απορρόφηση του αέρα.

$$RT_{60} = \frac{0.161V}{S\bar{a} + 4mV} \quad (7.9)$$

όπου:

$RT_{60}$ : ο χρόνος αντήχησης σε δευτερόλεπτα (*sec*)

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

$S$ : η ολική επιφάνεια του δωματίου σε τετραγωνικά μέτρα ( $m^2$ )

$\bar{a}$ : ο μέσος συντελεστής απορρόφησης των επιφανειών του δωματίου

$m$ : ο συντελεστής εξασθένησης της ενέργειας που η τιμή του εξαρτάται από την υγρασία και τη συχνότητα.

Σχετική Υγρασία %	Θερμοκρασία	Συχνότητα (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 7.3 Εξάρτηση του συντελεστή εξασθένησης της ηχητικής ενέργειας λόγω της παρουσίας αέρα συναρτήσει της σχετικής υγρασίας ( $4m$ ), της θερμοκρασίας και της συχνότητας.**

#### 7.5.4 Χώροι με ανοιχτά παράθυρα (Sabine-Franklin)

Στην περίπτωση που ο χώρος περιλαμβάνει μεγάλα ανοιχτά παράθυρα και η απορρόφηση από τα αντικείμενα εντός του είναι μεγάλη, ο χρόνος αντήχησης υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$RT_{60} = \frac{24V \ln 10}{Ac} \quad (7.10)$$

όπου:

$RT_{60}$ : ο χρόνος αντήχησης σε δευτερόλεπτα (*sec*)

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

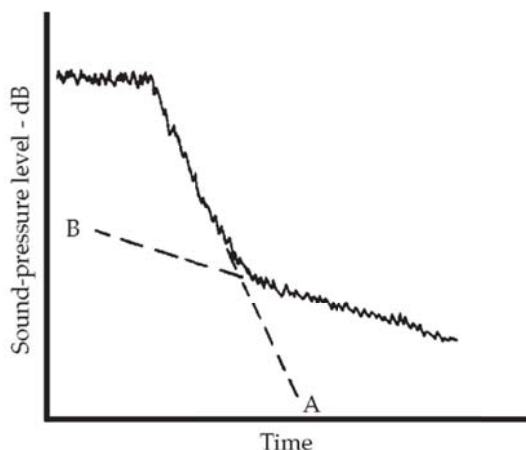
$A$ : η συνολική απορρόφηση του χώρου σε Sabines

$c$ : η ταχύτητα του ήχου στον αέρα σε  $m/s$



## 7.6 Συγκινονούντες χώροι

Όταν έχουμε δύο χώρους που επικοινωνούν, η μείωση της στάθμης του ηχητικού πεδίου σε λογαριθμική κλίμακα δεν ακολουθεί τον κανονικό ρυθμό μείωσης (ευθεία γραμμή). Στην περίπτωση αυτή, μπορούμε να διακρίνουμε δύο ρυθμούς μείωσης, με αποτέλεσμα η πτώση της στάθμης να μην είναι ευθεία, αλλά να παρουσιάζει σημεία καμπής.



**Σχήμα 7.4** Πτώση στάθμης ηχητικού πεδίου με διπλή κλίση λόγω σύζευξης ενός χώρου με μεγάλη απορρόφηση (A) κι ανακλαστικού χώρου (B)

Σύμφωνα με το σχήμα 7.4, ο χώρος A είναι το κυρίως δωμάτιο με σχετικά μικρό χρόνο αντήχησης (καμπύλη A). Ο χώρος B είναι προσαρτημένος διάδρομος με ανακλαστικές επιφάνειες και μεγάλο χρόνο αντήχησης (καμπύλη B). Ένα άτομο που βρίσκεται μεν μέσα στον κυρίως χώρο A, αλλά κοντά στο άνοιγμα προς τον παρακείμενο διάδρομο έχει την ευκαιρία να ακούσει ένα διπλό χρόνο αντήχησης.

## 7.7 EDT (Early Decay Time) και ERT (Extended Reverberation Time)

Ο EDT ορίζεται ως η επί έξι (6) φορές χρονική περίοδος που χρειάζεται ώστε ο ήχος να μειωθεί κατά  $10dB$  μετά το μηδενισμό της πηγής.

Ο ERT ορίζεται ως δύο (2) φορές ο χρόνος που απαιτείται ώστε ο ήχος να ελαττωθεί από  $-5$  έως  $-35dB$  από τη μέγιστη στάθμη του ηχητικού πεδίου.

Και οι δύο παραπάνω χρόνοι ορίζονται για κάθε συχνότητα όπως ακριβώς και ο χρόνος αντήχησης.

Όταν η ηχητική ενέργεια είναι τελείως διάχυτη (π.χ. μεγάλοι χώροι) οι χρόνοι EDT, ERT,  $RT_{60}$  έχουν ίδιες τιμές. Για χώρους όπου η ηχητική ενέργεια δεν είναι διάχυτη (π.χ. μικροί χώροι) οι χρόνοι αυτοί διαφέρουν.

## 7.8 Βέλτιστος χρόνος αντήχησης

Οι βέλτιστες τιμές του χρόνου αντήχησης εξαρτώνται από τη χρήση του χώρου, δηλαδή διαφέρουν κατά περίπτωση.

### 7.8.1 Ακουστικές απαιτήσεις χώρων

Ένας κλειστός χώρος έχει καλή ακουστική όταν πληροί τις παρακάτω προϋποθέσεις:

1. Ο ήχος φτάνει σε όλα τα σημεία του χώρου χωρίς αισθητή μείωση και κυρίως έχει την ίδια κατανομή παντού.
2. Δεν εμφανίζεται το φαινόμενο της επικάλυψης (ή τουλάχιστον είναι περιορισμένο).
3. Ο ρυθμός μείωσης του ήχου είναι βέλτιστος. Αυτό έχει ως συνέπεια την καθαρότητα της συνομιλίας και τη βελτίωση της αντίληψης της μουσικής.
4. Δεν υπάρχουν δυσάρεστες καταστάσεις όπως ηχώ, ηχητικές σκιές, ηχητικές παραμορφώσεις και ηχητικές συγκεντρώσεις.

### 7.8.2 Κατάλληλος όγκος ενός χώρου

Προκειμένου να επιτευχθούν οι βέλτιστες ακουστικές συνθήκες είναι απαραίτητο ένας χώρος να έχει το σωστό όγκο σύμφωνα με την εκάστοτε χρήση. Στον πίνακα 7.4 φαίνεται ο βέλτιστος όγκος ανά άτομο ανάλογα με τη χρήση του χώρου.

	Ελάχιστος	Βέλτιστος	Μέγιστος
Αίθουσα συναυλιών	6.5	7.1	9.9
Ιταλικού τύπου αίθουσες όπερας	4.0	4.2-5.1	5.7
Εκκλησίες	5.7	7.1-7.9	11.9
Κινηματογράφοι	-	3.1	4.2
Αίθουσες ομιλίας	-	2.8	4.9

**Πίνακας 7.4: Βέλτιστος όγκος / άτομο ( $m^3$ /άτομο) ανάλογα με τη χρήση του χώρου**

### 7.8.3 Εξίσωση βέλτιστης αντήχησης (Εξίσωση Stephens-Bate)

Έχουν προταθεί βέλτιστοι χρόνοι αντήχησης για χώρους από διάφορους κατασκευαστές χρησιμοποιώντας εμπειρικές μεθόδους. Μια πρόταση από τους Stephens και Bate είναι ο παρακάτω τύπος:

$$RT_{60} = r(0.012\sqrt[3]{V} + 0.107) \quad (7.11)$$

όπου:

$RT_{60}$ : ο χρόνος αντήχησης σε δευτερόλεπτα (sec)

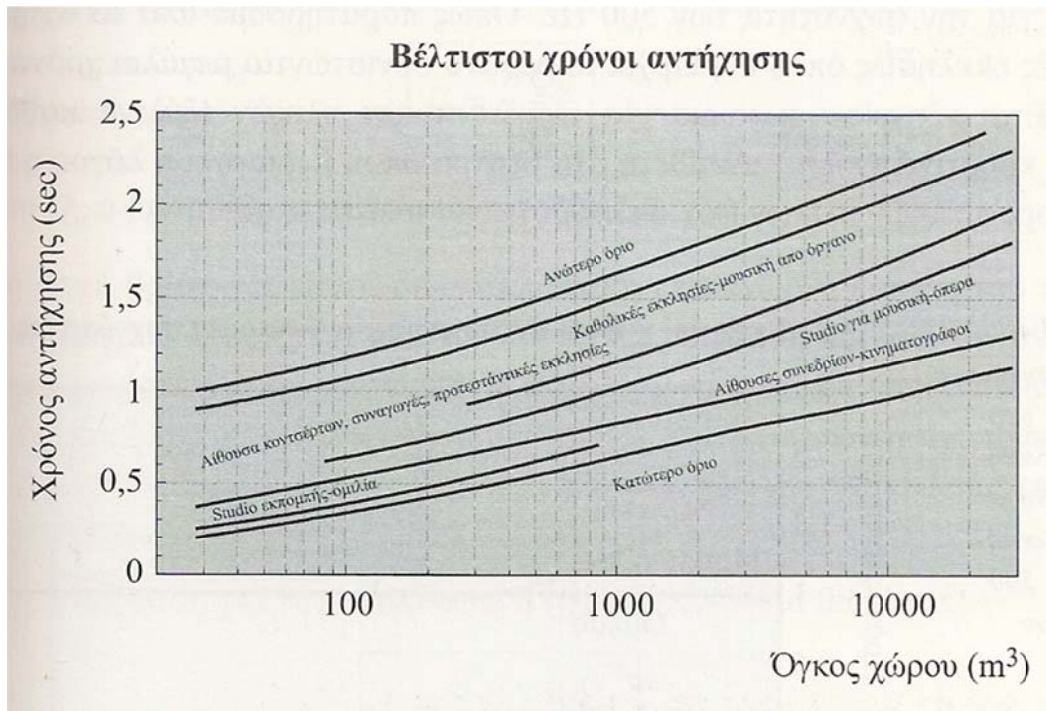
$V$ : ο όγκος του δωματίου σε κυβικά μέτρα ( $m^3$ )

$r = 4$  για λόγο

$r = 5$  για ορχήστρα

$r = 6$  για χορωδία

Μία άλλη μέθοδος χρησιμοποιεί γραφήματα για τον υπολογισμό του βέλτιστου χρόνου αντήχησης σε συνάρτηση με τον όγκο, αναλόγως με τη χρήση, όπως φαίνεται στο σχήμα 7.5 που ακολουθεί.



Σχήμα 7.5 Βέλτιστοι χρόνοι αντήχησης συναρτήσει του όγκου και της χρήσης του χώρου

### 7.9 Ηχητική στάθμη πίεσης του αντηχητικού πεδίου

Στους μεγάλους χώρους εφαρμόζονται οι αρχές της γεωμετρικής ακουστικής. Συνοπτικά, ο ήχος θεωρείται ως μια ακτίνα που διαδίδεται μέσα στο δωμάτιο και καθώς προσπίπτει σε μια επιφάνεια, ένα μέρος της αρχικής της ενέργειας ανακλάται και ένα απορροφάται. Επειδή το δωμάτιο είναι μεγάλο, θεωρείται ότι υπάρχει ομοιόμορφη κατανομή της ηχητικής ενέργειας και τυχαία διεύθυνση της διάδοσης του ήχου. Οι αρχές της στατιστικής χρησιμοποιούνται για να υπολογιστούν οι τύποι που χρησιμεύουν στην περιγραφή ενός τέτοιου δωματίου.

Είναι σημαντικό να μπορούμε να υπολογίσουμε τη στάθμη έντασης  $L_p$  μέσα σε ένα μεγάλο χώρο. Υπενθυμίζεται ότι για συνθήκες ελεύθερου πεδίου (free field) ισχύει ο νόμος του αντίστροφου τετραγώνου στη μεταβολή της στάθμης  $L_D$  και η εξίσωση που υπολογίζει τη στάθμη του ελεύθερου πεδίου:

$$L_D = L_W + 10 \log \frac{Q}{4\pi r^2} \quad (7.12)$$

Η εξίσωση που περιγράφει τη στάθμη ηχητικής πίεσης του αντηχητικού πεδίου μέσα σε ένα μεγάλο χώρο είναι:

$$L_R = L_W + 10 \log \frac{4}{S\bar{\alpha}} \quad (7.13)$$

Ο τύπος που δίνει τη συνολική ηχητική στάθμη πίεσης σε ένα μεγάλο χώρο προκύπτει συνδυάζοντας τους δύο παραπάνω τύπους:

$$L_T = L_W + 10 \log \left( \frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{S\bar{a}} \right) \quad (7.14)$$

όπου:

$L_W$ : η στάθμη ηχητικής ισχύος της πηγής

$r$ : η απόσταση από την πηγή σε  $m$

$Q$ : ο παράγοντας κατευθυντικότητας της ηχητικής πηγής ( $Q = 1$  για παντοκατευθυντική πηγή)

$\bar{a}$ : ο μέσος συντελεστής απορρόφησης του χώρου

$S\bar{a}$ : η απορρόφηση του χώρου

Επίσης ορίζεται και η ποσότητα  $R$  που ονομάζεται σταθερά δωματίου (Room Constant), η οποία εξαρτάται από την απορρόφηση του χώρου και δίδεται από τη σχέση:

$$R = \frac{S\bar{a}}{1 - \bar{a}} \quad (7.15)$$

### 7.10 Κρίσιμη απόσταση (Critical Distance) $D_C$

Βλέπουμε πως μέσα σε ένα κλειστό χώρο συνυπάρχουν δύο ηχητικά πεδία, το απευθείας (direct) με στάθμη  $L_D$  και το αντηχητικό (reverberant) με στάθμη  $L_R$ . Η συνολική στάθμη είναι το άθροισμα των δύο επιμέρους παραπάνω:

$$L_T = L_D + L_R \quad (7.16)$$

Κοντά στην ηχητική πηγή υπερισχύει το απευθείας πεδίο, ενώ μακριά από την πηγή το αντηχητικό. Σε κάποιο σημείο η στάθμη του απευθείας και του αντηχητικού πεδίου εξισώνονται. Με άλλα λόγια, η ολική στάθμη είναι  $3dB$  υψηλότερη από τη στάθμη του αντηχητικού (ή τη στάθμη του απευθείας). Η απόσταση αυτή ονομάζεται κρίσιμη απόσταση (critical distance)  $D_C$ . Μπορεί εύκολα να υπολογιστεί η απόσταση αυτή θεωρώντας το απευθείας ηχητικό πεδίο ίσο με το αντηχητικό, δηλαδή:

$$\frac{Q}{4\pi^2 D_C^2} = \frac{4}{S\bar{a}} \quad (7.17)$$

Λύνοντας τον παραπάνω τύπο ως προς  $D_C$  η κρίσιμη απόσταση δίνεται από την εξίσωση:

$$D_C = 0.141 \sqrt{QS\bar{a}} \quad (7.18)$$