

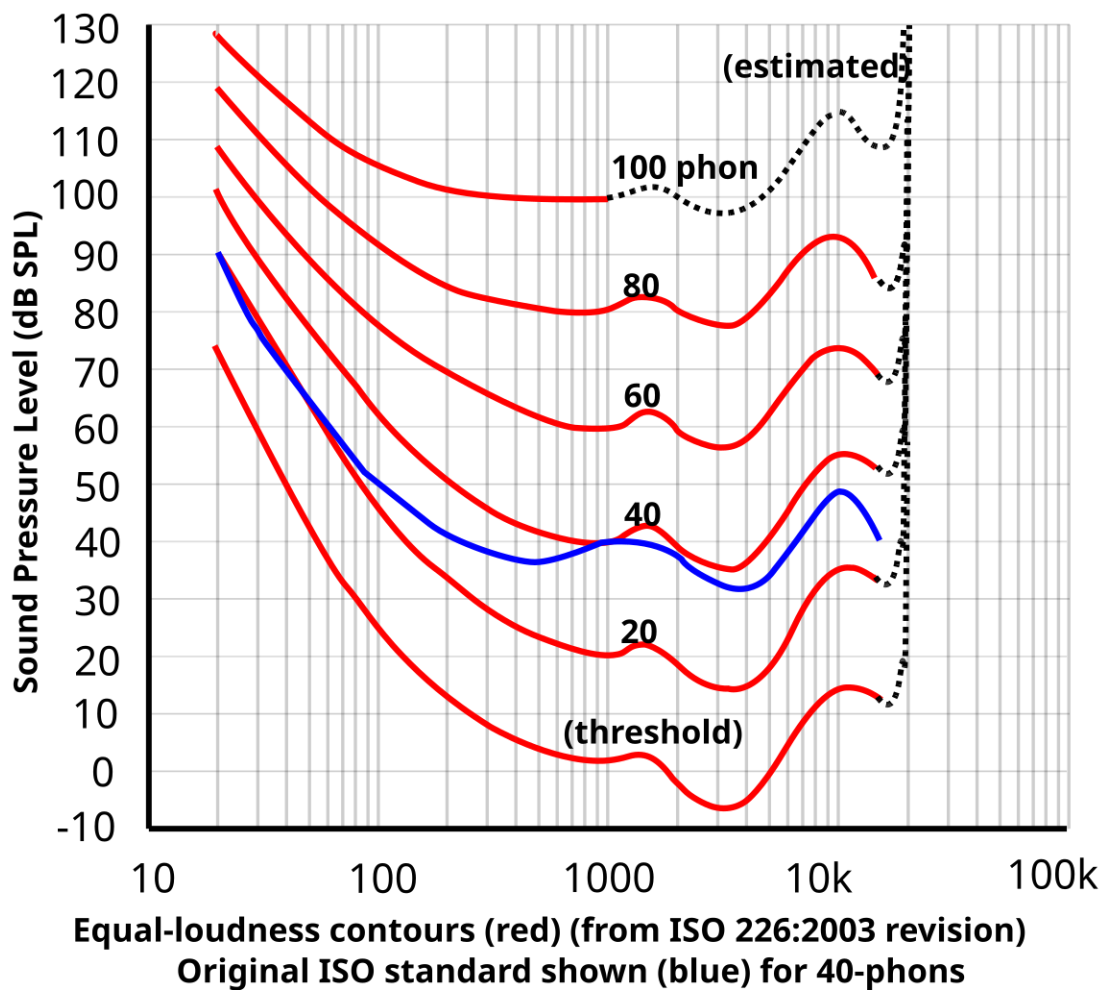
Contents

Έλεγχος Θορύβου και Κτιριακή Ακουστική	2
Ποια είναι η στάθμη του ήχου που ακούμε σε dB;.....	2
Πόσα dB είναι η μέγιστη στάθμη στον αέρα;.....	3
Ταχύτητα ήχου: αέρας, θάλασσα, πισίνα. Γιατί το μήκος κύματος είναι μεγαλύτερο στο νερό σε σχέση με τον αέρα;.....	5
Γιατί όσο ανεβαίνει η θερμοκρασία, ανεβαίνει και η ταχύτητα του ήχου;	5
Ανάκλαση και μήκος κύματος	7
Αν ένα club λειτουργεί στο υπόγειο και οι ένοικοι στον τελευταίο όροφο παραπονιούνται για θόρυβο.....	8
Πώς μετρώ την ηχομόνωση πατώματος/ταβανιού;.....	9
Βασικές Έννοιες & Δείκτες Ηχομόνωσης.....	10
1. Στάθμη ηχητικής πίεσης (Lp)	10
2. Δείκτης ηχομείωσης (R)	10
3. Σταθμισμένος δείκτης ηχομείωσης (Rw).....	10
4. Κανονικοποιημένη ηχομείωση επιτόπου (DnT)	11
5. Κανονικοποιημένο επίπεδο κρουστικού θορύβου (Ln, LnT)	11
6. Χρόνος αντήχησης (T).....	11
Γιατί διπλά τοιχώματα/τζάμια με κενό;	13
Γιατί το παράθυρο ρίχνει πολύ την ηχομόνωση;	14
Νόμος της μάζας.....	14
Κρίσιμη συχνότητα	14
Πώς μετράμε ηχοαπορρόφηση χώρου;	14
Ηχομόνωση vs Ηχοαπορρόφηση	14
Impact sound level (δάπεδα)	14
Τζάμια για να πέσω ≤ 45 dB μέσα στο καθιστικό.....	14

Έλεγχος Θορύβου και Κτιριακή Ακουστική

Ποια είναι η στάθμη του ήχου που ακούμε σε dB;

Η «ελάχιστη ακουστή» στάθμη εξαρτάται από τη συχνότητα (καμπύλες ίσης ακουστότητας). Το 0 dB SPL ορίζεται στα 1 kHz (αναφορά: $p_0=20 \mu\text{Pa}$). Σε χαμηλές συχνότητες το κατώφλι ανεβαίνει πολύ (π.χ. ~40 dB SPL στα 100 Hz), ενώ γύρω στα 3–4 kHz είναι χαμηλότερο. Στην πράξη χρησιμοποιούμε A-weighting (dB(A)) για να προσεγγίσουμε την ανθρώπινη ευαισθησία.



Πόσα dB είναι η μέγιστη στάθμη στον αέρα;

Η μέγιστη δυνατή στάθμη ηχητικής πίεσης στον αέρα είναι περίπου 194 dB SPL. Αυτό προκύπτει από το φυσικό όριο που θέτει η ίδια η ατμοσφαιρική πίεση.

1) Ορισμός SPL:

$$L_p = 20 \log_{10}(p/p_0), \text{ με } p_0 = 20 \text{ } \mu\text{Pa}.$$

2) Ο ήχος είναι ταλάντωση γύρω από την ατμοσφαιρική πίεση:

$$p_{\text{total}} = p_{\text{atm}} + p'(t).$$

- Στο θετικό μισό κύματος: $p_{\text{total}} = p_{\text{atm}} + p_{\text{max}}$

- Στο αρνητικό μισό: $p_{\text{total}} = p_{\text{atm}} - p_{\text{max}}$

3) Για να υπάρχει φυσικός αέρας πρέπει πάντα $p_{\text{total}} \geq 0$. Άρα $p_{\text{max}} \leq p_{\text{atm}} \approx 101.325 \text{ Pa}$. Η απόλυτη πίεση δεν μπορεί να είναι αρνητική (φυσικά αδύνατο), γιατί το μηδέν αντιστοιχεί στο απόλυτο κενό (καμία ύλη, καμία κίνηση μορίων).

4) Συνεπώς, το όριο είναι $p_{\text{max}} = p_{\text{atm}}$. Υπολογίζοντας:

$$L_p = 20 \log_{10}(101325 / 20e-6) \approx 194 \text{ dB SPL}.$$

Ερμηνεία: Σε 194 dB SPL η διακύμανση πίεσης είναι ίση με την ίδια την ατμοσφαιρική. Ήδη όμως σε πολύ χαμηλότερες στάθμες (~170–180 dB) εμφανίζονται μη γραμμικά φαινόμενα και σχηματίζονται κρουστικά κύματα.

Παράδειγμα τιμών:

Στάθμη (dB SPL)	Πίεση (Pa)	% της ατμοσφαιρικής
94	1	0.001%
120	20	0.02%
140	200	0.2%
150	632	0.6%
194	101325	100%

Χώρος / περίσταση	Τυπική στάθμη ηχητικής πίεσης (SPL)	Σχόλια
Ήσυχο γραφείο	40-50 dB	φυσιολογικός διάλογος ~60 dB
Καφετέρια - Bar	80-90 dB	ήδη «δυνατά»
Club - Main floor	100-110 dB SPL	φυσιολογική ένταση σε dance club
Μεγάλο techno ή live club	110-120 dB SPL	συνήθως με subwoofers και PA συστήματα
Πλησίον ηχείου (μπροστά στο PA)**	125-130 dB SPL	πολύ κοντά στο όριο πόνου (~130 dB)

Χρήση / περίσταση	Τυπική στάθμη SPL στο αυτί	Σχόλια
Ήσυχη ακρόαση, κλασική μουσική	60-75 dB SPL	άνετη μακροχρόνια ακρόαση
Κανονική ακρόαση μουσικής	80-90 dB SPL	φυσιολογική για τα περισσότερα pop/rock
Πολύ δυνατή (studio, DJ monitoring)	95-105 dB SPL	υψηλή ένταση - προσοχή στην έκθεση
Μέγιστη στάθμη (high-output συσκευές)	110-120 dB SPL	όρια ασφάλειας, επικίνδυνη παρατεταμένα

Η έκθεση σε υψηλές στάθμες περιορίζεται από τα διεθνή πρότυπα:

Στάθμη (dB SPL)	Μέγιστος ασφαλής χρόνος (χωρίς προστασία)
85 dB	8 ώρες
90 dB	2 ώρες
100 dB	15 λεπτά
110 dB	<2 λεπτά

Ταχύτητα ήχου: αέρας, θάλασσα, πισίνα. Γιατί το μήκος κύματος είναι μεγαλύτερο στο νερό σε σχέση με τον αέρα;

Η ταχύτητα του ήχου c εξαρτάται από τις **ιδιότητες του μέσου** (ελαστικότητα / συμπιεστότητα και πυκνότητα), όχι από την ένταση. Σε μεγάλα εύρη συχνοτήτων τα συνηθισμένα ρευστά (αέρας/νερό) είναι ουσιαστικά μη διασπερτικά → η c δεν αλλάζει με τη συχνότητα.

Υπάρχουν όμως περιπτώσεις όπου εμφανίζεται διασπορά στον ήχο, π.χ.:

- Σε στερεά (όπου υπάρχουν διαμήκη και εγκάρσια κύματα διαφορετικών ταχυτήτων).
- Σε σωλήνες ή αγωγούς με μικρές διαστάσεις (όπου υπάρχουν επιφανειακά ή κυματοδηγούμενα modes).
- Σε μεταυλικά ή πορώδη μέσα, όπου η ταχύτητα εξαρτάται από τη συχνότητα λόγω απορρόφησης ή μικροδομής.

Αέρας (20 °C): ~343 m/s. Θαλασσινό νερό (20 °C): ~1500 m/s. Γλυκό νερό (πισίνα, 20 °C): ~1480 m/s.

Γιατί το μήκος κύματος είναι μεγαλύτερο στο νερό;

Για δεδομένη συχνότητα f , $\lambda = c/f$. Επειδή το c στο νερό είναι ~4.3× του αέρα, το **μήκος κύματος** είναι ~4.3× μεγαλύτερο.

Παράδειγμα:

- **1 kHz:**
 - Αέρας: $\lambda \approx 343/1000 = 0.343$ m
 - Γλυκό νερό: $\lambda \approx 1480/1000 = 1.48$ m
- **100 Hz:**
 - Αέρας: ~3.43 m
 - Νερό: ~14.8–15.0 m

Γιατί όσο ανεβαίνει η θερμοκρασία, ανεβαίνει και η ταχύτητα του ήχου;

Τι είναι ο ήχος σε αέριο;

Είναι ένα **διαμήκες κύμα πίεσης**: μόρια του αέρα συμπιέζονται και αραιώνονται, μεταφέροντας την ταλάντωση από σημείο σε σημείο.

Η ταχύτητα με την οποία «ταξιδεύει» αυτό το κύμα εξαρτάται από:

- το πόσο «εύκολα» παραμορφώνεται το μέσο (η ελαστικότητά του),

- και πόσο «βαρύ» είναι (η πυκνότητα).

$$c = \sqrt{\text{ελαστικότητα} / \text{πυκνότητα}}$$

Η ταχύτητα ήχου στα στερεά είναι μεγαλύτερη όχι παρά την υψηλή πυκνότητα, αλλά επειδή η ελαστικότητα αυξάνεται πολύ περισσότερο από την πυκνότητα.

Ανάκλαση και μήκος κύματος

Ένα κύμα ανακλάται αποτελεσματικά από ένα εμπόδιο **μόνο αν το εμπόδιο είναι συγκρίσιμο ή μεγαλύτερο από το μήκος κύματος**.

- Αν το μήκος κύματος είναι πολύ μικρό → το εμπόδιο φαίνεται «μεγάλο» και το κύμα ανακλάται σχεδόν τέλεια.
- Αν το μήκος κύματος είναι πολύ μεγάλο → το εμπόδιο μοιάζει «λεπτό» ή «αόρατο» και το κύμα το προσπερνά εύκολα (το περιβάλλει).

Η φυσική εξήγηση

- Η ανάκλαση εξαρτάται από την **αντίθεση εμπέδησης ($Z=\rho c$)** (acoustic impedance mismatch). Πχ $Z_{air} \approx 400 \text{ Pa}$ $Z_{concrete} \approx 8 \times 10^6 \text{ Pa}$. Η **διαφορά εμπέδησης** είναι τεράστια· το κύμα στον αέρα «συναντά τοίχο» σαν έναν τοίχο σχεδόν άπειρα πιο άκαμπτο → σχεδόν όλο το κύμα **ανακλάται**. Ωστόσο, αυτό το επιχείρημα **από μόνο του δεν εξηγεί** γιατί οι χαμηλές συχνότητες περνούν πιο εύκολα, γιατί η αντίθεση εμπέδησης είναι ίδια σε όλες τις συχνότητες (το σκυρόδεμα δεν αλλάζει Z). Στις χαμηλές συχνότητες, το μήκος κύματος είναι τόσο μεγάλο που το κύμα: 1) δεν «προλαβαίνει» να «δει» τη μάζα του τοίχου να αντιστέκεται, 2) αλλά ολόκληρος ο τοίχος αρχίζει να **κινείται ελαφρώς** μπρος-πίσω (σαν μια μεγάλη μεμβράνη).
- Στις χαμηλές συχνότητες, επειδή τα μήκη κύματος είναι τεράστια, η «διαφορά» ανάμεσα στον αέρα και στο εμπόδιο φαίνεται μικρότερη → μικρότερο ποσοστό ανάκλασης, μεγαλύτερο ποσοστό μετάδοσης. Ο **νόμος της μάζας** είναι μια προσεγγιστική σχέση για την **αερόφερτη ηχομόνωση** ενός άκαμπτου, λεπτής μάζας πετάσματος (π.χ. μονό τοίχο): **$R \approx 20 \log_{10}(m' f) - 47$** (R: δείκτης ηχομείωσης (dB), m' : επιφανειακή μάζα του τοίχου (kg/m^2), f : συχνότητα (Hz))
- Επίσης, μεγάλα μήκη κύματος μπορούν να **κάμψουν γύρω από τα εμπόδια** (φαινόμενο περίθλασης). Η περίθλαση εξηγεί γιατί: 1) Οι χαμηλές συχνότητες «γυρίζουν τη γωνία» και ακούγονται πίσω από τοίχους ή πόρτες. 2) Οι υψηλές συχνότητες είναι πιο «κατευθυντικές» και σταματούν πιο εύκολα. Η περίθλαση συμβαίνει επειδή το πεδίο πίεσης γύρω από την άκρη του εμποδίου «ξαναγεννά» σφαιρικά κύματα — όταν το εμπόδιο είναι μικρότερο από ~μία λ , η νέα ακτινοβολία συμπληρώνει το πεδίο πίσω από το εμπόδιο.

Σχέση με την ηχομόνωση

Αυτός είναι και ο λόγος που:

- Οι χαμηλοί ήχοι «μπαίνουν» εύκολα στα κτίρια, ενώ τα πρίμα σταματούν πιο εύκολα.
- Για να «σταματήσεις» χαμηλές συχνότητες, χρειάζεσαι **πολύ βαριές κατασκευές ή συστήματα μάζας-ελατηρίου-μάζας** (διπλά τοιχώματα, πλωτά δάπεδα).

Αν ένα club λειτουργεί στο υπόγειο και οι ένοικοι στον τελευταίο όροφο παραπονιούνται για θόρυβο

1. Δύο «δρόμοι» μετάδοσης θορύβου

Ο ήχος δεν πάει μόνο «μέσα από τον αέρα», αλλά και **μέσα από τα δομικά στοιχεία** του κτιρίου.

- **Αερόφερτη μετάδοση:** Ο ήχος από τα ηχεία και τα μπάσα του club περνάει στον αέρα, μέσα από τοίχους, κλιμακοστάσια, φρεάτια ανελκυστήρα, αεραγωγούς.
- **Δομική/στερεοφερτή μετάδοση:** Οι χαμηλές συχνότητες (μπάσο, κρουστά, subwoofers) προκαλούν **κραδασμούς** στο δάπεδο και στα δομικά στοιχεία. Οι κραδασμοί αυτοί μεταδίδονται **μέσα από τον σκελετό** (κολόνες, δοκάρια, πλάκες) σε όλο τον ουρανοξύστη.

2. Γιατί φτάνει ως τον τελευταίο όροφο

- **Στερεοφερτός θόρυβος:** Οι χαμηλές συχνότητες έχουν πολύ μεγάλα μήκη κύματος (π.χ. 50 Hz → ~7 m στον αέρα, και ακόμα μεγαλύτερο σε σκυρόδεμα). Αυτά «κουμπώνουν» με τις διαστάσεις και τις ιδιοσυχνότητες του κτιρίου, οπότε ολόκληρος ο ουρανοξύστης μπορεί να μπει σε **δομικό συντονισμό**.
- **Πλευρικές διαδρομές (flanking transmission):** Ο ήχος μπορεί να παρακάμπτει τοπικά μέτρα ηχομόνωσης (π.χ. διπλούς τοίχους) και να «ανεβαίνει» μέσω κλιμακοστασίων, φρεατίων ανελκυστήρα, σωληνώσεων, ακόμα και μέσω των προσόψεων.
- **Αθροιστικά φαινόμενα:** Σε έναν υψηλό όροφο, οι κραδασμοί μπορεί να είναι **εντονότεροι** επειδή κάποιες ιδιοσυχνότητες του κτιρίου ενισχύουν συγκεκριμένα φάσματα (όπως μια χορδή που πάλλεται στις αρμονικές της).
- **Αερόφερτος μέσω εγκαταστάσεων:** Αν οι αεραγωγοί εξαερισμού δεν έχουν σωστή ακουστική μόνωση, λειτουργούν σαν «αγωγοί» ήχου που ανεβάζουν τις μεσαίες/υψηλές συχνότητες.

3. Τι ακούγεται πιο πολύ

- Στους τελευταίους ορόφους κυριαρχεί ο **χαμηλοσυχνός βόμβος** (μπάσα, subwoofer), γιατί:
 - Τα μπάσα είναι τα πιο δύσκολα να απομονωθούν.
 - Διαδίδονται πιο αποτελεσματικά μέσω του φέροντος οργανισμού.
 - Έχουν μακρά απόσβεση, άρα παραμένουν αντιληπτά ακόμα κι όταν τα πρίμα έχουν χαθεί.

4. Πώς το αντιμετωπίζουμε (σε επαγγελματικό επίπεδο)

- **Απομόνωση του club:**
 - Πλωτά δάπεδα (floating floors με αντικραδασμικά ελαστικά στρώματα).
 - Αποσύζευξη τοίχων (διπλά κελύφη, resilient channels).
 - Αντικραδασμικές στηρίξεις για σκηνή, ηχεία, εξοπλισμό.
- **Έλεγχος πλευρικών διαδρομών:**
 - Αεροστεγανότητα σε φρεάτια, κλιμακοστάσια.
 - Μονωτικά κουτιά για φρεάτια ανελκυστήρα.
 - Silent blocks σε σωληνώσεις/μηχανήματα HVAC.
- **Διαχείριση συχνοτήτων:**
 - Τοποθέτηση subwoofers σε πλατφόρμες απορρόφησης κραδασμών.
 - Χρήση cardioid sub arrays για μείωση της ενέργειας προς τα δομικά στοιχεία.

Πώς μετρώ την ηχομόνωση πατώματος/ταβανιού;

Η αξιολόγηση της ηχομόνωσης ενός οριζόντιου διαχωριστικού (πάτωμα/ταβάνι) γίνεται με δύο ειδών δοκιμές, επειδή υπάρχουν δύο διαφορετικοί τρόποι μετάδοσης θορύβου: αερόφερτος και κρουστικός.

α) Αερόφερτος θόρυβος

Σενάριο: Θόρυβος από ομιλία, μουσική, τηλεόραση κ.λπ. που μεταδίδεται από τον πάνω χώρο στον κάτω.

Διαδικασία:

1. Τοποθετείται στον πάνω χώρο τυποποιημένη ηχητική πηγή (omnidirectional loudspeaker) που παράγει λευκό ή ροζ θόρυβο.
2. Μετράμε τη στάθμη ήχου στον χώρο πηγής (L1).
3. Μετράμε τη στάθμη ήχου στον κάτω χώρο (L2).
4. Μετράμε τον χρόνο αντήχησης RT60 στον κάτω χώρο ώστε να υπολογιστεί η απορρόφηση: $A = 0.161 V/T$.
5. Υπολογίζουμε τον δείκτη ηχομείωσης:

$$R = L1 - L2 + 10 \log_{10}(S/A)$$

όπου S = εμβαδόν πατώματος (m^2).

Σε επιτόπιες μετρήσεις χρησιμοποιούμε τον δείκτη:

$DnT = L1 - L2 + 10 \log_{10}(T/T_0)$, με $T_0 = 0.5$ s (από το EN ISO 16283 ως μια συμβατική αναφορά που αντιστοιχεί σε «τυπικό» χρόνο αντήχησης ενός κατοικιακού δωματίου μέσου μεγέθους).

β) Κρουστικός θόρυβος

Σενάριο: Θόρυβος από βήματα, πτώσεις αντικειμένων, μετακινήσεις επίπλων.

Διαδικασία:

1. Τοποθετείται στον πάνω χώρο τυποποιημένη μηχανή κρούσης (tapping machine).

2. Μετράμε τη στάθμη ήχου στον κάτω χώρο ($L2$).

3. Κανονικοποιούμε με βάση την απορρόφηση:

$$Ln = L2 + 10 \log_{10}(A/A0), \text{ με } A0 = 10 \text{ m}^2$$

ή σε επιτόπου μετρήσεις:

$$LnT = L2 + 10 \log_{10}(T/T0).$$

Όσο μικρότερο το Ln ή LnT , τόσο καλύτερη η ηχομόνωση.

Γενική αξιολόγηση

- Αερόφερτος θόρυβος: θέλουμε μεγάλες τιμές σε R ή DnT .

- Κρουστικός θόρυβος: θέλουμε μικρές τιμές σε Ln .

Τυπικοί στόχοι για κατοικίες (ανάλογα με τον κανονισμό):

- $DnT,w \geq 50-55$ dB
- $Ln,w \leq 58$ dB

Βασικές Έννοιες & Δείκτες Ηχομόνωσης

1. Στάθμη ηχητικής πίεσης (Lp)

Τύπος:

$$Lp = 20 \log_{10}(p/p0), \text{ με } p0 = 20 \text{ } \mu\text{Pa}$$

Φυσική σημασία:

Περιγράφει πόσο δυνατός είναι ο ήχος σε σχέση με το όριο ακουστότητας. Μια αύξηση +20 dB σημαίνει 10× μεγαλύτερη πίεση. Είναι η βασική μονάδα μέτρησης στάθμης θορύβου.

2. Δείκτης ηχομείωσης (R)

Τύπος:

$$R = L1 - L2 + 10 \log_{10}(S/A)$$

Φυσική σημασία:

Δείχνει πόσα dB «κόβει» ένα χώρισμα (τοίχος, παράθυρο) σε εργαστηριακές συνθήκες.

3. Σταθμισμένος δείκτης ηχομείωσης (Rw)

Ορίζεται από το πρότυπο ISO 717 ως σταθμισμένη τιμή της καμπύλης $R(f)$.

Φυσική σημασία:

Δίνει έναν μοναδικό αριθμό που συνοψίζει την ικανότητα ηχομόνωσης. Χρησιμοποιείται για σύγκριση προϊόντων (π.χ. τοίχοι, τζάμια).

4. Κανονικοποιημένη ηχομείωση επιτόπου (DnT)

Τύπος:

$$DnT = L1 - L2 + 10 \log_{10}(T/T0), \text{ με } T0 = 0.5 \text{ s}$$

Φυσική σημασία:

Χρησιμοποιείται σε επιτόπιες μετρήσεις. Κανονικοποιεί τις μετρήσεις με βάση τον πραγματικό χρόνο αντήχησης του χώρου λήψης.

5. Κανονικοποιημένο επίπεδο κρουστικού θορύβου (Ln, LnT)

Τύποι:

$$Ln = L2 + 10 \log_{10}(A/A0), \text{ με } A0 = 10 \text{ m}^2$$

$$LnT = L2 + 10 \log_{10}(T/T0)$$

Φυσική σημασία:

Μετρά τον θόρυβο που περνά από δάπεδο σε χώρο κάτω λόγω κρούσεων. Όσο μικρότερο είναι το Ln ή LnT, τόσο καλύτερη η ηχομόνωση.

6. Χρόνος αντήχησης (T)

Τύπος Sabine:

$$T = 0.161 V / A$$

Φυσική σημασία:

Δείχνει πόσο διαρκεί ο ήχος σε έναν χώρο αφού σβήσει η πηγή. Σχετίζεται με την ακουστική άνεση και την ευκρίνεια ομιλίας.

Δείκτης	Ορισμός	Τύπος	Φυσική σημασία / Χρήση
Lp	Στάθμη ηχητικής πίεσης	$Lp = 20 \log_{10}(p/p0), p0=20 \mu\text{Pa}$	Περιγράφει πόσο δυνατός είναι ο ήχος.
R	Δείκτης ηχομείωσης (εργαστήριο)	$R = L1 - L2 + 10 \log_{10}(S/A)$	Δείχνει πόσα dB κόβει ένας τοίχος/παράθυρο σε εργαστηριακές συνθήκες.
Rw	Σταθμισμένος δείκτης ηχομείωσης	ISO 717 (σταθμισμένη τιμή R)	Ένας αριθμός για σύγκριση προϊόντων (π.χ. τοίχοι, τζάμια).
DnT	Κανονικοποιημένη ηχομείωση (επιτόπου)	$DnT = L1 - L2 + 10 \log_{10}(T/T0), T0=0.5 \text{ s}$	Χρησιμοποιείται σε πραγματικά κτίρια, κανονικοποιεί τον χρόνο αντήχησης.

Ln, LnT	Κανονικοποιημένο επίπεδο κρουστικού θορύβου	$L_n = L_2 + 10 \log_{10}(A/A_0),$ $A_0 = 10 \text{ m}^2$ $L_n T = L_2 + 10 \log_{10}(T/T_0)$	Μετρά πόσος θόρυβος περνά κάτω από δάπεδο λόγω κρούσεων. Όσο μικρότερο τόσο καλύτερα.
T	Χρόνος αντήχησης	$T = 0.161 V / A$	Δείχνει πόσο διαρκεί ο ήχος σε έναν χώρο. Σχετίζεται με την ακουστική άνεση και την ευκρίνεια ομιλίας.

Γιατί διπλά τοιχώματα/τζάμια με κενό;

Η βελτίωση της ηχομόνωσης με διπλά τοιχώματα ή διπλά τζάμια με κενό εξηγείται μέσω του μοντέλου μάζας-ελατηρίου-μάζας. Τα δύο φύλλα λειτουργούν ως μάζες και ο αέρας στο κενό ως ελατήριο. Αυτό το σύστημα έχει μια χαρακτηριστική συχνότητα συντονισμού f_0 :

$$f_0 = (c / 2\pi) \sqrt{[(\rho_0 / d) (1/m_1 + 1/m_2)]}$$

- Κάτω από f_0 : το σύστημα συμπεριφέρεται σαν ενιαίο, με χαμηλή ηχομόνωση.
- Γύρω από f_0 : εμφανίζεται «βουτιά» στην ηχομόνωση.
- Πάνω από f_0 : τα δύο φύλλα αποσυζευγνύονται και η ηχομόνωση αυξάνει με κλίση ~ 12 dB/οκτάβα.

Παράγοντες που βελτιώνουν:

- Μεγαλύτερο κενό $d \rightarrow$ κατεβάζει το f_0 .
- Βαρύτερα φύλλα \rightarrow μικρότερο f_0 και καλύτερη ηχομόνωση.
- Ασύμμετρα πάχη \rightarrow αποφεύγονται οι ίδιες κρίσιμες συχνότητες.
- Πορώδες απορροφητικό στη κοιλότητα \rightarrow αυξάνει την απόσβεση και κόβει τη βουτιά.
- Ελαστικές στηρίξεις/διπλοί σκελετοί \rightarrow περιορίζουν στερεοφερτές γέφυρες.

Παράγοντες που χειροτερεύουν:

- Σκληρές γέφυρες (κοχλίες, κοινός σκελετός).
- Αεροδιαρροές (χαραμάδες, κακής ποιότητας λάστιχα).
- Συμπτώσεις κρίσιμων συχνοτήτων των φύλλων χωρίς ασυμμετρία.

Παράδειγμα 1: Διπλή γυψοσανίδα

$m_1 = m_2 = 10 \text{ kg/m}^2$, $d = 0.10 \text{ m}$.

Υπολογισμός: $f_0 \approx 85 \text{ Hz}$.

Αν το κενό διπλασιαστεί (0.20 m) $\rightarrow f_0 \approx 60 \text{ Hz}$.

Παράδειγμα 2: Διπλά τζάμια

- Συμμετρικό 6/16/6: $m_1 \approx m_2 \approx 15 \text{ kg/m}^2$, $d=16 \text{ mm} \rightarrow f_0 \approx 270 \text{ Hz}$.
- Ασύμμετρο 6/16/10: $m_1 \approx 15$, $m_2 \approx 25 \text{ kg/m}^2 \rightarrow f_0 \approx 155 \text{ Hz}$.

Συμπέρασμα - Κανόνες σχεδιασμού:

- Στόχευσε χαμηλό f_0 με μεγάλα κενά και βαριές μάζες.
- Χρησιμοποίησε ασύμμετρα πάχη.
- Πρόσθεσε πορώδες γέμισμα στη κοιλότητα.
- Απόφυγε άκαμπτες γέφυρες.
- Εξασφάλισε αεροστεγανότητα.
- Έλεγε πλευρικές διαδρομές (flanking).

Γιατί το παράθυρο ρίχνει πολύ την ηχομόνωση;

Η συνολική διαπερατότητα είναι σταθμισμένος μέσος όρος: $\tau_{ολ} = (\tau_1 A_1 + \tau_2 A_2) / (A_1 + A_2)$.
Ακόμα και μικρή επιφάνεια με χαμηλό R κυριαρχεί. Παράδειγμα: τοίχος 10 m², R=50 dB + παράθυρο 1 m², R=30 dB → $R_{ολ} \approx 40$ dB.

Νόμος της μάζας

Για πέτασμα: $R \approx 20 \log_{10}(m' f) - 47$ (m' σε kg/m², f σε Hz). Διπλασιασμός μάζας ή συχνότητας → +6 dB.

Κρίσιμη συχνότητα

Συχνότητα όπου μήκος κύματος στον αέρα ταιριάζει με μήκος κύματος κάμψης πλάκας. Εμφανίζεται πτώση στην ηχομείωση. Υπολογισμός: $f_c = (c^2 / 2\pi) \sqrt{(m' / D)}$. Αντιμετώπιση: laminated, ασύμμετρα πάχη, απόσβεση.

Πώς μετράμε ηχοαπορρόφηση χώρου;

Με RT (RT60) και τύπους Sabine/Eyring: $A = 0.161 V / T$. Σε εργαστήριο (ISO 354) με αντηχητικό θάλαμο.

Ηχομόνωση vs Ηχοαπορρόφηση

Ηχομόνωση: εμποδίζει μετάδοση μεταξύ χώρων (R, DnT). Ηχοαπορρόφηση: μειώνει ανακλάσεις στον ίδιο χώρο (T60, A, α). Παράδειγμα: αφρός = υψηλή απορρόφηση αλλά χαμηλή μόνωση.

Impact sound level (δάπεδα)

Με tapping machine πάνω → μετρούμενος θόρυβος κάτω. Δείκτες Ln, LnT. Όσο μικρότερο τόσο καλύτερο. Στόχοι κατοικιών ≤ 50–58 dB. Βελτίωση με πλωτό δάπεδο, ελαστικά υποστρώματα, απομόνωση διαδρομών.

Τζάμια για να πέσω ≤ 45 dB μέσα στο καθιστικό

Μετράω με ηχόμετρο 24h στον άξονα παραθύρου → βρίσκω Lout. Στόχος: Lin ≤ 45 dB. Υπολογίζω απαίτηση $R_w + C_{tr}$ από $R_{req} = L_{out} - L_{in} + 10 \log(S/A)$. Επιλέγω υαλοπίνακα με κατάλληλο $R_w + C_{tr}$ (laminated/ασύμμετρο διπλό/τριπλό).