

## “Μικροδιάτρητες ηχοαπορροφητικές μεμβράνες για την βελτιστοποίηση του χρόνου αντήχησης αιθουσών”

Χρήστος Κουτσοδημάκης  
Σύμβουλος Ακουστικής, MSc, [ckoutsod@hotmail.com](mailto:ckoutsod@hotmail.com)  
ΕΡΓΟΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΕΠΕ  
Πανόρμου 71-73, 11524 - Αθήνα  
[info@ergoakoustiki.gr](mailto:info@ergoakoustiki.gr), [www.ergoakoustiki.gr](http://www.ergoakoustiki.gr)

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η βελτιστοποίηση του χρόνου αντήχησης αιθουσών απαιτεί αρκετές φορές τη διατήρηση της αισθητικής της αίθουσας, χωρίς να καταργούνται τα υαλοπετάσματα της. Στις περιπτώσεις αυτές μπορούν να εφαρμοστούν διαφανείς μικροδιάτρητες ηχοαπορροφητικές μεμβράνες, οι οποίες διατηρούν σε μεγάλο βαθμό τη διαφάνεια των υαλοπετασμάτων, προσθέτοντας όμως ηχοαπορρόφηση στον χώρο.

Γενικά, τα μικροδιάτρητα panel (MPP) έχουν μικρή διάμετρο οπής (0,5-1mm) έτσι ώστε να παρέχουν από μόνα τους αρκετή ακουστική αντίσταση και χαμηλή ακουστική εμπέδηση μάζας, ικανή για ηχοαπορρόφηση σε μεγάλο συχνотικό εύρος χωρίς επιπρόσθετο ινώδες ή πορώδες υλικό πίσω από αυτά. Τα μικροδιάτρητα panel έχουν απλή δομή, μπορούν να κατασκευαστούν από υλικά όπως χαρτόνι, πλαστικό, κόντρα-πλακέ, μεταλλικά φύλλα. Η απορρόφηση μπορεί επ' ακριβώς να προβλεφθεί.

Στην παρούσα εργασία γίνεται παρουσίαση της αρχής λειτουργίας του μικροδιάτρητου ηχοαπορροφητικού panel. Οι μικροδιάτρητες οπές στην επιφάνεια του panel προκαλούν την μετατροπή της ηχητικής ενέργειας σε θερμότητα. Η τριβή του αέρα σε κάθε οπή ενισχύει τον συντονισμό του αέρα ανάμεσα στη μικροδιάτρητη μεμβράνη και στο πίσω μέρος κάνοντας ηχοαπορρόφηση. Τέσσερις παράμετροι καθορίζουν την ηχοαπορρόφηση της μικροδιάτρητης μεμβράνης: i) Η διάμετρος  $d$  των οπών ii) η απόσταση  $b$  μεταξύ των οπών iii) το πάχος  $t$  της μεμβράνης iv) το πάχος του στρώματος του αέρα  $D$  ανάμεσα στο panel και στην επιφάνεια εφαρμογής.

Γίνεται επίσης παρουσίαση της βελτίωσης του χρόνου αντήχησης σε διάφορες αίθουσες με την χρήση των ηχοαπορροφητικών μικροδιάτρητων μεμβρανών Microsorber® της εταιρίας Kaefer. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από ακουστικές μετρήσεις σε χώρους όπου εφαρμόστηκαν οι παραπάνω μεμβράνες.

### ABSTRACT

*In some cases, it is required to achieve the optimum reverberation time for an auditorium with many transparent and hard surfaces. In these cases microperforated panel absorbers should be used in front of the transparent and reflecting surfaces in order to add absorption in the room.*

*In general microperforated panels (MPP) have submillimeter diameter size (0,5-1mm) as to provide by themselves, enough acoustic resistance and low acoustic mass reactance necessary for wide-band sound absorber, without any additional fibrous, porous material. The microperforated panels have a simple structure and*

may be made of any material such as cardboard, plastic, plywood sheet metal absorption. Their absorption characteristics are exactly predictable.

In the present paper the principals of the microperforated panel is presented. The small holes that form the microperforation cause a conversion of sound energy into heat energy. The friction of the air in each single hole is amplified by resonance in the air between the microperforated panels and the backing and yields to the absorption of the sound. The parameters are determine absorption of the panel are: i) The diameter  $d$  of the holes ii) The distance  $b$  between the holes iii) The thickness  $t$  of the panel iv) The thickness  $D$  of the air layer between the panel and the application surface.

Measurement curves of the reverberation time of auditoria in which the microperforated polycarbonate foil Microsorber® -Kaefer is applied to improve the acoustics of restaurants are presented.

## 1. Εισαγωγή

Τα διάτρητα panels έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιηθεί εδώ και αρκετά χρόνια, αλλά η απαραίτητη χρήση πορώδους υλικού μαζί με αυτά είχε σαν αποτέλεσμα να χρησιμοποιηθούν σαν προστατευτικό υλικό κάλυψης.

Τα μικροδιάτρητα panels έχουν αναπτυχθεί στα τέλη της δεκαετίας του εξήντα όταν ήταν απαραίτητο ένα ηχοαπορροφητικό υλικό για ένα λιτό περιβάλλον χωρίς την χρήση ινώδους ή πορώδους υλικού.

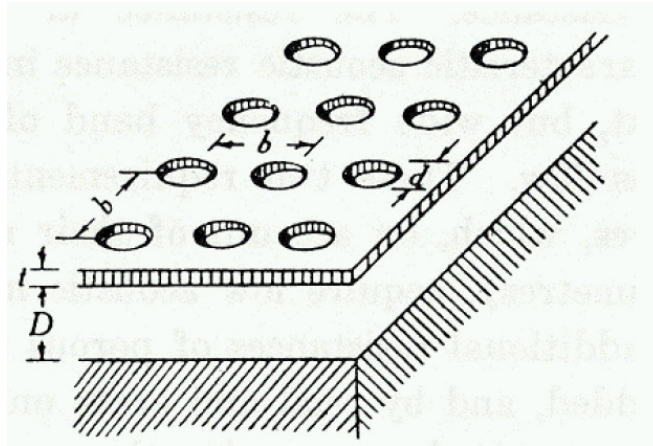
Σε αντίθεση με τα διάτρητα panels όπου η διάμετρος της διάτρησης είναι της τάξης του χιλιοστού ή ακόμη και του εκατοστού, τα μικροδιάτρητα panel έχουν διάμετρο διάτρησης μικρότερου του χιλιοστού (0,5-1mm). Με τον τρόπο αυτό μπορούν να παρέχουν από μόνα τους αρκετή ακουστική αντίσταση και χαμηλή ακουστική εμπέδηση μάζας, ικανά για ηχοαπορρόφηση σε μεγάλο συχνοτικό εύρος, χωρίς επιπρόσθετο ινώδες ή πορώδες υλικό.

## 2. Αρχή λειτουργίας των μικροδιάτρητων ηχοαπορροφητικών panel (MPP)

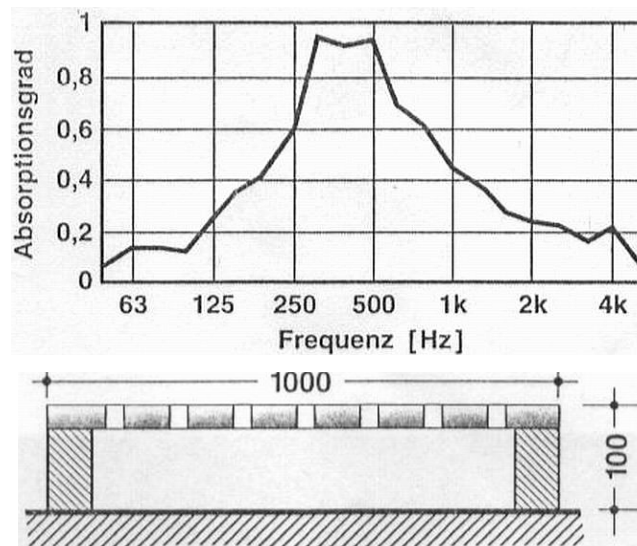
Τα μικροδιάτρητα panel έχουν απλή δομή, μπορούν να κατασκευαστούν από υλικά όπως χαρτόνι, πλαστικό, κόντρα-πλακέ και μεταλλικά φύλλα.

Οι μικροδιάτρητες οπές στην επιφάνεια του panel προκαλούν την μετατροπή της ηχητικής ενέργειας σε θερμότητα. Η τριβή του αέρα σε κάθε οπή ενισχύει τον συντονισμό του αέρα ανάμεσα στη μικροδιάτρητη μεμβράνη και στο πίσω μέρος κάνοντας ηχοαπορρόφηση. Ο αέρας που βρίσκεται ανάμεσα στο panel και στην επιφάνεια λειτουργεί σαν ένα σύστημα μάζας-ελατηρίου. Ένα μικροδιάτρητο panel αποτελεί ουσιαστικά μια σειρά από αντηχεία Helmholtz. Είναι ένα πλέγμα από στενούς και κοντούς σωλήνες, οι οποίοι διαχωρίζονται μεταξύ τους με απόσταση πολύ μεγαλύτερη από την διάμετρό τους, αλλά μικρή σε σύγκριση με το μήκος κύματος του ήχου.

Τέσσερις παράμετροι καθορίζουν τα χαρακτηριστικά του μικροδιάτρητου panel [2]: i) Η διάμετρος  $d$  των οπών ii) η απόσταση  $b$  μεταξύ των οπών iii) το πάχος  $t$  της μεμβράνης iv) το πάχος του στρώματος του αέρα  $D$  ανάμεσα στο panel και στην επιφάνεια εφαρμογής (Εικόνα 1).



**Εικόνα 1:** Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μικροδιάτρητη απορροφητή [1]  
 (Source: D.-Y. Maa, Scientia Sinica, Vol. XVIII, 1975)



Πάχος πλάκας: 5,00mm  
 Διάμετρος οπών: 0,55mm  
 Απόσταση οπών: 3,55mm  
 Απόσταση πλάκας από επίπεδη επιφάνεια: 100mm

**Εικόνα 2:** Απορρόφηση ενός μικροδιάτρητου panel μετρημένο σε αίθουσα του Γερμανικού Κοινοβουλίου (Source: Fuchs H.V., Zha X. „Schallabsorber aus Acryglas im Plenarsaal des Bundestages)

Από τις παραπάνω τέσσερις παραμέτρους μπορεί να υπολογιστεί η συχνότητα συντονισμού στην οποία συμβαίνει η μεγαλύτερη απορρόφηση καθώς και την συνολική απορρόφηση του μικροδιάτρητου panel (Εικόνα 2).

Η συχνότητα συντονισμού του μικροδιάτρητου panel όπου έχουμε και την μέγιστη ηχοαπορρόφηση δίνεται από την παρακάτω εξίσωση [3]:

$$f_o = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{P}{D(t+d)}} \quad (1)$$

όπου:  $c$  η ταχύτητα του ήχου,  $P$  ο λόγος του ανοίγματος της οπής,  $t$  το πάχος του panel,  $d$  η διάμετρος των οπών,  $D$  το πάχος του στρώματος του αέρα ανάμεσα στο panel και στην επιφάνεια εφαρμογής.

Ο συντελεστής απορρόφησης ενός μικροδιάτρητου panel για κάθετη πρόσπτωση δίνεται από την παρακάτω εξίσωση [4]:

$$a = \frac{4r}{(1+r)^2 + (\omega m - \cot(\omega D / c))^2} \quad (2)$$

Η σχετική ακουστική αντίσταση  $r$  δίνεται από την σχέση:

$$r = \frac{32\eta t}{\sigma \rho_o c d^2} k_r, \quad k_r = \left[ 1 + \frac{k^2}{32} \right]^{1/2} + \frac{\sqrt{2}}{32} k \frac{d}{t} \quad (3)$$

Η εμπέδηση μάζας  $x_m = \omega m$  δίνεται από την σχέση:

$$\omega m = \frac{\omega t}{\sigma c} k_m, \quad k_m = \left[ 1 + \frac{k^2}{2} \right]^{-1/2} + 0.85 \frac{d}{t} \quad (4)$$

και η σταθερά διάτρησης  $k$

$$k = d \sqrt{\omega \rho_o / 4\eta} \quad (5)$$

όπου:  $d$  η διάμετρος των οπών,  $t$  το πάχος του panel,  $\omega$  γωνιακή συχνότητα,  $\eta$  ο συντελεστής ιξώδους.

Για τον σχεδιασμό ενός μικροδιάτρητου panel για μία συγκεκριμένη εφαρμογή είναι επίσης απαραίτητες οι παρακάτω εξισώσεις:

Η μέγιστη τιμή της απορρόφησης του μικροδιάτρητου panel η οποία δίνεται από την εξίσωση:

$$a_o = 4r / (1 + r)^2 \quad (6)$$

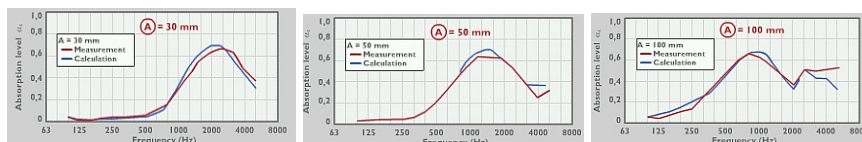
Το βάθος της κοιλότητας πίσω από το panel το οποίο δίνεται από την εξίσωση:

$$\frac{D}{\lambda} = \frac{1}{2\pi} \cot^{-1} \omega_o m \quad (7)$$

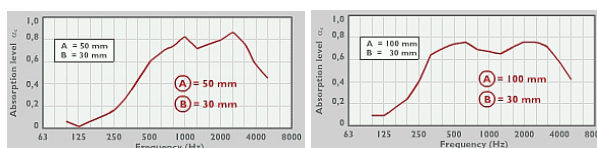
### 3) Εφαρμογή μικροδιάτρητης μεμβράνης για την βελτίωση του χρόνου αντήχησης

Το Microsorber® είναι μικροδιάτρητη πολυκαρβονική μεμβράνη πάχους 0.1mm, με διάμετρο οπών 0.2mm και με απόσταση μεταξύ οπών 2mm. Η απορρόφηση της μεμβράνης εξαρτάται από την απόσταση στην οποία τοποθετείται [5].

Στην παρακάτω Εικόνα 3.α φαίνεται η καμπύλη του συντελεστή απορρόφησης για μία μεμβράνη σε απόσταση 30mm, 50mm και 100 mm από την ανακλαστική επιφάνεια. Προκειμένου να έχουμε απορρόφηση σε μεγαλύτερο συχνοτικό εύρος μπορεί να χρησιμοποιηθούν δύο μεμβράνες. Στην Εικόνα 3.β. φαίνεται η καμπύλη του συντελεστή απορρόφησης για δύο μεμβράνες σε απόσταση 50 mm και 100 mm από την ανακλαστική επιφάνεια και 30mm απόσταση μεταξύ τους.



**Εικόνα 3.α** Απορρόφηση μίας μικροδιάτρητης πολυκαρβονικής μεμβράνης σε απόσταση 30, 50, 100mm από την ανακλαστική επιφάνεια



**Εικόνα 3.β** Απορρόφηση δύο μικροδιάτρητων πολυκαρβονικών μεμβράνων σε απόσταση 50, 100mm από την ανακλαστική επιφάνεια και απόσταση 30mm μεταξύ τους

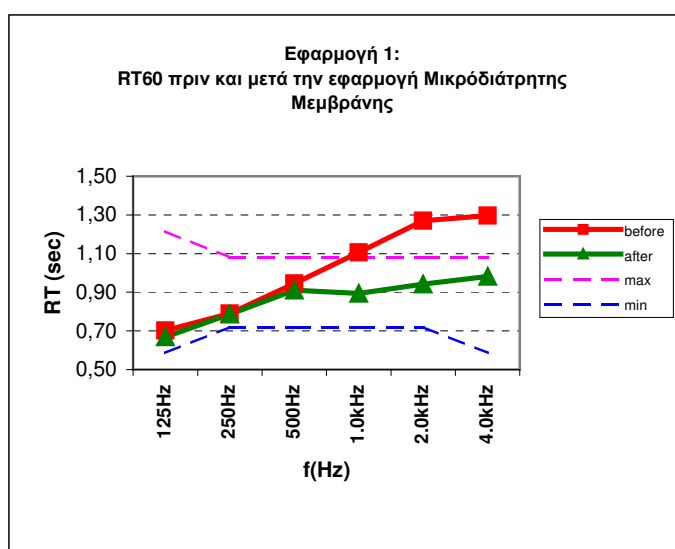
(Source: Kaufer Microsorber® datatsheet)

Οι μικροδιάτρητες μεμβράνες εφαρμόστηκαν σε δύο χώρους εστίασης. Το κοινό χαρακτηριστικό και στους δύο χώρους ήταν ότι υπήρχαν μεγάλες επιφάνειες από

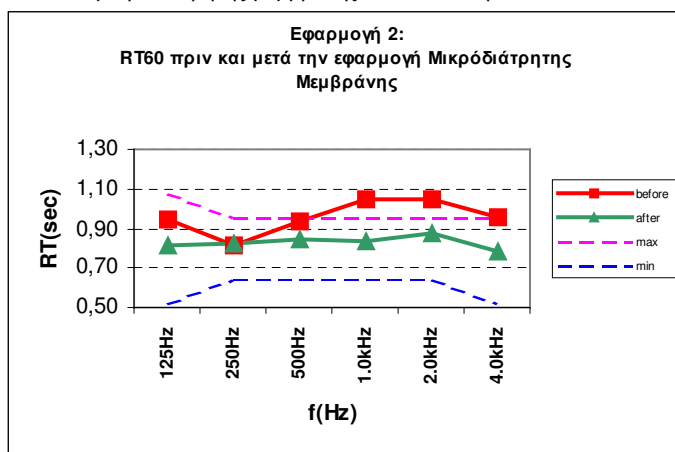
υαλοπετάσματα και δεν επιτρεπόταν να γίνει καμία παρέμβαση από πλευράς αρχιτεκτονικής αισθητικής στους χώρους αυτούς.

Ο μεγάλος χρόνος αντήχησης των χώρων αυτών είχε σαν συνέπεια: πρώτον να ενισχύεται ο θόρυβος από τις ομιλίες και την μουσική με αποτέλεσμα να επέρχεται κόπωση των πελατών και δεύτερον να μην μπορούν να συνομιλήσουν οι πελάτες καθώς υπήρχε μικρή καταληπτότητα του λόγου.

Στα παρακάτω Σχήματα 1 και 2 παρουσιάζονται οι μετρήσεις του χρόνου αντήχησης πριν και μετά την εφαρμογή μίας μικροδιάτρητης μεμβράνης στους δύο χώρους εστίασης.



**Σχήμα 1:** Σύγκριση του χρόνου αντήχησης πριν και μετά την εφαρμογή μικροδιατρητης μεμβράνης σε απόσταση 20-30 mm



**Σχήμα 2:** Σύγκριση του χρόνου αντήχησης πριν και μετά την εφαρμογή μικροδιατρητης μεμβράνης σε απόσταση 50 mm

#### Εφαρμογή 1

Η αίθουσα έχει όγκο  $V = 550 \text{ m}^3$

Η οροφή και δύο τοίχοι είναι από στοιχεία ξηράς δόμησης. Το πάτωμα είναι από μάρμαρο. Μία πλευρά αποτελείται από υαλοπέτασμα (10x5 m).

Όλες οι επιφάνειες είναι σκληρές ανακλαστικές. Εφαρμόστηκε μικροδιάτρητη μεμβράνη σε απόσταση 20-30mm εμπρός από το υαλοπέτασμα. Όπως ήταν αναμενόμενο σε αυτή την απόσταση επήλθε βελτίωση του χρόνου αντήχησης από τα 500 Hz-4kHz

#### Εφαρμογή 2

Η αίθουσα έχει όγκο  $V = 418 \text{ m}^3$ , σε σχήμα πέταλο.

Ο χώρος έχει μεγάλο ύψος και όλες οι επιφάνειες είναι σκληρές και ανακλαστικές.

Υπάρχουν στον χώρο περίπου 10 παράθυρα.

Εφαρμόστηκε μικροδιάτρητη μεμβράνη σε απόσταση 50 mm εμπρός από κάθε παράθυρο.

Όπως ήταν αναμενόμενο σε αυτή την απόσταση επήλθε βελτίωση του χρόνου αντήχησης από τα 250 Hz-4kHz

#### 4. Συμπεράσματα

Οι μικροδιάτρητες μεμβράνες με διάμετρο διάτρησης μικρότερη από 1 mm, όταν τοποθετηθούν σε απόσταση από την ανακλαστική επιφάνεια μπορούν να προσθέσουν απορρόφηση μέσα σε μία αίθουσα ώστε να επιτευχθεί βελτίωση του χρόνου αντήχησης χωρίς να καταργείται η διαφάνεια της κατασκευής.

Η διάμετρος των οπών, η απόσταση μεταξύ των οπών, το πάχος της μεμβράνης και το πάχος του στρώματος του αέρα ανάμεσα στην μεμβράνη και στην επιφάνεια εφαρμογής είναι οι παράμετροι που καθορίζουν την απορρόφηση. Σε ειδικές εφαρμογές μπορούν να σχεδιαστούν μικροδιάτρητες μεμβράνες σύμφωνα με τις συγκεκριμένες απαιτήσεις του χώρου. Συνήθως τα βιομηχανικά προϊόντα έχουν προκαθορισμένες τις τρεις πρώτες παραμέτρους έτσι ώστε μόνο η απόσταση και ο αριθμούς των μεμβρανών να είναι οι παράμετροι που μπορούν να μεταβληθούν.

Χρήση των μικροδιάτρητων μεμβρανών σε χώρους όπου υπάρχουν αρκετοί υαλοπίνακες μπορούν να επιφέρουν καλή ακουστική του χώρου χωρίς να αλλοιώνεται τελείως η αισθητική αυτού.

#### 5. Ευχαριστίες

Ευχαριστούμε την εταιρία Kaefer για την άδεια προβολής του Microsorber®, καθώς και τα εστιατόρια Restaurant 48 και ΠΙΛΠΟΥΛ.

#### Αναφορές

- [1] D.-Y Maa, “Theory and design of microperforated-panel sound –absorbing construction”, Scientia. Sinica. Vol XVIII, 55-71 (1975)
- [2] Fuchs H.V., Zha X. „Schallabsorber aus Acryglas im Plenarsaal des Bundestages
- [3] Morse P. M. & Ingard K. U., “Theoretical Acoustics” Pricenton (1968)
- [4] Maa D. Y. “Potential of microperforated panel absorber”. Journal of Acoustical Society of America, 104, 5, 2861–2866 (1998)
- [5] Kaefer Microsorber® datasheet