

Ακουστική κλειστών χώρων

ακουστικά χαρακτηριστικά μιας αίθουσας

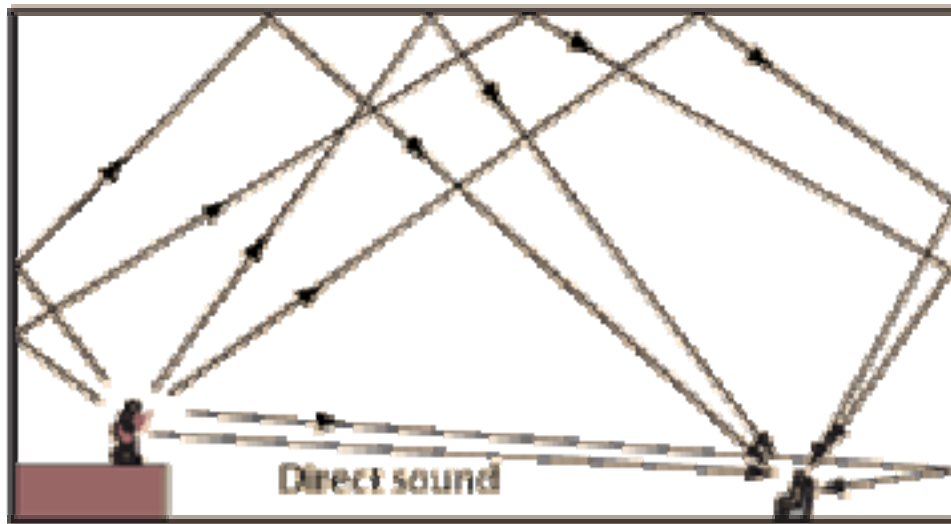
Πρέπει να ληφθούν υπόψη:

Ήσυχο περιβάλλον

Επαρκής ένταση ήχου σε κάθε σημείο της αίθουσας

Σωστή κατανομή των ήχων

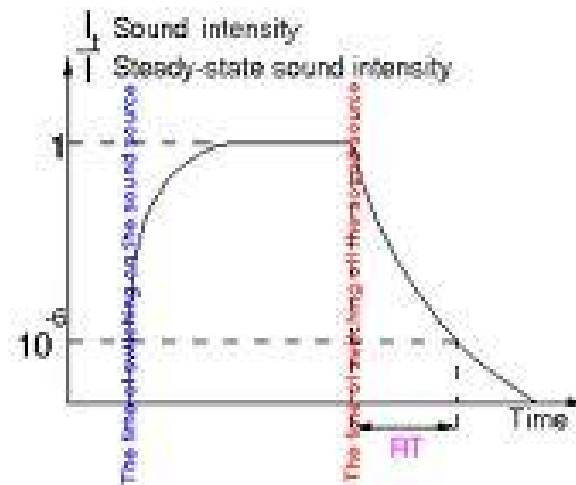
Κατάλληλη μίξη-διαχωρισμός διαδοχικών ήχων



Impulse Response



Ο ακροατής λαμβάνει πρώτα τον απευθείας ήχο. Έπειτα έρχονται οι πρώτες ανακλάσεις και ακόμα αργότερα φτάνει ο ήχος από πολλαπλές ανακλάσεις στους τοίχους της αίθουσας.



Φαινόμενο προβαδίσματος

Ο πρώτος ήχος που φτάνει χρονικά στο αυτί από μια πηγή αξιολογείται από τον εγκέφαλο ως ο πιο σημαντικός από όλους. Είναι θέμα επιβίωσης.

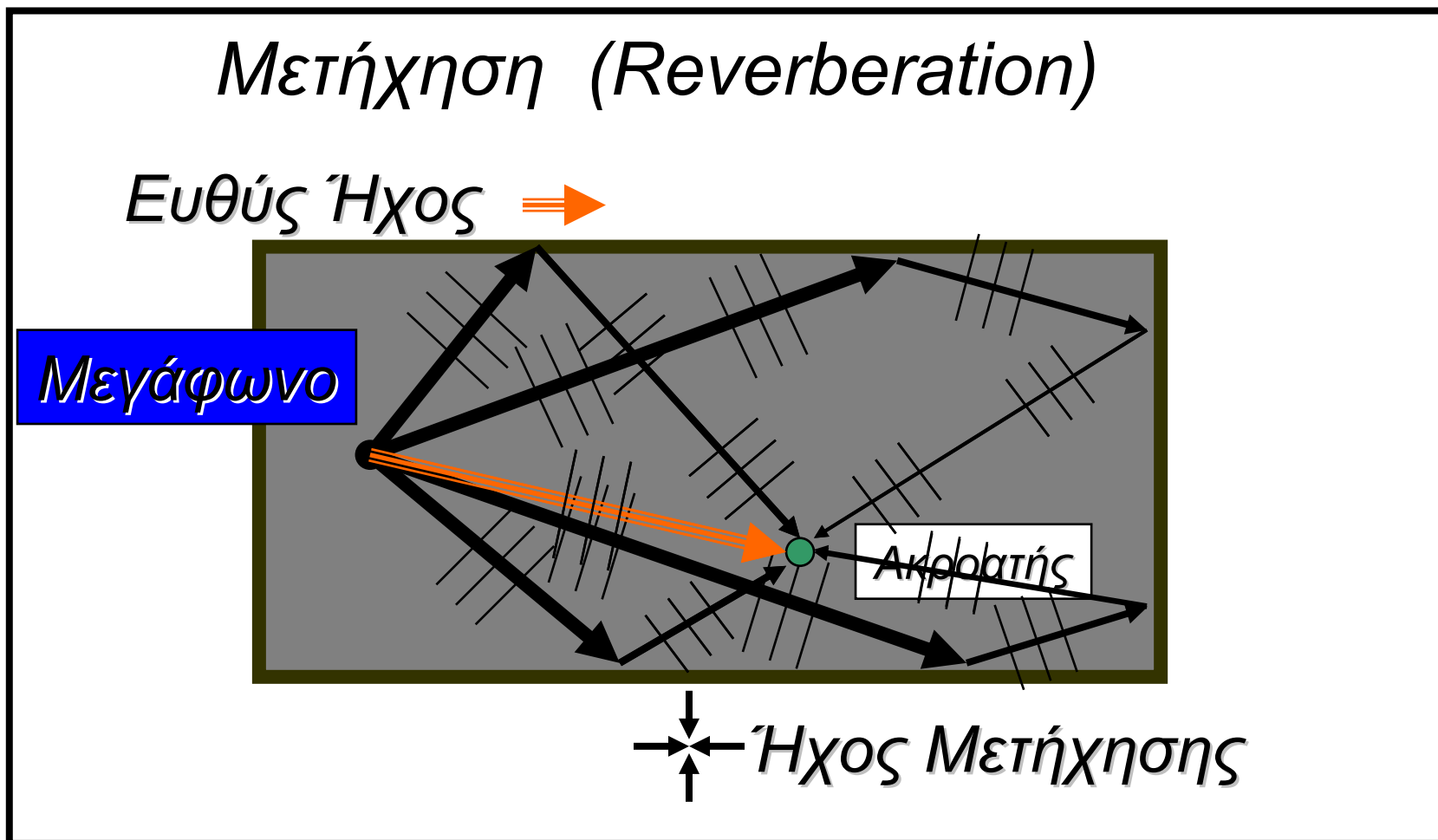
Ένα ανακλώμενο ηχητικό κύμα φτάνει αργότερα από το απευθείας κύμα από την πηγή. Ο εγκέφαλος λοιπόν χωρίζει τον λαμβανόμενο ήχο σε δύο κομμάτια. Τον ευθύ ήχο και τον έμμεσο που φτάνει λίγο αργότερα.

Ο εγκέφαλος χρησιμοποιεί τον ήχο που φτάνει στο αυτί τα πρώτα 1-2 ms από κάθε καινούργια ηχητική πηγή για να προσδιορίσει την κατεύθυνση στην οποία βρίσκεται η ηχητική πηγή.

Από τον ήχο που φτάνει αργότερα ο εγκέφαλος παίρνει στοιχεία για το μέγεθος και τη γεωμετρία του δωματίου καθώς και για την κατανομή των ηχητικών πηγών στο χώρο.

Τι είναι η μετήχηση;

Παρατεταμένη διάρκεια ήχου μετά το σταμάτημα της ηχητικής πηγής



Τι είναι ο χρόνος μετήχησης;

Είναι το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί από τη στιγμή που διακόπτεται ένας ήχος μέχρι τη στιγμή που η στάθμη έντασής του ελαττώνεται κατά 60db

Μπορεί να μετρηθεί απευθείας με μηχανήματα

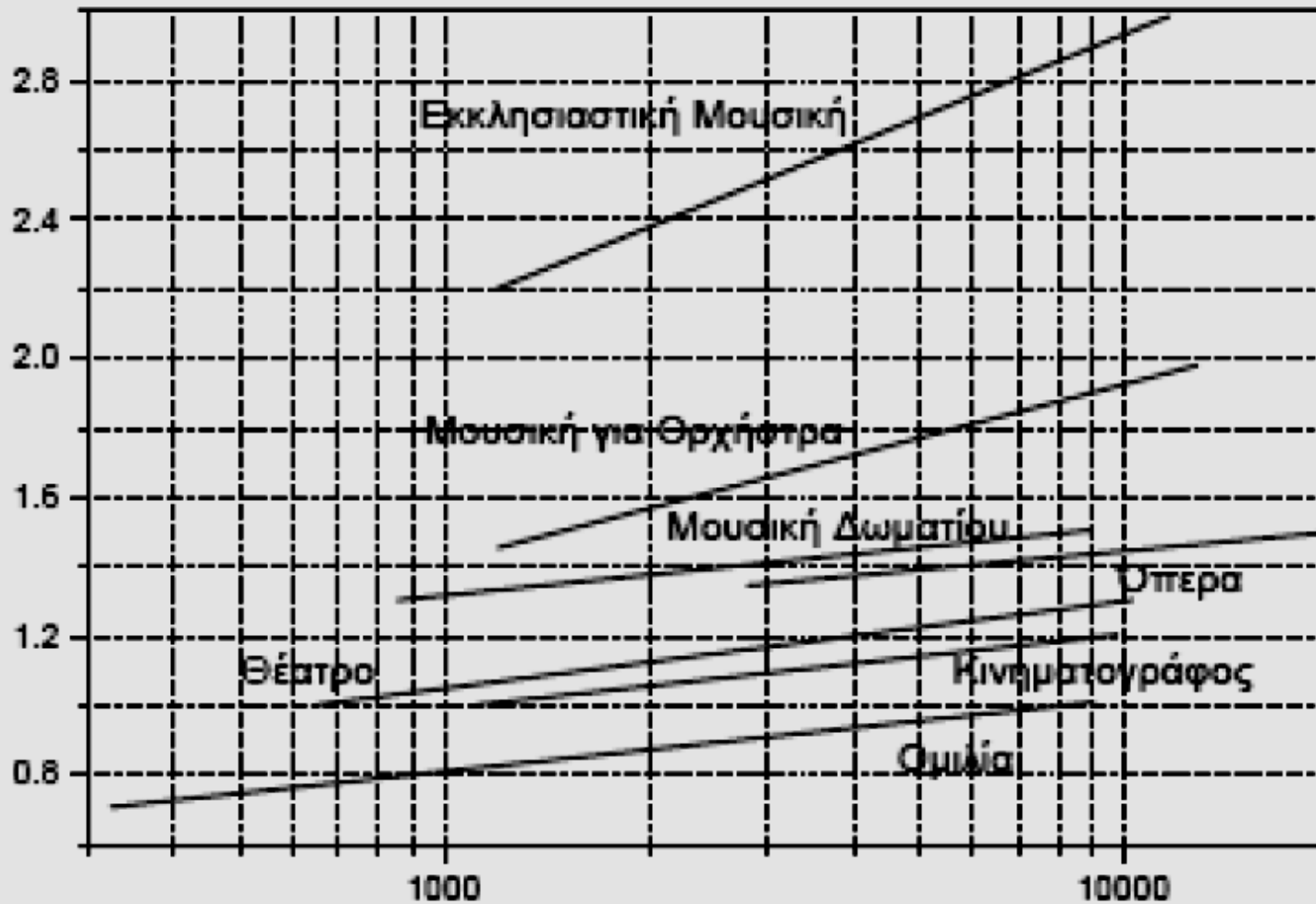
Μπορεί να υπολογιστεί από εμπειρικούς τύπους όπως ο τύπος Sabine

$$\tau_R = 0,161 \frac{V}{A} \text{ sec}$$

σε m³

σε m²

Χρόνος μετήχησης RT (sec)



Όγκος (m³) αίθουσας

Ορθογώνια αίθουσα έχει διαστάσεις 15 x 20 x 5 m. Οι τοίχοι είναι καλυμμένοι με σοβά που έχει συντελεστή απορρόφησης $\alpha_1=0,05$. Η αίθουσα προορίζεται διαλέξεις και είναι χωρητικότητας 100 ατόμων. Για την ακουστική μελέτη της αίθουσας απαιτούμε να λειτουργεί ικανοποιητικά (συντελεστής μετήχησης 0,9 και όταν είναι μισογεμάτη δηλαδή αν έχει μέσα 50 άτομα.

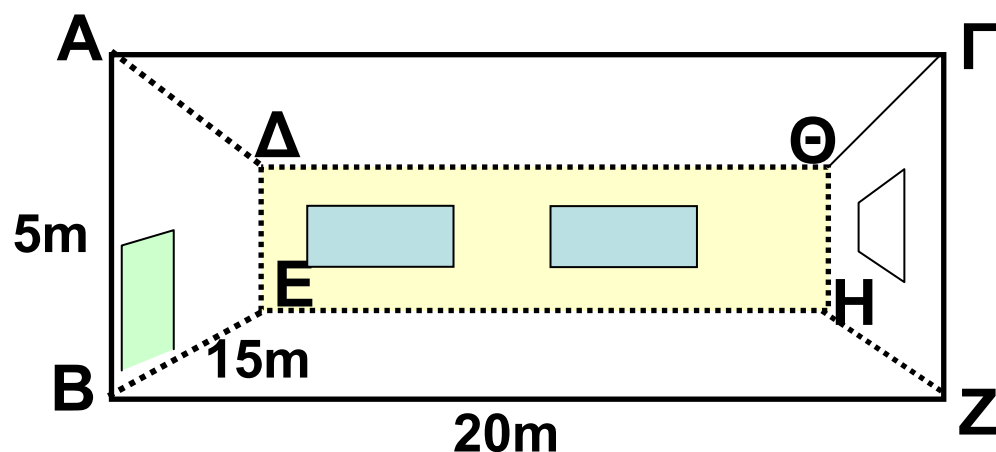
Θεωρήστε απορρόφηση $0,4\text{m}^2/\text{άτομο}$.

Στον τοίχο ΑΒΕΔ υπάρχει πόρτα 1 x 2 με συντελεστή απορρόφησης 0,08

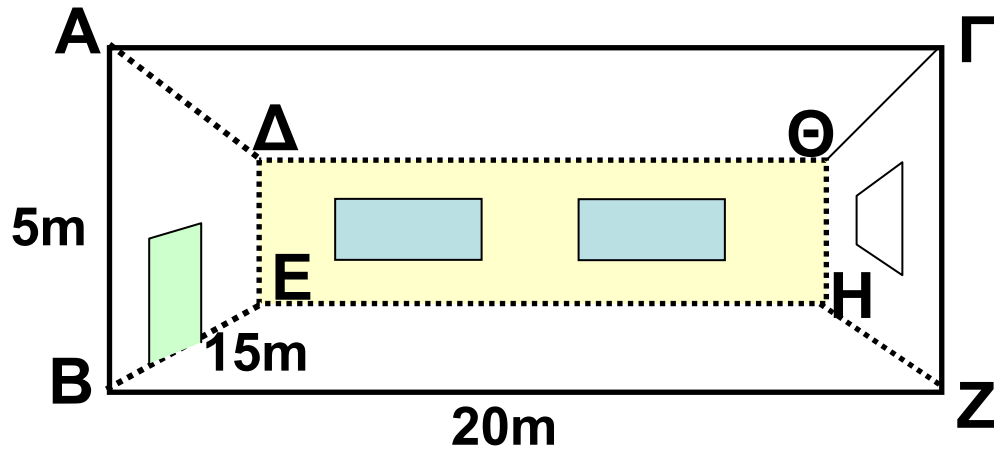
Στον τοίχο ΕΔΘΗ υπάρχουν 2 παράθυρα 2m^2 το καθένα που είναι ανοιχτά.

Στον τοίχο ΗΘΓΖ υπάρχει παράθυρο 2m^2 με $\alpha=0,01$

Στον τοίχο ΑΒΖΓ υπάρχει κουρτίνα 20m^2 με $\alpha=0,2$



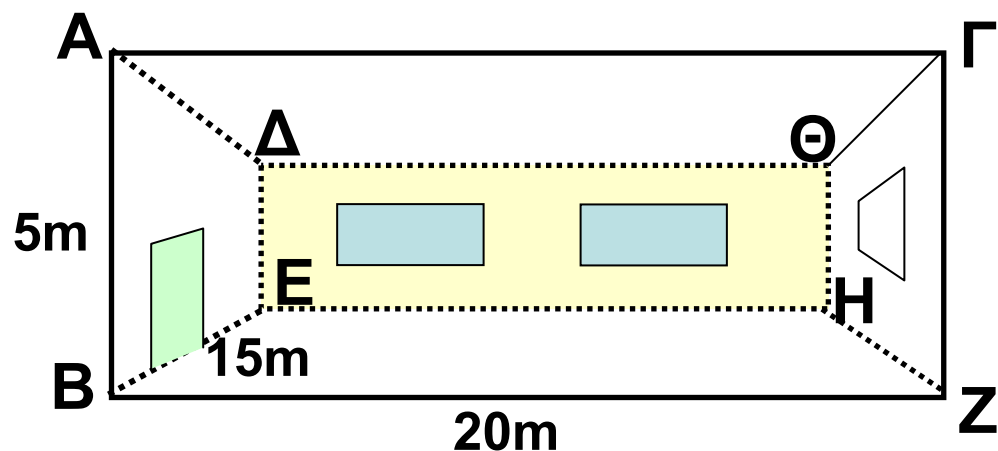
- α) Πόσος είναι ο χρόνος μετήχησης της αίθουσας;
β) Αν θέλουμε ο χρόνος μετήχησης της αίθουσας να είναι 0,9 ποιος πρέπει να είναι ο συντελεστής απορρόφησης υλικού με το οποίο πρέπει να επιστρώσουμε την οροφή;



Τύπος Sabine

$$\tau_R = 0,161 \frac{V}{A} \text{ sec}$$

$$A = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \alpha_3 S_3 + \alpha_4 S_4 + \dots$$



Τοίχος ΑΒΔΕ: $\alpha_{\tau_1} = 2 \times 0,08 + [(15 \times 5) - 2] 0,05 = 3,81 \text{m}^2$

Τοίχος ΗΘΓΖ: $\alpha_{\tau_2} = 2 \times 0,01 + [(15 \times 5) - 2] 0,05 = 3,67 \text{m}^2$

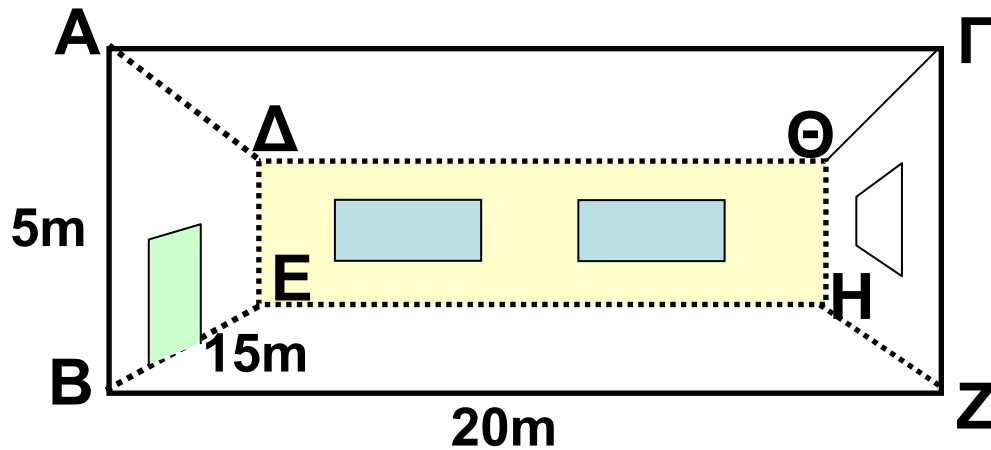
Τοίχος ΕΔΘΗ: $\alpha_{\tau_3} = 4 \times 1 + [(20 \times 5) - 4] 0,05 = 8,8 \text{m}^2$

Τοίχος ΑΒΖΓ: $\alpha_{\tau_4} = 20 \times 0,2 + [(20 \times 5) - 20] 0,05 = 8 \text{m}^2$

Οροφή ΑΔΘΓ: $\alpha_{\tau_5} = (20 \times 15) 0,05 = 15 \text{m}^2$

Πάτωμα ΒΕΗΖ: $\alpha_{\tau_6} = (20 \times 15) 0,05 = 15 \text{m}^2$

Ακροατήριο: $\alpha_{\tau_7} = 50 \times 0,4 = 20 \text{m}^2$



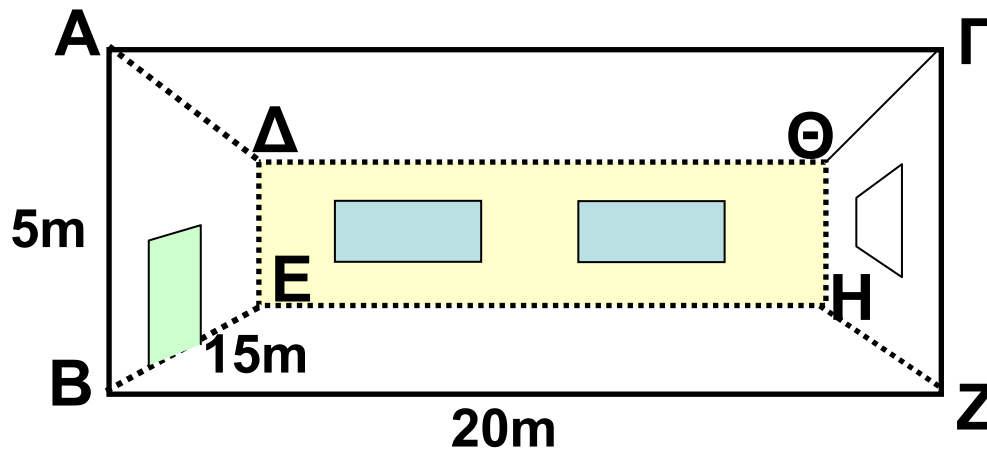
$$\tau_R = 0,161 \frac{V}{A} \text{ sec}$$

Άρα $A = \alpha_{T1} + \alpha_{T2} + \alpha_{T3} + \alpha_{T4} + \alpha_{T5} + \alpha_{T6} + \alpha_{T7} = 74,28 \text{ m}^2$

$$V = 20 \times 15 \times 5 = 1500 \text{ m}^3$$

Και ο χρόνος μετήχησης είναι: $\tau_R = 0,161 \frac{1500}{74,28} = 3,25 \text{ sec}$

Για αίθουσα διαλέξεων ο χρόνος αυτός είναι απαράδεκτος.



$$\tau_R = 0,161 \frac{V}{A} \text{ sec}$$

$$A = \alpha_{T1} + \alpha_{T2} + \alpha_{T3} + \alpha_{T4} + \alpha_{T5} + \alpha_{T6} + \alpha_{T7} = 74,28 \text{ m}^2$$

$$V = 20 \times 15 \times 5 = 1500 \text{ m}^3$$

$$\text{Οροφή } A\Delta\Theta\Gamma: \alpha_{T5} = (20 \times 15) \alpha = 300\alpha$$

$$\text{Και ο χρόνος μετήχησης είναι: } \tau_R = 0,161 \frac{1500}{59,28 + 300a} \Rightarrow$$

$$\dots \Rightarrow a = 0,7$$

Ένα από τα σημαντικότερα από ακουστικής άποψης χαρακτηριστικά μιας αίθουσας είναι ο **χρόνος μετήχησης**

Άλλα χαρακτηριστικά που καθορίζουν την ακουστική συμπεριφορά μιας αίθουσας

Ηχώ

Ανεπιθύμητη

Δυσκολεύει την επικοινωνία και αλλοιώνει το ρυθμό της μουσικής

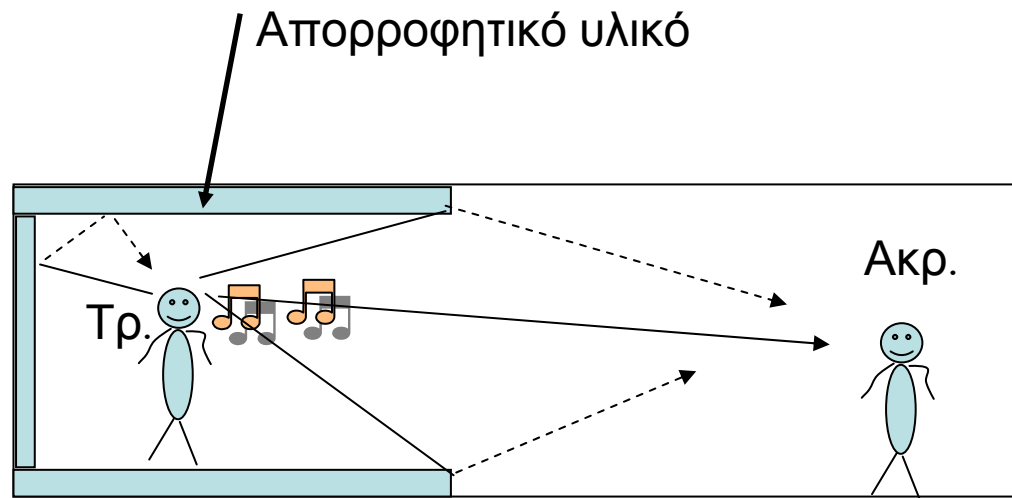
Κρίσιμος χρόνος για να αντιληφθεί το αυτί δύο ξεχωριστούς ήχους: $0,1s = 100ms$

Πρέπει να γίνεται προσπάθεια ώστε οι ήχοι που προκύπτουν από ανάκλαση και φτάνουν σε χρόνους μεγαλύτερους από $100ms$ στο αυτί του ακροατή να έχουν πολύ μικρότερη ένταση από τον απευθείας ήχο.

Ακουστικά πάνελ οροφής

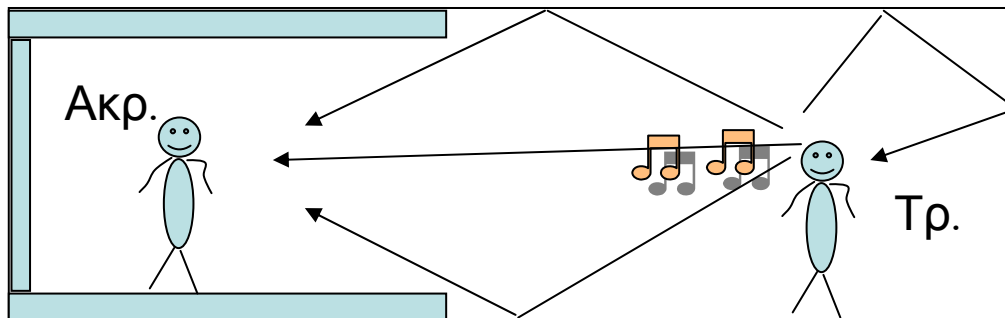


Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εξαλείψουν την ηχώ



Ίδιος χρόνος μετήχησης
αλλά διαφορετική
ακουστική συμπεριφορά

Ο τραγουδιστής δεν ακούει
τη φωνή του.
Ο ακροατής ακούει χαμηλή
ένταση ήχου



Ο τραγουδιστής ευχαριστείται
το τραγούδι του.
Ο ακροατής ακούει κανονική
ένταση ήχου

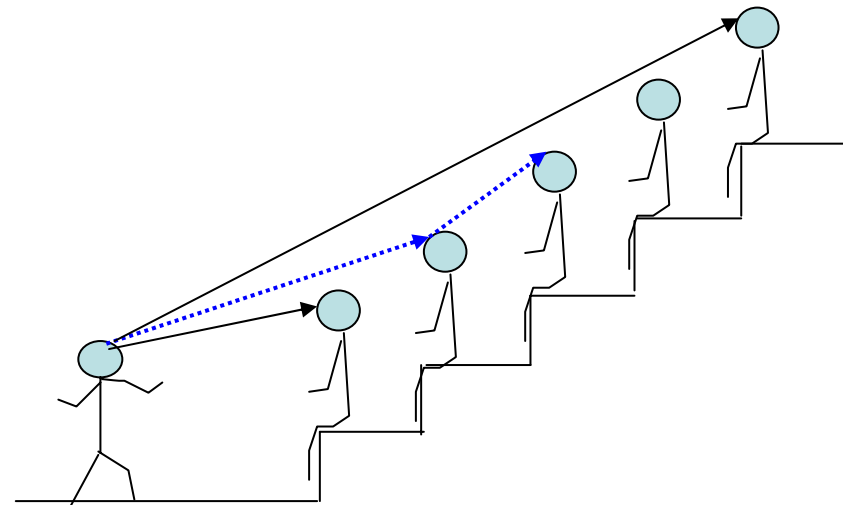
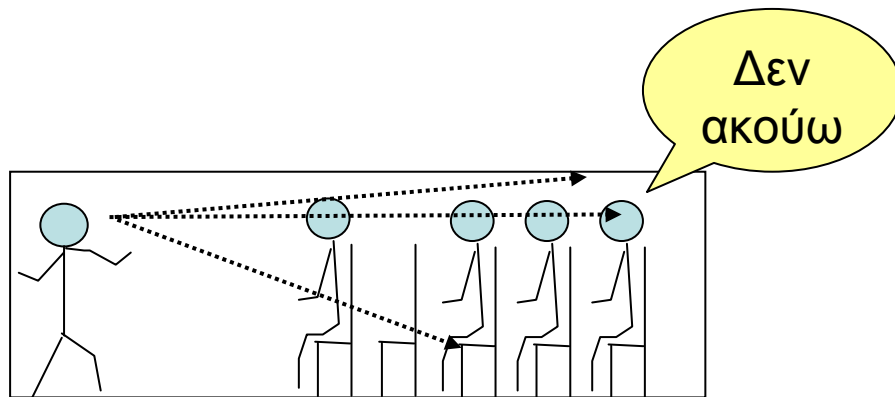
Άλλα χαρακτηριστικά που καθορίζουν την ακουστική συμπεριφορά μιας αίθουσας

Οικειότητα. Ένα υποκειμενικό χαρακτηριστικό που εκφράζει την αίσθηση να νοιώθεις κοντά σε αυτά που γίνονται στην σκηνή.

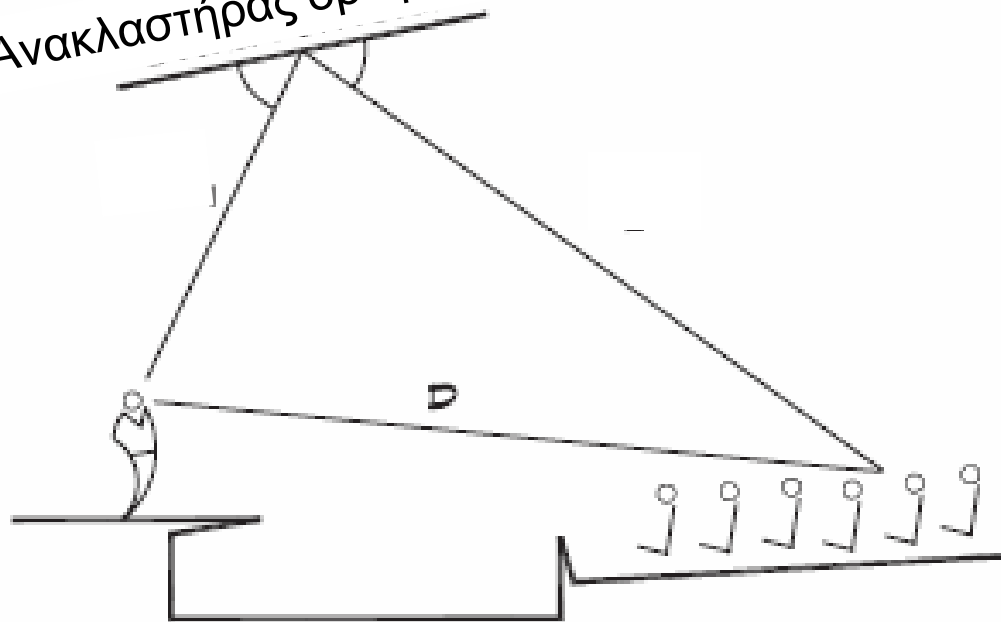
Αντικειμενικά προσδιορίζεται από τη χρονική διαφορά άφιξης του απευθείας ήχου και του ήχου από τις πρώτες ανακλάσεις. Χρόνοι μικρότεροι των 30ms είναι καλοί.

Άλλα χαρακτηριστικά που καθορίζουν την ακουστική συμπεριφορά μιας αίθουσας

Καλή (το τέλειο είναι ομοιόμορφη) κατανομή της έντασης του ήχου σε όλη την αίθουσα.



Ανακλαστήρας οροφής





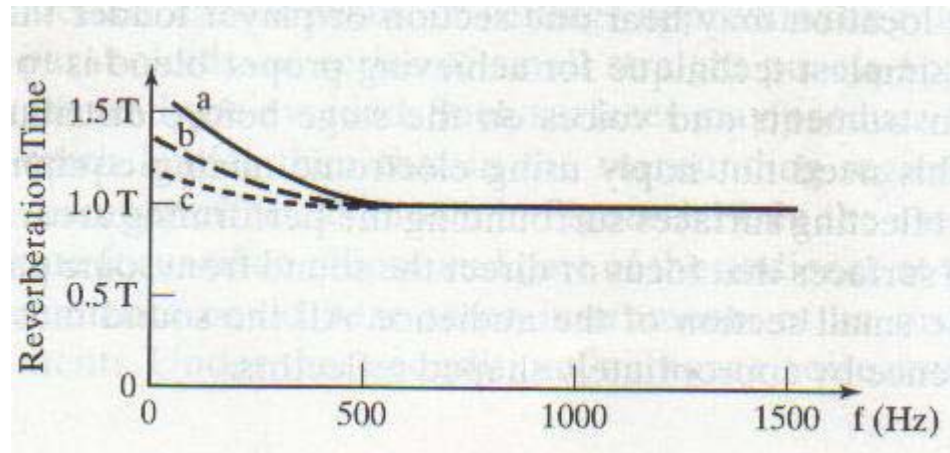
Minneapolis Orchestra Hall

Κατασκευές για διάχυση του ήχου

Άλλα χαρακτηριστικά που καθορίζουν την ακουστική συμπεριφορά μιας αίθουσας

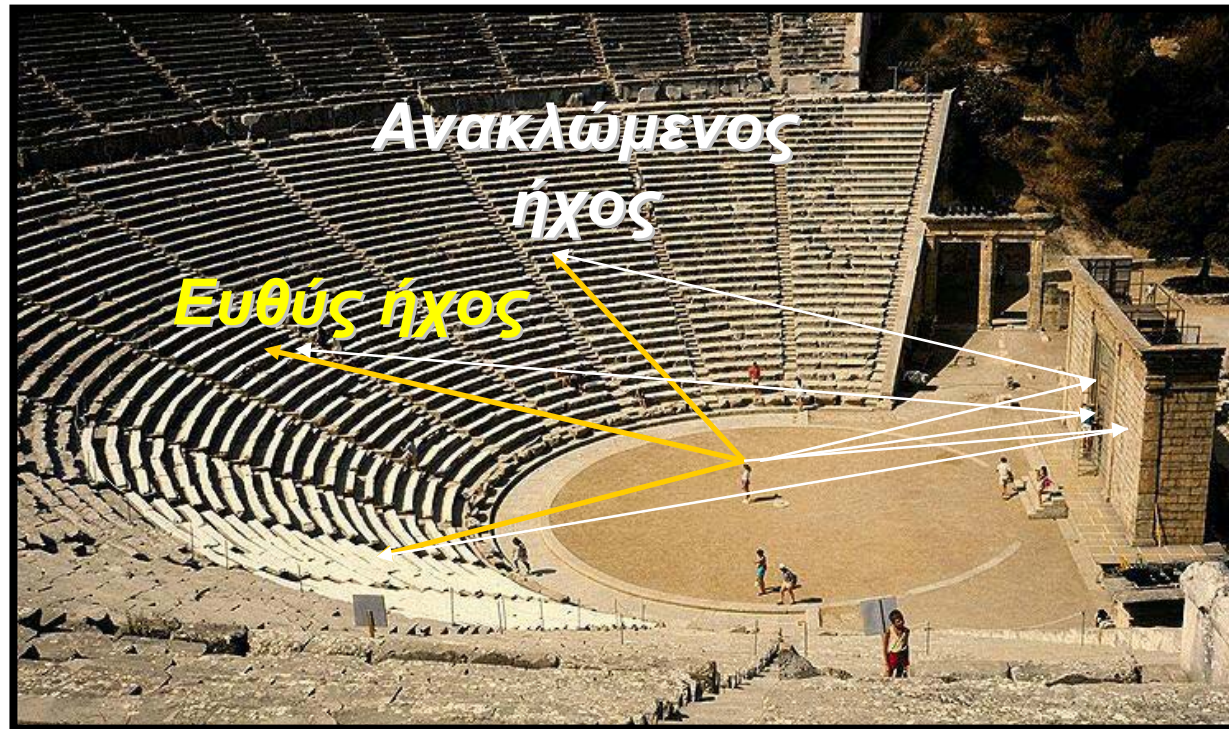
Ζεστασιά.

Μεγαλύτερη μετήχηση στις χαμηλές (κάτω από 500Hz) σε σχέση με τις υψηλές συχνότητες.



Η εξαιρετική ακουστική για την οποία το Αρχαίο Θέατρο της Επιδαύρου είναι διάσημο, οφείλεται στα πέτρινα εδωλιά του, καθώς το σχήμα και η διάταξή τους είναι ιδανικά για το φιλτράρισμα των θορύβων χαμηλής συχνότητας

Ακουστική ελληνικού θεάτρου



Ο Νίκο Νετκλέρκ και η Σίντι Ντεκίζερ του Ινστιτούτου Τεχνολογίας της Τζόρτζια, αποφάσισαν να διερευνήσουν τη θαυμάσια ακουστική της Επιδαύρου.

Όπως αναφέρει το [Nature.com](https://www.nature.com), οι υπολογισμοί τους έδειξαν ότι οι κλιμακωτές θέσεις του θεάτρου λειτουργούν ως ηχητικό φίλτρο, καθώς το σχήμα τους είναι ιδανικό για να καταστέλλει τους ήχους χαμηλής συχνότητας, κύριο συστατικό του θορύβου.

Η διάταξη των θέσεων, που θυμίζει τα πάνελ ηχομόνωσης σε σχήμα αβγοθήκης, φιλτράρει τις συχνότητες κάτω από 500 Hertz, όπως το μουρμούρισμα του κοινού και το θρόισμα των φύλλων.



Αν έχουμε μεγάλη αίθουσα και η απορρόφηση του αέρα είναι σημαντική ο χρόνος μετήχησης δίνεται από τη σχέση:

$$\tau_R = 0,161 \frac{V}{A + 4mV} (SI)$$

Όπου:

V: Όγκος του δωματίου

A: Συνολική απορροφητική ικανότητα χώρου

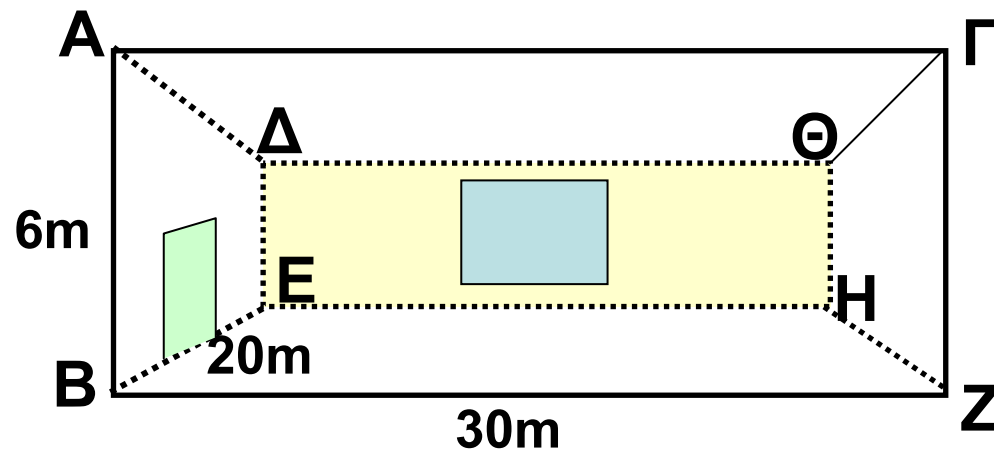
m: Συντελεστής εξασθένησης ο οποίος εξαρτάται από:
Τη σχετική υγρασία του χώρου
Τη θερμοκρασία

π.χ. για 20°C και 70% υγρασία $m=0,021$
30% υγρασία $m=0,038$

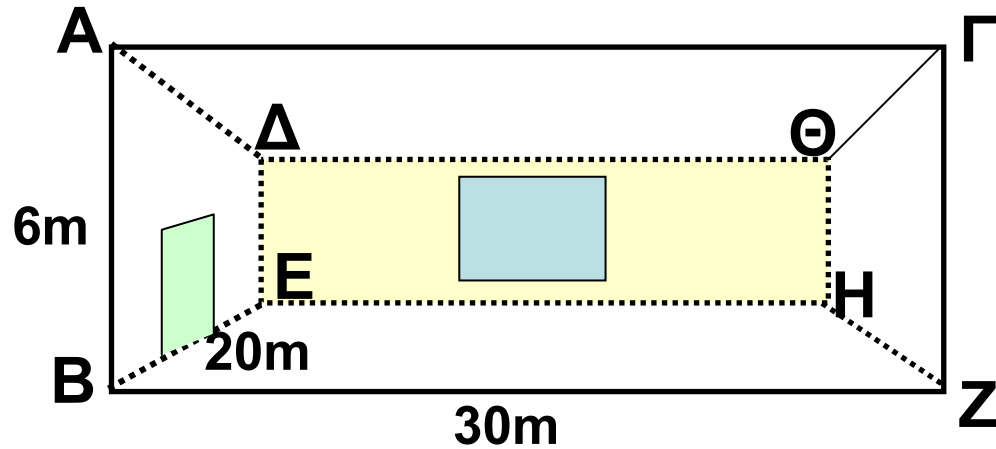
Μεγάλο αμφιθέατρο με διαστάσεις 30 x 20 x 6 m θα χρησιμοποιηθεί για συναυλίες. Οι τοίχοι είναι καλυμμένοι με σοβά που έχει συντελεστή απορρόφησης $\alpha_1=0,05$. Το πάτωμα είναι από λείο τσιμέντο με $\alpha_2=0,014$ και η οροφή από απλισμένο σκυρόδεμα με $\alpha_3=0,026$. Κάθε μακρύς τοίχος έχει κρεμασμένες κουρτίνες 20m^2 με $\alpha_4=0,35$. Τέλος στον τοίχο ΑΒΕΔ υπάρχει ξύλινη πόρτα 2 x 3 με $\alpha_5=0,08$. Επειδή η αίθουσα είναι μεγάλη θα λάβουμε υπόψη και την απορρόφηση του αέρα θεωρώντας έναν συντελεστή εξασθένησης $m=0,013$.

α) Βρείτε το χρόνο μετήχησης

β) Για το δάπεδο υπάρχουν απορροφητικά πλακάκια με $\alpha=0,5$ αλλά είναι αρκετά ακριβά. Ποιο το ελάχιστο εμβαδό που θα ντύσω ώστε ο χρόνος μετήχησης να γίνει τουλάχιστον 1,5s.



$$\tau_R = 0,161 \frac{V}{A + 4mV} (SI)$$



Τοίχος ΑΒΕΔ: $\alpha_{\tau_1} = 6 \times 0,08 + [(20 \times 6) - 6] 0,05 = 6,2\text{m}^2$

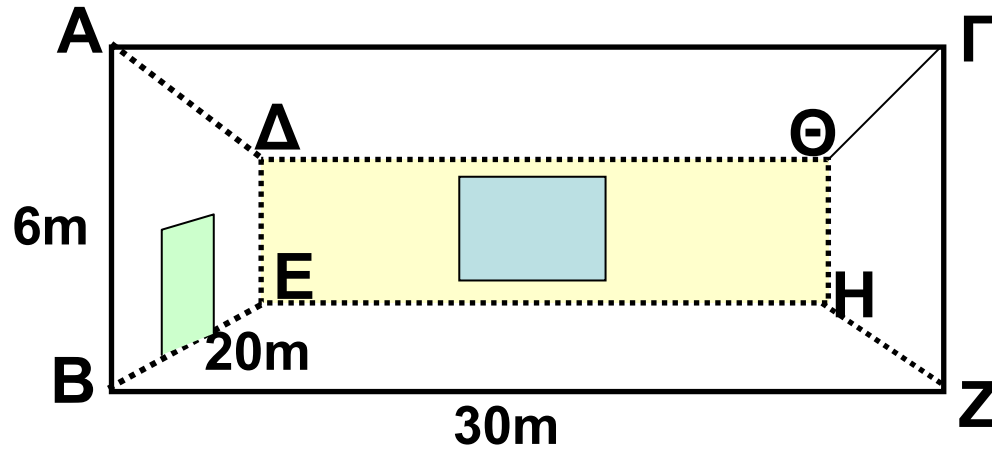
Τοίχος ΗΘΓΖ: $\alpha_{\tau_2} = (20 \times 6) 0,05 = 6\text{m}^2$

Τοίχος ΕΔΘΗ: $\alpha_{\tau_3} = 20 \times 0,35 + [(30 \times 6) - 20] 0,05 = 15\text{m}^2$

Τοίχος ΑΒΖΓ: $\alpha_{\tau_4} = 20 \times 0,35 + [(30 \times 6) - 20] 0,05 = 15\text{m}^2$

Οροφή ΑΔΘΓ: $\alpha_{\tau_5} = (30 \times 20) 0,026 = 15,6\text{m}^2$

Πάτωμα ΒΕΗΖ: $\alpha_{\tau_6} = (30 \times 20) 0,014 = 8,4\text{m}^2$



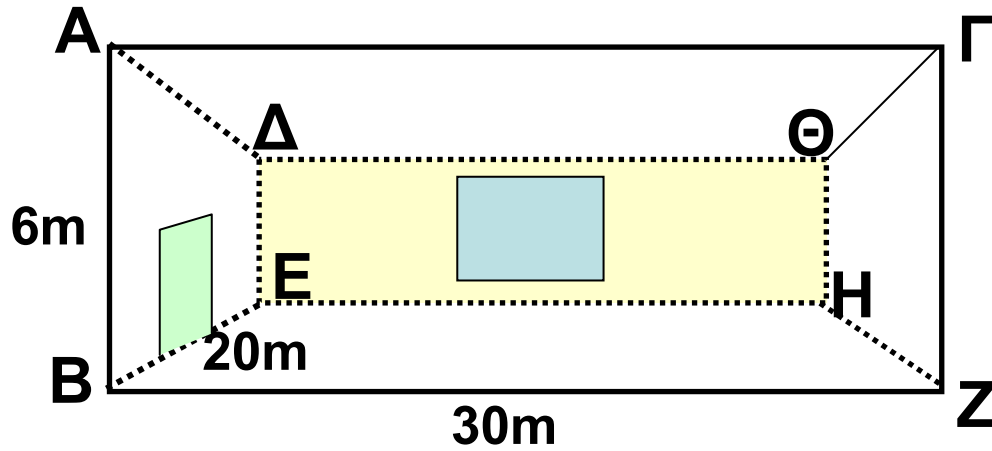
$$\tau_R = 0,161 \frac{V}{A + 4mV} (SI)$$

Άρα $A = \alpha_{T1} + \alpha_{T2} + \alpha_{T3} + \alpha_{T4} + \alpha_{T5} + \alpha_{T6} = 66,2 \text{ m}^2$

$$V = 30 \times 20 \times 6 = 3600 \text{ m}^3$$

Και ο χρόνος μετήχησης είναι: $\tau_R = 0,161 \frac{3600}{66,2 + 4 \cdot 0,013 \cdot 3600} = 2,3 \text{ sec}$

Είναι αρκετά μεγάλος.



$$\tau_R = 0,161 \frac{V}{A + 4mV} (SI)$$

$$A = \alpha_{T1} + \alpha_{T2} + \alpha_{T3} + \alpha_{T4} + \alpha_{T5} + \alpha_{T6} = 64,2m^2$$

$$V = 30 \times 20 \times 6 = 3600m^3$$

$$\text{Πάτωμα BEHZ: } \alpha_{T6} = \varepsilon \times 0,5 + [(30 \times 20) - \varepsilon] \cdot 0,014$$

57,8m²

Όπου ε το εμβαδόν του πατώματος που θα στρωθεί με πλακάκια

Και ο χρόνος μετήχησης είναι:

$$\tau_R = 0,161 \frac{3600}{57,8 + \varepsilon \cdot 0,5 + (30 \cdot 20 - \varepsilon) \cdot 0,014 + 4 \cdot 0,013 \cdot 3600} \Rightarrow$$

$\tau_R \rightarrow 1,5$

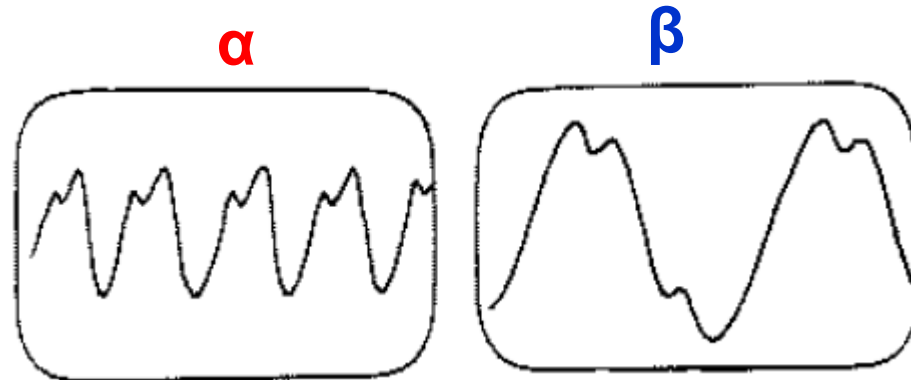
$$\dots \Rightarrow \varepsilon = 274m^2$$

Αρκεί να στρώσω το μισό πάτωμα περίπου

Μερικές ερωτήσεις για επανάληψη

1) Ποιος από τους ήχους που φαίνονται παρακάτω στην οθόνη ενός παλμογράφου έχει μεγαλύτερο ύψος (είναι δηλαδή οξύτερος);

α



2) Ποιος από τους δύο ήχους είναι δυνατότερος;

β

3) Μια τραγουδίστρια τραγουδά μια νότα με οξύ ήχο και έπειτα μια χαμηλή νότα. Σε ποια από τις δύο νότες οι φωνητικές χορδές της πάλλονται γρηγορότερα;

Οξύ ήχο

4) Σε ποια από τις δύο νότες όταν τις ακούς το τύμπανό σου ταλαντώνεται γρηγορότερα;

Οξύ ήχο

5) Γιατί ονομάζουν τη Σελήνη σιωπηλό πλανήτη;

Υπόδειξη: ο ήχος δεν διαδίδεται στο κενό

6) Με ποιο τρόπο μπορείτε να εκτιμήσετε την απόστασή σας από μια καταιγίδα;

Μετρήστε με το ρολόι το χρόνο από τη στιγμή που βλέπετε την αστραπή μέχρι να ακούσετε τη βροντή

7) Αν διπλασιάσουμε τη συχνότητα ενός ήχου τι παθαίνει η ταχύτητά του;

Δε θα αλλάξει

8) Αν διπλασιάσουμε τη συχνότητα ενός ήχου τι παθαίνει το μήκος κύματός του;

Θα γίνει το μισό

9) Ένας άνθρωπος αρχίζει να ακούει στα 5 ντεσιμπέλ και ένας άλλος στα 15 ντεσιμπέλ. Ποιος έχει καλύτερη ακοή;

Αυτός που ακούει από τα 5db

10) Πόσες φορές χαμηλότερη είναι η ένταση των ήχων που ακούει ο άνθρωπος με την καλύτερη ακοή;

10 φορές

11) Σε ποιο χώρο θα άκουγες καλύτερα τη μουσική ενός κιθαρίστα σε ένα δωμάτιο ή στο υπαιθρο και γιατί;

Σε δωμάτιο. Πιο πλούσιος ήχος λόγω μετήχησης.

12) Είναι καλή ιδέα να κρεμάσουμε παχιές κουρτίνες στους τοίχους ενός δωματίου που προορίζεται για διάβασμα και ήσυχες συζητήσεις; Γιατί ναι ή γιατί όχι;

Ναι..... απορρόφηση..... δεν μεταδίδονται οι ψίθυροι

ΤΕΛΟΣ