

## Contents

Ακουστική πίεση .....	1
phon .....	3
Lp και SEL.....	4
Καμπύλες Στάθμισης A, C και Z (Weighting Curves) .....	5
Ηχεία Lw και Lp .....	8
Νόμος της Μάζας (για κάθετη και τυχαία πρόσπτωση) .....	10
Κρίσιμη Συχνότητα (Critical Frequency, $f_c$ ) .....	11
Το Φαινόμενο του Συντονισμού (Resonance) .....	14
Σύνοψη: Παράγοντες που επηρεάζουν την ηχομονωτική συμπεριφορά των υλικών .....	17
Υπολογισμός Δείκτη Ηχομείωσης Σύνθετων Επιφανειών.....	21

## Ακουστική πίεση

### ✓ 1. Ορισμός στιγμιαίας πίεσης

Η συνολική πίεση στο σημείο και στη χρονική στιγμή  $t$ :

$$p(t) = p_0 + p'(t)$$

όπου:

- $p(t)$ = συνολική στιγμιαία πίεση
- $p_0$ = ατμοσφαιρική (στατική) πίεση
- $p'(t)$ = ακουστική πίεση (ταλαντούμενη συνιστώσα γύρω από το  $p_0$ )

Συχνά, όταν μιλάμε μόνο για τον ήχο, χρησιμοποιούμε:

$$p'(t) = p(t) - p_0$$

---

### ✓ 2. Μέση τιμή της ακουστικής πίεσης

$$\langle p'(t) \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T p'(t) dt$$

Για περιοδικά ή τυχαία ηχητικά σήματα, ισχύει συνήθως:

$$\langle p'(t) \rangle \approx 0$$

γιατί το ηχητικό κύμα ταλαντώνεται συμμετρικά γύρω από το μηδέν.

---

### ✓ 3. Μέση τιμή του τετραγώνου της ακουστικής πίεσης (Mean Square Pressure)

$$\langle p'^2(t) \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T p'^2(t) dt$$

---

### ✓ 4. RMS ακουστική πίεση (Root Mean Square Pressure)

$$p_{\text{RMS}} = \sqrt{\langle p'^2(t) \rangle}$$

Αυτή είναι η **σημαντικότερη ποσότητα στην ακουστική**, γιατί από αυτήν υπολογίζονται τα **dB (SPL)**.

Για ημιτονοειδές κύμα  $p'(t) = p_{\text{peak}} \sin(\omega t)$ :

$$p_{\text{RMS}} = \frac{p_{\text{peak}}}{\sqrt{2}}$$

---

### ✓ 5. Σχόλιο – Τι σημαίνουν φυσικά

#### Μέγεθος Φυσική σημασία

$p_0$  Η σταθερή πίεση του αέρα ( $\approx 101325$  Pa)

$p'(t)$  Η πραγματική «ηχητική διαταραχή» στον αέρα

$\langle p'(t) \rangle$  Μηδενίζεται — δεν δίνει πληροφορία για την ένταση

$\langle p'^2(t) \rangle$  Μετρά την *ενέργεια* του ήχου

$p_{\text{RMS}}$  Η ποσότητα που σχετίζεται με το *πόσο δυνατά ακούμε*

## phon

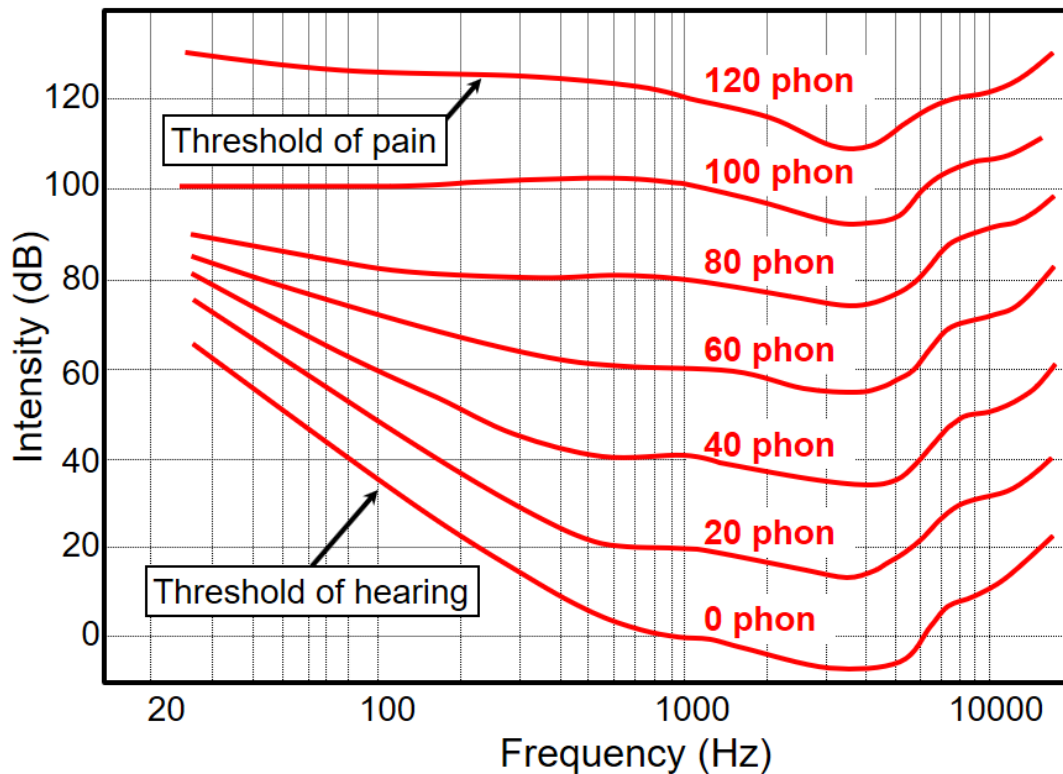
### ✦ Ορισμός του phon

Το phon είναι μονάδα μέτρησης της υποκειμενικής στάθμης ακουστότητας και βασίζεται στην ανθρώπινη αντίληψη έντασης. Ορίζεται έτσι ώστε ένας ήχος να έχει **N phon** όταν γίνεται αντιληπτός από έναν μέσο ακροατή **εξίσου δυνατός** με έναν **καθαρό ημιτονοειδή τόνο 1 kHz** που έχει **στάθμη N dB SPL**.

Δηλαδή:

- 1 kHz → phon = dB SPL
- αλλά σε άλλες συχνότητες → phon ≠ dB SPL, επειδή το αυτί δεν έχει την ίδια ευαισθησία σε όλο το φάσμα.

Figure 1.21 from [Müller, FMP, Springer 2015]



### ✦ Τι σημαίνει στην πράξη

- Η κλίμακα phon βασίζεται στις **καμπύλες ίσης ακουστότητας** (ISO 226).
- Δύο ήχοι σε διαφορετικές συχνότητες έχουν **ίσα phon** όταν «ακουγονται εξίσου δυνατά» — ακόμη κι αν έχουν **διαφορετικά dB SPL**.

- Έτσι, το phon είναι **αντιληπτικό μέγεθος (psychoacoustic)**, σε αντίθεση με το dB SPL που είναι **φυσικό μέγεθος (objective)**.

---

### ✦ Παράδειγμα

Αν ένας τόνος:

- στα **1 kHz** ακούγεται άνετα στα **40 dB SPL**, τότε έχει **40 phon**
- στα **100 Hz**, για να ακουστεί **εξίσου δυνατά**, μπορεί να χρειάζεται π.χ. **60 dB SPL**, άρα:
  - **100 Hz → 60 dB SPL → 40 phon**

Αντίστοιχα, σε υψηλές συχνότητες τα dB για ίδια phon μπορεί να είναι λιγότερα ή περισσότερα, ανάλογα με την καμπύλη ευαισθησίας.

## L<sub>p</sub> και SEL

### ✓ 1) Στάθμη Ηχητικής Πίεσης L<sub>p</sub>

$$L_p = 20 \log_{10} \left( \frac{p_{\text{RMS}}}{p_{\text{ref}}} \right)$$

όπου

$p_{\text{RMS}}$ : RMS ακουστική πίεση σε Pascal

$p_{\text{ref}}$ : πίεση αναφοράς, στον αέρα  $p_{\text{ref}} = 20 \mu\text{P}$

#### Ορισμός – Σημασία:

Η στάθμη ηχητικής πίεσης  $L_p$  εκφράζει πόσο δυνατός είναι ένας ήχος, συγκρίνοντας την RMS ακουστική πίεση με την πίεση αναφοράς. Είναι λογαριθμική ποσότητα (σε dB SPL), επειδή και το αυτί αντιλαμβάνεται λογαριθμικά τις μεταβολές της έντασης.

---

### ✓ 2) Ηχητική Έκθεση E

$$E = \int_{t_1}^{t_2} p'^2(t) dt$$

όπου

$p'(t)$ : στιγμιαία ακουστική πίεση

$t_1, t_2$ : χρονικά όρια παρατήρησης

#### Ορισμός – Σημασία:

Η ηχητική έκθεση  $E$  εκφράζει τη συνολική ηχητική ενέργεια που φτάνει στο αυτί μέσα στο χρονικό διάστημα  $[t_1, t_2]$ . Είναι κατάλληλο μέγεθος για παροδικούς ήχους (π.χ. κρότοι, πόρτες που χτυπούν, πυροβολισμοί).

### ✓ 3) Στάθμη Ηχητικής Έκθεσης (SEL ή $L_E$ )

$$SEL = L_{eq} + 10 \log_{10} \left( \frac{t_2 - t_1}{\Delta t} \right)$$

όπου

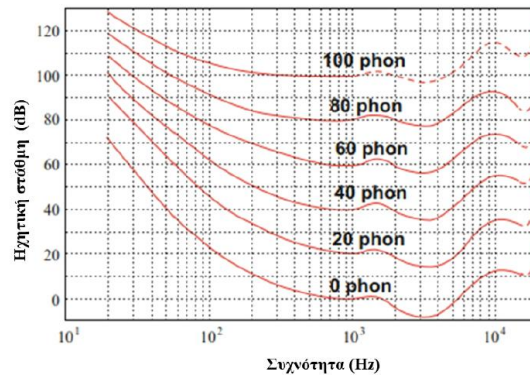
$L_{eq}$ : ισοδύναμη στάθμη πίεσης για την ίδια χρονική διάρκεια

$t_2 - t_1$ : διάρκεια του γεγονότος

$\Delta t$ : χρόνος αναφοράς (τυπικά 1 sec)

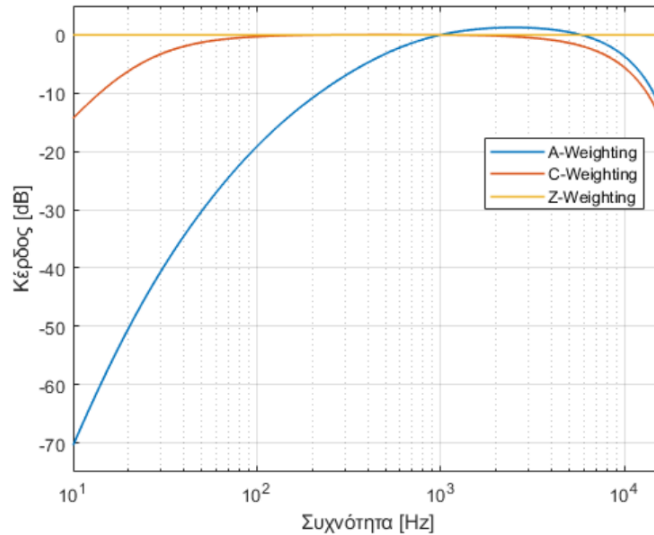
#### Ορισμός – Σημασία:

Το SEL συμπυκνώνει την ενέργεια ενός παροδικού ήχου οποιασδήποτε διάρκειας σε ένα δευτερόλεπτο αναφοράς, ώστε διαφορετικά γεγονότα να μπορούν να συγκριθούν δίκαια. Χρησιμοποιείται ιδιαίτερα σε μετρήσεις θορύβου περιβάλλοντος, αεροδρομίων, κρούσεων και θορύβων υποδομής.



## Καμπύλες Στάθμισης A, C και Z (Weighting Curves)

Στην αντικειμενική μέτρηση ήχου, η ίδια φυσική στάθμη μπορεί να μην αντιστοιχεί στην ίδια **υποκειμενική ένταση**, επειδή η ανθρώπινη ακοή **δεν αντιλαμβάνεται όλες τις συχνότητες με τον ίδιο τρόπο**. Για τον λόγο αυτό, τα διεθνή πρότυπα ISO και IEC έχουν θεσπίσει **καμπύλες στάθμισης** (weighting curves), οι οποίες εφαρμόζονται στο φάσμα της ηχητικής πίεσης ώστε οι μετρήσεις να προσεγγίζουν καλύτερα την ανθρώπινη ακουστική αντίληψη.



Σχήμα 1.5 Πρότυπες καμπύλες για τη στάθμιση της πίεσης σε SPL (dB).

Οι τρεις καθιερωμένες καμπύλες είναι:

#### ✓ **A-weighting (dB(A)) — Αισθητηριακή προσέγγιση της ανθρώπινης ακοής**

Η καμπύλη A προσομοιώνει την **ευαισθησία της ανθρώπινης ακοής σε χαμηλές στάθμες**, δηλαδή περίπου στο κατώφλι ακουστότητας.

Χαρακτηριστικά:

- **Μεγάλη αποκοπή στις χαμηλές συχνότητες** (κάτω από 500 Hz)
- **Ήπια αποκοπή στις πολύ υψηλές**
- Πλησιάζει την καμπύλη ίσης ακουστότητας **Fletcher-Munson των 40 phon**
- Είναι η **πιο διαδεδομένη** στάθμιση διεθνώς (περιβαλλοντικός θόρυβος, κτίρια, εργασιακός θόρυβος, ακουσολογία)

**Όπου χρησιμοποιείται:** ISO 1996, ISO 226, IEC 61672, εργασιακή υγιεινή, nuisance noise, αξιολόγηση οχλήσεων.

#### ✓ **C-weighting (dB(C)) — Ακουστική αντίληψη σε υψηλές στάθμες**

Η καμπύλη C ακολουθεί πιο «επίπεδη» συμπεριφορά, με **πολύ μικρότερη αποκοπή χαμηλών**, επομένως δίνει αποτέλεσμα πιο κοντά στο πραγματικό μη σταθμισμένο φάσμα.

- Προσομοιώνει την ακοή σε **υψηλές στάθμες** ( $\approx 100$  phon)
- Κατάλληλη για **impulsive ήχους και στάθμες υψηλής ενέργειας**

- Δίνει έμφαση στις χαμηλές συχνότητες που εισφέρουν στην «ισχύ» του ήχου

**Όπου χρησιμοποιείται:** impulsive noise (κρότοι), βαριά βιομηχανία, συναυλίες, αξιολόγηση συστημάτων ήχου, στρατιωτικές εφαρμογές.

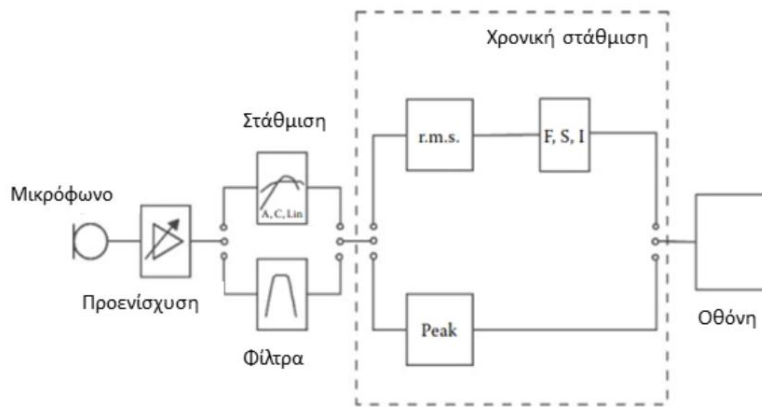
### ✓ Z-weighting (dB(Z)) — Μη σταθμισμένο (flat) φάσμα

Η Z-weighting (Zero-weighting) είναι **απόλυτα επίπεδη** στο ακουστό φάσμα (20 Hz – 20 kHz), με απόκλιση  $< \pm 1$  dB.

- Δεν προσομοιώνει την ανθρώπινη ακοή
- Στόχος: **πιστή καταγραφή** του πραγματικού φάσματος
- Χρησιμοποιείται όταν η **ανάλυση φάσματος** έχει σημασία

**Όπου χρησιμοποιείται:** εργαστηριακές μετρήσεις, μελέτη υλικών, ανάλυση κρουστικών σημάτων, έρευνα.

### ✦ Τι κάνει ένα ηχόμετρο εσωτερικά — τα στάδια επεξεργασίας



Σχήμα 1.6 Τα στάδια επεξεργασίας σε ένα ηχόμετρο.

Όταν ένα ηχόμετρο μετρά ήχο, η εσωτερική αλυσίδα επεξεργασίας ακολουθεί συνήθως τα παρακάτω βήματα:

1. **Λήψη σήματος από μικρόφωνο** (σε Pa)
2. **Προενίσχυση και A/D μετατροπή** (αναλογικό  $\rightarrow$  ψηφιακό)
3. **Εφαρμογή σταθμιστικού φίλτρου (A, C ή Z)**
  - ο υλοποιούνται ως **IIR ή FIR φίλτρα** με καμπύλες πιστές στο IEC 61672
4. **Υπολογισμός RMS πίεσης στο χρόνο**

5. **Μετασχηματισμός σε λογαριθμική στάθμη (σε dB)**
6. **Χρονική στάθμιση** (Fast, Slow, Impulse — F/S/I)
7. **Εξαγωγή δεικτών** ( $L_p$ ,  $L_{eq}$ ,  $L_{max}$ , SEL κ.λπ.)

Άρα, η **στάθμιση (A, C, Z)** εφαρμόζεται **ΠΡΙΝ** από τον **λογαριθμισμό**, στο πεδίο της πίεσης.

## Ηχεία $L_w$ και $L_p$

Στάθμη ηχητικής ισχύος της πηγής

$$L_w = 10 \log_{10} \left( \frac{W}{W_{ref}} \right)$$

όπου

- $W$ : ηχοισχύς της πηγής (Watt)
- $W_{ref} = 10^{-12}$  W: ισχύς αναφοράς στον αέρα

✔ **Τι σημαίνουν τα “100 W” στα ηχεία;**

Όταν γράφει ένα ηχείο **100 W**, αυτό αναφέρεται στην:

**ηλεκτρική ισχύ του ενισχυτή (input power)**  
και όχι στην **ακουστική ισχύ (sound power)**.

Δηλαδή:

- 100 W → πόση **ηλεκτρική ενέργεια** στέλνει ο ενισχυτής στο μεγάφωνο
- $L_w$  → πόση **ακουστική ενέργεια** τελικά βγαίνει στο χώρο (output)

---

✔ **Γιατί δεν ταυτίζονται με το  $L_p$ ;**

Επειδή ένα ηχείο έχει **χαμηλό ηλεκτρο-ακουστικό βαθμό απόδοσης**.

Τυπικός βαθμός απόδοσης: **0,5% – 2%**

Άρα από τα 100 Watt ηλεκτρικής ισχύος, μόνο **0,5–2 Watt** γίνονται **ακουστική ισχύς** στο καλύτερο σενάριο — τα υπόλοιπα χάνονται σε:

- ✔ θερμότητα
  - ✔ απώλειες στο πηνίο
  - ✔ απώλειες στο διάφραγμα
  - ✔ μηχανικές τριβές
-

✓ Πόσο περίπου είναι το  $L_w$  για ένα “100 W” ηχείο;

Αν υποθέσουμε απόδοση 1%:

$$W_{\text{acoustic}} \approx 0.01 \times 100 \text{ W} = 1 \text{ W}$$

Τότε:

$$L_w = 10 \log_{10} \left( \frac{W_{\text{acoustic}}}{W_{\text{ref}}} \right) = 10 \log_{10} \left( \frac{1}{10^{-12}} \right) = 10 \log_{10} (10^{12}) = 120 \text{ dB}$$

Άρα:

Ένα ενεργό ηχείο 100 W έχει τυπικά  $L_w$  περίπου 118–122 dB, όχι 100 dB.

(στην πράξη το εύρος μπορεί να είναι 115–125 dB, ανάλογα με την απόδοση και το μεγάφωνο)

✓ Πίνακας 1 — Από τα Watt του ενισχυτή → στην ακουστική ισχύ → στο  $L_w$

Ονομαστική ισχύς ηχείου (Electrical Power)	Τυπική ακουστική ισχύς (Acoustic Power)	Typical $L_w$ (Sound Power Level)
10 W	0.05–0.2 W	105–112 dB
50 W	0.3–1.0 W	112–120 dB
100 W	0.5–2.0 W	115–122 dB
200 W	1.0–4.0 W	118–125 dB

**Σχόλιο:** Όσο αυξάνεται η ηλεκτρική ισχύς, το  $L_w$  αυξάνεται αργά σε dB, γιατί είναι λογαριθμική κλίμακα  $L_w = 10 \log_{10} \left( \frac{W_{\text{acoustic}}}{10^{-12}} \right)$ .

✓ Πίνακας 2 — Από το  $L_w$  → στο SPL σε απόσταση (free field)

Χρησιμοποιούμε:

$$L_p(r) = L_w - 20 \log_{10}(r) - 11$$

$L_w$ (dB)	SPL στα 1 m	SPL στα 2 m	SPL στα 4 m	SPL στα 8 m
112 dB	≈ 101 dB	≈ 95 dB	≈ 89 dB	≈ 83 dB
118 dB	≈ 107 dB	≈ 101 dB	≈ 95 dB	≈ 89 dB

$L_w$ (dB)	SPL στα 1 m	SPL στα 2 m	SPL στα 4 m	SPL στα 8 m
122 dB	≈ 111 dB	≈ 105 dB	≈ 99 dB	≈ 93 dB

Σχόλιο:

– κάθε διπλασιασμός απόστασης → -6 dB στο SPL

– το -11 είναι η **σταθερά σφαιρικής διάδοσης**. Προκύπτει από τη σφαιρική διάδοση του ήχου στο ελεύθερο πεδίο, όπου η ενέργεια της πηγής κατανέμεται στην επιφάνεια σφαίρας  $4\pi r^2$ . Ο λογαριθμισμός αυτού του γεωμετρικού όρου δίνει το σταθερό -11" dB", το οποίο εκφράζει τη γεωμετρική εξασθένηση της ηχητικής έντασης με την απόσταση. Δεν σχετίζεται με απορρόφηση από το μέσο, αλλά αποκλειστικά με τη διάχυση της ενέργειας στον χώρο.

## Νόμος της Μάζας (για κάθετη και τυχαία πρόσπτωση)

Για κάθετη και τυχαία πρόσπτωση ηχητικού κύματος σε άκαμπτο διαχωριστικό, ο δείκτης ηχομείωσης δίνεται προσεγγιστικά από τη σχέση:

$$R(f) = 20\log_{10}(m' \cdot f) - 47$$

Όπου:

- $R(f)$ : δείκτης ηχομείωσης σε dB
- $m'$ : επιφανειακή μάζα ( $\text{kg}/\text{m}^2$ )
- $f$ : συχνότητα (Hz)

Ας θεωρήσουμε διαχωριστικό με επιφανειακή μάζα  $m' = 10 \text{ kg}/\text{m}^2$

Συχνότητα $f$	Υπολογισμός	$R(f)$
100 Hz	$20\log_{10}(10 \cdot 100) - 47$	≈ 13 dB
200 Hz	$20\log_{10}(10 \cdot 200) - 47$	≈ 19 dB
500 Hz	$20\log_{10}(10 \cdot 500) - 47$	≈ 27 dB
1000 Hz	$20\log_{10}(10 \cdot 1000) - 47$	≈ 33 dB

Παρατηρούμε ότι κάθε **διπλασιασμός της συχνότητας** αυξάνει την ηχομείωση κατά περίπου **6 dB**, επιβεβαιώνοντας τον Νόμο της Μάζας πριν από την κρίσιμη συχνότητα.

## Κρίσιμη Συχνότητα (Critical Frequency, $f_c$ )

Η κρίσιμη συχνότητα είναι η συχνότητα στην οποία τα καμπτικά κύματα που διαδίδονται μέσα στο διαχωριστικό (π.χ. γυψοσανίδα, τσιμεντοσανίδα ή γυαλί) έχουν ίδια **φασική ταχύτητα** με το προσπίπτον ηχητικό κύμα στον αέρα. Στην περιοχή αυτή, το διάφραγμα «συμπάλλει» με τον ήχο και ταλαντώνεται έντονα, με αποτέλεσμα **απότομη μείωση της ηχομείωσης**. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται σύμπτωση (coincidence effect).

Η **φασική ταχύτητα (phase velocity)** είναι η ταχύτητα με την οποία προχωρά το μέτωπο φάσης ενός ηχητικού κύματος στο χώρο. Δηλαδή, είναι η ταχύτητα με την οποία ένα συγκεκριμένο σημείο του κύματος (π.χ. μία κορυφή ή μία κοιλιά) μετακινείται στο μέσο.

- Για τον αέρα και τα περισσότερα ρευστά, η φασική ταχύτητα είναι σταθερή και ίση με την ταχύτητα του ήχου ( $\approx 343$  m/s).
- Για στερεά όπως τοίχους, γυψοσανίδες και πλάκες, η φασική ταχύτητα δεν είναι σταθερή· εξαρτάται από τη συχνότητα (το υλικό είναι *διασπερτικό* ως προς τα καμπτικά κύματα).

### ■ Εξίσωση Κρίσιμης Συχνότητας για άκαμπτου στοιχείου

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m'}{D}}$$

όπου:

- $f_c$ : κρίσιμη συχνότητα (Hz)
- $c$ : ταχύτητα του ήχου στον αέρα (m/s)
- $m'$ : επιφανειακή μάζα του διαχωριστικού ( $\text{kg/m}^2$ )
- $D$ : δυσκαμψία κάμψης (bending stiffness) του στοιχείου ( $\text{N}\cdot\text{m}$ )

Σημείωση:

Η ταχύτητα  $c$  στην παραπάνω εξίσωση αντιστοιχεί στην ταχύτητα του ήχου στον αέρα, καθώς η κρίσιμη συχνότητα περιγράφει τη συχνότητα στην οποία το προσπίπτον ηχητικό κύμα στον αέρα συντονίζεται με το καμπτικό κύμα στο στερεό. Η σύμπτωση κυματικών αριθμών (wavenumber matching) μεταξύ των δύο μέσων οδηγεί σε αυξημένη μετάδοση ήχου και μείωση της ηχομονωτικής ικανότητας του στοιχείου.

### ■ Εξίσωση Κρίσιμης Συχνότητας για εύκαμπτα στοιχεία

Η κρίσιμη συχνότητα προσεγγιστικά δίνεται από:

$$f_c = \frac{c^2}{1.8h} \sqrt{\frac{\rho}{E}} = \frac{c^2}{1.8hc_1}$$

όπου:

- $f_c$ : κρίσιμη συχνότητα (Hz)
- $h$ : πάχος του διαχωριστικού (m)
- $c$ : ταχύτητα του ήχου στον αέρα (m/s)
- $c_1$ : ταχύτητα διάδοσης των διαμήκων κυμάτων στο υλικό (m/s)
- $E$ : μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus) (Pa)
- $\rho$ : πυκνότητα του υλικού (kg/m<sup>3</sup>)

#### ✦ Σημείωση – Κρίσιμη Συχνότητα Άκαμπτων και Εύκαμπτων Στοιχείων

Για **άκαμπτα στοιχεία**, η κυρίαρχη μορφή διάδοσης είναι μέσω **κάμψης**, και η κρίσιμη συχνότητα εξαρτάται από τη **δυσκαμψία κάμψης (D)** και την **επιφανειακή μάζα (m')** του στοιχείου.

Αντίθετα, για **εύκαμπτα ή λεπτά στοιχεία**, η συμπεριφορά προσεγγίζεται μέσω **διαμήκων κυμάτων** και η κρίσιμη συχνότητα εξαρτάται από το **πάχος (h)** και τις υλικές ιδιότητες (**πυκνότητα ρ, μέτρο ελαστικότητας E**).

---

#### ✦ Τι συμβαίνει στη φυσική του φαινομένου

Για συχνότητες **πολύ χαμηλότερες** από την  $f_c$ :

- η ηχομείωση ακολουθεί τον **Νόμο της Μάζας**
- **κάθε διπλασιασμός της συχνότητας → +6 dB ηχομείωσης**
- το υλικό συμπεριφέρεται σαν «βαριά ασπίδα» απέναντι στο ηχητικό κύμα

Για συχνότητες **γύρω από την  $f_c$** :

- η φασική ταχύτητα των καμπτικών κυμάτων μέσα στο πάνελ **ταιριάζει** με την ταχύτητα του ήχου στον αέρα
- δημιουργείται **συντονισμός σύμπτωσης (coincidence)**
- η ηχομείωση **πέφτει απότομα** → εμφανίζεται η γνωστή «κοιλιά» της καμπύλης  $R(f)$
- το φαινόμενο ονομάζεται **Mass-Law Failure**, γιατί ο Mass Law **δεν ισχύει προσωρινά**

Για συχνότητες **πολύ υψηλότερες** από την  $f_c$ :

- το υλικό ξαναγίνεται πιο «αντίθετο» στο κύμα
  - η ηχομείωση αρχίζει ξανά να ανεβαίνει
  - όμως όχι τόσο ομαλά όσο πριν, λόγω εντονότερων καμπτικών τρόπων
- 

#### ✦ Τι σημαίνουν αυτά στην πράξη

- **γυψοσανίδες, λεπτά ξύλα και γυαλιά** έχουν συνήθως την κρίσιμη συχνότητά τους μέσα στο ακουστό φάσμα
  - η «κοιλιά» στο φάσμα ηχομείωσης είναι **ιδιαίτερα ενοχλητική**, γιατί μπορεί να πέσει η ηχομείωση κατά **5–15 dB**
  - η κρίσιμη συχνότητα είναι **κρίσιμος παράγοντας** στην κτιριακή ακουστική
- 

#### ✦ Πώς αποφεύγουμε τα προβλήματα της $f_c$

1. **Ασύμμετρες πολυστρωματικές κατασκευές** (διαφορετικά πάχη/πυκνότητες)
  2. **Διπλά τοιχώματα με διάκενο και απορροφητικό**
  3. **Μεμβράνες / damping layers** για αύξηση απόσβεσης
  4. **Αποφυγή λεπτών μονοστρωματικών πάνελ χωρίς διάκενο**
- 

#### ✓ **Άκαμπτα στοιχεία (stiff / non-flexural elements)**

Χαρακτηριστικά:

- Μεγάλη μάζα και υψηλή δυσκαμψία
- Πολύ μικρή μηχανική παραμορφωσιμότητα
- Δεν αναπτύσσουν έντονες καμπτικές ταλαντώσεις στο ακουστό φάσμα

Παραδείγματα:

- Σκυρόδεμα (οπλισμένο ή μη)
- Τούβλινη/λιθοδομή μεγάλης μάζας
- Παχιές τσιμεντοσανίδες
- Μεταλλικά ή σύνθετα πάνελ μεγάλου πάχους

Ακουστική συνέπεια:

→ Συμμορφώνονται περισσότερο με τον **Νόμο της Μάζας**, χωρίς έντονο φαινόμενο σύμπτωσης στο φάσμα.

---

### ✓ **Εύκαμπτα στοιχεία (flexible / bending elements)**

Χαρακτηριστικά:

- Μικρή μάζα και μικρή δυσκαμψία
- Υπόκεινται εύκολα σε κάμψη
- Αναπτύσσουν έντονα **καμπτικά κύματα** στο ακουστό φάσμα
- Εμφανίζουν **κρίσιμη συχνότητα** και «κοιλιά» στη  $R(f)$

Παραδείγματα:

- Γυψοσανίδες
- Λεπτές ξύλινες επενδύσεις / κόντρα πλακέ
- Γυάλινα στοιχεία (μονά ή διπλά)
- Λεπτές μεταλλικές λαμαρίνες
- Ελαφρά σύνθετα φύλλα (MDF, OSB, PVC πάνελ)

Ακουστική συνέπεια:

→ Επηρεάζονται έντονα από το **coincidence effect** και παρουσιάζουν μείωση ηχομείωσης γύρω από την **κρίσιμη συχνότητα**.

## Το Φαινόμενο του Συντονισμού (Resonance)

Σε πολύ χαμηλές συχνότητες, η **σκληρότητα** (stiffness) των υλικών εμποδίζει την ταλάντωση των διαχωριστικών στοιχείων (τοιχών, πατωμάτων κ.λπ.). Ο συνδυασμός της **σκληρότητας** με τη **μάζα** του τοιχώματος μπορεί να προσεγγιστεί ως σύστημα **μάζας-ελατηρίου**.

Σε μια συγκεκριμένη συχνότητα, η οποία εξαρτάται από τη μάζα και τη σκληρότητα του υλικού, εμφανίζεται **συντονισμός**.

Κατά τον συντονισμό, η επιφάνεια αρχίζει να ταλαντώνεται με **μεγάλο πλάτος**, γεγονός που οδηγεί σε **αυξημένη μετάδοση ήχου** → δηλαδή **μείωση της ηχομονωτικής ικανότητας**.

Άρα, **στις πολύ χαμηλές συχνότητες** έχουμε συχνά **χειρότερη ηχομείωση**, όχι λόγω νόμου της μάζας, αλλά λόγω **συντονισμού**.

## Συντονισμός σε πραγματικούς τοίχους (με διαστάσεις $L_x, L_y$ )

Για παραλληλεπίπεδες επιφάνειες στερεωμένες στις τέσσερις πλευρές τους, οι **συχνότητες συντονισμού** δίνονται από:

$$f_r = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{B}{m} \left[ \left( \frac{n_x}{L_x} \right)^2 + \left( \frac{n_y}{L_y} \right)^2 \right]}$$

Όπου:

- $B$ : Μέτρο καμπτικής ακαμψίας του υλικού

### Μέτρο καμπτικής ακαμψίας $B$

Το  $B$  **δεν δίνεται απευθείας σε πίνακες**.

Υπολογίζεται από το **μέτρο ελαστικότητας (Young modulus)**, το **πάχος** και τον **λόγο Poisson**.

$$B = \frac{E h^3}{12(1 - \sigma^2)}$$

Όπου:

$E$  Μέτρο ελαστικότητας Young (Pa) — **δίνεται σε πίνακες** για κάθε υλικό

$h$  Πάχος τοιχώματος (m) — γνωστό από κατασκευή

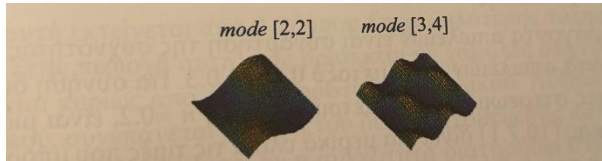
$\sigma$  Λόγος Poisson (χωρίς μονάδα) — **δίνεται σε πίνακες**

- **Παράδειγμα τυπικών τιμών**

Υλικό	$E$ (GPa)	$\sigma$
Γυψοσανίδα	2–4	0.29
Ξύλο (MDF)	4–5	0.30
Τούβλο	8–15	0.20
Σκυρόδεμα	20–30	0.18

- $m$ : Μάζα ανά μονάδα επιφάνειας ( $\text{kg/m}^2$ )
- $L_x, L_y$ : Διαστάσεις του τοιχώματος (m)

- $n_x, n_y$ : Ακέραιοι αριθμοί (1,2,3...) που δείχνουν την **τάξη του τρόπου συντονισμού (mode)**



Η **χαμηλότερη** συχνότητα συντονισμού προκύπτει για  $n_x = n_y = 1$ .

### Απλοποιημένος τύπος για ομοιόμορφες επιφάνειες

Στην πράξη συχνά χρησιμοποιούμε:

$$f_r = 0.458 c_L h \sqrt{(1 - \sigma^2)} \sqrt{\left(\frac{n_x^2}{L_x^2}\right) + \left(\frac{n_y^2}{L_y^2}\right)}$$

Όπου:

- $c_L$ : Ταχύτητα διάδοσης διατμητικών (καμπτικών) κυμάτων στο υλικό
- $\sigma$ : Λόγος Poisson
- $h$ : Πάχος τοιχώματος (m)

### Ταχύτητα καμπτικών (διατμητικών) κυμάτων στο υλικό $c_L$

Υπολογίζεται από το  $E$ , τη  $\rho$  (πυκνότητα) και το  $\sigma$ .

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho(1 - \sigma^2)}}$$

Όπου:

$E$  Μέτρο ελαστικότητας Young

$\rho$  Πυκνότητα υλικού ( $\text{kg/m}^3$ ), **δίνεται σε πίνακες**

$\sigma$  Λόγος Poisson

### Τυπική τάξη μεγέθους $c_L$

Υλικό	$c_L$ περίπου (m/s)
Γυψοσανίδα 12.5mm	~ 800–1000 m/s
MDF 18mm	~ 1200–1500 m/s

Υλικό	$c_L$ περίπου (m/s)
Τούβλο	~ 2000–3000 m/s
Σκυρόδεμα	~ 2500–3000+ m/s

## Σύνοψη: Παράγοντες που επηρεάζουν την ηχομονωτική συμπεριφορά των υλικών

Η ικανότητα ενός δομικού στοιχείου να μειώνει την μετάδοση του αερόφερτου θορύβου εξαρτάται κυρίως από τρεις μηχανισμούς:

### 1) Ο Νόμος της Μάζας

Για ένα άκαμπτο, ομοιογενές τοίχωμα μεγάλων διαστάσεων, η ηχομείωση αυξάνεται όσο αυξάνεται η **επιφανειακή μάζα** και η **συχνότητα**.

$$R \approx 20 \log_{10}(m'f) - 47(\text{dB})$$

Όπου:

- $R$ : δείκτης ηχομείωσης (dB)
- $m'$ : επιφανειακή μάζα ( $\text{kg}/\text{m}^2$ )
- $f$ : συχνότητα (Hz)

#### Φυσική σημασία:

Μεγαλύτερη μάζα  $\rightarrow$  δυσκολότερη ταλάντωση  $\rightarrow$  καλύτερη ηχομόνωση.

Ισχύει σε **μεσαίες συχνότητες**, όπου η επιφάνεια δεν λυγίζει σημαντικά.

### 2) Το Φαινόμενο της Σύμπτωσης (Coincidence Effect)

Σε υψηλότερες συχνότητες η επιφάνεια δεν συμπεριφέρεται ως άκαμπτη, αλλά ως **εύκαμπτο πέτασμα** που μεταδίδει **καμπτικά κύματα**.

Όταν η **φασική ταχύτητα** των καμπτικών κυμάτων του τοιχώματος γίνει ίση με την ταχύτητα του ήχου στον αέρα  $\rightarrow$  **συμβαίνει σύμπτωση**, δηλαδή η μετάδοση του ήχου μεγιστοποιείται.

Η κρίσιμη συχνότητα δίνεται περίπου από:

$$f_c = \frac{c^2}{1.8 h c_L}$$

Όπου:

- $f_c$ : κρίσιμη συχνότητα (Hz)
- $c$ : ταχύτητα του ήχου στον αέρα (m/s)
- $h$ : πάχος του τοιχώματος (m)
- $c_L$ : ταχύτητα καμπτικών κυμάτων στο υλικό (m/s)

#### Φυσική σημασία:

Στην  $f_c$  έχουμε **απότομη μείωση της ηχομείωσης** → χαρακτηριστικό «βύθισμα» στο φάσμα  $R(f)$ .

Εμφανίζεται σε **μεσαίες-υψηλές συχνότητες** (π.χ. 1–4 kHz), συχνά στο **εύρος της ομιλίας**.

---

### 3) Το Φαινόμενο του Συντονισμού (Resonance)

Σε χαμηλές συχνότητες, το τοίχωμα συμπεριφέρεται σαν **σύστημα μάζας-ελατηρίου**:

Η μάζα του τοιχώματος ταλαντώνεται έναντι της ακαμψίας του υλικού.

Η συχνότητα συντονισμού για εύκαμπτες πλάκες:

$$f_r \approx 0.458 c_L h (1 - \sigma^2)^{1/2} \left[ \frac{n_x^2}{L_x^2} + \frac{n_y^2}{L_y^2} \right]^{1/2}$$

Όπου:

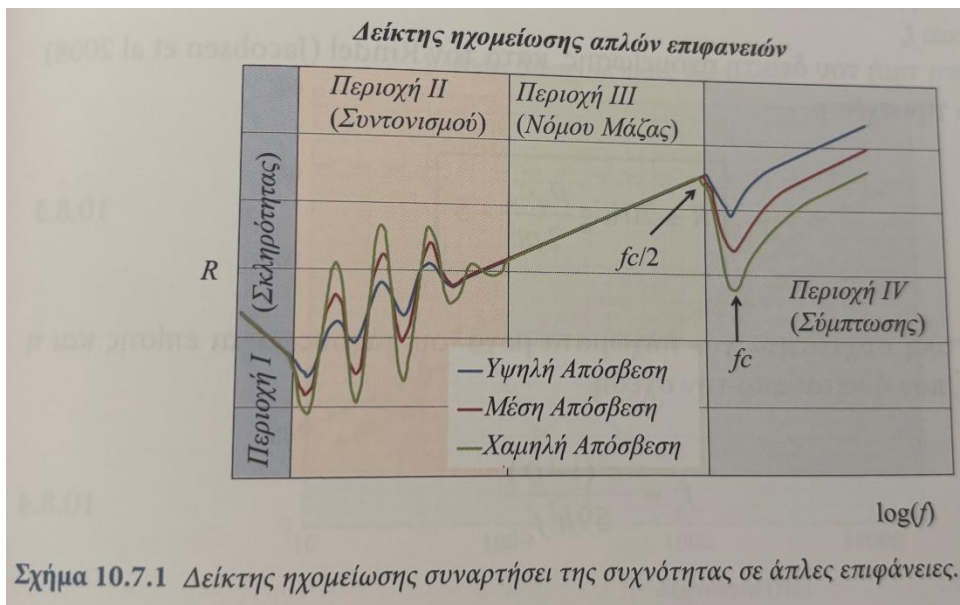
- $f_r$ : συχνότητα συντονισμού
- $m$ : μάζα ανά μονάδα επιφάνειας
- $k$ : ακαμψία / ελαστικότητα
- $L_x, L_y$ : διαστάσεις της επιφάνειας
- $n_x, n_y$ : δείκτες τρόπου ταλάντωσης
- $\sigma$ : λόγος Poisson

#### Φυσική σημασία:

Κοντά στο  $f_r$  το τοίχωμα **ταλαντώνεται έντονα**, άρα **μειώνεται η ηχομείωση σε χαμηλές συχνότητες** (κυρίως μπάσα).

---

Χαρακτηριστικό	Συντονισμός (Resonance)	Σύμπτωση (Coincidence)
Συχνότητα εμφάνισης	Χαμηλές (κάτω από 100 Hz)	Υψηλές (συνήθως 1–4 kHz)
Τι ταλαντώνεται	Ολόκληρη η επιφάνεια σαν μία μάζα	Η επιφάνεια με καμπτικές κυματομορφές
Φυσική φύση	Μηχανικός συντονισμός μάζας-ελατηρίου	Φασική ταύτιση κυμάτων (αέρα-πλάκας)
Αποτέλεσμα	Πτώση R λόγω μεγάλης μεταφοράς ενέργειας	Πτώση R λόγω φασικής ενίσχυσης διάδοσης
Αντιμετώπιση	Αύξηση μάζας ή απόσβεση στο διάκενο	Αλλαγή πάχους, σκληρότητας ή απόσβεση



### Σχόλια για το Σχήμα 10.7.1

Το διάγραμμα παρουσιάζει πώς μεταβάλλεται ο δείκτης ηχομείωσης  $R$  ενός τοιχώματος σε συνάρτηση με τη συχνότητα.

#### Περιοχή I — Σκληρότητας

Σε πολύ χαμηλές συχνότητες το υλικό δεν μπορεί να «ακολουθήσει» την πίεση του ηχητικού κύματος και παραμένει πρακτικά άκαμπτο.

Σε αυτή την περιοχή η ηχομόνωση είναι μικρή και **δεν ακολουθεί τον νόμο της μάζας**.  
Εδώ «κυριαρχεί» η μηχανική ακαμψία του υλικού.

---

### Περιοχή II — Φαινόμενο Συντονισμού

Σε ορισμένες χαμηλές συχνότητες το τοίχωμα λειτουργεί σαν **σύστημα μάζας-ελατηρίου**. Το αποτέλεσμα είναι **ισχυρές ταλαντώσεις της επιφάνειας**, άρα αυξημένη μετάδοση του ήχου.

Εδώ εμφανίζεται **τοπικό ελάχιστο** στην ηχομείωση.

#### ✦ Συνέπεια:

Κακή ηχομόνωση στα μπάσα → αυτά «περνάνε» πιο εύκολα.

---

### Περιοχή III — Νόμος της Μάζας

Σε μεσαίες συχνότητες η επιφάνεια λειτουργεί πλέον σαν «βαριά μάζα».

Η ηχομείωση ακολουθεί την γνωστή σχέση:

$$R \approx 20 \log_{10}(m'f) - 47$$

Άρα, όσο:

- αυξάνεται η **συχνότητα**, και
- αυξάνεται η **επιφανειακή μάζα  $m'$** ,

τόσο **βελτιώνεται γραμμικά η ηχομόνωση**.

#### ✦ Αυτή είναι η «ευνοϊκή περιοχή» του διαχωριστικού.

---

### Περιοχή IV — Φαινόμενο Σύμπτωσης

Σε υψηλότερες συχνότητες η επιφάνεια **δεν είναι άκαμπτη**, αλλά **λυγίζει** και εμφανίζει **καμπτικά κύματα**.

Όταν η φασική ταχύτητα αυτών των καμπτικών κυμάτων γίνει ίση με την ταχύτητα του ήχου στον αέρα → εμφανίζεται η **κρίσιμη συχνότητα  $f_c$** .

Σε αυτή τη συχνότητα έχουμε **απότομη πτώση** της ηχομείωσης (ένα «βαθύ V» στο γράφημα).

#### ✦ Συνέπεια:

Η ηχομόνωση χειροτερεύει σε **μεσαίες-υψηλές συχνότητες** (συχνά μέσα στο φάσμα ομιλίας → 1–4 kHz).

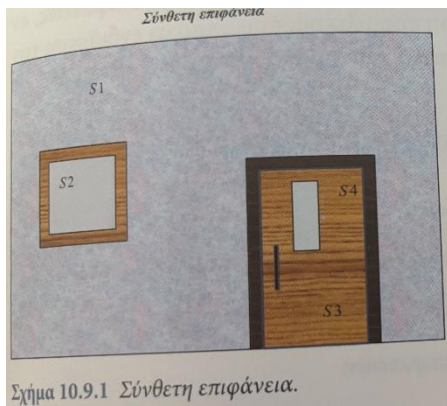
### Σημείωση για τις τρεις καμπύλες (Υψηλή / Μέση / Χαμηλή Απόσβεση)

- Η **μπλε καμπύλη** (υψηλή απόσβεση) δείχνει **βελτιωμένη συμπεριφορά** κοντά στον συντονισμό και στη σύμπτωση.
- Η **πράσινη καμπύλη** (χαμηλή απόσβεση) έχει μεγάλα «βυθίσματα» → το τοίχωμα δονείται πιο ελεύθερα.
- Άρα, **υλικά με υψηλή εσωτερική απόσβεση** (π.χ. γυψοσανίδα) έχουν συνήθως **καλύτερη συνολική ηχομόνωση** σε σχέση με πολύ άκαμπτα υλικά (π.χ. γυμνό μέταλλο).

### Συγκριτική Σύνοψη

Φαινόμενο	Συχνότητες	Μηχανισμός	Επίδραση
Συντονισμός	Χαμηλές (50–250 Hz)	Το τοίχωμα πάλλεται ως ενιαία μάζα	Μείωση μόνωσης στα μπάσα
Νόμος της Μάζας	Μεσαίες	Η μάζα περιορίζει τη δόνηση	Γραμμική αύξηση R με $\log(f)$
Σύμπτωση	Μεσαίες–Υψηλές (1–4 kHz)	Τα καμπτικά κύματα συγχρονίζονται με τον ήχο στον αέρα	«Βύθιση» στο φάσμα → ισχυρή μείωση μόνωσης

## Υπολογισμός Δείκτη Ηχομείωσης Σύνθετων Επιφανειών



Σπάνια ένα δομικό στοιχείο (π.χ. ένας τοίχος που χωρίζει δύο χώρους) αποτελείται από ένα μόνο υλικό.

Στις περισσότερες πραγματικές εφαρμογές η επιφάνεια είναι **σύνθετη**, δηλαδή αποτελείται από **διαφορετικά τμήματα** με διαφορετική ηχομονωτική ικανότητα, όπως:

- τοίχος ( $S_1$ )
- παράθυρο ( $S_2$ )
- μεταλλική ή ξύλινη πόρτα ( $S_3$ )
- τζαμάκι πόρτας / φεγγίτης ( $S_4$ )

Επειδή κάθε τμήμα έχει **διαφορετικό δείκτη ηχομείωσης**, η συνολική ηχομόνωση της σύνθετης επιφάνειας δεν είναι ίση με αυτή του καλύτερου ή του χειρότερου τμήματος, αλλά υπολογίζεται **συνδυαστικά**.

---

### 1. Υπολογισμός Συνολικού Συντελεστή Διάδοσης $\tau$

Για κάθε επιμέρους τμήμα της επιφάνειας χρησιμοποιούμε τον **συντελεστή διάδοσης** (ή συντελεστή μεταφοράς)  $\tau_i$ , δηλαδή το ποσοστό ηχητικής ενέργειας που περνάει μέσα από το υλικό.

Η συνολική μετάδοση για ολόκληρη την επιφάνεια είναι:

$$\tau = \frac{\tau_1 S_1 + \tau_2 S_2 + \tau_3 S_3 + \dots}{S_1 + S_2 + S_3 + \dots}$$

Όπου:

- $S_i$ : το εμβαδόν του κάθε τμήματος ( $m^2$ )
- $\tau_i$ : ο συντελεστής διάδοσης του τμήματος

#### Συντελεστής διάδοσης κάθε ομογενούς επιφάνειας $\tau_i$

Ο συντελεστής διάδοσης ενός υλικού συνδέεται με τον δικό του δείκτη ηχομείωσης  $R_i$  μέσω του:

$$\tau_i = 10^{-R_i/10}$$

Όπου:

- $R_i$ : ο δείκτης ηχομείωσης του υλικού (σε dB)
- $\tau_i$ : το **ποσοστό ενέργειας** που περνάει μέσα από το υλικό.

**Δηλαδή:**

- Αν  $R_i = 30\text{dB} \rightarrow \tau_i = 10^{-3} = 0.001 \rightarrow$  περνάει το **0.1%** της ενέργειας
- Αν  $R_i = 50\text{dB} \rightarrow \tau_i = 10^{-5} = 0.00001 \rightarrow$  περνάει το **0.001%**

Όσο μεγαλύτερο το **R**, τόσο μικρότερο το  $\tau \rightarrow$  άρα καλύτερη ηχομόνωση.

---

## 2. Υπολογισμός Συνολικού Δείκτη Ηχομείωσης $R$

Αφού βρεθεί ο συνολικός συντελεστής διάδοσης  $\tau$ , ο συνολικός δείκτης ηχομείωσης της σύνθετης επιφάνειας είναι:

$$R = 10 \log_{10} \left( \frac{1}{\tau} \right)$$

Αυτός είναι ο **τελικός δείκτης ηχομείωσης** που χαρακτηρίζει όλη την επιφάνεια.

---