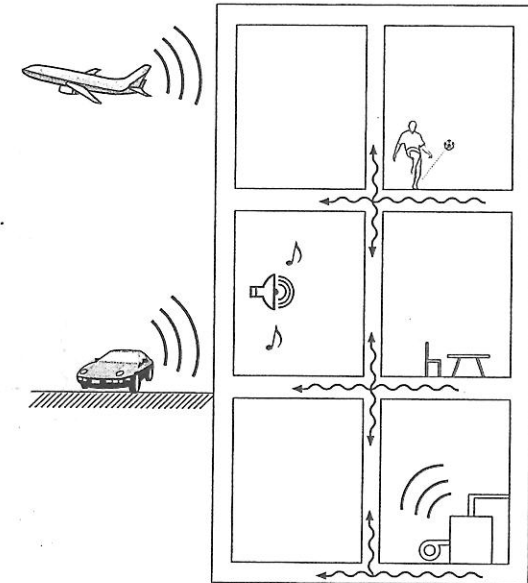


## ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΗΧΟΜΟΝΩΣΗΣ

Αντικείμενο της ηχομόνωσης είναι η αποτελεσματική προστασία ενός κτιρίου τόσο από τους εξωτερικούς θορύβους (κυκλοφοριακός, αεροπορικός κλπ) όσο και από τους θορύβους που δημιουργούνται στο εσωτερικό του (Σχ. 22).

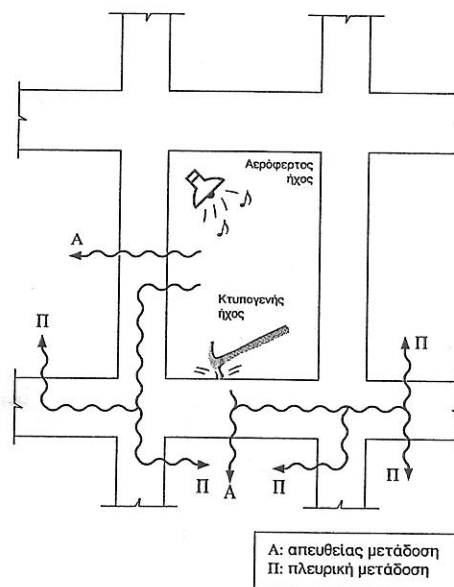


Σχ.22. Πηγές θορύβου

Η διάδοση του ήχου σ' ένα κτίριο είναι ένα σύνθετο πρόβλημα γιατί ο ήχος ακολουθεί διάφορους δρόμους διάδοσης. Για να επιτευχθεί αποτελεσματική ηχομόνωση θα πρέπει να προβλεφθούν όλοι οι πιθανοί δρόμοι διάδοσης του ήχου και να ληφθούν κατάλληλα μέτρα για τον περιορισμό του.

Οι θόρυβοι στο εσωτερικό ενός κτιρίου διακρίνονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με την πηγή από την οποία προέρχονται. Η πρώτη κατηγορία είναι ο αερόφερτος

ήχος και προέρχεται από πηγές όπως ομιλία, μουσική, λειτουργία οικιακών συσκευών κλπ και διαδίδεται μέσω του αέρα στον διπλανό χώρο (Σχ. 23). Είναι φανερό ότι ο αερόφερτος ήχος αποτελεί το κύριο πρόβλημα ηχομόνωσης μεταξύ γειτονικών χώρων κύρια του ίδιου ορόφου και κατά συνέπεια αφορά περισσότερο δομικά στοιχεία όπως τοίχοι, πόρτες, παράθυρα.



Σχ. 23. Μετάδοση του ήχου σ' ένα κτίριο

Στην δεύτερη κατηγορία ανήκει ο κτυπογενής (στερεόφερτος) ήχος. Αυτός προέρχεται από εφαρμογή κτυπημάτων (δυνάμεων) πάνω σε δομικά στοιχεία. Στην πράξη κτυπογενής ήχος προκαλείται από βηματισμό κατοίκων, μετακίνηση επίπλων, πτώση αντικειμένων στο δάπεδο κλπ. Στις περιπτώσεις αυτές, το δομικό στοιχείο που δέχεται την διέγερση (συνήθως το πάτωμα) ταλαντώνεται και εκπέμπει αερόφερτο ήχο στους γειτονικούς χώρους (Σχ. 23). Ο κτυπογενής ήχος μεταφέρεται μέσω του

σκελετού του κτιρίου σε μεγάλες αποστάσεις με μικρή απόσβεση και συνεπώς ο έλεγχός του είναι σημαντικός για την ηχομόνωση.

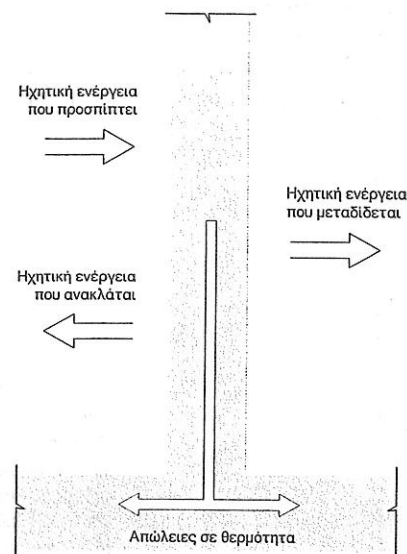
Οι δύο κατηγορίες του αερόφερτου και κτυπογενή ήχου έχουν, όπως ήδη αναφέρθηκε στην εισαγωγή, διαφορετικά χαρακτηριστικά και μηχανισμούς διάδοσης και γι' αυτό εξετάζονται χωριστά. Τα μέτρα ηχομόνωσης που παίρνονται διακρίνονται σε μέτρα ηχομόνωσης για αερόφερτο ήχο και μέτρα ηχομόνωσης για κτυπογενή. Μια αποτελεσματική ηχομόνωση πρέπει να περιλαμβάνει μέτρα για τον περιορισμό και των δύο κατηγοριών θορύβου.

Στους εσωτερικούς θορύβους ενός κτιρίου περιλαμβάνονται και οι θόρυβοι διάφορων εγκαταστάσεων όπως π.χ. ανελκυστήρες, εγκαταστάσεις θέρμανσης – ψύξης, υδραυλικά, αποχετεύσεις κλπ. Επομένως, θα πρέπει να παίρνονται ηχομονωτικά μέτρα και για τον περιορισμό του θορύβου των εγκαταστάσεων.

## 4. ΗΧΟΜΟΝΩΣΗ ΣΕ ΑΕΡΟΦΕΡΤΟ ΗΧΟ

## 4.1 Δείκτης Ηχομείωσης κτιριακού στοιχείου σε αερόφερτο ήχο

Από την ηχητική ενέργεια που προσπίπτει σ' ένα χωρίσμα ένα μέρος ανακλάται, ένα μέρος μεταδίδεται στον διπλανό χώρο και ένα μέρος μετατρέπεται σε θερμότητα μέσα στο χωρίσμα (Σχ. 24).



Σχ. 24. Μετάδοση της ηχητικής ενέργειας μέσα από χωρίσμα

Η ηχομονωτική ικανότητα ενός κτιριακού στοιχείου χαρακτηρίζεται από τον λόγο  $\frac{P_{\pi}}{P_{\delta}}$ , όπου  $P_{\pi}$  η ηχητική ενέργεια που προσπίπτει και  $P_{\delta}$  αυτή που διέρχεται.

Όσο μεγαλύτερη η ενέργεια που διέρχεται τόσο χαμηλότερη η ηχομονωτική ικανότητα του στοιχείου.

Ως δείκτης ηχομείωσης  $R$  χωρίσματος σε αερόφερτο ήχο ορίζεται το δεκαπλάσιο του λογάριθμου του λόγου  $\frac{P_{\pi}}{P_{\delta}}$ ,

$$R = 10 \log \frac{P_{\pi}}{P_{\delta}} \text{ (σε dB). } \text{ ή } R_w = 10 \log \frac{w_i}{w_t} = 10 \cdot \log$$

Ο δείκτης ηχομείωσης  $R$  ενός δομικού στοιχείου όταν αυτό αποτελεί διαχωριστικό στοιχείο μεταξύ δύο χώρων (Σχ. 25) δίνεται από την σχέση

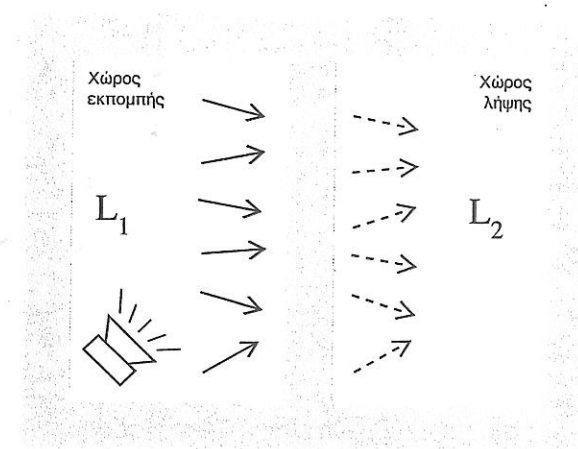
$$R = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{S}{A} \text{ (σε dB),}$$

όπου:  $L_1$  είναι η στάθμη ηχητικής πίεσης στον χώρο εκπομπής

$L_2$  είναι η στάθμη ηχητικής πίεσης στον χώρο λήψης

$S$  είναι η επιφάνεια του χωρίσματος

και  $A$  είναι η ισοδύναμη ηχοαπορροφητική επιφάνεια του χώρου λήψης.



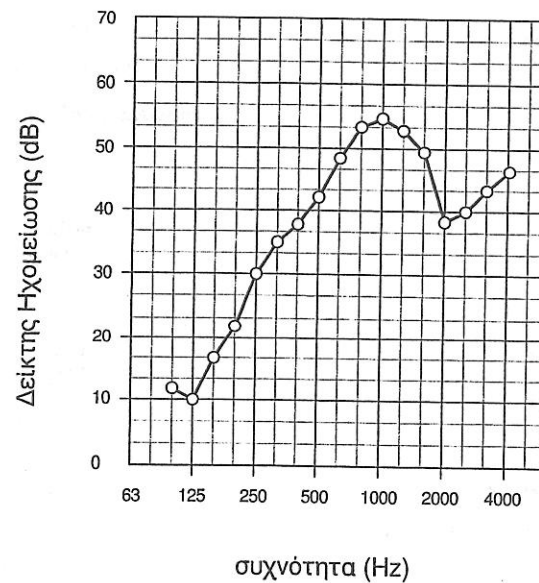
Σχ. 25. Ορισμός Δείκτη Ηχομείωσης χωρίσματος

Σε περίπτωση που ενδιαφέρουν χονδρικές τιμές του δείκτη ηχομείωσης  $R$ ,

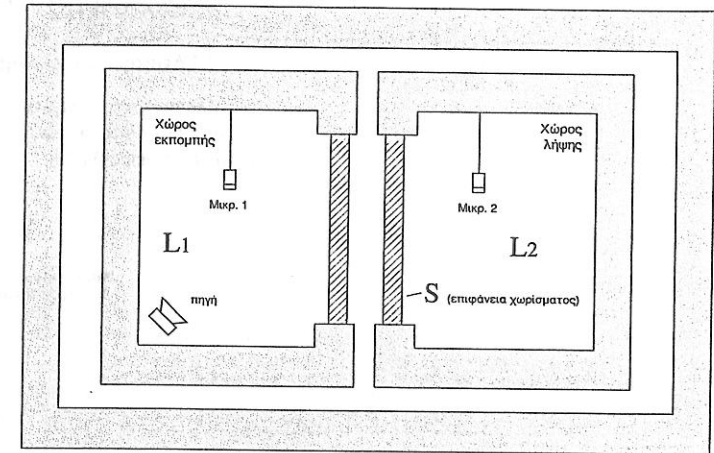
ο όρος  $10 \log \frac{S}{A}$  μπορεί να παραλειφθεί οπότε προκύπτει  $R = L_1 - L_2$  (dB).

Ο δείκτης ηχομείωσης ενός χωρίσματος δηλ. είναι προσεγγιστικά ίσος με την διαφορά της στάθμης ηχητικής πίεσης στους δύο χώρους που διαχωρίζει.

Ο δείκτης ηχομείωσης είναι συνάρτηση της συχνότητας και συνήθως δίνονται οι τιμές του στις κεντρικές συχνότητες των τρίτων οκτάβας στο διάστημα από 100Hz μέχρι 3200Hz που ενδιαφέρει την Δομική Ακουστική. Η τιμή του εξαρτάται επίσης από την γωνία πρόσπτωσης των ηχητικών κυμάτων και οι τιμές που δίνονται είναι μέσες τιμές για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης (διάχυτο ηχητικό πεδίο). Ένα τυπικό παράδειγμα δείκτη ηχομείωσης χωρίσματος δίνεται στο Σχήμα 26.

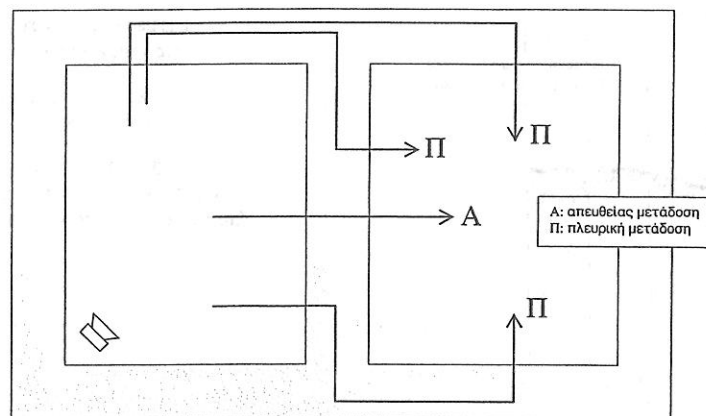


Σχ. 26. Διάγραμμα Δείκτη Ηχομείωσης χωρίσματος



Σχ. 27. Μέτρηση Δείκτη Ηχομείωσης χωρίσματος

Η μέτρηση του δείκτη ηχομείωσης κτιριακών στοιχείων γίνεται σε ειδική διάταξη θαλάμων μέτρησης όπως φαίνεται σχηματικά στο Σχήμα 27. Το δομικό στοιχείο που θα μετρηθεί κατασκευάζεται ως διαχωριστικό στο άνοιγμα μεταξύ των θαλάμων. Οι προδιαγραφές και απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιούνται καθώς και η μεθοδολογία μέτρησης καθορίζονται στο πρότυπο ΕΛΟΤ 370. Η καθοριστική απαίτηση είναι ότι τα πλευρικά στοιχεία των θαλάμων πρέπει να παρουσιάζουν ιδιαίτερα υψηλή ηχομόνωση, έτσι ώστε ο μόνος δρόμος μετάδοσης του ήχου να είναι απευθείας μέσα από το στοιχείο που μετριέται.



Σχ. 28. Μετάδοση του αερόφερτου ήχου μεταξύ γεγονικών χώρων.

#### 4.2 Πλευρικές μεταδόσεις – Φαινόμενος δείκτης ηχομείωσης

Στην πράξη, για ένα δομικό στοιχείο που είναι τοποθετημένο σ' ένα κτίριο, η ηχητική ενέργεια που προσπίπτει δεν μεταδίδεται μόνο μέσα από το στοιχείο (Σχ. 28, δρόμος Α) αλλά και μέσα από τα πλευρικά στοιχεία (δρόμος Π). Η πρόσθετη μετάδοση μέσα από πλευρικά στοιχεία ονομάζεται πλευρική μετάδοση και είναι ιδιαίτερα σημαντική για την ηχομόνωση. Σ' ένα συνηθισμένο κτίριο με πλευρικά στοιχεία από σκυρόδεμα σχεδόν το 50% της μετάδοσης του ήχου οφείλεται σε πλευρικές μεταδόσεις.

Είναι φανερό ότι, λόγω των πλευρικών μεταδόσεων, ο Δείκτης Ηχομείωσης ενός κτιριακού στοιχείου που μετριέται επί τόπου είναι χαμηλότερος από τον αντίστοιχο που μετριέται στο εργαστήριο. Ο δείκτης ηχομείωσης που περιλαμβάνει και τις πλευρικές μεταδόσεις ονομάζεται φαινόμενος δείκτης ηχομείωσης και συμβολίζεται με  $R'$ .

Οι πλευρικές μεταδόσεις και ο περιορισμός τους γίνεται ιδιαίτερα σημαντικός στις περιπτώσεις που απαιτείται υψηλή ηχομόνωση. Στις περιπτώσεις αυτές, λόγω της μεγάλης «αντίστασης» διάδοσης του ήχου απευθείας μέσα από το δομικό στοιχείο, ο δρόμος μετάδοσης από τα πλευρικά στοιχεία είναι ευκολότερος.

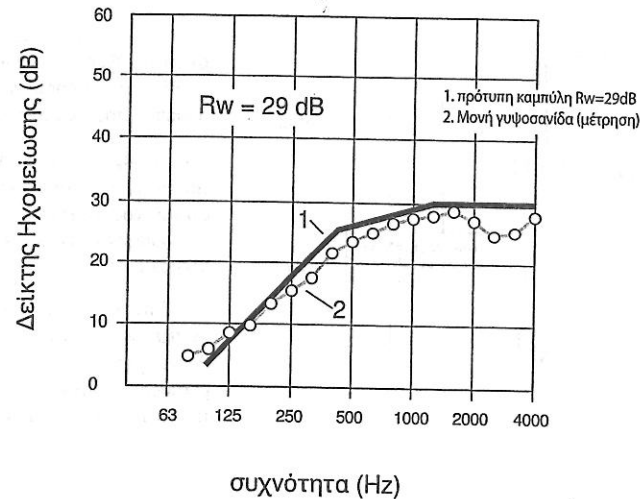
Για παράδειγμα, αν ένα ελαφρύ χώρισμα με σχετικά υψηλό δείκτη ηχομείωσης της τάξης των 55dB κατασκευασθεί και στηριχθεί σε μια πλάκα σκυροδέματος, ο φαινόμενος δείκτης  $R'$  μπορεί να κυμανθεί από 45 μέχρι 55dB λόγω των πλευρικών μεταδόσεων ανάλογα με το βάρος της πλάκας, δηλ. ανάλογα με το βάρος των πλευρικών στοιχείων.

Στην πράξη οι πλευρικές μεταδόσεις μπορούν να αντιμετωπισθούν είτε με πλευρικά στοιχεία μεγάλου βάρους (επιφανειακό βάρος 400 kg/m<sup>2</sup>) είτε με ασυνεχή κατασκευή. Λεπτομέρειες για τους τρόπους αντιμετώπισης των πλευρικών μεταδόσεων δίνονται στην συνέχεια στην περιγραφή της ηχομονωτικής ικανότητας των επί μέρους δομικών στοιχείων.

#### 4.3 Αξιολόγηση της ηχομονωτικής ικανότητας σε αερόφερτο ήχο – Σταθμισμένος δείκτης ηχομείωσης

Όπως προαναφέρθηκε, ο δείκτης ηχομείωσης  $R$  (ή  $R'$ ) ενός χωρίσματος μεταβάλλεται με την συχνότητα και οι τιμές του δίνονται για όλες τις κεντρικές συχνότητες των τρίτων οκτάβας από 100Hz μέχρι 3200Hz. Για τον λόγο αυτό είναι δύσκολη μια απλή και γρήγορη αξιολόγηση της ηχομονωτικής ικανότητας ενός χωρίσματος βασισμένη στους δείκτες  $R$  ή  $R'$ . Ακόμη πιο δύσκολη είναι η σύγκριση της ηχομόνωσης δύο χωρισμάτων γιατί κάποιο χώρισμα μπορεί να παρουσιάζει υψηλότερες τιμές των δεικτών  $R$  ή  $R'$  σε κάποιες συχνότητες και χαμηλότερες τιμές σε κάποιες άλλες. Σημαντικό επίσης είναι το γεγονός ότι είναι εξαιρετικά δύσκολο να τεθούν απαιτήσεις ή προδιαγραφές για την ηχομόνωση κτιριακών στοιχείων χρησιμοποιώντας όλες τις τιμές του δείκτη ηχομείωσης στις τριτοκταβικές ζώνες.

Για τους παραπάνω λόγους προκύπτει η ανάγκη ορισμού ενός μονότιμου δείκτη που να χαρακτηρίζει συνολικά την ηχομονωτική ικανότητα ενός χωρίσματος για όλη την περιοχή συχνοτήτων από 100Hz μέχρι 3200Hz.



Σχ. 29. Σταθμίσωση Δείκτη Ηχομείωσης χωρίσματος

Το μέγεθος αυτό ονομάζεται Σταθμισμένος Δείκτης Ηχομείωσης και συμβολίζεται ως  $R_w$  ( $R'_w$ ).

Για να προκύψει ο σταθμισμένος δείκτης ηχομείωσης  $R_w$ , οι τιμές του δείκτη  $R$  συγκρίνονται με μια πρότυπη καμπύλη στάθμισης που καθορίζει τις τιμές οκτάβας έτσι ώστε ο δείκτης  $R_w$  να έχει συγκεκριμένη τιμή. Η πρότυπη καμπύλη για σταθμισμένο δείκτη ηχομείωσης  $R'_w = 29dB$  φαίνεται στο Σχήμα 29. Η τιμή της πρότυπης καμπύλης που αντιστοιχεί στα 500Hz είναι και η τιμή του σταθμισμένου δείκτη  $R_w$ .

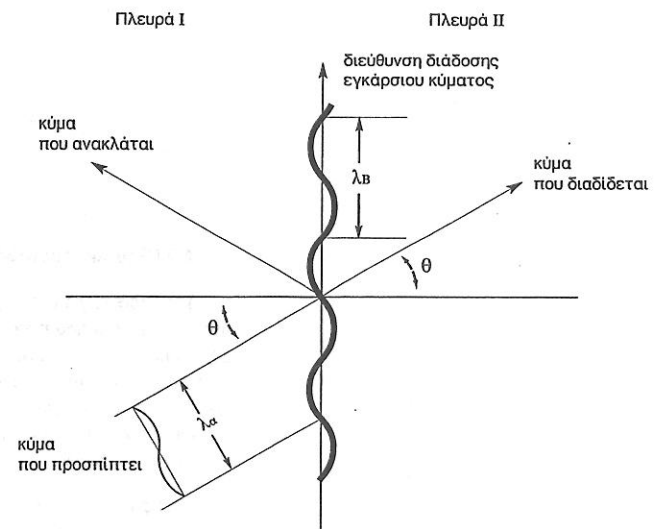
Η διαδικασία στάθμισης του δείκτη  $R'$  ή  $R$  έτσι ώστε να προκύψει ο μονότιμος δείκτης  $R_w$  ή  $R'_w$  περιγράφεται στο πρότυπο ΕΛΟΤ 461.

Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 29 φαίνεται ο μετρημένος δείκτης ηχομείωσης  $R$  χωρίσματος μονής γυψοσανίδας και η πρότυπη καμπύλη. Η πρότυπη καμπύλη στάθμισης μετατοπίζεται μέχρις ότου οι δύο καμπύλες «πλησιάσουν» (όπως φαίνεται στο σχήμα) και εκπληρωθούν τα παρακάτω κριτήρια.

1. Η μέση δυσμενέστερη απόκλιση για όλες τις συχνότητες μεταξύ μετρήσεων και πρότυπης καμπύλης να μην υπερβαίνει τα 2dB.

2. Η μέγιστη δυσμενής απόκλιση για οποιαδήποτε συχνότητα να μην υπερβαίνει τα 8dB.

Για την θέση της πρότυπης καμπύλης όπου εκπληρώνονται τα παραπάνω κριτήρια, η τιμή που αντιστοιχεί στην συχνότητα των 500Hz αποτελεί τον δείκτη  $R_w$ . Στο συγκεκριμένο παράδειγμα της μονής γυψοσανίδας προκύπτει  $R_w = 29dB$ .



Σχ. 30. Μηχανισμός διάδοσης ηχητικού κύματος μέσα από χωρίσμα

#### 4.4 Μετάδοση του ήχου μέσα από χωρίσματα

Για την κατανόηση της ηχομονωτικής συμπεριφοράς των δομικών στοιχείων σε αερόφερτο ήχο είναι βασικής σημασίας η ανάλυση του μηχανισμού μετάδοσης του ήχου μέσα από ένα χωρίσμα.

Στο Σχήμα 30 φαίνεται σχηματικά ένα χωρίσμα που διαιρεί τον χώρο σε δύο πλευρές. Από την πλευρά Ι προσπίπτει υπό γωνία  $\theta$  ηχητικό κύμα μήκους κύματος  $\lambda_o$ . Το κύμα διεγείρει το χωρίσμα σε ταλάντωση και πάνω του δημιουργούνται και διαδίδονται εγκάρσια κύματα μήκους κύματος  $\lambda_b$ . Εξαιτίας της ταλάντωσής του το χωρίσμα λειτουργεί ως ηχητική πηγή και εκπέμπει ήχο στην πλευρά ΙΙ.

Ο μηχανισμός διάδοσης επομένως είναι: αερόφερτος ήχος που προσπίπτει – δημιουργία στερεόφερτου ήχου στο χωρίσμα – εκπομπή αερόφερτου ήχου στο γειτονικό χώρο.

Η εκπομπή ήχου από το χωρίσμα στην πλευρά ΙΙ εξαρτάται από την σχέση μεταξύ του μήκους κύματος  $\lambda_o$  των ηχητικών κυμάτων στον αέρα και του μήκους κύματος  $\lambda_b$  των εγκάρσιων κυμάτων (στερεόφερτου ήχου) πάνω στο χωρίσμα. Επομένως, η μετάδοση του ήχου μέσα από το χωρίσμα είναι συνάρτηση της συχνότητας.

Στις χαμηλές συχνότητες ισχύει  $\lambda_b > \lambda_o$  και η εκπομπή ήχου από το χωρίσμα είναι χαμηλή και περιορίζεται στην περιοχή γύρω από το χωρίσμα. Καθώς η συχνότητα αυξάνει, τα μήκη κύματος  $\lambda_o, \lambda_b$  μεταβάλλονται και υπάρχει κάποια συχνότητα όπου το ίχνος (προβολή) του  $\lambda_o$  πάνω στο χωρίσμα είναι ίσο με το μήκος κύματος  $\lambda_b$  των εγκάρσιων κυμάτων πάνω στο χωρίσμα. Στην συχνότητα αυτή, η σύμπτωση των δύο μηκών κύματος έχει σαν αποτέλεσμα έντονη εκπομπή ήχου από το χωρίσμα (ελάχιστη ηχομόνωση). Η συχνότητα μέγιστης εκπομπής (ελάχιστης ηχομόνωσης) ονομάζεται συχνότητα σύμπτωσης και δίνεται από την σχέση

$$f_s = \frac{c_o^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m''}{B}}$$

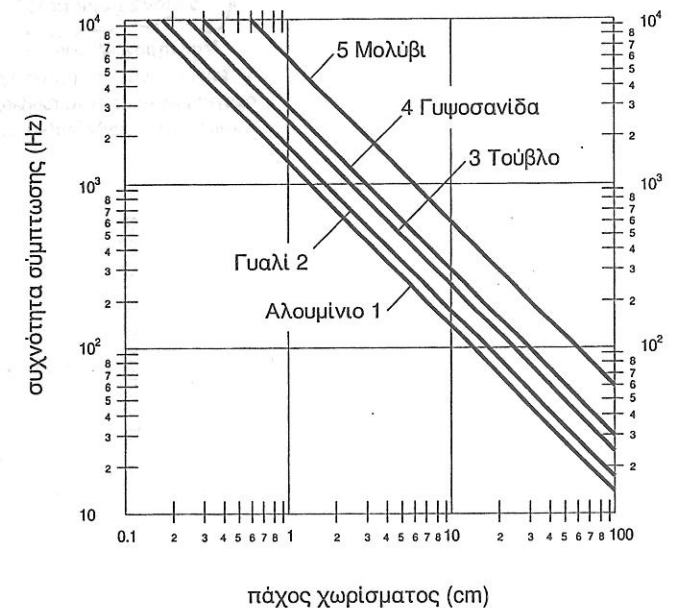
όπου  $B = \frac{Eh^3}{12}$  είναι η ακαμψία του χωρίσματος,  $m''$  είναι το επιφανειακό βάρος του και  $c_o = 340 \text{ m/s}$ .

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι η συχνότητα σύμπτωσης  $f_s$  έχει ιδιαίτερη σημασία για την ηχομόνωση.

Για συχνότητες υψηλότερες από την συχνότητα σύμπτωσης  $f_s$ , η εκπομπή ήχου μειώνεται σταδιακά με αποτέλεσμα σταδιακή αύξηση της ηχομόνωσης.

Η συχνότητα σύμπτωσης είναι συνάρτηση βασικών μεγεθών του χωρίσματος και συγκεκριμένα της ακαμψίας και του επιφανειακού βάρους. Παίρνοντας υπόψη ότι η ταχύτητα διάδοσης διαμήκων κυμάτων  $c_L$  στο χωρίσμα δίνεται από την σχέση

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \text{ προκύπτει ότι η συχνότητα σύμπτωσης } f_s \text{ ενός χωρίσματος πάχους } h$$



Σχ. 31. Διάγραμμα υπολογισμού της συχνότητας σύμπτωσης

μπορεί να υπολογισθεί προσεγγιστικά από την σχέση

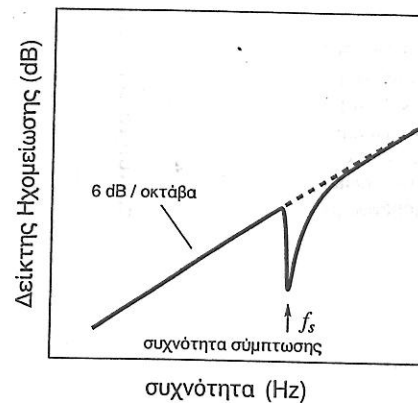
$$f_s = \frac{c_o^2}{1 \cdot 8 \cdot c_L \cdot h} \text{ (σε Hz)}$$

$$(c_o = 340 \text{ m/s}, c_L \text{ (m/s)}, h \text{ (m)})$$

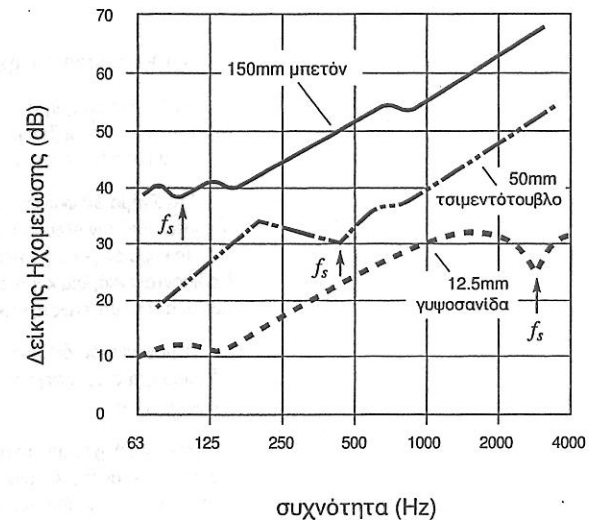
Η συχνότητα σύμπτωσης ενός χωρίσματος μπορεί να εκτιμηθεί εύκολα χρησιμοποιώντας το διάγραμμα του Σχ. 31 όπου δίνεται η  $f_s$  ως συνάρτηση του πάχους  $h$  για χωρίσματα διαφόρων υλικών.

#### 4.5 Μονά χωρίσματα

Μονά ή μονοκέλυφα χωρίσματα θεωρούνται δομικά στοιχεία που ταλαντώνονται ως ενιαίο σώμα κατά την διέγερσή τους και την εκπομπή ήχου. Αποτελούνται από ομογενή υλικά (μπετόν, τούβλο, γυψοσανίδα κλπ) είτε από στρώσεις διαφορετικών υλικών στέρεα συνδεδεμένες μεταξύ τους έτσι ώστε να αποτελούν ένα σώμα.



Σχ. 32. Θεωρητική καμπύλη Δείκτη Ηχομείωσης μονού χωρίσματος

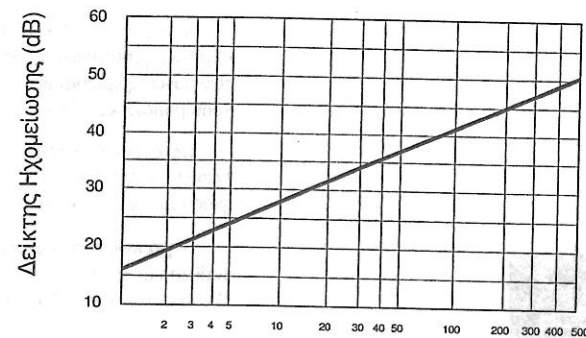


Σχ. 33. Δείκτης Ηχομείωσης μονών χωρισμάτων

Η ηχομονωτική ικανότητα ενός μονού χωρίσματος παριστάνεται σχηματικά σε συνάρτηση με την συχνότητα στο Σχήμα 32. Όπως φαίνεται στο σχήμα, ο δείκτης ηχομείωσης αυξάνεται με την συχνότητα με κλίση 6dB/οκτάβα δηλ. κατά 6dB για κάθε διπλασιασμό της συχνότητας. Στην περιοχή όμως γύρω από την συχνότητα σύμπτωσης  $f_s$  παρατηρείται απότομη μείωση της ηχομείωσης όπως περιγράψαμε στην προηγούμενη παράγραφο. Η μείωση του δείκτη ηχομείωσης λόγω σύμπτωσης εκτείνεται σε μια περιοχή με εύρος περίπου μιας οκτάβας. Το μέγεθος της μείωσης εξαρτάται κύρια από την απόσβεση του υλικού.

Είναι φανερό ότι το φαινόμενο της σύμπτωσης περιορίζει την ηχομονωτική ικανότητα ενός μονού χωρίσματος. Το ιδανικό μονό χώρισμα θα πρέπει να εμφανίζει συχνότητα σύμπτωσης εκτός της περιοχής από 100Hz μέχρι 3200Hz που αφορά την Δομική Ακουστική.

Στο Σχήμα 33 φαίνεται ο δείκτης ηχομείωσης τριών χαρακτηριστικών περιπτώσεων χωρισμάτων. Το πρώτο χώρισμα είναι λεπτή, εύκαμπτη πλάκα



Επιφανειακό Βάρος χωρίσματος (Kg/m²)

Σχ. 34. Προεγγιστικός μέσος Δείκτης Ηχομείωσης μονών χωρισμάτων με βάση τον νόμο της μάζας

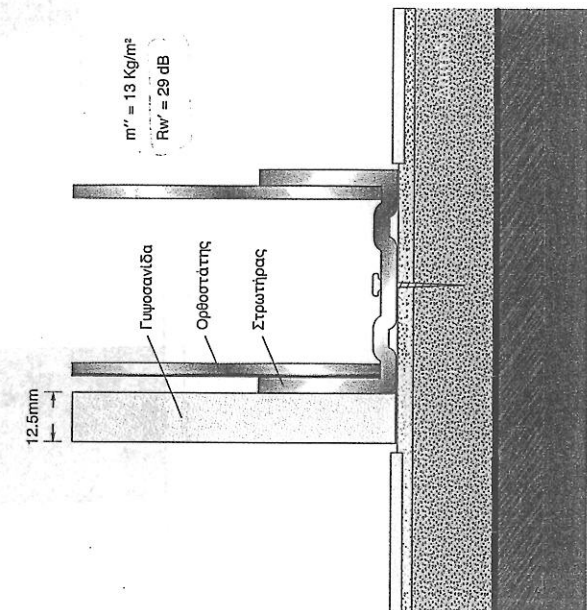
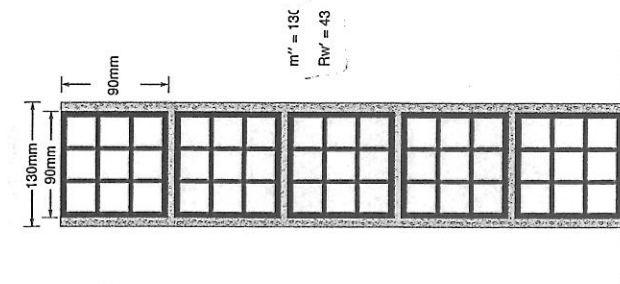
γυψοσανίδας με συχνότητα σύμπτωσης γύρω στα 2600Hz. Η δεύτερη περίπτωση αφορά βαρύ, άκαμπτο χώρισμα από μπετόν με συχνότητα σύμπτωσης 80Hz. Τέλος, το τρίτο χώρισμα από τσιμεντότουβλα παρουσιάζει συχνότητα σύμπτωσης στα 300Hz, εντός της ζώνης που ενδιαφέρει την ηχομόνωση.

Αν εξαιρέσει κανείς το φαινόμενο της σύμπτωσης, μια χονδρική εκτίμηση της ηχομόνωσης μονών χωρισμάτων δίνεται από τον λεγόμενο νόμο της μάζας. Ο νόμος αυτός δέχεται ότι ο δείκτης ηχομείωσης ενός μονού χωρίσματος αυξάνεται κατά 6dB για κάθε διπλασιασμό του βάρους του.

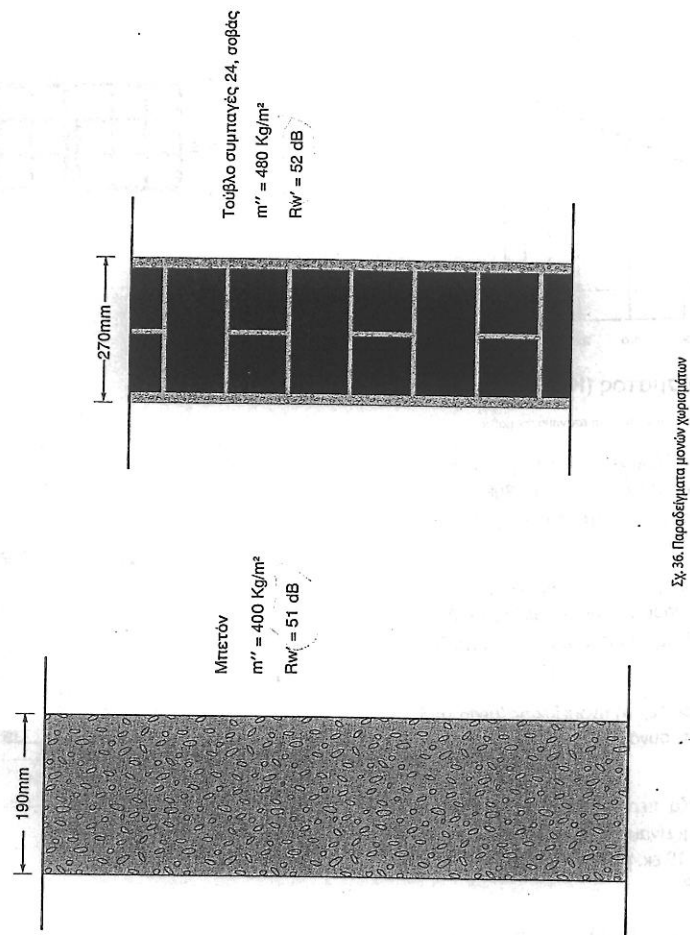
Στο Σχήμα 34 δίνεται ένα διάγραμμα του μέσου δείκτη ηχομείωσης (μέση τιμή για όλες τις συχνότητες) ενός μονού χωρίσματος σε συνάρτηση με το επιφανειακό του βάρος (kg/m²).

Μια μονή γυψοσανίδα έχει επιφανειακή μάζα περίπου 13 Kg/m². Από το διάγραμμα προκύπτει ότι ο μέσος δείκτης ηχομείωσης είναι περίπου 28dB. Αντίστοιχα, για ένα τοιχείο οπλισμένου σκυροδέματος πάχους 19 εκ. με επιφανειακή μάζα 400 Kg/m² προκύπτει δείκτης ηχομείωσης περίπου 50dB.

Παραδείγματα συνηθισμένων μονών χωρισμάτων με τα ηχομονωτικά χαρακτηριστικά τους δίνονται στα Σχήματα 35 και 36.



Σχ. 35. Παραδείγματα μονών χωρισμάτων

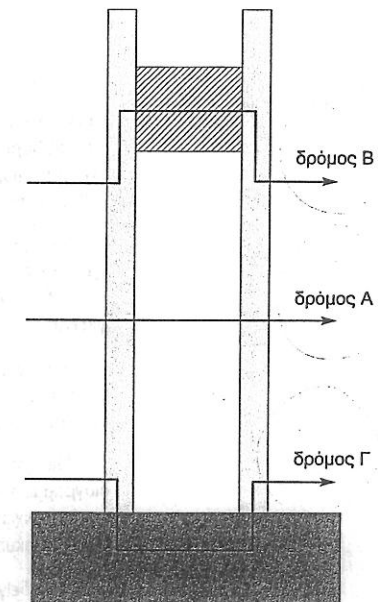


#### 4.6 Διπλά χωρίσματα

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, τόσο το φαινόμενο της σύμπτωσης όσο και ο νόμος της μάζας θέτουν ένα όριο στην ηχομονωτική ικανότητα των μονών χωρισμάτων. Για τον λόγο αυτό, όπου απαιτείται αυξημένη ηχομόνωση χρησιμοποιούνται διπλά ή δικέλυφα χωρίσματα.

Ως διπλά ή δικέλυφα θεωρούνται χωρίσματα που αποτελούνται από δύο πλάκες ή κελύφη που χωρίζονται μεταξύ τους με διάκενο στο οποίο υπάρχει αέρας ή ηχοαπορροφητικό υλικό.

Η ηχομονωτική συμπεριφορά ενός διπλού χωρίσματος είναι πολύπλοκη γιατί, σε αντίθεση με το μονό, υπάρχουν τρεις διαφορετικοί δρόμοι μετάδοσης του ήχου (Σχ. 37). Η απευθείας διάδοση μέσα από το διάκενο (δρόμος Α), η μετάδοση μέσα από

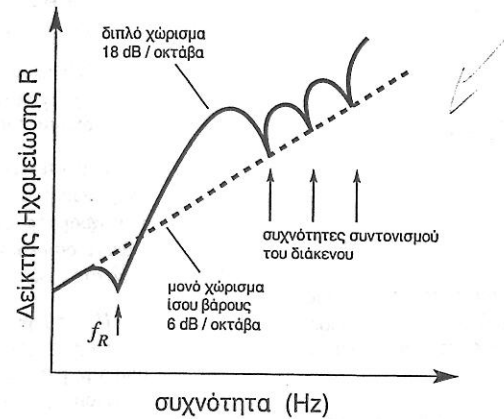


Σχ. 37. Δρόμοι μετάδοσης του ήχου μέσα από διπλό χωρίσμα

κοινά στοιχεία σύνδεσης των κελυφών (δρόμος Β) και η πλευρική μετάδοση μέσα από το κοινό δομικό στοιχείο στήριξης του χωρίσματος (δρόμος Γ).

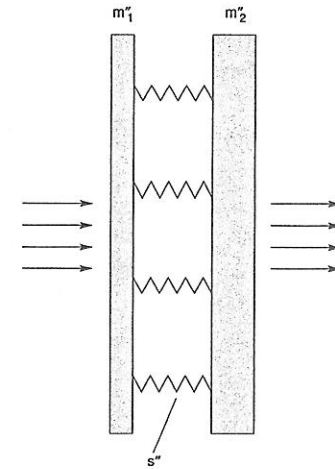
Εξαιτίας της πολυπλοκότητας μετάδοσης του ήχου στα διπλά χωρίσματα δεν υπάρχει μια απλή μεθοδολογία που να επιτρέπει την ακριβή εκτίμηση του δείκτη ηχομείωσης. Η εκτίμηση του γίνεται στην πράξη προσεγγιστικά αφού γίνονται απλουστευτικές παραδοχές.

Στο Σχήμα 38 δίνεται σχηματικά ο δείκτης ηχομείωσης ενός διπλού χωρίσματος σε σύγκριση με ένα μόνο ίδιου βάρους σε συνάρτηση με την συχνότητα.



Σχ. 38. Δείκτης Ηχομείωσης διπλού χωρίσματος σε σύγκριση με τον αντίστοιχο μονού χωρίσματος ίσου βάρους

Στην περιοχή των χαμηλών συχνοτήτων η ηχομόνωση του διπλού χωρίσματος όχι μόνο δεν εμφανίζει καμία βελτίωση σε σύγκριση με το μόνο αλλά αντίθετα σε μια συγκεκριμένη συχνότητα  $f_R$  εμφανίζει σημαντική μείωση. Η συχνότητα αυτή είναι η-συχνότητα συντονισμού του διπλού χωρίσματος.



Σχ. 39. Μηχανικό ισοδύναμο διπλού χωρίσματος

Η συμπεριφορά αυτή εξηγείται θεωρώντας το μηχανικό ισοδύναμο ενός διπλού χωρίσματος (Σχ. 39).

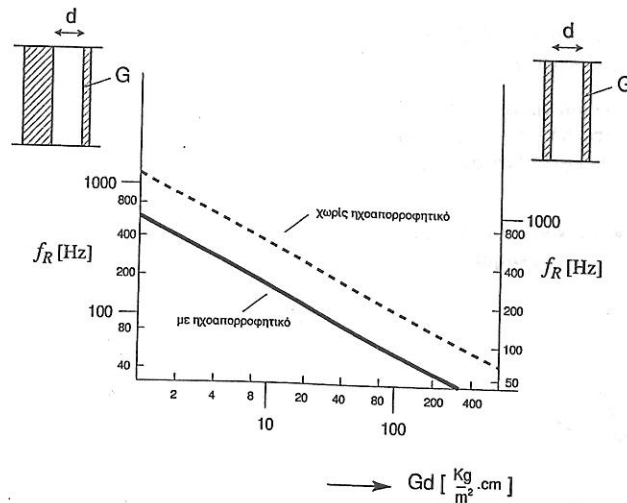
Οι δύο μάζες  $m_1''$  και  $m_2''$  αντιπροσωπεύουν τα δύο κελύφη του χωρίσματος (επιφανειακές μάζες) και το ελατήριο με ακαμψία  $S''$  ανά μονάδα επιφάνειας την ελαστικότητα του διάκενου μεταξύ των κελυφών. Είναι γνωστό ότι το σύστημα αυτό συντονίζεται στην συχνότητα  $f_R$  όπου τα κελύφη ταλαντώνονται με μέγιστο πλάτος με αποτέλεσμα η μετάδοση και εκπομπή ήχου να είναι μέγιστη (ελάχιστη ηχομόνωση).

Η συχνότητα συντονισμού δίνεται από την σχέση

$$f_R = \frac{600}{\sqrt{m''d}} \text{ (Hz)}$$

$$\text{όπου } m'' = \frac{m_1'' m_2''}{m_1'' + m_2''} \text{ ( } m_1'', m_2'' \text{ σε kg/m}^2 \text{ και d σε cm).}$$

Στο Σχήμα 40 δίνεται ένα διάγραμμα που επιτρέπει τον εύκολο υπολογισμό της συχνότητας συντονισμού  $f_R$  διπλού χωρίσματος σε συνάρτηση με το βάρος των



Σχ. 40. Διάγραμμα υπολογισμού της συχνότητας συντονισμού  $f_R$  διπλών χωρίσματος

πλακών  $G$  και πάχος του ηχοαπορροφητικού στρώματος  $d$ .

Πάνω από την συχνότητα συντονισμού  $f_R$  η ηχομόνωση του διπλού χωρίσματος εμφανίζει σημαντική αύξηση σε σχέση με το μονό (αύξηση 18dB/οκτάβα σε σύγκριση με τα 6dB/οκτάβα του μονού ίδιου βάρους). Στην περιοχή αυτή το διπλό χωρίσμα εμφανίζει μεγάλη αντίσταση στην μετάδοση του ήχου.

Στις υψηλότερες συχνότητες, όταν το μήκος κύματος των ηχητικών κυμάτων γίνεται συγκρίσιμο με το πάχος του διακένου  $d$ , η κοιλότητα του διακένου συντονίζεται και σχηματίζονται στάσιμα κύματα. Ο συντονισμός της κοιλότητας διευκολύνει την μετάδοση της ηχητικής ενέργειας μέσα από το χωρίσμα με αποτέλεσμα μείωση της ηχομόνωσης.

Από τα προηγούμενα προκύπτει ότι τα διπλά χωρίσματα εμφανίζουν σημαντικά υψηλότερη ηχομόνωση σε σύγκριση με τα μονά ίδιου βάρους ιδιαίτερα όταν η συχνότητα συντονισμού  $f_R$  βρίσκεται εκτός περιοχής που ενδιαφέρει την ηχομόνωση ( $f_R < 100\text{Hz}$ ) και όταν αποφεύγονται οι συντονισμοί στο διάκενο.

#### 4.7 Ο ρόλος ηχοαπορροφητικού υλικού στο διάκενο διπλού χωρίσματος

Η τοποθέτηση ηχοαπορροφητικού υλικού στο διάκενο ενός διπλού χωρίσματος αυξάνει σημαντικά την ηχομονωτική του ικανότητα. Η βελτίωση της ηχομόνωσης οφείλεται στους παρακάτω λόγους:

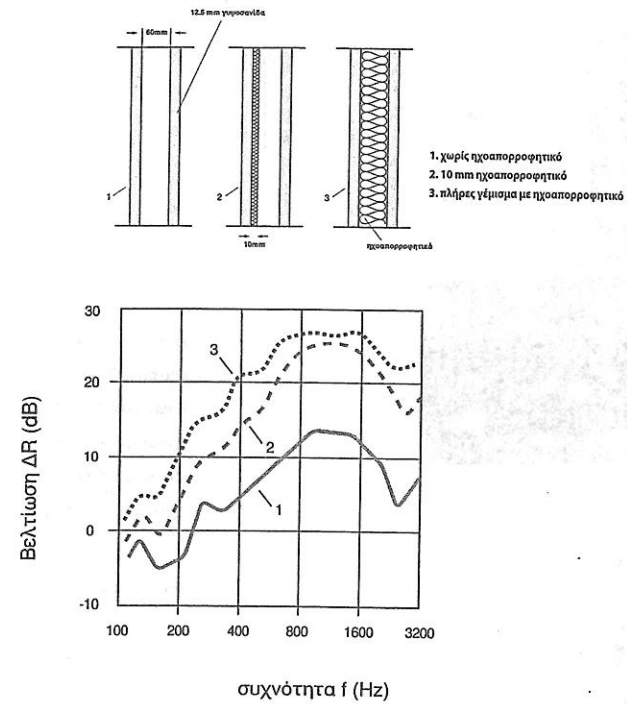
1. Η τοποθέτηση ηχοαπορροφητικού αποτρέπει τον συντονισμό στο διάκενο (σχηματισμό στάσιμων κυμάτων) με αποτέλεσμα την αύξηση της ηχομόνωσης στις υψηλές συχνότητες.
2. Η παρουσία του ηχοαπορροφητικού υλικού μεταβάλλει την ακαμψία  $S''$  στο διάκενο με αποτέλεσμα την μετατόπιση της συχνότητας συντονισμού  $f_R$  σε χαμηλότερη συχνότητα.
3. Το ηχοαπορροφητικό υλικό αυξάνει τις απώλειες της ηχητικής ενέργειας στο διάκενο με αποτέλεσμα την μείωση του βυθίσματος στην συχνότητα σύμπτωσης με αποτέλεσμα την βελτίωση της ηχομόνωσης.

Η αποτελεσματικότητα ενός ηχοαπορροφητικού υλικού στην βελτίωση της ηχομόνωσης ενός διπλού χωρίσματος καθορίζεται κύρια από την αντίσταση ροής του ηχοαπορροφητικού. Η αντίσταση ροής καθορίζει τόσο την ακαμψία  $S''$  στο διάκενο όσο και την ικανότητα μετατροπής της ηχητικής ενέργειας σε θερμότητα μέσα στο υλικό.

Μια ακριβής εκτίμηση της βελτίωσης που προκύπτει από την τοποθέτηση ηχοαπορροφητικού υλικού στο διάκενο είναι δύσκολη στην πράξη γιατί εκτός από την αντίσταση ροής του υλικού σημαντικό ρόλο παίζει και το πάχος του ηχοαπορροφητικού στρώματος.

Στο Σχήμα 41 δίνεται η βελτίωση  $\Delta R$  του δείκτη ηχομείωσης ενός διπλού χωρίσματος από γυψοσανίδα σε σχέση με το μονό ίδιο βάρους ανάλογα με το ηχοαπορροφητικό στο διάκενο. Όπως φαίνεται στο σχήμα, η τοποθέτηση ενός στρώματος ηχοαπορροφητικού πάχους 10 mm έχει σαν αποτέλεσμα σημαντική αύξηση της ηχομόνωσης. Η πλήρωση του διακένου με ηχοαπορροφητικό αυξάνει παραπέρα σταδιακά την ηχομόνωση κατά 3-4dB.

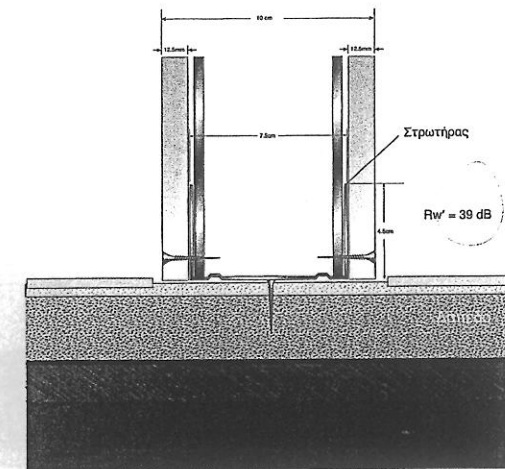
Συνεπώς, το πάχος του ηχοαπορροφητικού υλικού στο διάκενο ενός διπλού χωρίσματος προκύπτει από τον συνδυασμό κόστους και απαιτούμενης ηχομόνωσης.



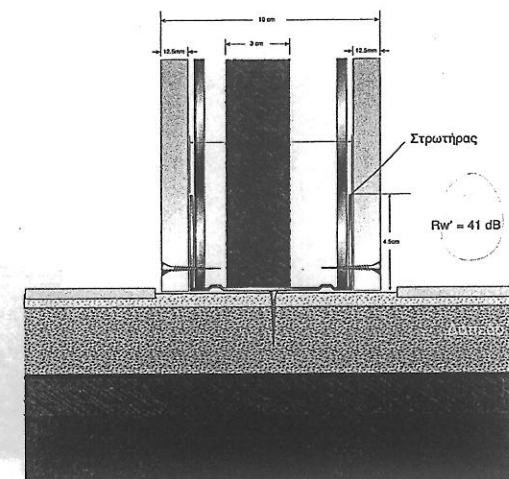
Σχ. 41. Βελτίωση  $\Delta R$  του δείκτη ηχομείωσης διπλού χωρισματος από γυψοσανίδες 12.5mm σε σχέση με μονό ίδιου βάρους ανάλογα με το πάχος του ηχοαπορροφητικού στο διάκενο.

Βέλτιστη λύση στην πράξη μπορεί να θεωρηθεί η πλήρωση των 2/3 του διακένου με ηχοαπορροφητικό.

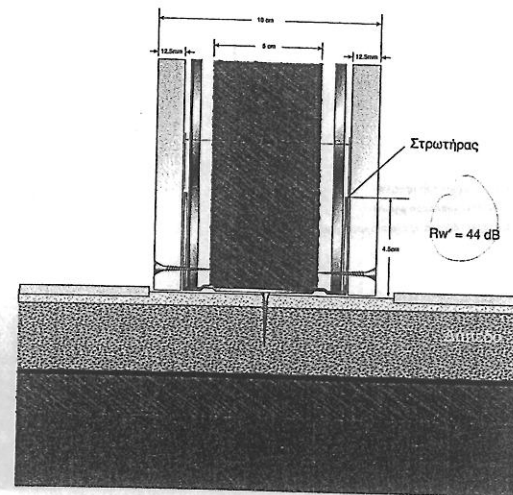
Παραδείγματα διπλών χωρισμάτων με τα ηχομονωτικά χαρακτηριστικά τους δίνονται στα Σχήματα 42, 43, 44, 45 και 46.



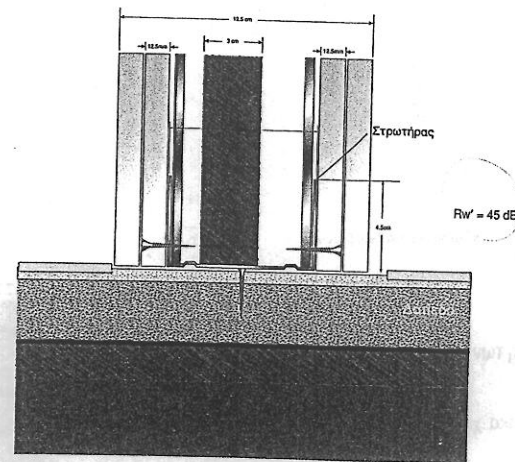
Σχ. 42. Παραδείγματα διπλών χωρισμάτων



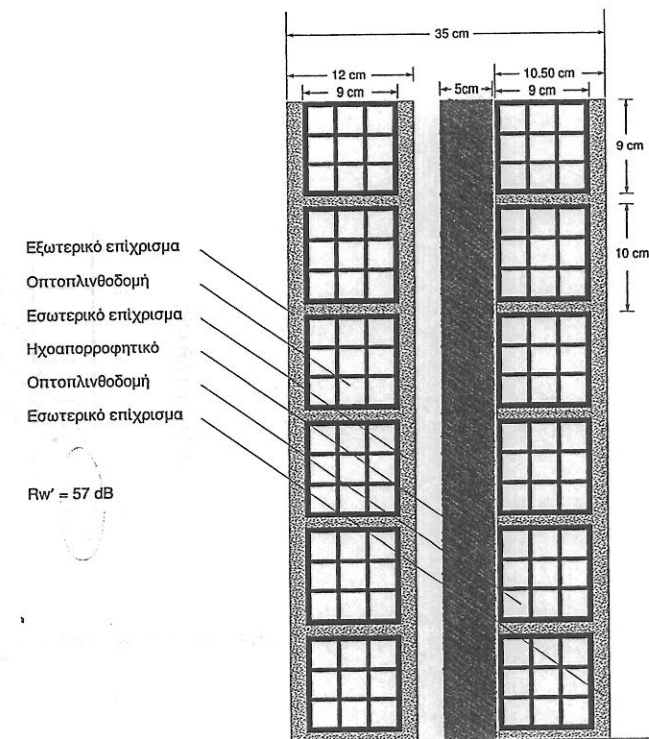
Σχ. 43. Παραδείγματα διπλών χωρισμάτων



Σχ. 44. Παραδείγματα διπλών χωρισμάτων



Σχ. 45. Παραδείγματα διπλών χωρισμάτων

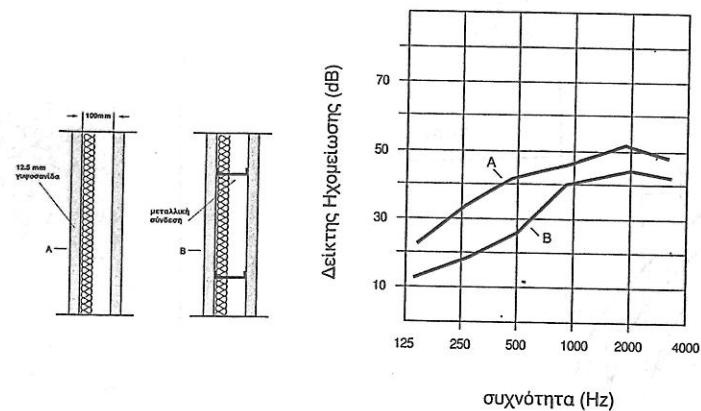


Σχ. 46. Παραδείγματα διπλών χωρισμάτων

#### 4.8 Επίδραση συνδέσεων μεταξύ των κελυφών στον δείκτη ηχομείωσης

Η ύπαρξη συνδέσεων μεταξύ των κελυφών διπλών χωρισμάτων έχει σημαντική επίδραση στην ηχομονωτική του ικανότητα. Οι ταλαντώσεις του κελύφους από την πλευρά της πηγής θορύβου μεταδίδονται μέσα από τις συνδέσεις στο κέλυφος της πλευράς του δέκτη με αποτέλεσμα σημαντική μείωση της ηχομόνωσης. Η μείωση της ηχομόνωσης ενός διπλού χωρίσματος λόγω συνδέσεων (ηχογεφυρών) εξαρτάται από το είδος τους (γραμμικές ή σημειακές). Στην πράξη, οι ηχογέφυρες κατά την κατασκευή ελαφρών χωρισμάτων αποφεύγονται με την στήριξη των κελυφών με χωριστούς σκελετούς.

Ένα παράδειγμα της επίδρασης συνδέσεων (ηχογεφυρών) στην ηχομονωτική ικανότητα διπλού ελαφρού χωρίσματος από γυψοσανίδα δίνεται στο Σχήμα 47.



Σχ. 47. Επίδραση συνδέσεων μεταξύ των κελυφών στον Δείκτη Ηχομείωσης διπλού χωρίσματος.

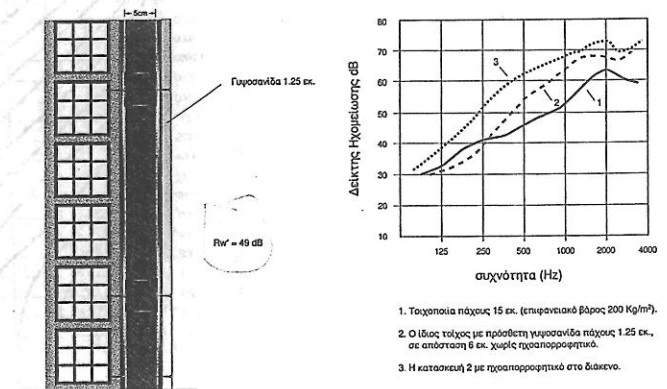
#### 4.9 Βελτίωση της ηχομόνωσης υφιστάμενου χωρίσματος

Ένα πρόβλημα που παρουσιάζεται συχνά στην πράξη είναι η ανάγκη βελτίωσης της ηχομόνωσης ενός υφιστάμενου χωρίσματος.

Σύμφωνα με όσα εξετάστηκαν προηγουμένως, η απαιτούμενη βελτίωση μπορεί να επιτευχθεί με την τοποθέτηση ενός δεύτερου χωρίσματος σε απόσταση από το υφιστάμενο έτσι ώστε να δημιουργηθεί διπλό χωρίσμα.

Για να πετύχει κανείς την μεγαλύτερη δυνατή βελτίωση θα πρέπει το δεύτερο χωρίσμα να είναι εύκαμπτο (έτσι ώστε η συχνότητα σύμπτωσης να είναι υψηλή  $f_R > 2500\text{Hz}$ ) και να έχει μεγάλη απόσβεση (έτσι ώστε να περιορίζεται η μείωση της ηχομόνωσης λόγω σύμπτωσης). Κατά την στήριξη του πρόσθετου χωρίσματος πρέπει να αποφεύγονται συνδέσεις με το υφιστάμενο χωρίσμα. Τέλος, η τοποθέτηση ηχοαπορροφητικού στρώματος στο διάκενο επιβάλλεται γιατί αυξάνει σημαντικά την ηχομόνωση της κατασκευής όπως εξηγήθηκε στην προηγούμενη παράγραφο.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα βελτίωσης της ηχομόνωσης υφιστάμενης τοιχοποιίας φαίνεται στο Σχήμα 48.



Σχ. 48. Βελτίωση Ηχομόνωσης υφιστάμενου χωρίσματος

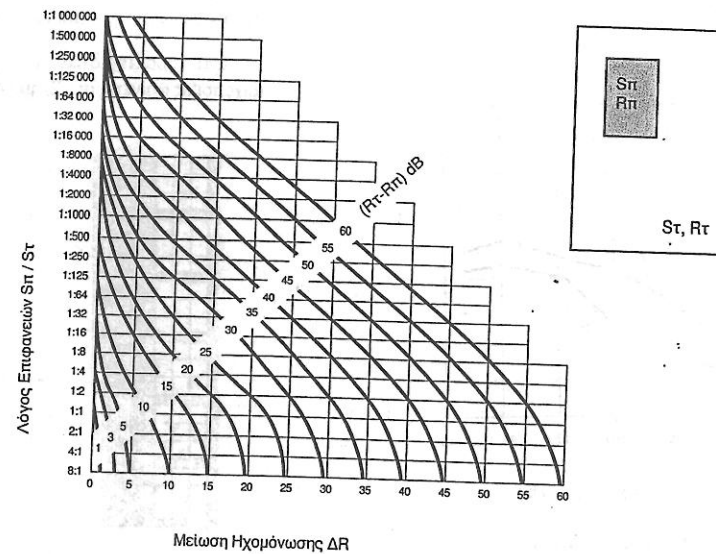
#### 4.10 Ηχομόνωση σύνθετων χωρισμάτων

Πολύ συχνά στην πράξη κατασκευάζονται στοιχεία με σχετικά μικρή ηχομονωτική ικανότητα (πόρτες, παράθυρα, ανοίγματα αερισμού κλπ) πάνω σε τοίχους με αυξημένη ηχομόνωση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να παρουσιάζει το σύνθετο χωρίσμα μειωμένη ηχομόνωση σε σχέση με το βαρύ στοιχείο.

Ο δείκτης ηχομείωσης  $R_{\sigma}$  ενός σύνθετου χωρίσματος μπορεί να υπολογισθεί από την σχέση

$$R_{\sigma} = R_t - \Delta R, (\text{dB})$$

όπου  $R_t$  είναι ο δείκτης ηχομείωσης του αρχικού τοίχου και  $\Delta R$  η μείωση που προκύπτει λόγω του πρόσθετου στοιχείου μειωμένης ηχομόνωσης.

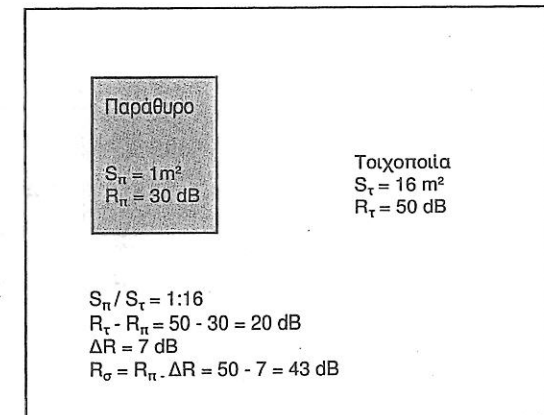


Σχ. 49. Διάγραμμα υπολογισμού δείκτη ηχομείωσης σύνθετων χωρισμάτων

Η μείωση  $\Delta R$  εξαρτάται από την επιφάνεια  $S_t$  του αρχικού τοίχου, την επιφάνεια  $S_{\pi}$  του πρόσθετου στοιχείου και από τον δείκτη ηχομείωσης  $R_t$  του πρόσθετου στοιχείου.

Ο υπολογισμός της μείωσης  $\Delta R$  μπορεί να γίνει εύκολα με την βοήθεια του διαγράμματος που δίνεται στο Σχήμα 49.

Ένα παράδειγμα υπολογισμού του δείκτη ηχομείωσης ενός σύνθετου χωρίσματος τοιχοποιίας και παραθύρου δίνεται στο Σχήμα 50.



Σχ. 50. Υπολογισμός ηχομόνωσης σύνθετου χωρίσματος

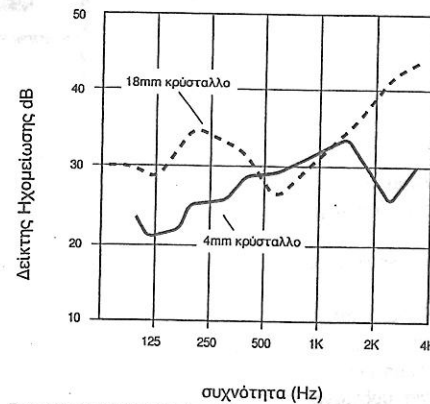
#### 4.11. Ηχομόνωση κουφωμάτων

##### α. Παράθυρα

Η μετάδοση του αερόφερτου ήχου μέσα από ένα παράθυρο ακολουθεί τις βασικές αρχές που παρουσιάστηκαν στην περίπτωση των χωρισμάτων. Παρουσιάζει όμως και σημαντικές αποκλίσεις που μειώνουν στην πράξη την ηχομονωτική ικανότητα των παραθύρων. Οι αποκλίσεις οφείλονται στις μικρές διαστάσεις των κρυστάλλων, τον τρόπο στήριξής τους στο φύλλο και την τοποθέτηση της κάσας στον τοίχο.

##### Παράθυρα με μονό κρύσταλλο

Ο δείκτης ηχομείωσης ενός παραθύρου με μονό κρύσταλλο ακολουθεί τον νόμο της μάζας μόνο στις μεσαίες συχνότητες. Στις χαμηλές συχνότητες είναι μεγαλύτερος από τον προβλεπόμενο από τον νόμο της μάζας, ενώ στις υψηλές συχνότητες παρουσιάζει μια απότομη μείωση εξαιτίας του φαινομένου της σύμπτωσης (Σχ. 51).



Σχ. 51. Δείκτης ηχομείωσης μονού παραθύρου με κρύσταλλα διαφορετικού πάχους

Οι παραπάνω αποκλίσεις οφείλονται, όπως προαναφέρθηκε, στις μικρές διαστάσεις των κρυστάλλων που επηρεάζουν την ακαμψία με αποτέλεσμα την έντονη εμφάνιση του φαινομένου της σύμπτωσης και τον περιορισμό της ηχομονωτικής ικανότητας. Για τον λόγο αυτό, ο σταθμισμένος δείκτης ηχομείωσης δεν αυξάνεται σημαντικά με την αύξηση του πάχους των κρυστάλλων (Σχ. 51).

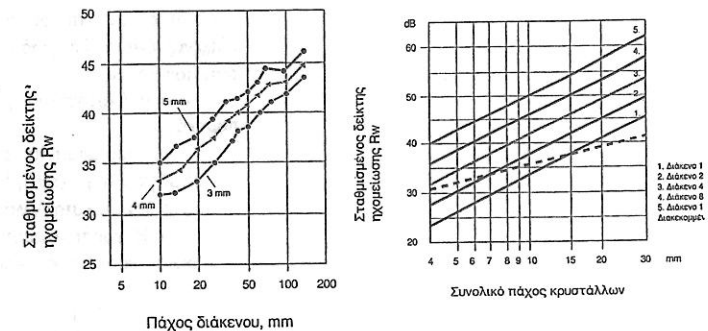
##### Παράθυρα με διπλά κρύσταλλα

Στην περίπτωση παραθύρων με διπλά κρύσταλλα η βελτίωση που επιτυγχάνεται καθορίζεται κύρια από το πάχος του διάκενου μεταξύ των κρυστάλλων και λιγότερο από το πάχος τους (Σχ. 52).

Ο δείκτης ηχομείωσης αυξάνει περίπου 3dB για διπλασιασμό του διάκενου. Για μικρά πάχη του διάκενου η συχνότητα συντονισμού εμφανίζεται (ανάλογα με το πάχος των κρυστάλλων) στην περιοχή μεταξύ 200 και 400Hz με αποτέλεσμα μειωμένη ηχομόνωση. Για τον λόγο αυτό, το διάκενο στα διπλά παράθυρα πρέπει να είναι μεγαλύτερο από 12 mm.

Στις υψηλές συχνότητες το πρόβλημα των διπλών παραθύρων είναι η απότομη μείωση της ηχομόνωσης λόγω έντονης εμφάνισης του φαινομένου της σύμπτωσης. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται με την χρησιμοποίηση ανισόπαχων κρυστάλλων. Μία σχέση πάχους 1:2 μεταξύ των κρυστάλλων θεωρείται βέλτιστη.

Στο Σχ. 53 δίνεται διάγραμμα για την εκτίμηση του σταθμισμένου δείκτη ηχομείωσης παραθύρων με διπλό κρύσταλλο σε συνάρτηση με το συνολικό πάχος των κρυστάλλων για διάφορα πάχη διάκενου.

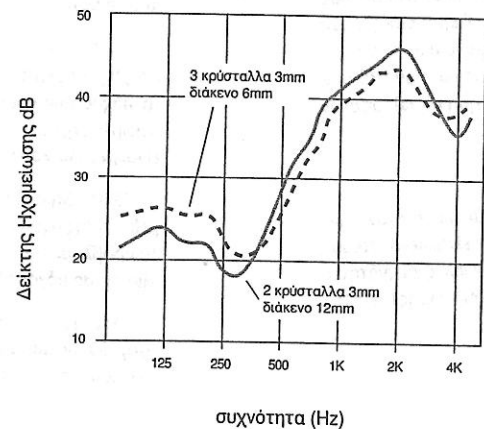


Σχ. 52. Σταθμισμένος δείκτης ηχομείωσης διπλού παραθύρου για διαφορετικά πάχη κρυστάλλων και διάκενου

Σχ. 53. Σταθμισμένος δείκτης ηχομείωσης  $R_w$  διπλού παραθύρου σε συνάρτηση με το συνολικό πάχος των κρυστάλλων

**Παράθυρα με τριπλό κρύσταλλο**

Όπως φαίνεται στο Σχ. 54 ένα τριπλό παράθυρο δεν προσφέρει αυξημένη ηχομόνωση σε σύγκριση με ένα διπλό αντίστοιχου πάχους κρυστάλλων και διάκενου. Ο λόγος είναι ότι όταν το διάκενο μεταξύ των τριών κρυστάλλων είναι μικρό οι



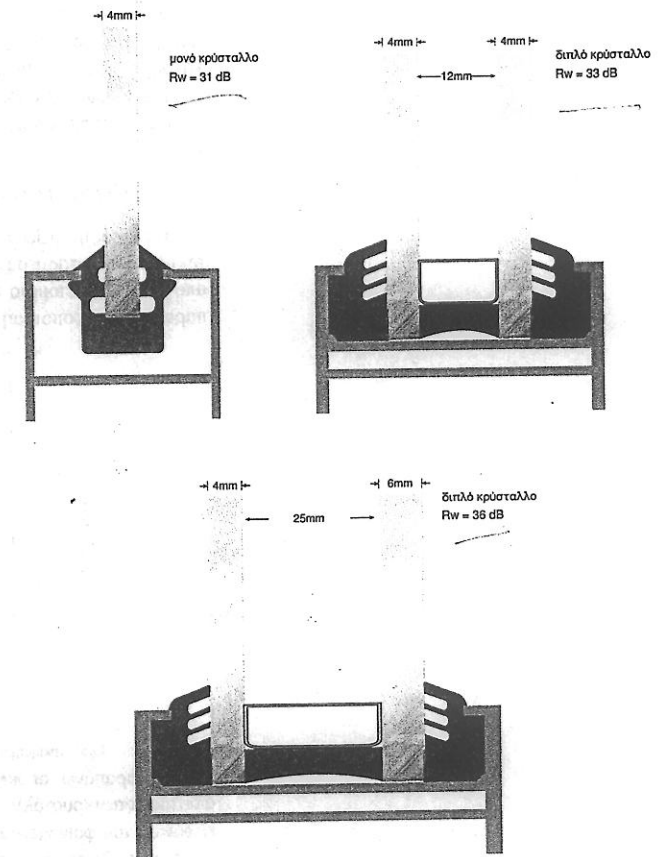
Σχ. 54. Σύγκριση δείκτη ηχομείωσης μεταξύ διπλού και τριπλού παραθύρου

κρύσταλλοι δεν λειτουργούν σαν διπλό χώρισμα. Μόνο στην περίπτωση μεγάλων διακενών ένα τριπλό παράθυρο εμφανίζει αυξημένη ηχομόνωση σε σύγκριση με το αντίστοιχο διπλό.

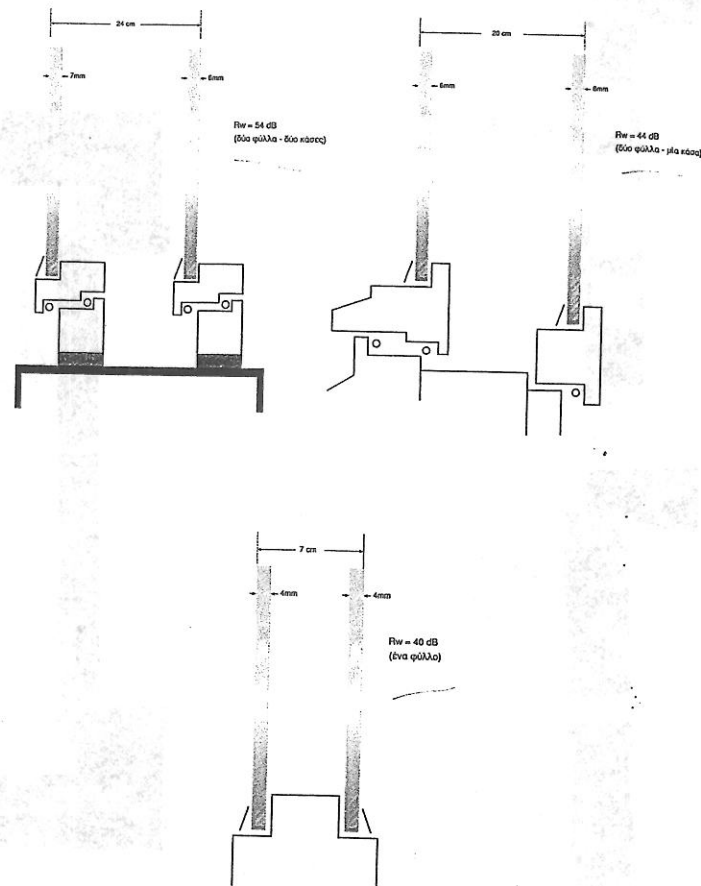
Κατά την κατασκευή ηχομονωτικών παραθύρων οι βασικοί κανόνες είναι οι παρακάτω:

- Όπου απαιτείται αυξημένη ηχομόνωση, παράθυρα με διπλά κρύσταλλα είναι η καλύτερη επιλογή. Το πάχος των κρυστάλλων καθώς και το διάκενο πρέπει να επιλεγούν κατάλληλα έτσι ώστε να επιτευχθεί η απαιτούμενη ηχομόνωση.
- Η χρήση ανισόπαχων κρυστάλλων είναι απαραίτητη για αυξημένη ηχομόνωση (διαφοροποίηση συχνοτήτων σύμπτωσης). Λόγος πάχους 1:2 είναι βέλτιστος.
- Η κάσα του παραθύρου και η τοποθέτησή της είναι σημαντικές παράμετροι. Η στεγανοποίηση είναι επίσης σημαντική για την ηχομονωτική ικανότητα. Η χρήση ξεχωριστών φύλλων (και ειδικά πάνω σε ξεχωριστή κάσα) αυξάνει σημαντικά την ηχομόνωση λόγω μείωσης των πλευρικών μεταδόσεων.

Μερικά παραδείγματα παραθύρων με τα αντίστοιχα ηχομονωτικά χαρακτηριστικά τους δίνονται στα Σχήματα 55 και 56.



Σχ. 55. Παραδείγματα παραθύρων

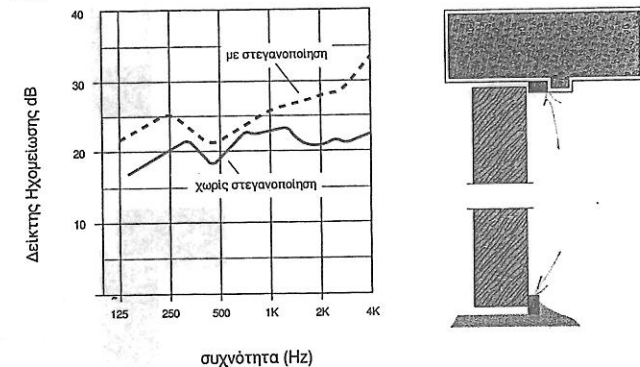


Σχ. 56. Παραδείγματα παραθύρων

## β. Πόρτες

Οι πόρτες είναι τα κτιριακά στοιχεία με την μικρότερη ηχομονωτική ικανότητα. Η ηχομόνωση που προσφέρουν είναι χαμηλή και αυτό οφείλεται στο χαμηλό επιφανειακό βάρος τους αλλά και στην μετάδοση του ήχου από το περιμετρικό κενό μεταξύ κάσας και φύλλου, κάσας και τοίχου και ανάμεσα στο φύλλο και το κατωκάσι.

Στο Σχήμα 57 δίνεται η βελτίωση της ηχομόνωσης μιας πρεσσοριστής πόρτας εξαιτίας της στεγανοποίησης των περιμετρικών κενών. Υλικά όπως λάστιχο, καουτσούκ, πλαστικές λωρίδες κλπ είναι κατάλληλα για περιμετρική στεγανοποίηση.

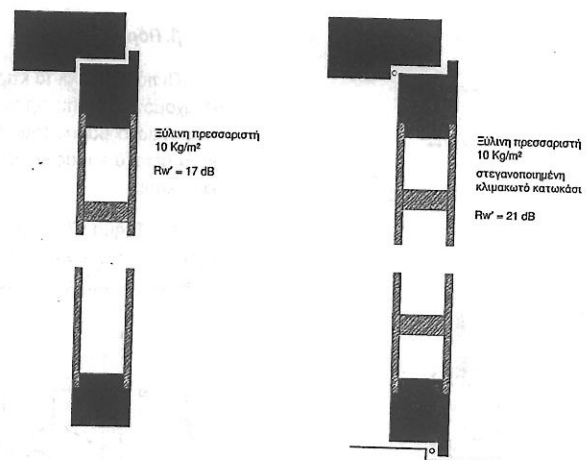


Σχ. 57. Επίδραση της περιμετρικής στεγανοποίησης στην ηχομονωτική ικανότητα πόρτας

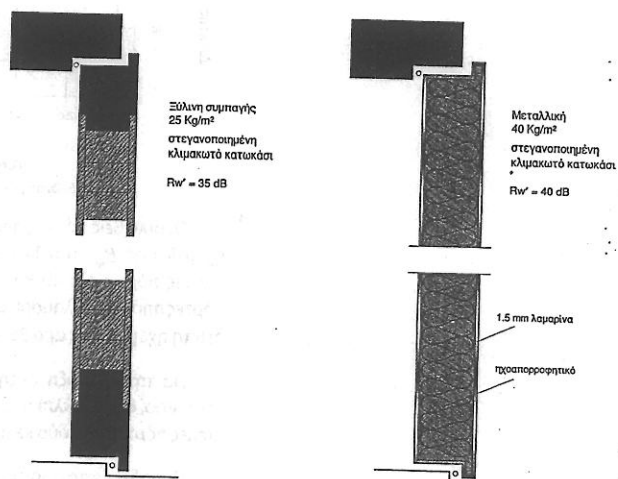
Οι συνήθεις πόρτες από πρεσσοριστό φύλλο ( $10-15 \text{ kg/m}^2$ ) εμφανίζουν δείκτη ηχομείωσης  $R_w$  από 17 μέχρι 25dB ανάλογα με την στεγανοποίηση. Συμπαγείς ξύλινες πόρτες ( $25-40 \text{ kg/m}^2$ ) έχουν δείκτη ηχομείωσης μέχρι 35dB. Μεταλλικές πόρτες από φύλλο λαμαρίνας 1 μέχρι 2 mm και ηχοαπορροφητικό στο διάκενο έχουν δείκτη ηχομείωσης από 35-40dB ανάλογα με το πάχος της λαμαρίνας.

Για την επίτευξη αυξημένης ηχομόνωσης σε χώρους με υψηλές απαιτήσεις (στούντιο, θέατρα κλπ) ή εκεί όπου υπάρχει ασυνεχής κατασκευή χρησιμοποιούνται διπλές πόρτες από δύο κελύφη με ενδιάμεσο διάκενο 10-15 εκ.

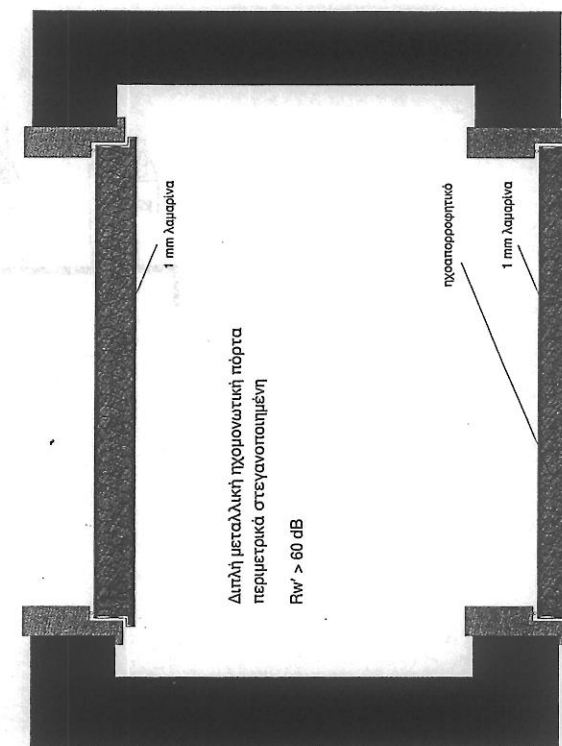
Παραδείγματα από πόρτες και τα αντίστοιχα ηχομονωτικά χαρακτηριστικά τους δίνονται στα Σχήματα 58, 59 και 60.



Σχ. 58. Ηχομονωτικές πόρτες



Σχ. 59. Ηχομονωτικές πόρτες



Σχ. 60. Διπλή ηχομονωτική πόρτα

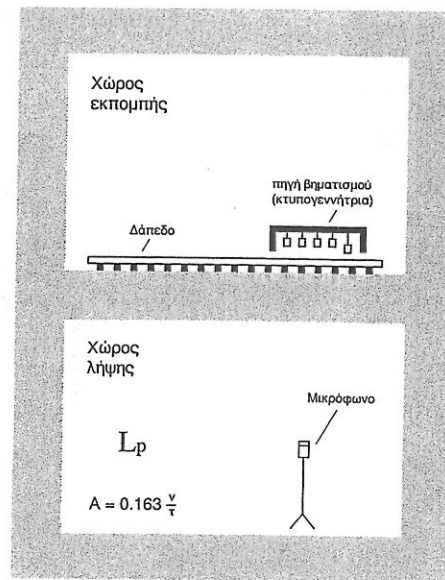
## 5. ΗΧΟΜΟΝΩΣΗ ΣΕ ΚΤΥΠΟΓΕΝΗ (ΣΤΕΡΕΟΦΕΡΤΟ) ΗΧΟ

## 5.1 Ηχομονωτική ικανότητα δομικού στοιχείου σε κτυπογενή ήχο - Κανονικοποιημένη στάθμη ηχητικής πίεσης κτυπογενή ήχου

Η ηχομονωτική ικανότητα ενός δαπέδου σε κτυπογενή ήχο εκφράζεται από την κανονικοποιημένη στάθμη ηχητικής πίεσης κτυπογενή ήχου  $L_n$  που ορίζεται από την σχέση

$$L_n = L_p + 10 \log \left( \frac{A}{A_0} \right) \text{ σε dB}$$

Στην παραπάνω σχέση,  $L_p$  είναι η στάθμη ηχητικής πίεσης σε ορισμένη ζώνη συχνοτήτων στον χώρο λήψης κάτω από το δάπεδο,  $A$  είναι η ισοδύναμη ηχοαπορροφητική επιφάνεια του χώρου λήψης και  $A_0$  μία σταθερά ίση με  $10 \text{ m}^2$ .



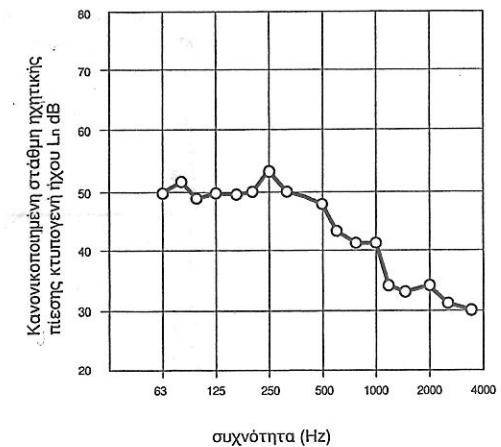
Σχ. 61. Διάταξη μέτρησης ηχομονωτικής ικανότητας δαπέδων

Για τον προσδιορισμό της κανονικοποιημένης στάθμης ηχητικής πίεσης κτυπογενή ήχου  $L_n$ , το εξεταζόμενο δάπεδο διεγείρεται από πρότυπη πηγή βηματισμού (κτυπογεννήτρια) και μετρείται η στάθμη ηχητικής πίεσης  $L_p$  στον χώρο λήψης (Σχ. 61).

Η ισοδύναμη ηχοαπορροφητική επιφάνεια  $A$  του χώρου λήψης υπολογίζεται από

την σχέση  $A = 0,163 \frac{V}{T}$  μετρώντας τον χρόνο αντήχησης  $T$  στον χώρο λήψης.

Όσο μικρότερη είναι η στάθμη  $L_n$  τόσο μεγαλύτερη η ηχομονωτική ικανότητα του δαπέδου. Όπως και ο δείκτης ηχομείωσης  $R$  σε αερόφερτο ήχο, έτσι και ο δείκτης  $L_n$  είναι συνάρτηση της συχνότητας. Δίνεται σε καμπύλη με τις τιμές του στις κεντρικές συχνότητες των τρίτων οκτάβας για όλο το διάστημα από 100Hz μέχρι 3200Hz που ενδιαφέρει την Δομική Ακουστική. Ένα τυπικό παράδειγμα στάθμης  $L_n$  δαπέδου δίνεται στο Σχήμα 62.

Σχ. 62. Στάθμη  $L_n$  δαπέδου

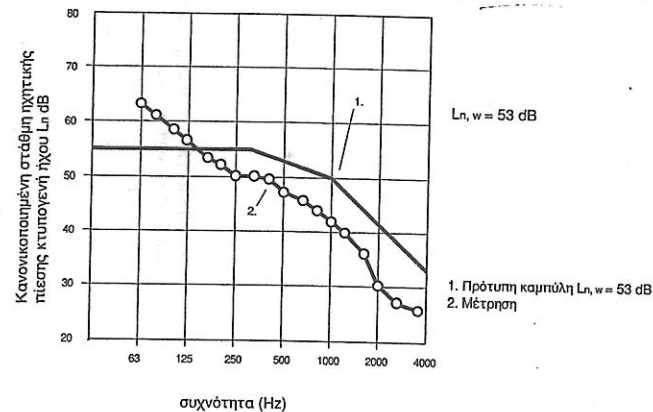
### 5.2 Αξιολόγηση της ηχομόνωσης κτιριακών στοιχείων σε κτυπογενή ήχο

Όπως προαναφέρθηκε και στην περίπτωση του δείκτη ηχομείωσης  $R$  σε αερόφερτο ήχο, έτσι και ο δείκτης  $L_n$  σε κτυπογενή είναι δύσκολος όταν δίνεται με τις τιμές του στις κεντρικές τριτοκταβικές συχνότητες. Και στην περίπτωση αυτή προκύπτει η ανάγκη ορισμού ενός μονότιμου δείκτη που να χαρακτηρίζει συνολικά την ηχομονωτική ικανότητα ενός δαπέδου για όλη την περιοχή συχνοτήτων.

Στην περίπτωση του δείκτη  $L_n$  το μονότιμο μέγεθος που ορίζεται ονομάζεται σταθμισμένη κανονικοποιημένη στάθμη ηχητικής πίεσης κτυπογενή ήχου και συμβολίζεται ως  $L_{n,w}$ .

Η διαδικασία στάθμισης των τιμών του δείκτη  $L_n$  στις τριτοκταβικές ζώνες για να προκύψει ο δείκτης  $L_{n,w}$  είναι ανάλογη μ' αυτήν που περιγράψαμε στην περίπτωση του δείκτη ηχομείωσης  $R$  σε αερόφερτο ήχο (πρότυπο ΕΛΟΤ 370).

Στο Σχήμα 63 φαίνεται η διαδικασία στάθμισης. Ο μετρημένος δείκτης  $L_n$  ενός δαπέδου συγκρίνεται με την πρότυπη καμπύλη στάθμισης. Η πρότυπη καμπύλη στάθμισης μετατοπίζεται μέχρις ότου οι δύο καμπύλες «πλησιάζουν» και εκπληρωθούν τα κριτήρια όπως περιγράφηκαν στην περίπτωση στάθμισης του δείκτη ηχομείωσης σε αερόφερτο ήχο. Για την θέση της πρότυπης καμπύλης όπου εκπληρώνονται τα κριτήρια απόκλισης, η τιμή που αντιστοιχεί στην συχνότητα των 500Hz αποτελεί τον δείκτη  $L_{n,w}$ . Στο συγκεκριμένο παράδειγμα προκύπτει  $L_{n,w} = 53dB$ .



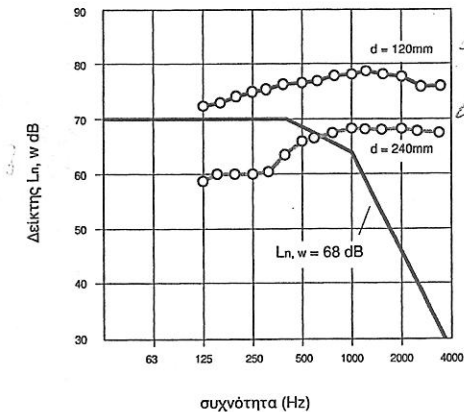
Σχ. 63. Στάθμιση κανονικοποιημένης στάθμης ηχητικής πίεσης κτυπογενή ήχου

### 5.3 Ηχομόνωση δαπέδων χωρίς επικαλύψεις

Η ηχομονωτική συμπεριφορά ενός συνηθισμένου δαπέδου (πλάκα μπετόν) χωρίς επικαλύψεις είναι σχετικά απλή. Ο δείκτης  $L_n$  αυξάνεται (η ηχομόνωση μειώνεται) περίπου κατά 5dB για δεκαπλασιασμό της συχνότητας. Αντίθετα ο δείκτης  $L_n$  μειώνεται (η ηχομόνωση αυξάνεται) κατά 10dB όταν το πάχος της πλάκας διπλασιάζεται.

Στο Σχήμα 64 φαίνεται η ηχομονωτική συμπεριφορά σε κτυπογενή ήχο πλακών από μπετόν σε συνάρτηση με το πάχος τους. Η συνήθης πλάκα μπετόν πάχους 120 mm εμφανίζει πολύ χαμηλή ηχομόνωση ( $L_n < 60 dB$ ).

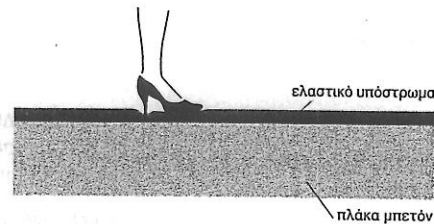
Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι είναι απαραίτητη η βελτίωση της ηχομόνωσης των δαπέδων. Η απαιτούμενη βελτίωση επιτυγχάνεται σε κάποιο βαθμό με την χρήση ελαστικών επιστρώματων και αποτελεσματικά με την κατασκευή «κολυμβητών» (πλωτών) δαπέδων.



Σχ. 64. Ηχομονωτική ικανότητα σε κτυπογενή ήχο πλακών μπετόν διαφορετικού πάχους

### 5.4 Βελτίωση της ηχομόνωσης δαπέδου με ελαστικές επιστρώσεις

Μια απλή λύση για την βελτίωση της ηχομονωτικής ικανότητας ενός δαπέδου είναι η χρησιμοποίηση ενός ελαστικού επιστρώματος που τοποθετείται απ' ευθείας στο δάπεδο (Σχ. 65). Η βελτίωση οφείλεται στο ότι το επίστρωμα (π.χ. μοκέτα) λόγω της ελαστικότητάς του μειώνει τις δυνάμεις (κτυπήματα) που διεγείρουν την πλάκα με αποτέλεσμα τον περιορισμό της εκπομπής ήχου στον κάτω χώρο. Η λύση ενός ελαστικού επιστρώματος μπορεί να εφαρμοσθεί όταν η απαιτούμενη βελτίωση είναι μικρή και η εκ των υστέρων κατασκευή «κολυμβητού» δαπέδου δεν είναι τεχνικά εφικτή.



Σχ. 65. Ελαστικό επίστρωμα δαπέδου

Η επιλογή του κατάλληλου επιστρώματος για συγκεκριμένη βελτίωση της ηχομονωτικής ικανότητας μπορεί να γίνει εύκολα με την βοήθεια των διαγραμμάτων του Σχήμα 66.

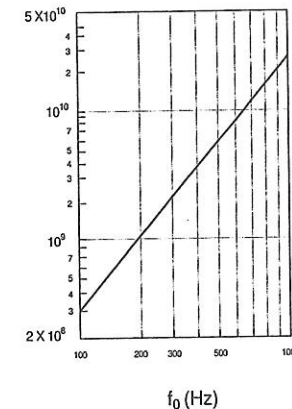
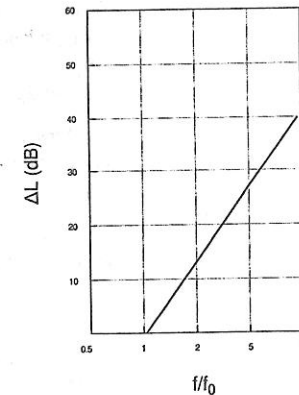
Για παράδειγμα υποθέτουμε ότι απαιτείται βελτίωση της ηχομόνωσης ενός δαπέδου

κατά 20dB στην συχνότητα των 500Hz. Από το διάγραμμα 1 προκύπτει  $f/f_0 = 2,5$  και  $f_0 = \frac{f_o}{2.5} = \frac{500}{2.5} = 200\text{Hz}$ .

Από το διάγραμμα 2 για  $f_0 = 200\text{Hz}$  προκύπτει για τον λόγο του μέτρου ελαστικότητας

Ε προς το πάχος  $h$  του υλικού  $\frac{E}{h} = 10^9 \text{ N/m}^3$ .

Κάθε υλικό με λόγο μέτρου ελαστικότητας προς πάχος ίσο με το παραπάνω θα μπορούσε να δώσει την ζητούμενη βελτίωση. Για ένα επίστρωμα πάχους 3 mm το μέτρο ελαστικότητας του υλικού θα πρέπει να είναι  $3 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$ .



Σχ. 66. Διαγράμματα υπολογισμού επιστρώσεων για βελτίωση ηχομόνωσης δαπέδων

### 5.5 Κολυμβητά δάπεδα

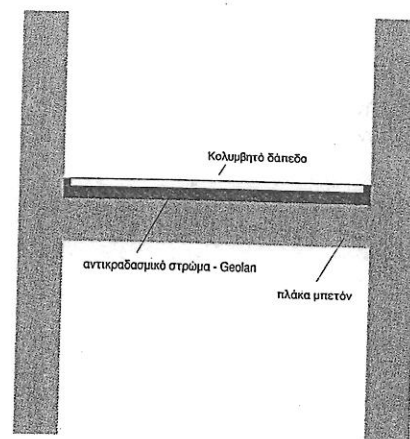
Επειδή η βελτίωση που επιτυγχάνεται με ελαστικά επιστρώματα είναι περιορισμένη, είναι απαραίτητη στην πράξη η κατασκευή κολυμβητών (πλωτών) δαπέδων για υψηλή ηχομόνωση σε κτυπογενή ήχο. Με τον όρο «κολυμβητό» εννοεί κανείς ένα δάπεδο που δεν βρίσκεται σε απ' ευθείας επαφή με την πλάκα (και τους πλευρικούς τοίχους) αλλά μεταξύ τους παρεμβάλλεται ελαστικό, αντικραδασμικό στρώμα (Σχ. 67).

Στην περίπτωση αυτή, λόγω του ελαστικού στρώματος, η διέγερση του δαπέδου δεν μεταφέρεται στην πλάκα με αποτέλεσμα μειωμένη εκπομπή ήχου στον κάτω χώρο.

Η βελτίωση της ηχομονωτικής ικανότητας ενός κολυμβητού δαπέδου σε σχέση με το αντίστοιχο μη κολυμβητό δίνεται προσεγγιστικά από την σχέση

$$\Delta L = 40 \log \left( \frac{f}{f_R} \right) \text{ σε dB},$$

Όπου  $f_R$  είναι η συχνότητα συντονισμού του συστήματος δάπεδο – ελαστικό στρώμα.

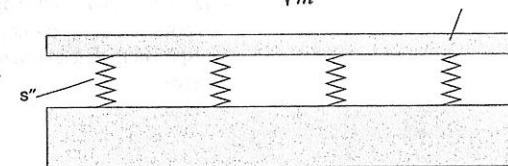


Σχ. 67. Σχηματική παράσταση κολυμβητού δαπέδου

Το μηχανικό ισοδύναμο ενός κολυμβητού δαπέδου φαίνεται στο Σχήμα 68, όπου  $S''$  είναι η δυναμική ακαμψία ανα μονάδα επιφάνειας του ελαστικού στρώματος ( $N/m^3$ ) και  $m''$  η επιφανειακή μάζα του δαπέδου ( $kg/m^2$ ).

Η συχνότητα συντονισμού  $f_R$  δίνεται από την σχέση

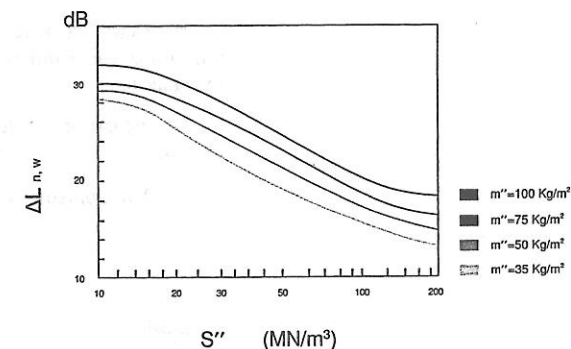
$$f_R = 500 \sqrt{\frac{S''}{m''}} \text{ (σε Hz)}.$$



Σχ. 68. Μηχανικό ισοδύναμο κολυμβητού δαπέδου

Η βελτίωση  $\Delta L$  της ηχομόνωσης που επιτυγχάνεται με ένα πλωτό δάπεδο εξαρτάται κύρια από την δυναμική ακαμψία  $S''$  του αντικραδασμικού στρώματος και το επιφανειακό βάρος  $m''$  του δαπέδου.

Η βελτίωση  $\Delta L$  μπορεί να εκτιμηθεί προσεγγιστικά με την βοήθεια του διαγράμματος του Σχήματος 69 όταν είναι γνωστή η δυναμική ακαμψία  $S''$  του

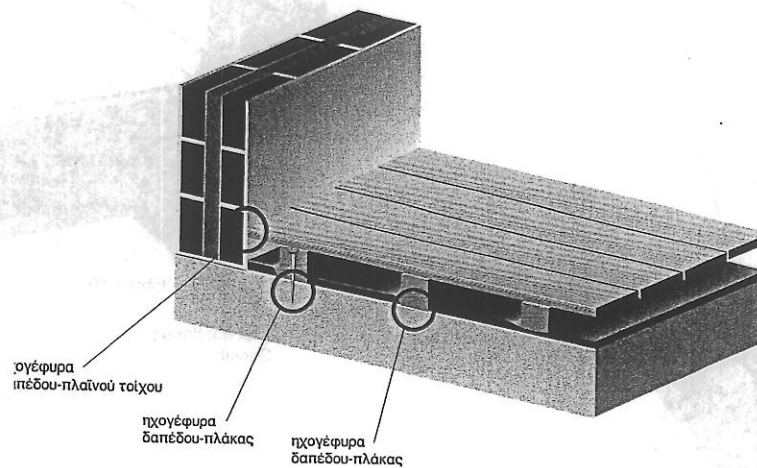


Σχ. 69. Αναμενόμενη βελτίωση  $\Delta L_{n,w}$  της ηχομόνωσης κολυμβητών δαπέδων σε συνάρτηση της ακαμψίας  $S''$  του ελαστικού στρώματος και του επιφανειακού βάρους  $m''$

ελαστικού στρώματος. Όπως προκύπτει, όσο μικρότερη η ακαμψία (μαλακότερο το ελαστικό) τόσο μεγαλύτερη η βελτίωση  $\Delta L$  της ηχομόνωσης. Στην πράξη, η βελτίωση  $\Delta L$  που επιτυγχάνεται με ένα κολυμβητό δάπεδο κυμαίνεται από 20 μέχρι 25dB.

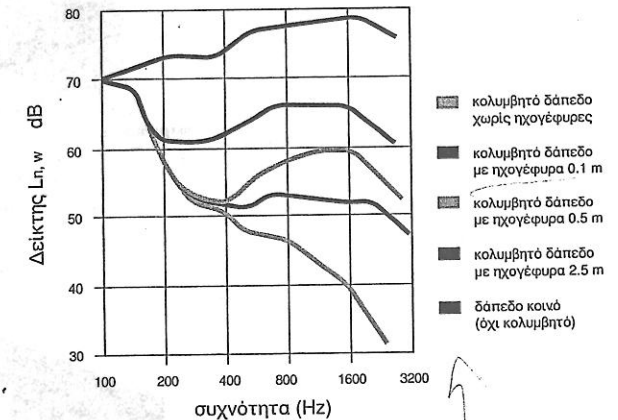
Κατά την επιλογή του αντικραδασμικού στρώματος, πέρα από την δυναμική ακαμψία θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η παραμόρφωσή του λόγω στατικών φορτίων, έτσι ώστε να διατηρεί την ελαστικότητά του κατά την εφαρμογή των δυναμικών φορτίων.

Η ηχομόνωση ενός κολυμβητού δαπέδου μειώνεται σημαντικά από την ύπαρξη τυχόν συνδέσεων (ηχογεφυρών) μεταξύ δαπέδου – πλάκας και δαπέδου – πλευρικών τοίχων (Σχ. 70). Γι αυτόν τον λόγο θα πρέπει να αποφεύγονται κατά την κατασκευή ενός κολυμβητού δαπέδου.



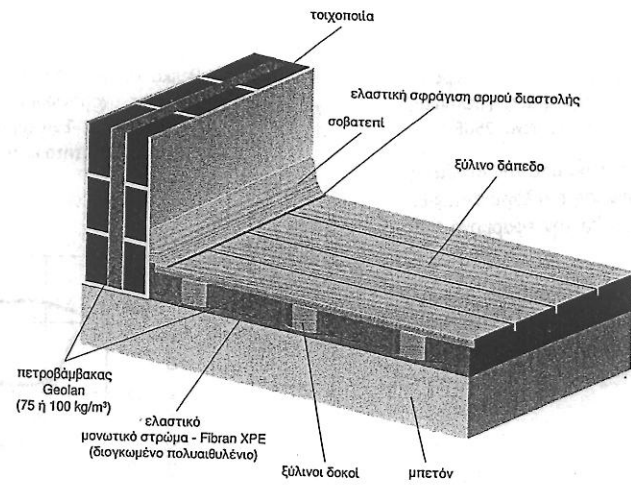
Σχ. 70. Ηχογέφυρες στην κατασκευή κολυμβητού δαπέδου

Γενικά οι ηχογέφυρες μεταξύ δαπέδου – πλάκας προκαλούν μεγαλύτερες μειώσεις της ηχομόνωσης σε σύγκριση με τις ηχογέφυρες μεταξύ δαπέδου – πλευρικών τοίχων. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα επίδρασης ηχογεφυρών στην ηχομονωτική ικανότητα κολυμβητών δαπέδων δίνεται στο Σχήμα 71.

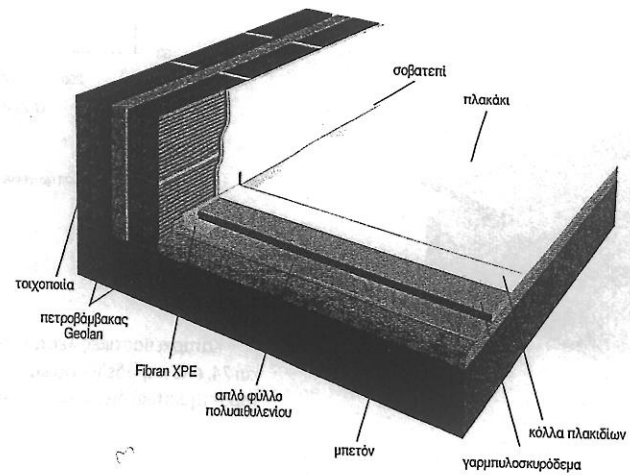


Σχ. 71. Επίδραση ηχογεφυρών στην ηχομονωτική ικανότητα κολυμβητού δαπέδου

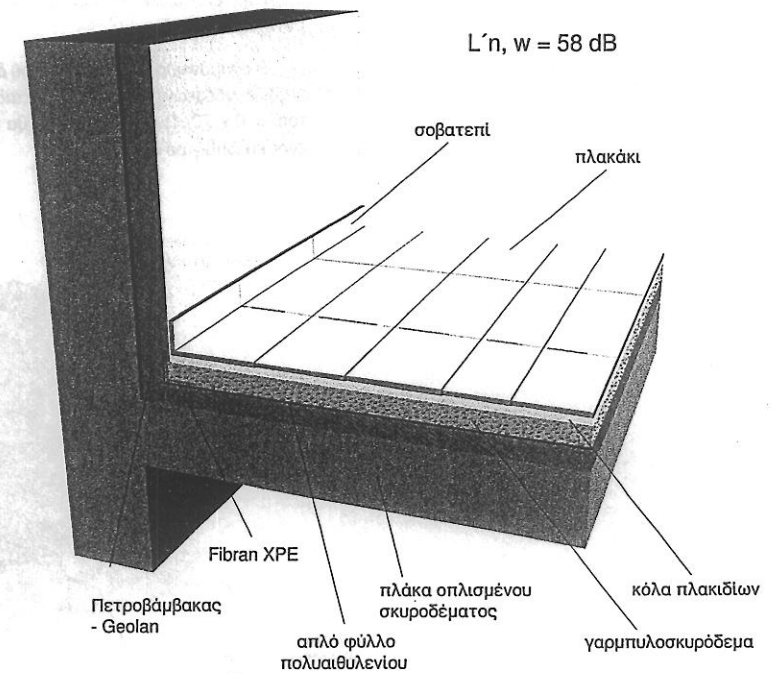
Κατασκευαστικές λεπτομέρειες κολυμβητών δαπέδων δίνονται στα Σχ. 72, 73 και 74, ενώ παραδείγματα κολυμβητών δαπέδων με τα αντίστοιχα ηχομονωτικά τους χαρακτηριστικά δίνονται στα Σχήματα 75 και 76.



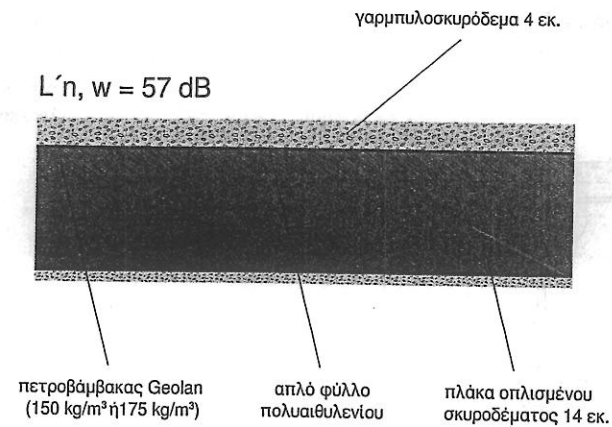
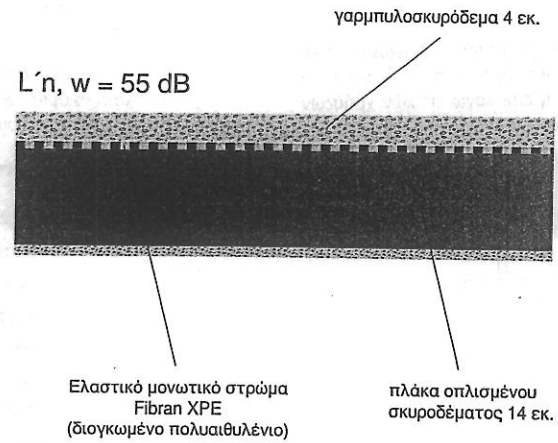
Σχ. 72. Παράδειγμα κολυμβητού δαπέδου



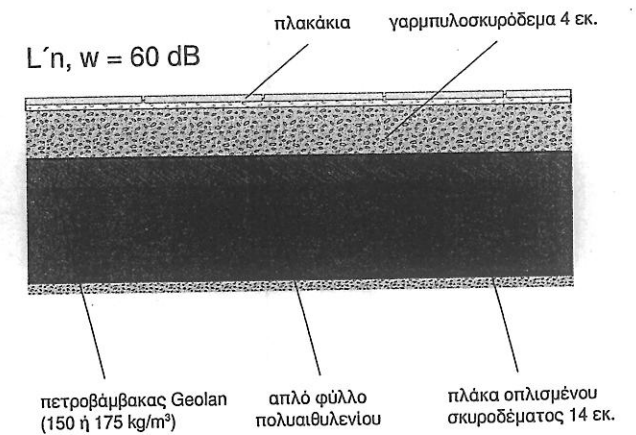
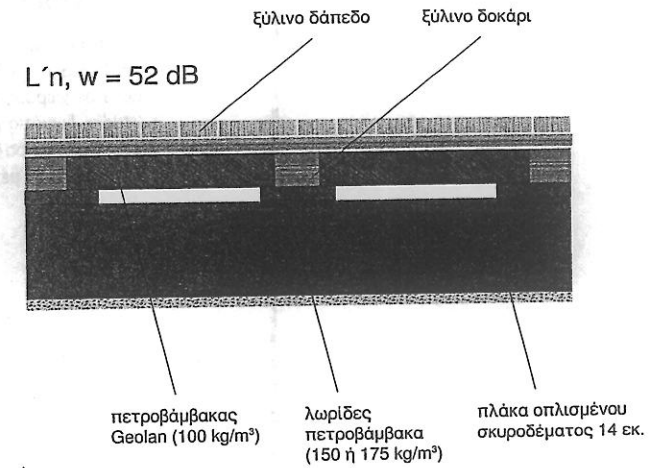
Σχ. 73. Παράδειγμα κολυμβητού δαπέδου



Σχ. 74. Παράδειγμα ηχομονωτικού κολυμβητού δαπέδου



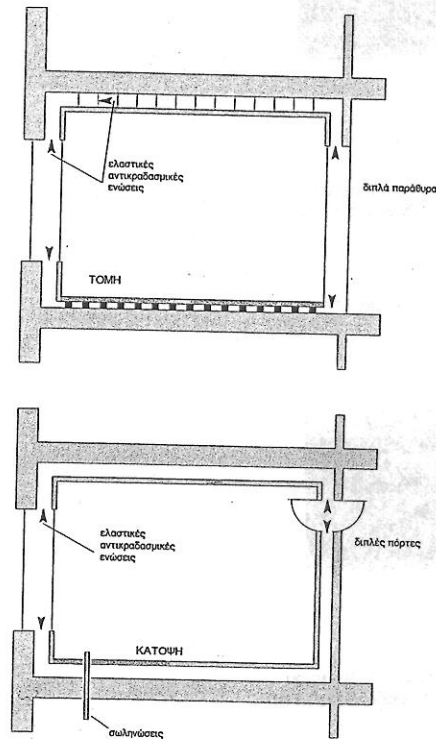
Σχ. 75. Παραδείγματα ηχομονωτικών κολυμβητών δαπέδων



Σχ. 76. Παραδείγματα ηχομονωτικών κολυμβητών δαπέδων

### 5.6 Ασυνεχής κατασκευή

Όπως προαναφέρθηκε, οι πλευρικές μεταδόσεις μειώνουν την ηχομονωτική ικανότητα ακόμη και δομικών στοιχείων με υψηλό δείκτη ηχομείωσης. Για τον λόγο αυτό σε χώρους όπου απαιτείται υψηλή ηχομόνωση είτε λόγω ειδικών χρήσεων (studio, δωμάτια μουσικής, θέατρα κλπ) είτε λόγω δημιουργίας υψηλών σταθμών θορύβου (κέντρα διασκέδασης, πιεστήρια, τυπογραφεία κλπ) επιβάλλεται η εξάλειψη των πλευρικών μεταδόσεων.



Σχ. 77 Σχηματική απεικόνιση ασυνεχούς κατασκευής

Αυτό επιτυγχάνεται με την ασυνεχή κατασκευή που είναι η κατασκευή δωματίου σε δωμάτιο χωρίς καμία σύνδεση μεταξύ των δύο δωματίων (Σχ. 77).

Η ασυνεχής κατασκευή έχει συνολικό δείκτη ηχομείωσης πολύ μεγαλύτερο από το όριο που θέτουν οι πλευρικές μεταδόσεις γιατί εξασφαλίζει αποτελεσματικό έλεγχο τόσο του αερόφερτου όσο και του κτυπογενή ήχου.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα ασυνεχούς κατασκευής δίνεται στο Σχήμα 78.

Τα βασικά χαρακτηριστικά της ασυνεχούς κατασκευής είναι τα εξής :

- κατασκευάζεται κολυμβητό δάπεδο
- οι εσωτερικοί τοίχοι πατούν ελαστικά στο κολυμβητό δάπεδο, στηρίζονται ελαστικά στους εξωτερικούς, δεν φτάνουν μέχρι την οροφή και κλείνουν περιμετρικά με ελαστικό υλικό
- κατασκευάζεται ελαστική αναρτημένη ψευδοροφή που κλείνει περιμετρικά στους τοίχους με ελαστικό σφράγισμα
- τοποθετούνται διπλές πόρτες που η κάθε μία στηρίζεται σε ξεχωριστό τοίχο
- χρησιμοποιούνται διπλά παράθυρα που το κάθε φύλλο στηρίζεται σε διαφορετικό τοίχο
- όλες οι σωληνώσεις (νερού, ηλεκτρικού κλπ) μονώνονται με ελαστικό υλικό και στηρίζονται ελαστικά με ειδικούς αναρτήρες.