

Πειραματική Διερεύνηση Ηχομονωτικών Ικανοτήτων Θυρών

ΓΕΩΡΓΙΟΣ Ι. ΠΟΥΛΑΚΟΣ

Αναπληρωτής Καθηγητής Σχολής Αρχιτεκτόνων ΕΜΠ

Περίληψη

Η συνεχώς αυξανόμενη ένταση του περιβάλλοντος ηχητικού πεδίου, τόσο στο εξωτερικό, όσο και στο εσωτερικό των κτιρίων, απαιτεί την αυξημένη ηχομονωτική ικανότητα των διαχωριστικών πετασμάτων, ώστε μέσα στους χώρους διαβίωσης να επικρατούν συνθήκες ακουστικής άνεσης. Για να επιτευχθεί αυτό χρειάζεται να κατασκευαστούν πόρτες, οι οποίες να παρουσιάζουν υψηλές τιμές σταθμισμένου δείκτη ηχομείωσης R_w . Στην παρούσα εργασία εξετάζονται πειραματικά έξι πόρτες, που είναι κατασκευασμένες από δύο πλάκες μοριοσανίδας (M.D.F.) με επένδυση φορμάικας. Οι δύο πλάκες ενώνονται εσωτερικά με οριζόντιες τραβέρσες από μοριοσανίδα (νοβοπάν) και στα ενδιάμεσα διάκενα τοποθετείται χαλαρά υαλοβάμβακας. Οι πόρτες αυτές έχουν R_w μεγαλύτερο από τις συννηθισμένες πόρτες, αλλά όχι ικανοποιητικό. Η προσθήκη φύλλων μολύβδου αυξάνει την ηχομονωτική ικανότητα και λαμβάνονται πόρτες με ικανοποιητικές τιμές R_w . Η πρόσθετη σφράγιση με ειδική μαστίχη τόσο στο κάτω μέρος, όσο και περιμετρικά των εξετασθέντων δοκιμίων, δεν έδειξε πειραματικά αύξηση της ηχομονωτικής ικανότητάς τους. Αυτό σημαίνει ότι η αρχική σφράγιση των αρμών των δοκιμίων ήταν επαρκής. Επίσης, εξετάζονται εργαστηριακά τρεις διπλές πόρτες, που προέκυψαν με συνδυασμούς από τις απλές πόρτες, που εξετάστηκαν. Οι διπλές πόρτες παρουσιάζουν πολύ υψηλές τιμές του R_w .

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες για την άνετη διαβίωση στους διάφορους χώρους είναι και η στάθμη ηχητικής έντασης μέσα σ' αυτούς. Διεθνώς έχουν καθοριστεί οι ανεκτές στάθμες ηχητικής έντασης, ανάλογα με τη χρήση του χώρου.

Η επίδραση του εξωτερικού θορύβου σε κάθε χώρο εξαρτάται από την ηχομονωτική ικανότητα του παρεμβαλλόμενου διαχωριστικού πετάσματος. Αυτά τα διαχωριστικά πετάσματα είναι συνήθως σύνθετα και αποτελούνται από μια τοιχοποιία που περιλαμβάνει ένα ή περισσότερα ανοίγματα.

Στις εσωτερικές τοιχοποιίες το άνοιγμα είναι συνήθως μια πόρτα. Σ' αυτή την περίπτωση ο δείκτης ηχομείωσης του σύνθετου διαχωριστικού πετάσματος, R_c , εξαρτάται από τους δείκτες ηχομείωσης R_t και R_π της τοιχοποιίας

και της πόρτας, αντιστοίχως, καθώς και από τον λόγο S_π/S του εμβαδού της πόρτας, S_π προς το συνολικό εμβαδό του σύνθετου διαχωριστικού πετάσματος, S [1]. Μάλιστα, ο δείκτης R_c είναι τόσο μεγαλύτερος, όσο μεγαλύτεροι είναι οι δείκτες R_t και R_π και όσο μικρότερο είναι το εμβαδό S_π . Συνεπώς, με δεδομένη την κατασκευή της τοιχοποιίας και το άνοιγμα της πόρτας, η συνολική ηχομονωτική ικανότητα του διαχωριστικού πετάσματος εξαρτάται από την αντίστοιχη της πόρτας.

Επειδή οι συννηθισμένες πόρτες έχουν μικρό δείκτη ηχομείωσης, συνήθως $R_\pi < 30$ dB, η επίδρασή τους στη συνολική ηχομονωτική ικανότητα του σύνθετου διαχωριστικού πετάσματος είναι δυσμενής και μάλιστα είναι τόσο δυσμενέστερη, όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του R_π [2,3]. Πρακτικά, σε αρκετές περιπτώσεις, ανάλογα με τις συνθήκες του εξωτερικού θορύβου και τη χρήση του χώρου, χρειάζονται πόρτες με μεγαλύτερες τιμές δείκτη ηχομείωσης. Το ίδιο συμβαίνει, επίσης, όταν χρειάζεται να προστατευθεί το απόρρητο της συνομιλίας ή της τηλεφωνικής επικοινωνίας μέσα σ' έναν χώρο [4].

Η ηχομονωτική ικανότητα της πόρτας, εκτός από το υλικό και τον τρόπο κατασκευής της, εξαρτάται και από το περιμετρικό σφράγισμα των αρμών της [5]. Το πιο ευάλωτο σημείο της είναι στο κάτω μέρος, όπου η πόρτα ακουμπά στο πάτωμα.

Ο Soeta et al. διερεύνησαν τις ακουστικές ιδιότητες της ηχομετάδοσης μέσα από πόρτες, μετρώντας και υπολογίζοντας χρονικούς και χωρικούς παράγοντες του ηχητικού πεδίου [6].

Καλή πρόβλεψη της ηχομονωτικής ικανότητας για τις πόρτες, οι οποίες αποτελούνται από δύο στρώσεις, λαμβάνεται από τη θεωρία του Sharp [7], όταν υπάρχει ηχοαπορροφητικό υλικό στο διάκενο μεταξύ των στρώσεων και από την αντίστοιχη των Cummings και MacHolland [8] όταν δεν υπάρχει ηχοαπορροφητικό υλικό.

Η επίδραση της ηχομετάδοσης μέσα από τους αρμούς στη συνολική ηχομόνωση της πόρτας περιγράφεται από το μοντέλο του Jones [9], ενώ το μοντέλο του Comperts [10] αποδίδει ικανοποιητικά την ηχομετάδοση μέσα από απλούς δομικούς αρμούς.

2 ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

R_c	ο δείκτης ηχομείωσης του σύνθετου διαχωριστικού πετάσματος
R_t	ο δείκτης ηχομείωσης της τοιχοποιίας
R_{π}	ο δείκτης ηχομείωσης της πόρτας
S_{π}	το εμβαδό της πόρτας
S	το συνολικό εμβαδό του σύνθετου διαχωριστικού πετάσματος
L_1	η ισοδύναμη στάθμη χωρικής μέσης ηχητικής πίεσης στο δωμάτιο ηχητικής εκπομπής
L_2	η αντίστοιχη στάθμη ηχητικής πίεσης στο δωμάτιο ηχητικής λήψης
A	η ισοδύναμη επιφάνεια ηχοαπορρόφησης του δωματίου ηχητικής λήψης
V	ο όγκος του δωματίου ηχητικής λήψης
T_R	ο χρόνος αντήχησης του δωματίου ηχητικής λήψης
R	ο δείκτης ηχομείωσης για τις διαφορετικές πόρτες
R_w	ο σταθμισμένος δείκτης ηχομείωσης του σύνθετου διαχωριστικού πετάσματος

3 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Η διαδικασία δοκιμής της ηχομονωτικής ικανότητας για πόρτες περιγράφεται αναλυτικά στο EN ΕΛΟΤ 370.3 [11] και αναφέρεται συνοπτικά παρακάτω. Η εξεταζόμενη πόρτα έχει εμβαδό μικρότερο από το εμβαδό του ανοίγματος μεταξύ των δύο αιθουσών δοκιμής. Για τον λόγο αυτό πρέπει στο άνοιγμα να τοποθετηθεί ειδικό διαχωριστικό πέτασμα με αρκετά μεγάλη ηχομόνωση και σ' αυτό να τοποθετηθεί η υπό εξέταση πόρτα. Ο ήχος που μεταδίδεται μέσα από το χώρισμα αυτό και από οποιαδήποτε άλλη έμμεση διαδρομή πρέπει να είναι αμελητέος σε σύγκριση με τον ήχο που μεταδίδεται απευθείας μέσα από την πόρτα.

Ο δείκτης ηχομείωσης, R_{π} , της πόρτας στις εργαστηριακές δοκιμές όπου επικρατεί διάχυτο ηχητικό πεδίο, προσδιορίζεται από τη σχ.(3.1), ενώ η ισοδύναμη επιφάνεια ηχοαπορρόφησης A του δωματίου ηχητικής λήψης προσδιορίζεται από τη σχ.(3.2).

$$R_{\pi} = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{S_{\pi}}{A} \quad 3.1$$

$$A = \frac{0.163V}{T_R} \quad 3.2$$

Στην παρούσα εργασία προσδιορίστηκε πειραματικά η ηχομονωτική συμπεριφορά σε έξι απλές και τρεις διπλές πόρτες, στην προσπάθεια να κατασκευαστεί μία πόρτα με υψηλή ηχομονωτική ικανότητα. Επίσης, έγινε έλεγχος σχετικά με την ηχομονωτική επάρκεια της περιμετρικής σφράγισης των αρμών.

Οι απλές πόρτες που μελετήθηκαν, παρουσιάζονται στον πίνακα 1, ενώ οι διπλές πόρτες είναι συνδυασμοί από τις παραπάνω απλές πόρτες (πίνακας 2).

Επίσης, ελέγχθηκε η ηχοστεγανότητα της περιμετρικής σφράγισης των αρμών μεταξύ του φύλλου και της κάσας. Για τον λόγο αυτό στις πόρτες I, II, III, IV, V και VI, τοποθετήθηκε πρόσθετη περιμετρική σφράγιση από ειδική αποφρακτική μαστίχα σε δύο στάδια.

Στο πρώτο στάδιο τοποθετήθηκε μόνο στο κάτω τμήμα της πόρτας (δοκίμια I', II', III', IV', V' και VI') και στο δεύτερο σε όλη την περίμετρο της πόρτας (δοκίμια I'', II'', III'', IV'', V' και VI'').

Πίνακας 1. Συνοπτική περιγραφή απλών θυρών.

	<p><u>Κατασκευή:</u> 2 όμοιες στρώσεις <u>Επιφανειακές διαστάσεις:</u> 1170 x 2430 mm <u>Απόσταση μεταξύ στρώσεων:</u> 46,00 mm <u>Κατασκευή κάθε φύλλου:</u> Ειδική μοριοσανίδα (M.D.F.), πάχους 6,0 mm</p>
I.	<p><u>Εσωτερική επένδυση κάθε φύλλου:</u> Φορμάικα πάχους 1,0 mm. <u>Διάκενο:</u> Οριζόντιες τραβέρσες πλάτους 18,0 mm από μοριοσανίδα (νοβοπάν) ανά 20,0 mm και υαλοβάμβακας (50 kg/m³) <u>Συνολικό πάχος φύλλου:</u> 60,00 mm <u>Συνολική επιφ. πυκνότητα:</u> 26,1 kg/m²</p>
II.	<p><u>Κατασκευή:</u> Ίδια με πόρτα I <u>Επιφανειακές διαστάσεις:</u> Ίδιες με πόρτα I <u>Απόσταση μεταξύ στρώσεων:</u> 51,00 mm. <u>Συνολικό πάχος φύλλου:</u> 65,00 mm <u>Συνολική επιφ. πυκνότητα:</u> 29,3 kg/m²</p>
III.	<p><u>Κατασκευή:</u> Ίδια με πόρτα I <u>Επιφανειακές διαστάσεις:</u> Ίδιες με πόρτα I <u>Απόσταση μεταξύ στρώσεων:</u> 66,00 mm. <u>Συνολικό πάχος φύλλου:</u> 80,00 mm <u>Συνολική επιφ. πυκνότητα:</u> 33,0 kg/m²</p>

IV. Κατασκευή: Ίδια με πόρτα I
Επιφανειακές διαστάσεις: Ίδιες με πόρτα I Απόστα-
ση μεταξύ στρώσεων: 81,00 mm.
Συνολικό πάχος φύλλου: 95,00 mm
Συνολική επιφ. πυκνότητα: 38,2 kg/m².

V. Κατασκευή: Ίδια με πόρτα I
Επιφανειακές διαστάσεις: Ίδιες με πόρτα I
Απόσταση μεταξύ στρώσεων: 70,00 mm
Κατασκευή 1^{ης} στρώσης: Εξωτερικά ειδική μοριοσανίδα (M.D.F.) πάχους 5,0 mm, ενδιάμεσα μόλυβδος πάχους 2,0 mm και εσωτερικά μοριοσανίδα πάχους 5,0 mm.
Κατασκευή 2^{ης} στρώσης: Ίδια υλικά με 1^η στρώση, αλλά με πάχη 6,0 mm, 1,0 mm και 6,0 mm, αντιστοίχως.
Επένδυση: Φορμάικα πάχους 1,0 mm.
Διάκενο: Υαλοβάμβακας (50 kg/m³)
Συνολικό πάχος φύλλου: 95,0 mm Συνολική επιφ. πυκνότητα: 64,6 kg/m²

VI. Κατασκευή: Ίδια με πόρτα I
Επιφανειακές διαστάσεις: Ίδιες με πόρτα I
Απόσταση μεταξύ στρώσεων: 100,00 mm
Κατασκευή 1^{ης} στρώσης: Ειδική μοριοσανίδα (M.D.F.) πάχους 16,0 mm.
Κατασκευή 2^{ης} στρώσης: Εξωτερικά M.D.F. πάχους 6,0 mm, ενδιάμεσα μόλυβδος πάχους 1,0 mm και εσωτερικά μοριοσανίδα πάχους 6,0 mm.
Διάκενο: Υαλοβάμβακας (50 kg/m³)
Συνολικό πάχος φύλλου: 129,0 mm
Συνολική επιφ. πυκνότητα: 72,3 kg/m².

Πίνακας 2. Συνοπτική περιγραφή διπλων θυρών.

VII. Συνδυασμός: Πόρτες II και I
Απόσταση μεταξύ τους: 175,0 mm.
Συνολική επιφ. πυκνότητα: 55,9 kg/m² (29,8+26,1)

VIII. Συνδυασμός: Πόρτες II και III
Απόσταση μεταξύ τους: 155,0 mm.
Συνολική επιφ. πυκνότητα: 62,3 kg/m² (29,3+33,0)

IX. Συνδυασμός: Πόρτες II και VI
Απόσταση μεταξύ τους: 106,00 mm.
Συνολική επιφ. πυκνότητα: 93,9 kg/m² (29,3+64,6)

4 ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ

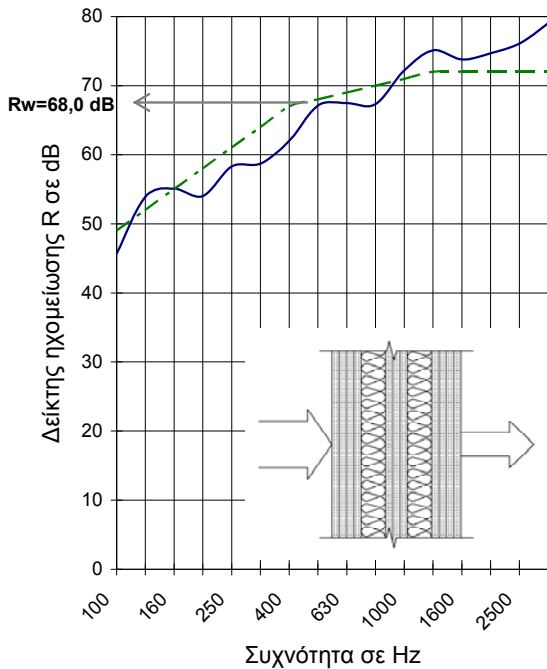
Η διεξαγωγή των δοκιμών έγινε στο Εργαστήριο Ηχοτεχνίας του Ε.Μ.Πολυτεχνείου και στις κατάλληλα διαμορ-

φωμένες αίθουσες για τον προσδιορισμό της ηχομονωτικής ικανότητας διαχωριστικών πετασμάτων και στοιχείων διαχωριστικών πετασμάτων [11].

Στο άνοιγμα μεταξύ των δύο αιθουσών, στις οποίες έγιναν οι δοκιμές, κατασκευάστηκε διαχωριστικό πέτασμα που αποτελείται από μια στρώση από τέσσερις γυψοσανίδες πάχους 15,0 mm η καθεμιά, διάκενο πάχους 45,0 mm, δεύτερη στρώση από τρεις γυψοσανίδες με το ίδιο πάχος, δεύτερο διάκενο πάχους 45,0 mm και τρίτη στρώση από τρεις γυψοσανίδες. Το διαχωριστικό πέτασμα έχει συνολικό πάχος 270,0 mm και $R_w = 68,0$ dB (σχήμα 1), ώστε ο ήχος που μεταδίδεται μέσα από αυτό να είναι αμελητέος σε σύγκριση με τον ήχο που μεταδίδεται μέσα από την πόρτα. Και στα δύο διάκενα έχει τοποθετηθεί, χαλαρά, στρώμα υαλοβάμβακα πυκνότητας 50 kg/m³. Και οι δύο πλευρές του διαχωριστικού πετάσματος έχουν επιχρισθεί με ασβεστοκονίαμα πάχους 15,0 mm.

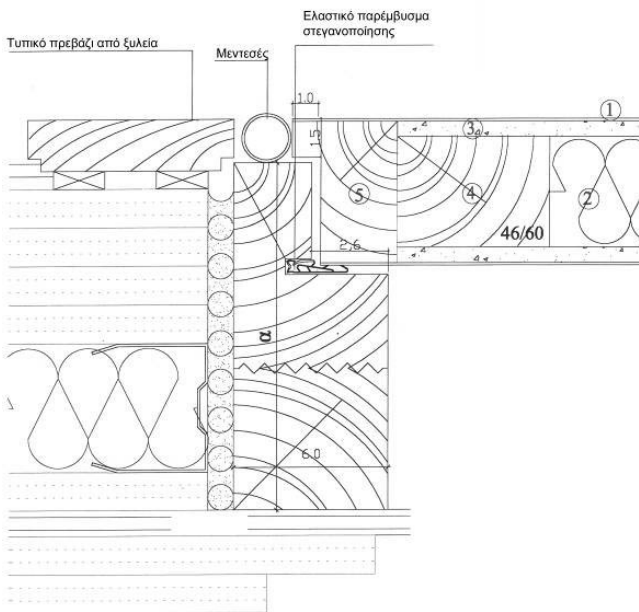
Πίνακας 3. Δείκτης ηχομείωσης για τείχο από γυψοσανίδες με υαλοβάμβακα στα διάκενα.

Συχνότητα σε Hz	Δείκτης ηχομείωσης R
100	45,7
125	53,9
160	55,1
200	54,0
250	58,3
315	58,7
400	62,0
500	67,1
630	67,5
800	67,3
1000	72,2
1250	75,1
1600	73,8
2000	74,7
2500	76,1
3150	79,0

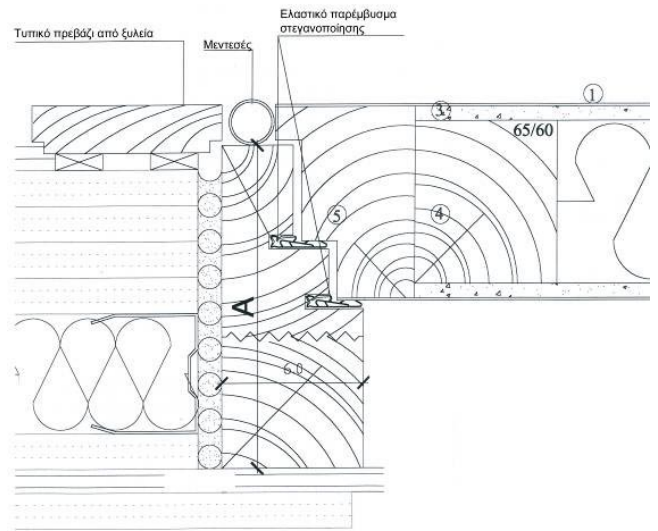


Σχήμα 1. Δείκτης ηχομείωσης σε σχέση με τη συχνότητα για το διαχωριστικό πέτασμα.

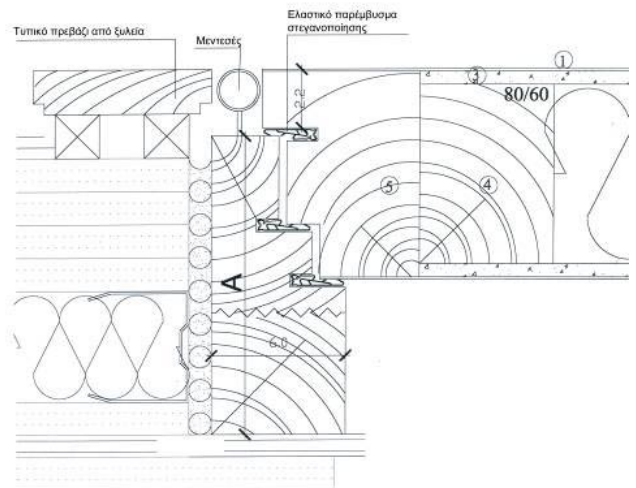
Στο μέσο του πετάσματος και στο κάτω μέρος του έχει αφαιρεθεί άνοιγμα με τις διαστάσεις των δοκιμών και κατασκευάστηκε περιμετρική ξύλινη κάσα, στην οποία αναρτήθηκαν διαδοχικά, από ειδικούς μεντεσέδες, οι πόρτες που εξετάστηκαν.



Σχήμα 2. Λεπτομέρεια οδόντωσης σε οριζόντια τομή της κάσας και του φύλλου για την πόρτα I.

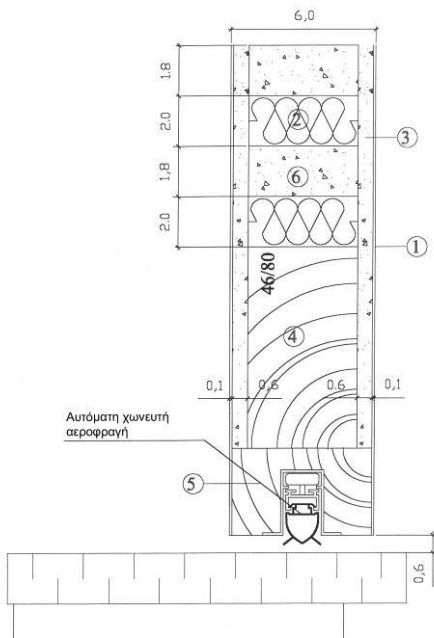


Σχήμα 3. Λεπτομέρεια οδόντωσης σε οριζόντια τομή της κάσας και του φύλλου για τις πόρτες II και III.

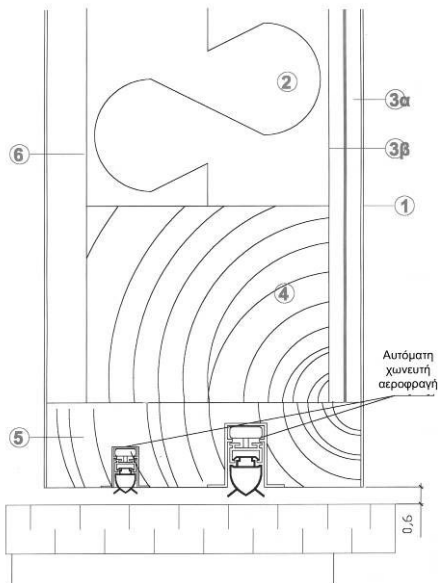


Σχήμα 4. Λεπτομέρεια οδόντωσης σε οριζόντια τομή της κάσας και του φύλλου για τις πόρτες IV, V και VI.

Το κάτω μέρος του φύλλου ακουμπούσε στο δάπεδο. Η στεγανοποίηση μεταξύ κάσας και φύλλου έγινε με την κατασκευή κατάλληλων οδοντώσεων για την καλύτερη εφαρμογή του φύλλου στην κάσα, στις οποίες τοποθετήθηκε ελαστικό παρέμβυσμα στεγανοποίησης. (σχήματα 2,3,4) Στο κάτω μέρος του φύλλου υπάρχει αυτόματη χωνευτή αεροφραγή, η οποία καλύπτει το πιθανό κενό ανάμεσα σ' αυτό και το δάπεδο. (σχήματα 5,6)



Σχήμα 5. Λεπτομέρεια αυτόματης αεροφραγής σε κατακόρυφη τομή του φύλλου για τις πόρτες I έως και V.



Σχήμα 6. Λεπτομέρεια αυτόματης αεροφραγής σε κατακόρυφη τομή του φύλλου για την πόρτα VI.

Γενικά, η τοποθέτηση κάθε πόρτας έγινε με τρόπο όσο το δυνατόν παρόμοιο με την πραγματική κατασκευή, όπως, επίσης, έγινε προσεκτική εξομοίωση των συνθηκών της περιμετρικής σφράγισής της. Και στις δύο αίθουσες δοκιμών είναι αναρτημένα από την οροφή κατάλληλα στοιχεία ηχοδιάχυσης από βερνικωμένη αντικολλλητή ξυλεία για τη δημιουργία διάχυτου ηχητικού πεδίου μέσα στις αίθουσες.

Για τον προσδιορισμό των ισοδυναμίων σταθμών χωρι-

κής μέσης ηχητικής πίεσης L_1 και L_2 στις αίθουσες ηχητικής εκπομπής και ηχητικής λήψης, αντίστοιχα, χρησιμοποιήθηκε ως ηχητικό σήμα θόρυβος παραγόμενος από τη συσκευή ταχείας ανάλυσης investigator 2260D με BZ 7204 της Brüel & Kjaer. Το ηχητικό σήμα διαβιβαζόταν μέσω του ενισχυτή 2716 της Brüel & Kjaer στο παγκατευθυντικό μεγάφωνο 4296 της Brüel & Kjaer, το οποίο ήταν τοποθετημένο σε κατάλληλο τρίποδο μέσα στην αίθουσα ηχητικής εκπομπής.

Ο παραγόμενος ήχος ήταν σταθερός και είχε συνεχές φάσμα σ' όλη την περιοχή συχνοτήτων που ενδιαφέρει. Η ηχητική ισχύς του σήματος ήταν αρκετά μεγάλη, ώστε η τιμή της στάθμης L_2 να είναι περισσότερο από 10,0 dB μεγαλύτερη από τη στάθμη του θορύβου βάθους σε κάθε ζώνη συχνοτήτων και για όλες τις διεξαχθείσες δοκιμές.

Το μεγάφωνο τοποθετήθηκε διαδοχικά κοντά στις δύο γωνίες της αίθουσας ηχητικής εκπομπής, που βρίσκονται απέναντι από το δοκίμιο και σε απόσταση μεγαλύτερη από 1,0 m από τις επιφάνειες που ορίζουν την αίθουσα.

Ο προσδιορισμός των ηχητικών σταθμών L_1 και L_2 έγινε με τη χρησιμοποίηση του περιστρεφόμενου μικροφώνου 3293 της Brüel & Kjaer και τη διαβίβαση του ηχητικού σήματος στο Investigator 2260 D της Brüel & Kjaer. Για τον προσδιορισμό του χρόνου αντήχησης T_R στην αίθουσα ηχητικής λήψης χρησιμοποιήθηκε το ίδιο σύστημα ηχητικής εκπομπής, το οποίο τοποθετήθηκε στην αίθουσα ηχητικής λήψης. Για τη λήψη του ηχητικού σήματος και την εκτίμηση του T_R χρησιμοποιήθηκε το ίδιο σύστημα ηχητικής λήψης, όπως και προηγουμένως.

5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Οι τιμές του δείκτη ηχομείωσης, R που αντιστοιχούν στις πόρτες και προέκυψαν από τις εργαστηριακές δοκιμές σε τριτοοκταβικές ζώνες συχνότητας και για όλη την περιοχή συχνοτήτων που ενδιαφέρει, αναγράφονται στον πίνακα 4 για τις απλές και τις διπλές πόρτες, στον πίνακα 5 για τις πόρτες μετά την τοποθέτηση της ειδικής αποφρακτικής μαστίχας στο κάτω μέρος και στον πίνακα 6 για τις πόρτες μετά την τοποθέτηση της ειδικής μαστίχας περιμετρικά.

Οι πειραματικές τιμές του R κάθε πόρτας αποδίδονται γραφικά σε συνάρτηση με τη συχνότητα στο σχήμα 7 για το δοκίμιο I, στο σχήμα 8 για το δοκίμιο II, στο σχήμα 9 για το δοκίμιο III, στο σχήμα 10 για το δοκίμιο IV, στο σχήμα 11 για το δοκίμιο V, στο σχήμα 12 για το δοκίμιο VI, στο σχήμα 13 για το δοκίμιο VII, στο σχήμα 14 για το δοκίμιο VIII και στο σχήμα 15 για το δοκίμιο IX. Επίσης, στα σχήματα 16 έως 21 δίνονται συγκριτικά οι πειραματικές τιμές του R , κάθε πετάσματος με σφράγιση στο κάτω και περιμετρικά, ως ακολούθως: στο σχήμα 16 για τα δοκίμια I, I' και I'', στο σχήμα 17 για τα δοκίμια II, II' και II'', στο σχήμα 18 για τα δοκίμια III, III' και III'', στο σχήμα 19 για τα δοκίμια IV, IV' και IV'', στο σχήμα 20 για τα δοκίμια V, V' και V'' και στο σχήμα 21 για τα δοκίμια VI, VI' και VI''.

Για την αξιολόγηση της ηχομονωτικής ικανότητας κάθε πόρτας προσδιορίστηκε αντίστοιχα ο σταθμισμένος δείκτης ηχομείωσης R_w από τη σύγκριση της καμπύλης των δοκιμών με την καμπύλη αναφοράς για τον αερόφερτο ήχο, σύμφωνα με το πρότυπο Ε.Λ.Ο.Τ. EN ISO 717-1 [12].

Στα αντίστοιχα διαγράμματα δίνονται για κάθε πόρτα

η τελική θέση της καμπύλης αναφοράς και ο αντίστοιχος σταθμισμένος δείκτης ηχομείωσης R_w . Οι τιμές R_w , για όλες τις πόρτες που μελετήθηκαν αναγράφονται στον πίνακα 7 και για ευκολότερη συγκριτική μελέτη απεικονίζονται με τη μορφή ιστογραμμάτων στα σχήματα 22 και 23.

Πίνακας 4. Εργαστηριακές δοκιμές του δείκτη ηχομείωσης σε τριτοοκταβικές ζώνες συχνότητας για απλές και διπλές πόρτες.

F σε Hz	Απλές πόρτες						Διπλές πόρτες		
	I R σε dB	II R σε dB	III R σε dB	IV R σε dB	V R σε dB	VI R σε dB	VII R σε dB	VIII R σε dB	IX R σε dB
100	25,8	24,5	23,7	28,2	33,3	26,7	34,5	33,8	40,8
125	29,1	27,8	29,9	35,8	41,8	35,3	41,8	43,2	48,0
160	31,0	31,0	35,3	36,2	42,6	36,3	43,3	46,5	47,3
200	28,9	32,1	35,7	36,7	42,4	37,2	45,6	44,7	48,8
250	29,5	34,2	36,2	37,4	42,0	40,8	48,3	45,3	52,1
315	30,4	31,5	37,2	36,5	41,7	41,3	47,2	47,4	53,4
400	30,7	31,6	36,3	35,7	41,0	40,4	45,4	45,2	53,7
500	31,2	32,5	35,0	35,2	42,9	41,8	47,9	44,2	54,2
630	29,6	31,1	32,2	32,7	44,8	42,3	43,4	46,2	55,4
800	30,9	29,6	31,7	33,3	44,3	45,1	48,7	51,4	58,3
1000	31,8	31,2	35,8	37,1	45,6	46,5	52,5	53,3	61,2
1250	31,5	33,0	36,5	38,8	44,5	47,0	51,7	54,6	65,2
1600	31,0	35,1	37,6	39,7	43,2	44,7	52,1	56,3	64,4
2000	29,9	38,7	37,3	41,7	40,1	44,6	57,2	60,2	64,9
2500	30,4	39,6	37,0	43,6	39,2	46,5	59,1	62,2	68,8
3150	32,0	42,1	41,2	44,5	40,3	50,3	65,9	68,3	75,2

Πίνακας 5. Εργαστηριακές δοκιμές του δείκτη ηχομείωσης σε τριτοοκταβικές ζώνες συχνότητας για απλές πόρτες με πρόσθετη σφράγιση στο κάτω μέρος.

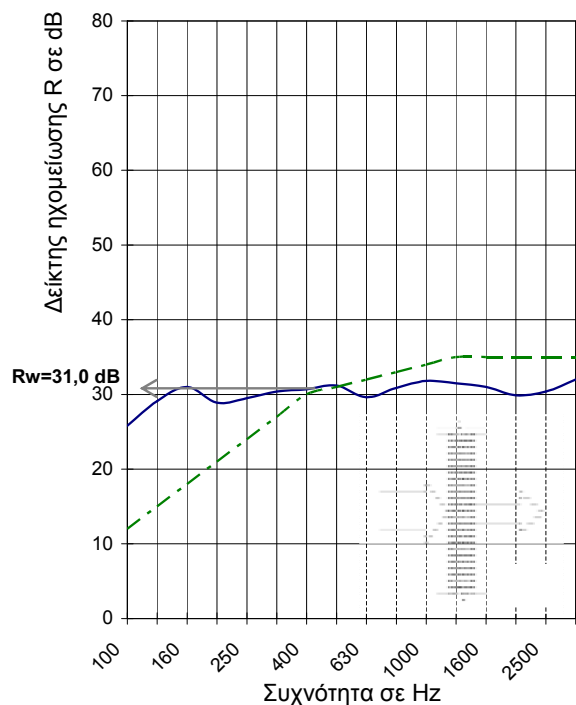
F σε Hz	I' R σε dB	II' R σε dB	III' R σε dB	IV' R σε dB	V' R σε dB	VI' R σε dB
100	24,5	24,3	25,8	28,2	32,6	29,3
125	29,9	25,6	30,7	33,8	40,5	38,7
160	32,8	28,3	32,5	34,7	42,9	39,2
200	31,8	30,5	33,1	35,4	43,5	39,5
250	32,1	33,5	34,8	36,2	43,1	40,3
315	32,0	29,2	35,9	36,6	42,9	40,8
400	32,6	30,3	33,6	35,8	42,0	38,8
500	33,4	31,0	32,8	34,0	43,9	40,6
630	28,1	31,6	32,2	31,7	45,8	42,7
800	29,0	29,1	30,8	34,6	45,3	44,3
1000	29,4	32,6	34,0	37,0	46,6	46,3
1250	30,3	32,8	35,4	38,8	45,5	47,5
1600	32,5	35,6	36,8	39,5	44,1	46,0
2000	34,4	37,2	42,3	41,2	41,2	45,3
2500	38,4	39,0	40,8	43,7	40,4	46,7
3150	41,0	41,9	43,3	45,0	42,6	50,1

Πίνακας 6. Εργαστηριακές δοκιμές του δείκτη ηχομείωσης σε τριτοοκταβικές ζώνες συχνότητας για απλές πόρτες με πρόσθετη περιμετρική σφράγιση.

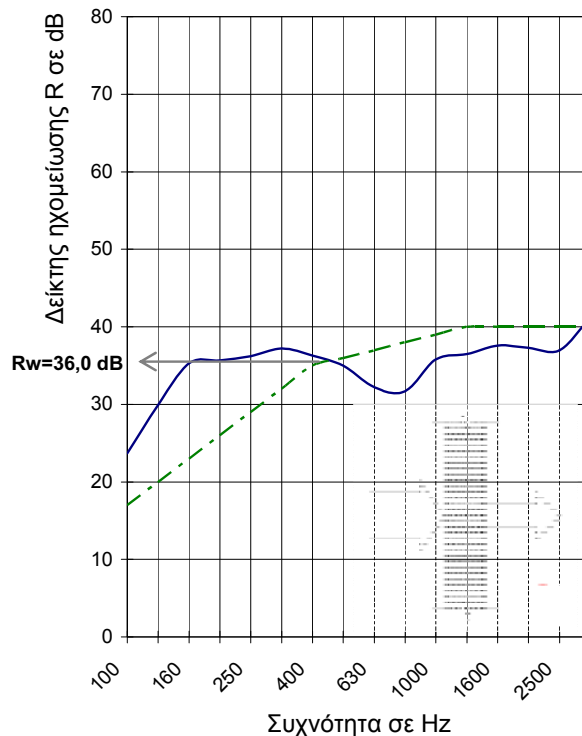
F σε Hz	I'' R σε dB	II'' R σε dB	III'' R σε dB	IV'' R σε dB	V'' R σε dB	VI'' R σε dB
100	26,9	23,5	30,1	27,6	31,8	27,5
125	31,3	30,2	32,5	33,6	41,0	36,4
160	34,7	32,8	35,3	35,0	43,2	37,1
200	31,5	33,6	35,8	36,4	44,1	37,8
250	31,0	34,6	36,3	38,2	42,8	40,3
315	32,4	30,5	33,3	37,5	41,5	41,8
400	33,2	32,9	35,2	35,9	41,2	39,4
500	31,5	33,6	34,5	33,8	42,7	40,0
630	28,2	30,1	31,6	32,3	45,5	42,6
800	29,6	31,9	33,4	35,4	46,1	45,0
1000	30,0	33,2	34,3	38,1	46,5	46,4
1250	32,2	34,5	36,7	39,4	46,0	47,6
1600	33,9	36,3	37,2	39,9	44,2	46,8
2000	36,5	37,9	41,9	42,0	41,1	46,1
2500	38,2	40,6	44,4	44,6	40,5	47,0
3150	41,5	42,5	46,0	45,7	42,7	50,6

Πίνακας 7. Τιμές του σταθμισμένου δείκτη ηχομείωσης για τις πόρτες που εξετάστηκαν.

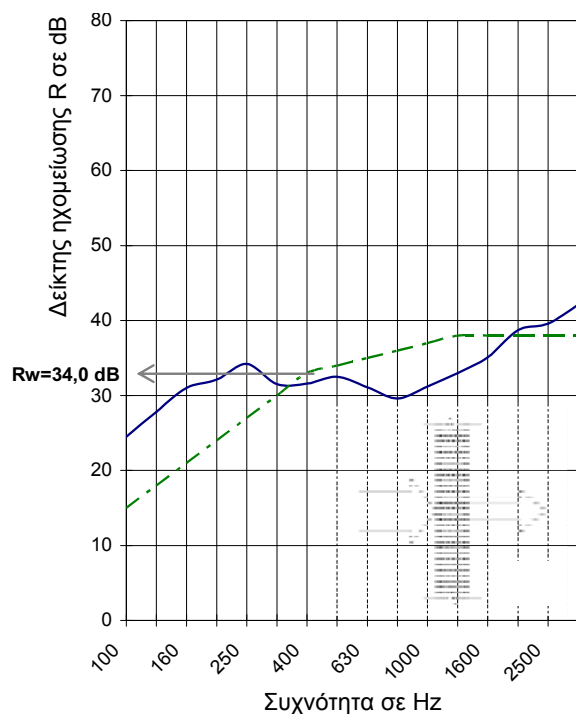
Απλές πόρτες	R _w σε dB	Πόρτες με σφράγιση στο κάτω μέρος	R _w σε dB	Πόρτες με περιμετρική σφράγιση	R _w σε dB
I	31	I'	32	I''	33
II	34	II'	34	II''	35
III	36	III'	36	III''	37
IV	38	IV'	38	IV''	39
V	43	V'	44	V''	44
VI	45	VI'	45	VI''	45
VII	51				
VIII	52				
IX	61				



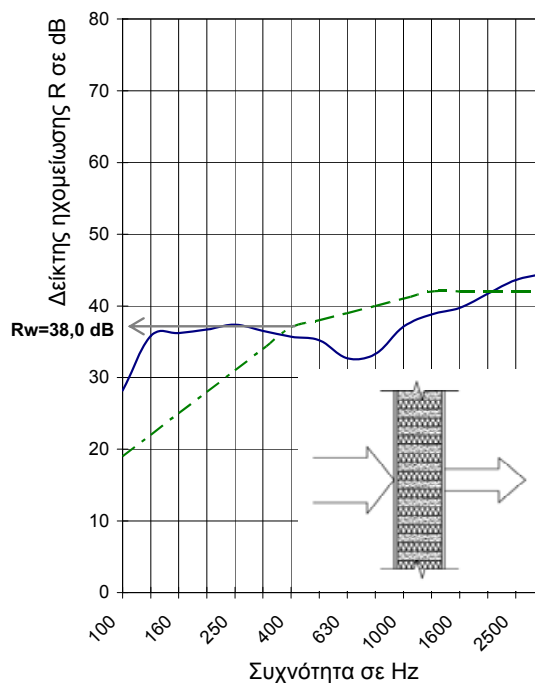
Σχήμα 7. Δείκτης ηχομείωσης σε σχέση με τη συχνότητα για την πόρτα I.



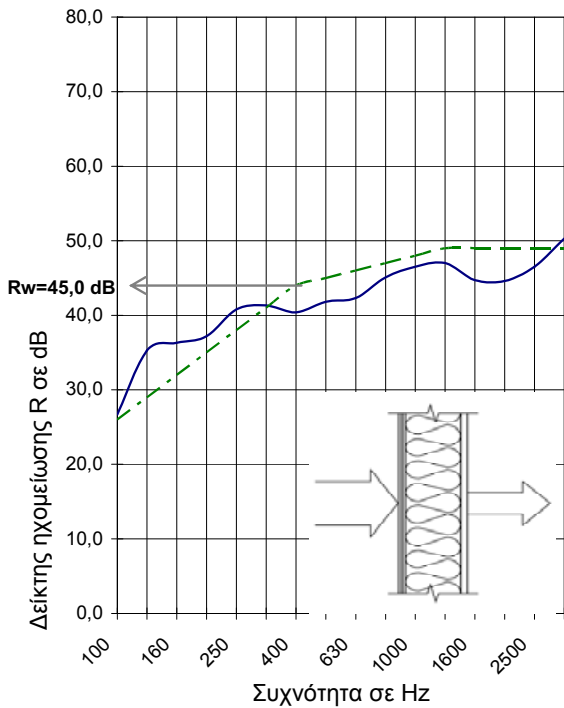
Σχήμα 9. Δείκτης ηχομείωσης σε σχέση με τη συχνότητα για την πόρτα III.



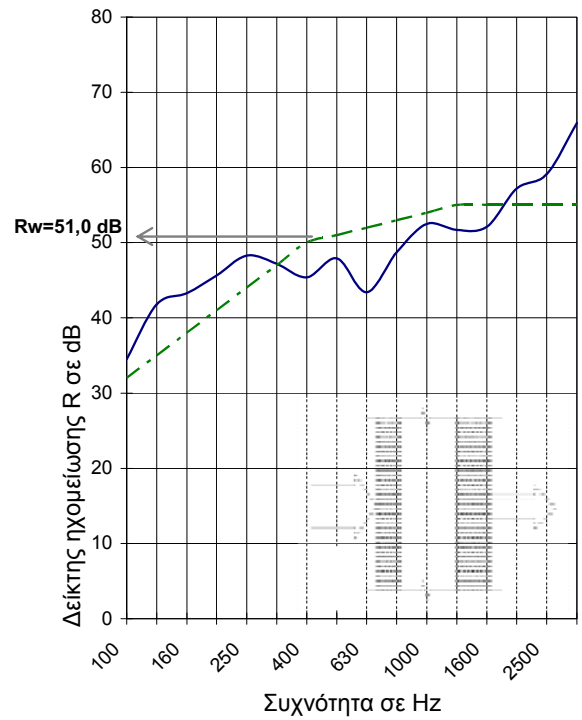
Σχήμα 8. Δείκτης ηχομείωσης σε σχέση με τη συχνότητα για την πόρτα II.



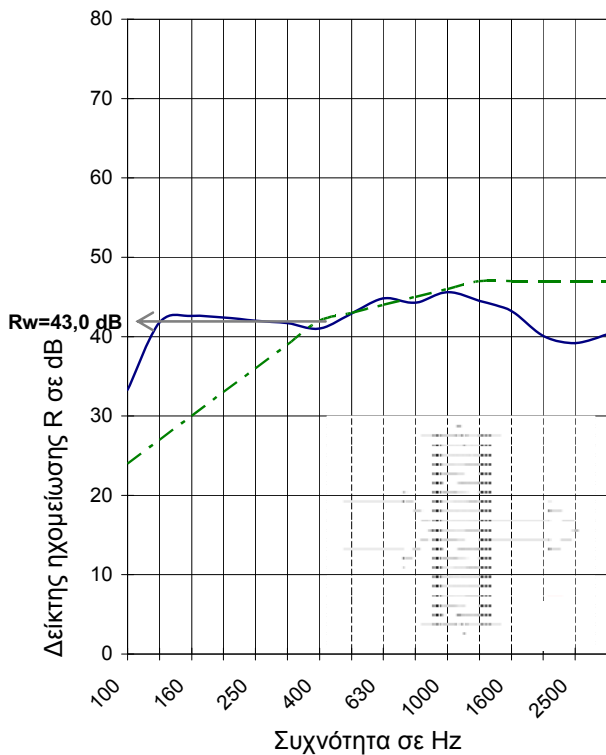
Σχήμα 10. Δείκτης ηχομείωσης σε σχέση με τη συχνότητα για την πόρτα IV.



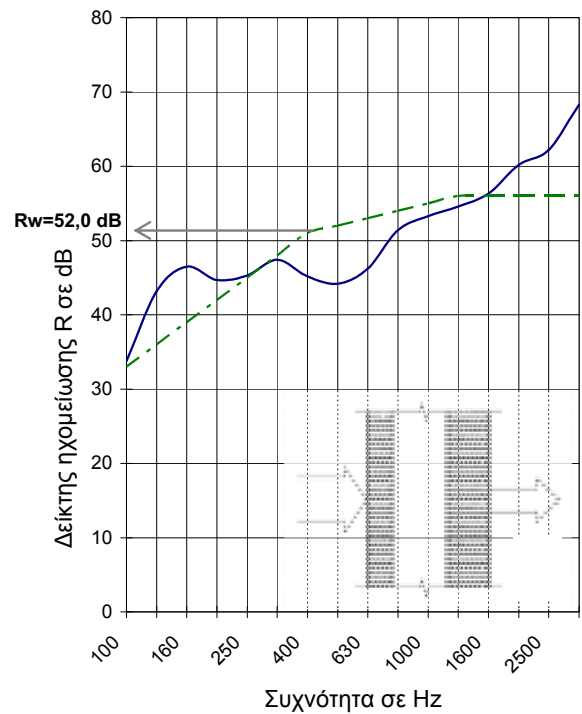
Σχήμα 11. Δείκτης ηχομείωσης σε σχέση με τη συχνότητα για την πόρτα V.



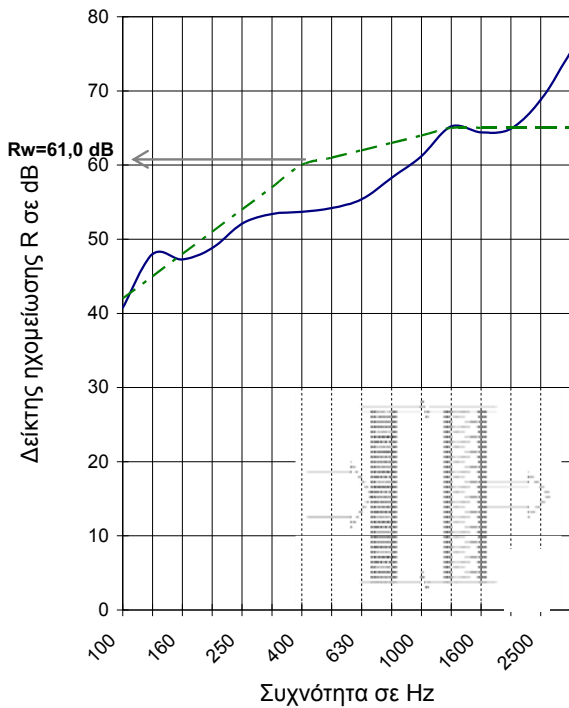
Σχήμα 13. Δείκτης ηχομείωσης σε σχέση με τη συχνότητα για την πόρτα VII.



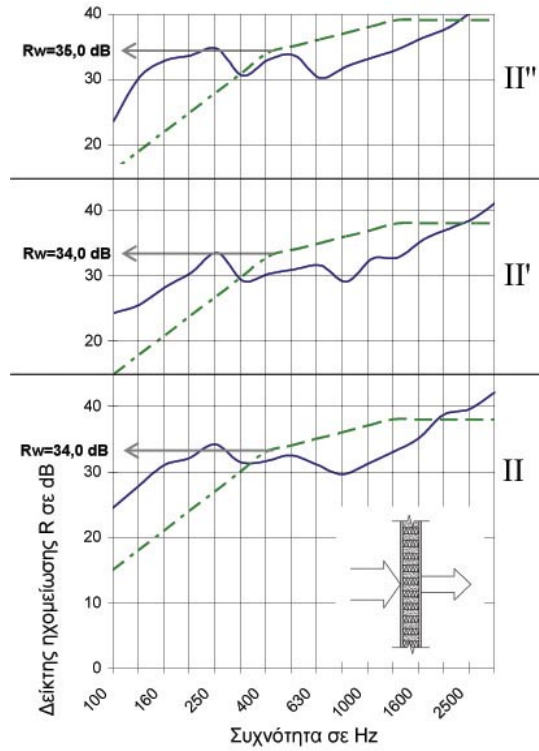
Σχήμα 12 Δείκτης ηχομείωσης σε σχέση με τη συχνότητα για την πόρτα VI.



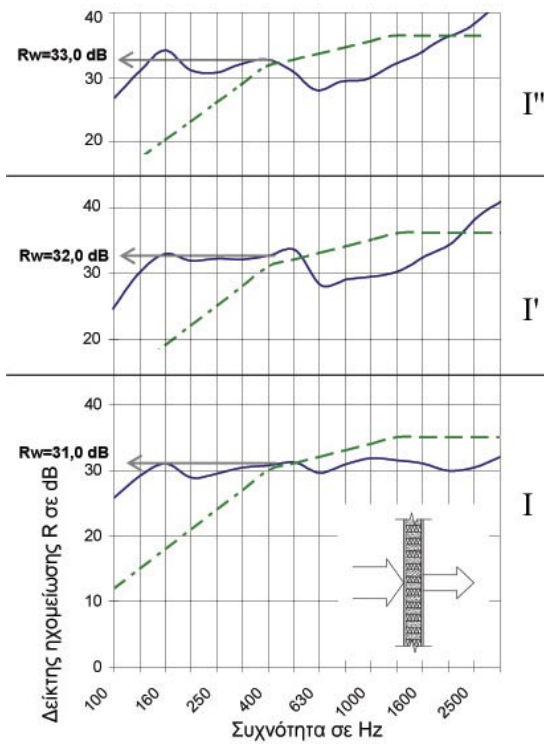
Σχήμα 14. Δείκτης ηχομείωσης σε σχέση με τη συχνότητα για την πόρτα VIII.



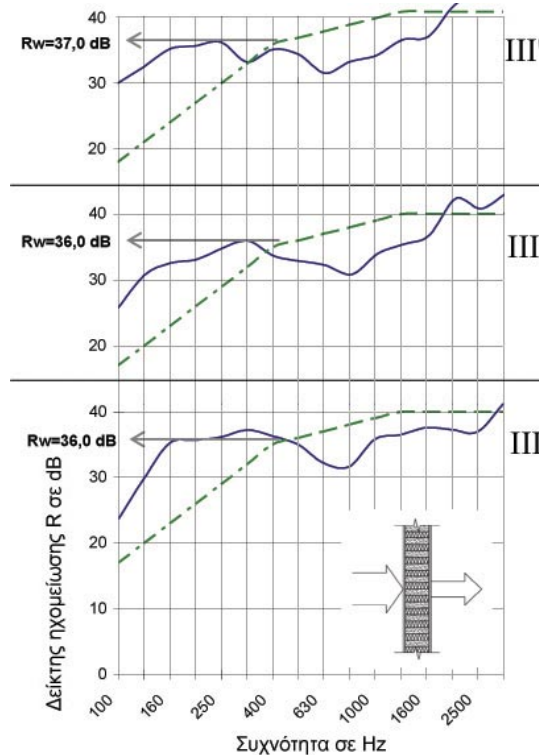
Σχήμα 15. Δείκτης ηχομείωσης σε σχέση με τη συχνότητα για την πόρτα IX.



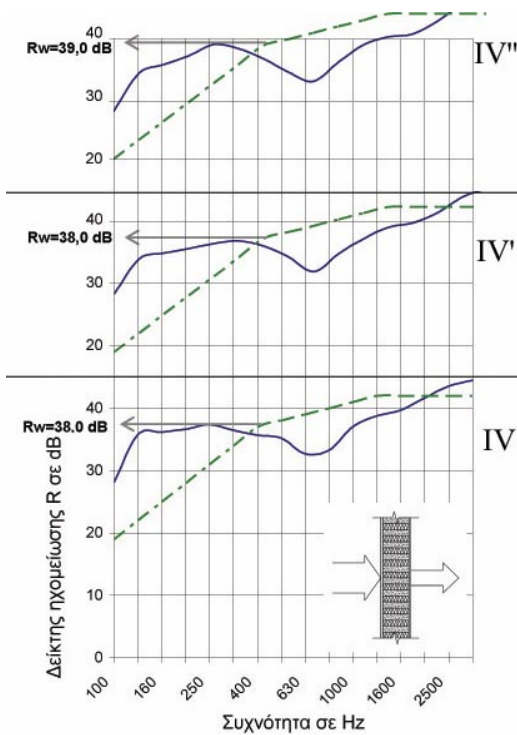
Σχήμα 17 Δείκτης ηχομείωσης σε σχέση με τη συχνότητα για τις πόρτες II, II' και II''.



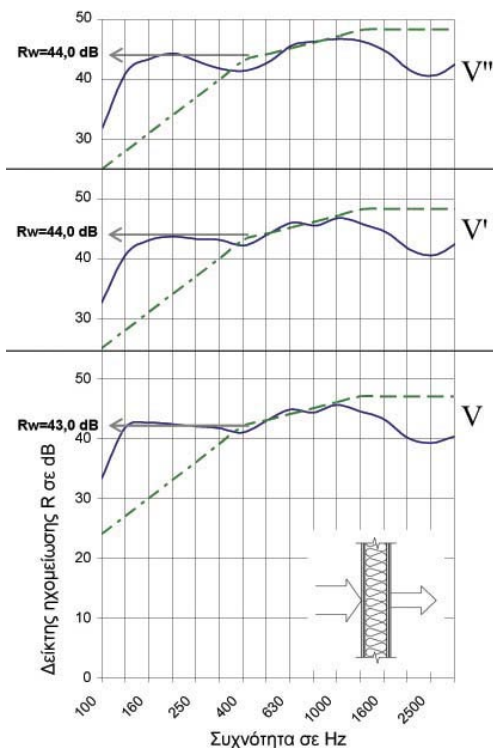
Σχήμα 16. Δείκτης ηχομείωσης σε σχέση με τη συχνότητα για τις πόρτες I, I' και I''.



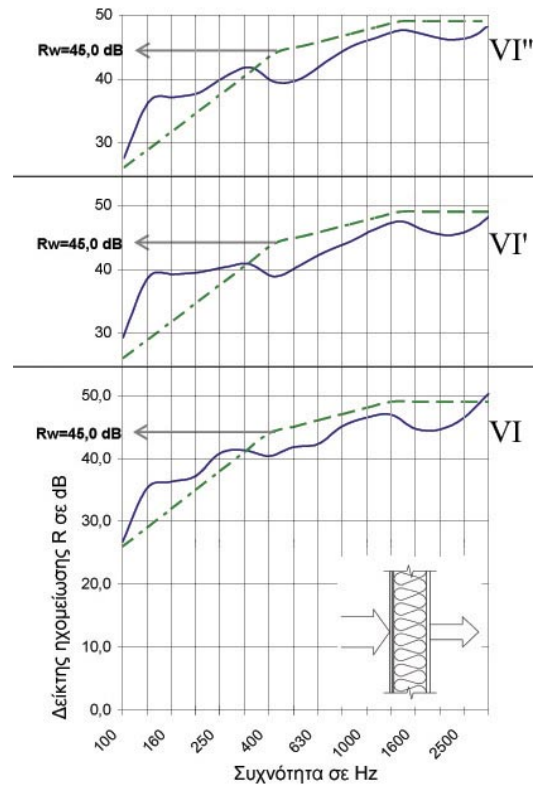
Σχήμα 18. Δείκτης ηχομείωσης σε σχέση με τη συχνότητα για τις πόρτες III, III' και III''.



Σχήμα 19 Δείκτης ηχομείωσης σε σχέση με τη συχνότητα για τις πόρτες IV, IV' και IV''.



Σχήμα 20. Δείκτης ηχομείωσης σε σχέση με τη συχνότητα για τις πόρτες V, V' και V''.



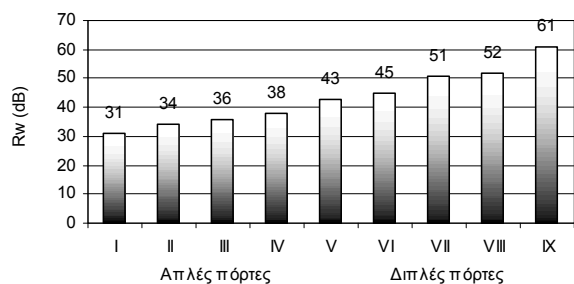
Σχήμα 21. Δείκτης ηχομείωσης σε σχέση με τη συχνότητα για τις πόρτες VI, VI' και VI''.

Από τη μελέτη των αποτελεσμάτων των δοκιμών για τις απλές πόρτες παρατηρείται μία συνεχής αύξηση του σταθμισμένου δείκτη ηχομείωσής τους, R_w από την τιμή των 31,0 dB (δοκίμιο I) μέχρι την τιμή των 38,0 dB (δοκίμιο IV), καθώς αυξάνεται η επιφανειακή πυκνοτήτά τους, όπως προβλέπεται από τον νόμο της μάζας [13,14]. Ωστόσο, η αύξηση της ηχομονωτικής ικανότητας κάθε πόρτας με την αύξηση της συχνότητας είναι μικρότερη από την προβλεπόμενη από τον ίδιο νόμο.

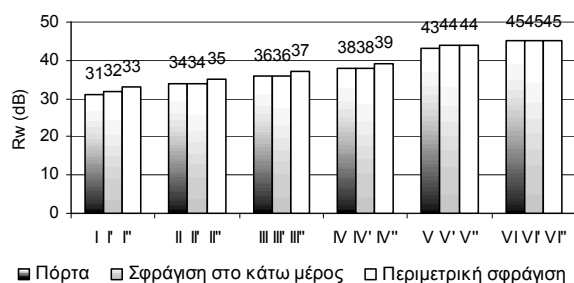
Αυτό οφείλεται στις οριζόντιες τραβέρσες, που ενώνουν τις δύο στρώσεις κάθε πόρτας, οι οποίες λειτουργούν ως ηχογέφυρες.

Συγχρόνως και τα πηγάκια που ενώνουν τις δύο στρώσεις περιμετρικά, λειτουργούν ως ηχογέφυρες. Αυτό έχει ως συνέπεια να διέρχεται μέσα από την πόρτα αυξημένη ποσότητα ηχητικής ενέργειας στην περιοχή των μεσαίων και κυρίως των υψηλών συχνοτήτων, με αποτέλεσμα τη μείωση της ηχομονωτικής ικανότητάς της σ' αυτές τις περιοχές συχνοτήτων.

Με την προσθήκη φύλλων μολύβδου μεταξύ των στρώσεων της πόρτας λαμβάνονται υψηλές τιμές του σταθμισμένου δείκτη ηχομείωσης, μεταξύ 43,0 - 45,0 dB (δοκίμια V και κυρίως VI).



Σχήμα 22. Σταθμισμένος δείκτης ηχομείωσης για απλές και διπλές πόρτες.



Σχήμα 23. Σταθμισμένος δείκτης ηχομείωσης για πόρτες με πρόσθετη σφράγιση.

Οι δοκιμές με τις διπλές πόρτες δείχνουν ότι οι πόρτες αυτές παρουσιάζουν πολύ υψηλές τιμές του σταθμισμένου δείκτη ηχομείωσης, R_{w} , που φτάνουν μέχρι και τα 61,0 dB.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών με την πρόσθετη σφράγιση κάθε πόρτας στο κάτω τμήμα της και ακολούθως και περιμετρικά έδειξαν μηδενική ή ασήμαντη αύξηση του αντίστοιχου σταθμισμένου δείκτη ηχομείωσης (δοκίμια I' έως VI' και I'' έως IV''). Αυτό σημαίνει ότι η περιμετρική σφράγιση κάθε πόρτας είναι εξαιρετικά ικανοποιητική και δεν δημιουργεί αρνητικές επιδράσεις στην ηχομονωτική ικανότητά της.

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την παρούσα ερευνητική εργασία προκύπτει ότι οι απλές πόρτες που μετρήθηκαν παρουσιάζουν τιμές του

δείκτη ηχομείωσης μικρότερες του αναμενόμενου λόγω των ηχογεφυρών που παρουσιάζονται στην κατασκευή τους. Υψηλότερες τιμές λαμβάνονται με την προσθήκη φύλλων μολύβδου, οπότε οι πόρτες αυτές είναι ικανοποιητικές για την κατασκευή σύνθετων διαχωριστικών πετασμάτων, τα οποία να εξασφαλίζουν επαρκή ηχομονωτική προστασία σε διάφορους χώρους.

Πολύ υψηλές τιμές του σταθμισμένου δείκτη ηχομείωσης λαμβάνονται, όταν κατασκευάζονται στο διαχωριστικό πέτασμα διπλές πόρτες.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1 Κορωνάιος Α. και Πουλάκος Γ., Τεχνικά Υλικά, τόμος II, Αθήνα, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2005.
- 2 Bishop D.E. and Hirtle P.W., "Notes on the sound-transmission-loss of residential-type windows and doors", *Journal of the Acoustical Society of America*, 1968, 43:4, pp. 880-882.
- 3 Hongisto V., Keranen J. and Lindgren M., "Sound insulation of doors-Part 2: Comparison between measurement results and predictions", *Journal of Sound and Vibration*, 2000, 230:1, pp.149-170.
- 4 Cavanaugh W.T., Farrell W.R., Hirtle P.W. and Watters B.G., "Speech privacy in buildings", *J. of the Acoustical Society of America*, 1962, 34:4, pp 475-492.
- 5 Hongisto V., "Sound insulation of doors-Part 1: Prediction models for structural and leak transmission", *Journal of Sound and Vibration*, 2000, 230:1, pp.133-148.
- 6 Soeta V., Ohtori K., Fujii K. and Ando Y., "Measurement of sound transmission by hall doors", *J. of Sound and Vibration*, 2001, Vol. 241, No.1, pp.79-86.
- 7 Sharp B.H., "Prediction methods for the sound transmission of building elements", *Noise Control Engineering*, 1978, Vol. 11, pp.53-63.
- 8 Cummings A. και Mulholland K.A., "The transmission loss of finite sized double panels in a random incidence sound field", *Journal of Sound and Vibration*, 1968, Vol. 8, pp.126-133.
- 9 Jones R.E., "How to accurately predict the sound insulation of partitions", *Sound and Vibration*, 1976, pp.14-25.
- 10 Comperts M.C., "The sound insulation of circular and slit-shaped apertures", *Acustica*, 1964, Vol. 14, pp.1-16.
- 11 E.A.O.T. EN ISO 140.03 1995.
- 12 E.A.O.T. EN ISO 717.1 1997.
- 13 Beranek L.L., *Noise reduction*, John Wiley, New York, 1960.
- 14 Van den Eijk J., "Van Doorn-Ijzerman's new mass law", *J. of Sound Vibration*, 1966, 3:1, pp.20-35.

Γεώργιος Ι. Πουλάκος

Αναπληρωτής καθηγητής

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, Τομέας Συνθέσεων Τεχνολογικής Αιχμής, Εργαστήριο Ηχοτεχνίας, Ηρώων Πολυτεχνείου 5, Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, τηλ.: 2107721394.

Extended summary

Experimental Investigation of Sound Insulation of Doors in Buildings

GEORGE J. POULAKOS

Associate Professor, School of Architecture, NTUA

Abstract

The continuing raise in the environmental noise around buildings, as well as in their interior spaces, demands that the partitions have increased soundproofing ability. For this reason, it is important to construct doors with high values of weighting sound insulation index R_w .

In this paper, the experimental analysis of various doors constructed with two particleboard sheets (MDF) with Formica external rendering, are presented and analysed. The two sheets are internally interconnected with horizontal elements made of particleboard, whereas the air gap between them is filled with glasswool insulation. These doors have an R_w value, which is higher than ordinary doors, but still not satisfactory. The addition of lead sheets has as a result the production of doors with sufficient soundproofing ability. The additional sealing with specific mastic, of the lower part and of the perimeter of the examined doors, did not reveal, experimentally, an increase in their soundproofing ability. This means that sealing of the gaps between the door and its frame was adequate. The paper also presents experimental results concerning double doors, which were derived from the combination of the simple doors that were measured. These doors demonstrate very high values of R_w .

1 INTRODUCTION

One of the most important parameters of comfort in the various interior spaces is the level of sound intensity. Internationally accepted tolerable levels of sound intensity have been defined, depending on the use of the space. The effect of exterior noise on a space depends on the sound-proofing capacity of the existing partition. These partitions are usually composite and comprise of a wall with one or more openings. In the case of interior walls, the opening is usually a door. In this case, the sound reduction index of the composite partition, R_c , depends on the sound reduction indices R_t and R_d of the wall and the door, respectively, and on the ratio of the surface of the door, S_d , to the total surface of the composite partition, S [1]. The R_c index increases as the indices R_t and R_d increase and as the surface S_d decreases. As a result, for a given wall construction and door

Submitted: Dec. 28 2006 Accepted: Apr 6 2009

opening, the net sound insulation capacity of the partition mainly depends on this of the door.

As common doors have a low sound insulation index (usually $R_d < 30$ dB), their influence on the net sound-insulation capacity of the composite partition is negative, and worsens as the R_d value increases. [2,3] In many cases, depending on exterior noise conditions and space use, doors with higher values of the sound-reduction index are needed. The same applies in the case of spaces where there is the need for private of conversations and telephone communications. [4]

The sound-proofing capacity of the door depends, apart from its materials and construction, on the peripheral sealing of its slits [5], with their most critical part being the lower, where the door is adjacent to the floor.

Soeta et al. investigated the acoustical properties of sound propagation through doors by measuring and calculating time and spatial parameters of the sound field. [6]

A fairly good prediction of the sound-proofing capacity for doors, which are composed of two layers, can be achieved from Sharp's theory [7], when a sound-absorbing material is used in the gap between the two layers, and from the theory of Cumming and MacHolland [8], when no sound-absorbing material is used. The influence of sound propagation through the slits on the total sound-proofing of the door is described by the Jone's model [9], whereas the Compert's model [10] can accurately predict sound propagation through simple structural slits.

2 PRESENTATION OF THE EXPERIMENT

The testing procedure of the sound-proofing capacity of doors is described in detail in EN EAOT 370.3 [11] and is roughly presented below. The door under examination has a much smaller surface than the opening between the two testing spaces. For this reason, a special partition with a fairly large sound-proofing capacity must be constructed

in order for the door to be placed. The sound, which is propagated through this partition and through all other indirect courses, has to be negligible compared to the sound, which is propagated through the door.

The sound reduction index, R_{π} , of the door in laboratory testing, where there is a prevailing diffuse sound field, can be defined from eq. (3.1), whereas as the equivalent sound-absorbing surface A of the sound-reception room can be defined from eq. (3.2).

In the current paper, the sound-proofing capacity of six simple and three double doors was defined experimentally, in order to manufacture a door of high sound-proofing capacity. The sound-proofing capacity of the peripheral sealing of the slits, was also tested. The simple doors under study are presented in Table 1, while the double doors, which are combinations of the above-mentioned simple ones, in Table 2.

Furthermore, the sound-proofing of the peripheral sealing of the slits between the leaf and the frame of the door was measured. For this reason, for doors I, II, III, IV, V and VI, additional peripheral sealing made of specific mastic was placed in two stages. In the first stage only the lower part of the door was sealed (testing modules I', II', III', IV', V' and VI'), whereas in the second stage, the whole perimeter was sealed (testing modules I'', II'', III'', IV'', V'' and VI'').

3 LABORATORY EXPERIMENTS

The laboratory experiments were conducted in the Acoustics Laboratory of the National Technical University of Athens, Greece in appropriately configured rooms for the definition of the sound-proofing capacity of partitions and partition elements. [11] In the opening between the two rooms, a partition was constructed. This comprised of the following layers: one layer of four 15 mm-thick gypsum-boards, a 45 mm-thick gap, a second layer of three gypsum-boards of the same thickness, a second 45 mm-thick gap and a final layer of three gypsum-boards. The partition had a total thickness of 270,0 mm and such total surface weight that the sound, which is propagated through it, is negligible compared to this, which is propagated through the door ($R_w = 68,0$ dB, figure 1). Both gaps are loosely filled with glass-wool, with a density of 50 kg/m³. Both sides of the partition are plastered with 15-mm thick lime mortar. In the middle of the partition, an opening with dimensions corresponding to those of the testing modules was left and a wooden frame was constructed, from which the modules were suspended with the help of appropriate hinges. The lower part of the door leaf was adjacent to the floor. The sound-proofing between the door's frame and leaf was achieved with the construction of appropriate indentations, and inside them an elastic sound-proofing gasket was placed. (figs. 2,3,4) At the lower part of the leaf, there was an automatic, recessed wind-

barrier covering the gap that might exist between the leaf and the floor. (figs. 5,6)

In general, the placement of the door was done in a way, which was as close as possible to current construction practices. The same was applied to the conditions of peripheral sealing. In both testing rooms, appropriate sound-diffusing elements made of lacquered plywood were suspended from the ceiling in order to create a diffuse sound field.

For the measurement of the average sound pressure level, L_1 and L_2 , respectively, the noise that is produced as a sound signal from a fast-analysis device Bruel & Kjaer investigator 2260D with BZ 7204. The sound signal was transmitted through a Brüel & Kjaer 2716 amplifier to a Brüel & Kjaer 4296 all-directional loudspeaker, which was appropriately placed on a tripod inside the room of sound emission.

The produced sound had a continuous spectrum in all the frequencies in all the frequency range of interest. The sound power of the signal was adequately high, in order for the value of the level L_2 to be more than 10,0 dB higher than the level of background noise in every frequency range and during all the testing procedures.

The loudspeaker was placed consecutively near the two corners of the sound emission room, which were opposite to the testing module and at a distance greater than 1,0 m from the peripheral walls.

The measurement of the sound levels L_1 and L_2 was achieved with the use of a Brüel & Kjaer 3293 rotating microphone and the transmission of the sound signal to the Brüel & Kjaer 2260 D Investigator. The measurement of the reverberation time, T_R , in the sound reception room was achieved when the same sound emission system was placed in it. For the reception of the sound signal and the calculation of the T_R value, the above-mentioned sound reception system was used.

4 RESULTS - DISCUSSION

The values of the sound reduction index, R , which correspond to the doors and were derived from the experimental testing in third-octave frequency bands and for the whole area of the frequencies that are of interest, are recorded in table 4 for simple and double doors, in table 5 for the doors after the placement of the specific mastic at the lower part and in table 6 for the doors after the placement of specific mastic peripherally.

The experimental values of R for each door plotted against the frequency are graphically presented in fig.7 for module I, fig.8 for module II, fig.9 for module III, fig.10 for module IV, fig.11 for module V, fig.12 for module VI, fig.13 for module VII, fig.14 for module VIII and fig.15 for module IX. Furthermore, in figs. 16 to 21, the R experimental values of each module with specific mastic on the lower part and peripherally, are given comparatively as follows: in fig. 16

for modules I, I' and I'', in fig. 17 for modules II, II' and II'', in fig. 18 for modules III, III' and III'', in fig. 19 for modules IV, VI' and IV'', in fig. 20 for modules V, V' and V'' and in fig. 21 for modules VI, VI' and VI''.

For the evaluation of the sound-proofing capacity of each door the weighted sound-reduction index, R_w was defined from the comparison of the testing curve to the reference curve for airborne sound, according to the E.A.O.T. EN ISO 717-1 standard [12].

In the diagrams that are presented for each door, the final position of the curve and the respective weighted sound-reduction index, R_w are also given. The R_w values for all the studied doors are recorded in table 7 and are graphically presented in the clustered column charts of figs. 22 and 23.

From the study of the testing results for simple doors, a continuous raise in their weighted sound-reduction index, R_w from the value of 31,0 dB (module I) up to the value of 38,0 dB (module IV), with the raise of their surface density, as is predicted from the mass law [13,14]. Nevertheless, the increase in the sound-proofing capacity of each door with the increase in the frequency is smaller than the one predicted by the same law. This is due to the horizontal elements, which connect the two layers of the door and function as sound bridges. As a result, an increased amount of sound energy in the area of medium and, mostly, high frequencies is transmitted through the door, reducing its sound insulation capacity for these frequency bands.

The addition of lead sheets between the different layers of the door results in high values of the weighted sound-reduction index, which range between 43,0 and 45,0 dB (module V and, mostly, VI).

The testing of the double door reveal that these doors present very high values of the weighted sound-reduction index, R_w , which reach up to 61,0 dB.

The results of the tests with the additional sealing of the lower part and the periphery showed a zero or negligible increase of the respective weighted sound-reduction index (modules I' to VI' and I'' to IV''). This means that the initial peripheral sealing of each door was satisfactory and did cause negative effects on its sound-proofing capacity.

5 CONCLUSIONS

From the current study, it can be seen that the values of the sound-reduction index of the simple doors, which were measured, were lower than expected due to the sound bridges that exist in their construction. Higher values can be achieved with the addition of lead leaves. In this case, these doors are acceptable for the construction of composite partitions, which ensure the adequate sound protection of different spaces. Very high values of the sound-reduction index can be achieved with the construction of double doors.

George J. Poulakos

Associate professor

National Technical University of Athens, School of Architecture, Department of Architectural Technology, Sound Laboratory, 5 Heron Polytechniou Str., Zografou Campus, tel.: 2107721394, fax: 2107721393, email: gpoulako@central.ntua.gr