



## افزایش پهنای باند بسامدی جاذب‌های صوتی چندلایه تخت متشکل از ماده متخلخل، صفحه سوراخ‌دار و فاصله‌های هوایی

محسن بروغنی<sup>۱</sup>، صابر صفار<sup>۲</sup>، صدیقه بصیرجعفری<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>مهندسی صدا، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صدا و سیما، تهران، ایران  
<sup>۲</sup>مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صداوسیما، تهران، ایران  
<sup>۳</sup>فیزیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صداوسیما، تهران، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۵ مهر ۱۳۹۵  
بازنگری: ۲۶ اردیبهشت ۱۳۹۶  
پذیرش: ۳۱ اردیبهشت ۱۳۹۶  
ارائه آنلاین: ۱۷ خرداد ۱۳۹۶

### کلمات کلیدی:

ضریب جذب صوتی  
جاذب مرکب  
روش ماتریس تبدیل  
شبیه‌سازی اجزا محدود  
صفحه سوراخ‌دار

**چکیده:** امروزه جاذب‌هایی که نوفه را در پهنای وسیعی از بسامدها جذب کنند و نیز کمترین فضا را در سازه به خود اختصاص دهند، بسیار مورد توجه است. در این مقاله با استفاده از ترکیب ماده متخلخل، صفحه سوراخ‌دار و فاصله‌های هوایی، چهار نمونه اولیه پیشنهاد شده و در ادامه به منظور افزایش میزان و پهنای باند جذب صوتی، مشخصه‌های نمونه‌ای که بیشترین جذب صوتی را داشته، استخراج شده است. برای بررسی عملکرد جذب صوتی ساختارهای ارائه شده از روش ماتریس تبدیل و روش اجزا محدود استفاده شده است. برای صحت‌گذاری مدل ریاضی و نتایج روش اجزا محدود، نتایج نظری و تجربی برای دو نمونه مختلف از جاذب مرکب مقایسه شده‌اند که تطابق مناسبی را نشان می‌دهند. نتایج نشان می‌دهند که میانگین ضریب جذب صوتی مدل بهبود یافته، با ضخامت نهایی ۵۱ میلی‌متر در گستره بسامدی ۶۰۰ Hz - ۱ Hz، ۰/۹ است که نسبت به ساختارهای ارائه شده در کارهای گذشته، بدون افزایش ضخامت کلی، ۵٪ بهبود در میزان جذب دارد. به عبارتی، با ضخامت کمتری به همان ضریب جذب متداول در ساختارهای موجود در صنعت می‌توان دست یافت و این امر از نظر مهندسی بسیار مهم است؛ چون فضای کمتری اشغال می‌شود و هزینه اجرا نیز کاهش می‌یابد.

### ۱- مقدمه

امروزه آلودگی صوتی به‌ویژه در کلان شهرها، به مسأله‌ای جدی تبدیل شده است. از این رو جاذب‌هایی که نوفه صوتی را در پهنای وسیعی از بسامدها به‌خصوص بسامدهای پایین جذب کنند و نیز کمترین فضا را در سازه به خود اختصاص دهند بسیار مورد نیاز است. برای این منظور، تطبیق امپدانس آکوستیکی جاذب صوت با هوا بسیار حائز اهمیت است؛ چرا که در این صورت بهترین انتقال انرژی بین ماده و محیط اطراف صورت می‌گیرد. این امر در طراحی مبدل‌های آکوستیکی هم اهمیت دارد [۱، ۲]. در خصوص افزایش تطبیق امپدانس آکوستیکی مواد با هوا تحقیقات بسیاری انجام شده است. برخی از محققان به پدید آوردن مواد جدید جاذب صوت با استفاده از فناوری‌های جدیدی همچون نانوفناوری روی آورده‌اند [۳-۵] و برخی دیگر سعی می‌کنند با انتخاب لایه‌های جاذب صوت موجود یا بهبود مشخصه‌های آنها با استفاده از روش‌هایی نظیر الگوریتم ژنتیک و چیدمان مناسب آنها ساختاری مناسب برای جذب صوت ارائه دهند [۶]. جاذب‌های صفحه‌ای سوراخ‌دار<sup>۱</sup> به دلیل تناسب با محیط و استحکام بالا به‌طور گسترده برای

کنترل نوفه به کار می‌روند و اولین بار توسط ما<sup>۲</sup> ارائه شدند [۷-۹]. از معایب این نوع جاذب‌ها، پهنای باریک گستره بسامدی جذب است. به منظور افزایش پهنای بسامدی جذب صوت جاذب‌های مذکور، پیشنهادهایی ارائه شده است از جمله استفاده از چندلایه صفحه سوراخ‌دار به صورت متوالی [۱۰] و استفاده از جاذب متخلخل<sup>۳</sup> در پشت صفحه سوراخ‌دار [۱۱-۱۳]. همچنین برای افزایش جذب بسامدهای پایین، از رشد نانولوله‌های کربنی<sup>۴</sup> بر صفحات سوراخ‌دار [۱۴]، قرار دادن صفحه‌ای مرتعش در پشت صفحه سوراخ‌دار [۱۵] و قرار دادن تشدیدگر هلمهولتز<sup>۵</sup> در پشت صفحه سوراخ‌دار استفاده شده است [۱۶]. رویز به بهینه‌سازی ساختارهای دو و سه لایه از صفحات سوراخ‌دار با استفاده از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید<sup>۶</sup> پرداخته و مشخصات ساختارهای بهینه را با استفاده از این الگوریتم استخراج نمود و نشان داد که با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی می‌توان مشخصات ساختار را به گونه‌ای تعیین نمود که جذب صوتی مناسبی داشته باشد [۱۷]. پوسته‌های سوراخ‌دار به دلیل وزن سبک‌تر و قیمت کمتر نسبت به صفحات سوراخ‌دار، به عنوان ایده‌ای

- 2 Maa
- 3 Porous absorber
- 4 Carbon nanotube
- 5 Helmholtz resonator
- 6 Simulated annealing

1 Micro-perforated panel (MPP)

نویسنده عهده‌دار مکاتبات: basirjafari@iribu.ac.ir

تشکیل شده است. در ادامه، مشخصه‌های ساختاری که بهترین عملکرد جذب صوتی را داشته، بهبود یافته است. برای بررسی میزان جذب صوتی ساختارها، از دو روش ماتریس تبدیل<sup>۲</sup> و شبیه‌سازی اجزای محدود<sup>۳</sup> به کمک نرم‌افزار کامسول مولتی فیزیک<sup>۴</sup> استفاده شده است.

قالب‌بندی مقاله پیش‌رو بدین‌گونه است که در بخش ۲، ماتریس تبدیل ماده متخلخل، صفحه سوراخ‌دار و فاصله هوایی محاسبه شده است. در بخش ۳، صحت مدل ریاضی پیشنهادی و نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود در مقایسه با نتایج تجربی موجود ارزیابی شده است. همچنین در این بخش، میزان ضریب جذب ساختارهای ارائه شده با استفاده از روش تحلیلی و روش عددی (شبیه‌سازی اجزای محدود) محاسبه شده است و در ادامه این بخش، مشخصه‌های ساختاری که بهترین عملکرد جذب صوتی را داشته، بهبود یافته است. در نهایت، در بخش ۴ نتیجه‌گیری کلی از این تحقیق آورده شده است.

## ۲- مدل ریاضی

در این مقاله، عملکرد آکوستیکی ساختارهای چندلایه تخت متشکل از صفحه سوراخ‌دار، ماده متخلخل موجود در ایران و فاصله هوایی بررسی شده است. بدین منظور از دو روش حل تحلیلی و عددی (شبیه‌سازی اجزای محدود) استفاده شده است. ابتدا ماتریس تبدیل صفحه سوراخ‌دار، ماده متخلخل و فاصله هوایی محاسبه شده و با استفاده از آن ضریب جذب صوتی ساختارهای مورد نظر محاسبه شده است. تغییر مشخصات هر لایه از جمله ضخامت صفحه، قطر حفره‌ها و درصد سوراخ‌شدگی صفحه، جنس و ضخامت ماده متخلخل بر روی عملکرد جذب صوتی ساختار مؤثر است. از این‌رو اثر تغییر مشخصات هر لایه بر روی میزان و پهنای باند جذب صوتی بررسی شده و مشخصه‌های بهینه استخراج شده است. با استفاده از این مشخصات بهینه، ساختار بهبودیافته با بیشترین میانگین ضریب جذب صوتی ارائه شده است.

### ۲-۱- ساختارهای مورد بررسی

در شکل ۱ چهار نوع ساختار چهارلایه با استفاده از ترکیب صفحه سوراخ‌دار، ماده متخلخل و فاصله هوایی پیشنهاد شده است تا میزان جذب صوتی آن‌ها مقایسه شود. مواد متخلخل در برابر ضربه، استحکام کافی ندارند و همچنین ذرات ریزی که از آن‌ها جدا می‌شوند، وارد هوا و سامانه تهویه می‌شوند و به سلامت انسان آسیب می‌رسانند؛ از این‌رو برای پوشش ماده متخلخل در تمام ساختارهای ارائه شده، صفحه سوراخ‌دار به عنوان لایه اول انتخاب شده است. ترتیب قرار گرفتن لایه‌ها در ساختارهای ارائه شده به شرح زیر است:

- ساختار (a): صفحه سوراخ‌دار، فاصله هوایی، صفحه سوراخ‌دار،

مناسب برای جایگزین کردن آنها با صفحات سوراخ‌دار مطرح شده است و استفاده از ترکیب پوسته سوراخ‌دار و صفحات سوراخ‌دار برای بهبود عملکرد آکوستیکی آنها ارائه شده است [۱۸]. جاذب‌های متخلخل عمدتاً از مواد فومی و فیبری ساخته می‌شوند. در این نوع جاذب‌ها موج صدا در داخل شبکه‌ای از حفره‌های بهم پیوسته انتشار می‌یابد و به دلیل ابعاد بسیار کوچک این حفره‌ها و اندرکنش موج با دیواره‌های آنها، اتلاف چسبندگی و حرارتی رخ می‌دهد که باعث تبدیل انرژی موج صدا به گرما می‌شود. جاذب‌های متخلخل عمدتاً برای جذب گستره بسامدهای بالا مورد استفاده قرار می‌گیرند و برای جذب بسامد پایین باید ضخامت جاذب متخلخل را افزایش داد. برای محاسبه ضریب جذب صوتی ماده متخلخل، ابتدا لازم است امیدانس مشخصه و ثابت انتشار ماده متخلخل محاسبه شود. تحقیقات زیادی برای مدل‌سازی و محاسبه دو کمیت مذکور برای ماده متخلخل انجام شده است که از میان آن‌ها به مدل دلنی بیزلی [۱۹]، مدل میکی [۲۰]، مدل ورونینا [۲۱]، مدل کوماتسو [۲۲]، مدل کوانلی [۲۳]، مدل آلارد [۲۴] می‌توان اشاره نمود. جونز و همکاران به ساده‌سازی مدل دلنی بیزلی پرداختند تا بدون نیاز به دانستن مقدار مقاومت در برابر جریان ماده متخلخل بتوان منحنی جذب صوتی آن را به‌دست آورد [۲۵]. اخیراً در تحقیقی، روش‌های مذکور مقایسه شده‌اند و نتیجه شده است که مدل آلارد نسبت به سایر مدل‌ها دقیق‌تر است و مدل ساده شده آلارد ارائه شده است [۲۶]. بهینه‌سازی جذب صوتی این نوع جاذب‌ها به ازای ضخامتی معین، مسأله مهمی در صنعت آکوستیک است. شوتیان‌لی و همکاران به بهینه‌سازی یک لایه جاذب متخلخل فیبری با ضخامتی مشخص پرداختند. آن‌ها مشخصات میکروسکوپی جاذب فیبری را به‌گونه‌ای تعیین کردند که بیشترین میانگین ضریب جذب صوتی برای گستره‌های بسامدی مختلف به‌دست آید [۲۷]. زین‌العابدین و همکاران به منظور بهینه‌سازی جذب صوتی ماده متخلخل، جاذبی تک‌لایه با استفاده از ترکیب پشم شیشه و اسفنج طراحی نمودند [۲۸]. بروغنی و همکاران به بهینه‌سازی جاذب متخلخل سه لایه با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی پرداختند و ساختاری چندلایه از مواد متخلخل برای استفاده در دیواره‌های اتاق صامت با بسامد قطع ۸۰ هرتز طراحی نمودند [۶]. داورن و همکاران تأثیر اضافه نمودن جاذب متخلخل در پشت صفحه سوراخ‌دار را بررسی کردند و با ساختن نمونه‌های مختلف و استفاده از لوله امیدانسی ضریب جذب صوتی آن‌ها محاسبه کردند [۲۹]. وانگ با ارائه ساختاری چهارلایه (به ترتیب متشکل از صفحه شیاردار، ماده متخلخل، پوسته سوراخ‌دار و فاصله هوایی<sup>۱</sup>) و سپس بهبود مشخصه هر لایه توانست به ساختاری با ضخامت کلی ۵۱ میلی‌متر و میانگین ضریب جذب صوتی ۰/۷۷ در گستره بسامدی ۱ تا ۲۰۰۰ هرتز برسد [۳۰].

در این مقاله با استفاده از ترکیب ماده متخلخل (منتخب از پشم سنگ‌های موجود در ایران)، صفحه سوراخ‌دار و فاصله هوایی، چهار نمونه اولیه قابل استفاده در صنعت، پیشنهاد شده است که هر ساختار از چهار لایه

2 Transfer matrix methods  
3 Finite element simulation  
4 COMSOL MultiPhysics

1 Air gap

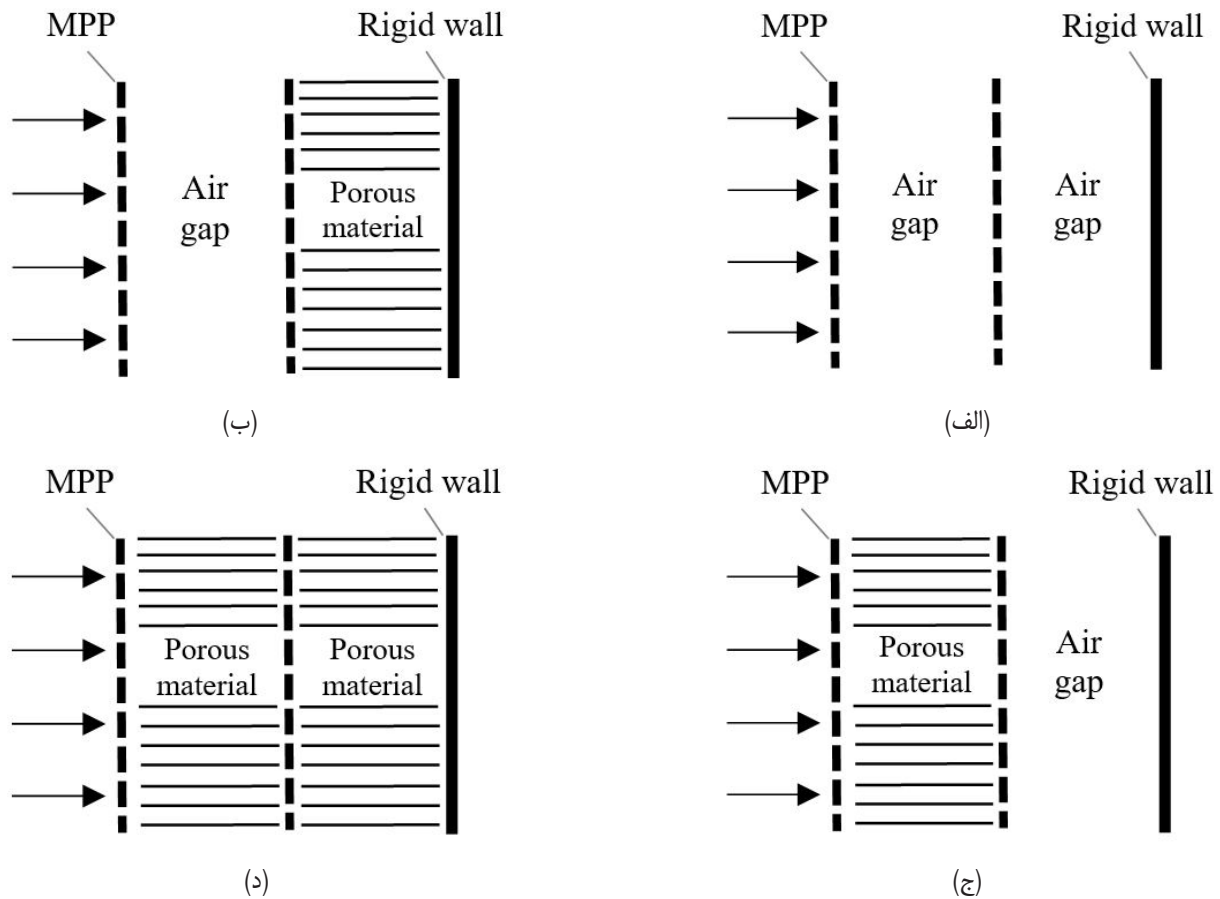


Fig. 1. Provided structure for comparison of their sound absorption coefficient

شکل ۱: ساختارهای ارائه شده برای مقایسه میزان جذب صوتی آنها.

جدول ۱: مشخصات پشم سنگ‌های مورد استفاده.

Table 1. Properties of used rock wools

مقاومت در برابر جریان هوا Pa.s/m <sup>2</sup>	چگالی kg/m <sup>3</sup>	ماده متخلخل
۹۰۴۱	۳۰	پشم سنگ نوع ۱
۴۰۵۴۹	۸۰	پشم سنگ نوع ۲
۵۷۰۴۹	۱۰۰	پشم سنگ نوع ۳
۷۵۴۰۴	۱۲۰	پشم سنگ نوع ۴
۱۰۶۰۹۰	۱۵۰	پشم سنگ نوع ۵

$$K = \frac{2\pi f}{c} \left[ 0.29 \left( \frac{\rho f}{\sigma} \right)^{-0.526} + j \left( 1 + 0.098 \left( \frac{\rho f}{\sigma} \right)^{-0.685} \right) \right] \quad (2)$$

که در روابط بالا،  $\rho$  و  $c$  به ترتیب چگالی هوا و سرعت صوت در هوا است.  $f$  بسامد و  $\sigma$  نشان‌دهنده مقاومت در برابر جریان هوای ماده متخلخل است. پس از محاسبه امپدانس مشخصه و ثابت انتشار، با شرط پیوستگی فشار و سرعت ذره‌ای در وجه مشترک بین لایه‌ها، ماتریس تبدیل ماده متخلخل [P] به دست می‌آید [۱۱]:

- فاصله هوایی.
- ساختار (b): صفحه سوراخ‌دار، فاصله هوایی، صفحه سوراخ‌دار، ماده متخلخل.
- ساختار (c): صفحه سوراخ‌دار، ماده متخلخل، صفحه سوراخ‌دار، فاصله هوایی.
- ساختار (d): صفحه سوراخ‌دار، ماده متخلخل، صفحه سوراخ‌دار، ماده متخلخل.

## ۲-۲- محاسبه ماتریس تبدیل ماده متخلخل

به منظور کاربردی بودن ساختارهای ارائه شده، از پشم سنگ‌های موجود در ایران به عنوان ماده متخلخل استفاده شده است که مشخصات آنها در جدول ۱ آورده شده است.

همانطور که در مقدمه گفته شد در این مقاله، از مدل ساده شده آلود که نسبت به سایر مدل‌ها دقیق‌تر است برای محاسبه امپدانس مشخصه و ثابت انتشار ماده متخلخل استفاده شده است که به ترتیب عبارت‌اند از [۲۶]:

$$Z_c = \rho c \left[ 1 + 0.0729 \left( \frac{\rho f}{\sigma} \right)^{0.6622} + j 0.187 \left( \frac{\rho f}{\sigma} \right)^{-0.538} \right] \quad (1)$$

در این رابطه،  $\rho c$  امپدانس مشخصه هوا و  $k$  ثابت انتشار موج در هوا است.

$$[P] = \begin{bmatrix} \cos(KL) & jZ_c \sin(KL) \\ \frac{j}{Z_c} \sin(KL) & \cos(KL) \end{bmatrix} \quad (3)$$

که در آن،  $L$  ضخامت ماده متخلخل و  $-1 = j^2$  است.

### ۲-۵- محاسبه ضریب جذب صوتی ساختارهای چندلایه با استفاده از روش ماتریس تبدیل

در یک ساختار چندلایه، ماتریس تبدیل کل ساختار  $[T]$  از ضرب ماتریس تبدیل تک تک لایه‌ها در یکدیگر به دست می‌آید. اگر  $P_i$  و  $V_i$  به ترتیب، فشار صدا و سرعت ذره‌ای بر روی سطح اولین لایه،  $P_e$  و  $V_e$  فشار و سرعت ذره‌ای بر روی سطح دیوار سخت باشند، رابطه زیر را بین کمیت‌های مذکور می‌توان به دست آورد [۱۵]:

$$\begin{bmatrix} P_i \\ V_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_e \\ V_e \end{bmatrix} \quad (10)$$

با توجه به اینکه سرعت ذره‌ای<sup>۴</sup> بر روی سطح دیوار سخت برابر صفر است ( $V_e = 0$ ):

$$\begin{bmatrix} P_i \\ V_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_e \\ 0 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{cases} P_i = T_{11} P_e \\ V_i = T_{21} P_e \end{cases} \quad (11)$$

با توجه به رابطه (۱۱) امپدانس آکوستیکی ویژه ورودی، طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۵]:

$$Z_{in} = \frac{P_i}{V_i} = \frac{T_{11}}{T_{21}} \quad (12)$$

و با استفاده از آن، ضریب جذب<sup>۵</sup> بر خورد عمود را طبق رابطه زیر می‌توان به دست آورد [۱۵]:

$$\alpha = \frac{4 \operatorname{Re} \left( \frac{Z_{in}}{\rho c} \right)}{\left[ 1 + \operatorname{Re} \left( \frac{Z_{in}}{\rho c} \right) \right]^2 + \left[ \operatorname{Im} \left( \frac{Z_{in}}{\rho c} \right) \right]^2} \quad (13)$$

که در آن،  $Re$  به معنی قسمت حقیقی و  $Im$  به معنی قسمت موهومی است.

### ۲-۶- روش اجزا محدود

در این مقاله برای بررسی عملکرد جذب آکوستیکی جاذب متخلخل چندلایه، علاوه بر روش تحلیلی ماتریس تبدیل، از روش عددی اجزا محدود نیز به کمک نرم‌افزار کامسول مولتی فیزیک استفاده شده است. در این نرم‌افزار از واسط کاربری فشار آکوستیکی در حوزه بسامد استفاده شده است که موج صوتی را در حوزه بسامد مدل می‌کند و با حل معادله هلمهولتز در حوزه بسامد، رفتار آکوستیکی ساختار را مشخص می‌نماید. نحوه مش‌زنی

### ۲-۳- محاسبه ماتریس تبدیل صفحه سوراخ‌دار

برای بررسی عملکرد آکوستیکی صفحه سوراخ‌دار از ماتریس تبدیل آن  $[M]$  طبق رابطه (۴) استفاده می‌شود [۱۵]:

$$[M] = \begin{bmatrix} 1 & Z_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

که در آن،  $Z_s$  امپدانس آکوستیکی ویژه<sup>۱</sup> صفحه سوراخ‌دار است و طبق رابطه زیر به دست می‌آید [۱۵]:

$$Z_s = \rho c (r + jwm) \quad (5)$$

که  $\rho c$  امپدانس آکوستیکی ویژه<sup>۲</sup> هوا،  $w$  بسامد زاویه‌ای،  $r$  مقاومت آکوستیکی ویژه<sup>۳</sup> و  $m$  راکتانس آکوستیکی ویژه<sup>۳</sup> است و طبق روابط زیر محاسبه می‌شوند [۱۵]:

$$r = \frac{0.147t}{pd^2} k_r, \quad k_r = \sqrt{\left(1 + \frac{x^2}{32}\right)} + \frac{\sqrt{2}}{8} \frac{xd}{t} \quad (6)$$

$$m = \frac{0.294 \times 10^{-3} t}{p} k_m \quad (7)$$

$$k_m = 1 + \frac{1}{\sqrt{\left(9 + \frac{x^2}{32}\right)}} + 0.85 \frac{d}{t} \quad (8)$$

در روابط بالا  $t$  ضخامت صفحه برحسب میلی‌متر،  $d$  قطر سوراخ‌ها برحسب میلی‌متر،  $p$  درصد سوراخ‌شدگی و  $x$  ثابت صفحه سوراخ‌دار است که طبق رابطه  $x = d\sqrt{f/10}$  به دست می‌آید که در آن،  $f$  بسامد موج صوتی است.

### ۲-۴- محاسبه ماتریس تبدیل حجم هوایی

با شرط پیوستگی فشار و سرعت ذره‌ای در وجه مشترک بین لایه‌ها، ماتریس تبدیل حجم هوایی  $[S]$  به ضخامت  $D$  طبق رابطه (۹) محاسبه می‌شود [۱۱].

$$[S] = \begin{bmatrix} \cos(kD) & j\rho c \sin(kD) \\ \frac{j}{\rho c} \sin(kD) & \cos(kD) \end{bmatrix} \quad (9)$$

- 
- 1 Specific acoustic impedance
  - 2 Specific acoustic resistance
  - 3 Specific acoustic reactance

- 
- 4 Particle velocity
  - 5 Absorption coefficient

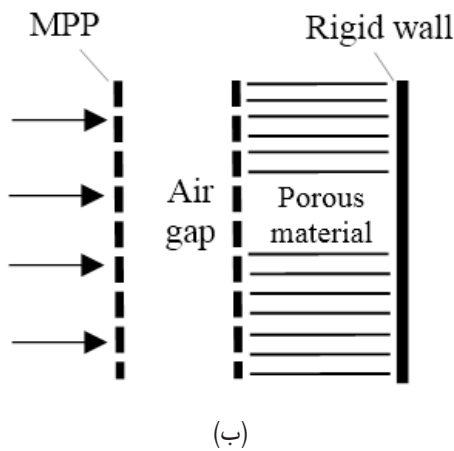
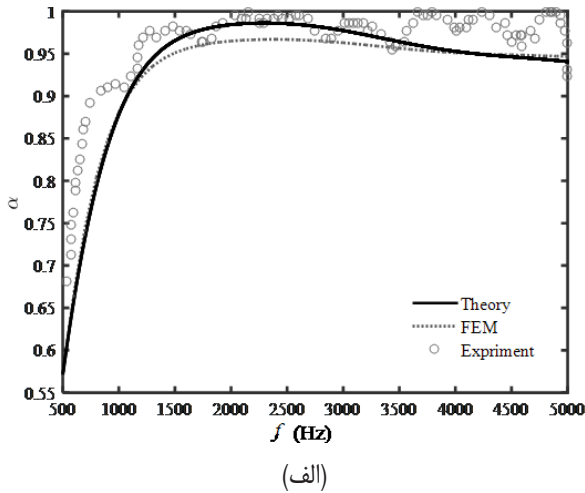


Fig. 3. (a) Comparison of theoretical and numerical results with experimental results [17] for (b) composite absorber (first layer: MPP absorber with  $t = 0.5 \text{ mm}$ ,  $d = 0.23 \text{ mm}$ ,  $p = 20 \%$ ; second layer: air gap with  $D = 2 \text{ cm}$  thickness; third layer: MPP absorber with similar characteristics to the first layer; fourth layer: porous absorber with  $\sigma = 28000 \text{ Pa.s/m}^2$ ,  $L = 4 \text{ cm}$ ).

شکل ۳: (الف) مقایسه نتایج روش‌های تحلیلی و عددی با نتایج تجربی [۱۷] برای (ب) جاذب مرکب (لایه اول، صفحه سوراخ‌دار با مشخصات  $t = 0.5 \text{ mm}$ ,  $d = 0.23 \text{ mm}$ ,  $p = 20 \%$ ; لایه دوم، فاصله هوایی به ضخامت  $D = 2 \text{ cm}$ ; لایه سوم، صفحه سوراخ‌دار با مشخصات لایه اول؛ لایه چهارم، جاذب متخلخل با مشخصات  $\sigma = 28000 \text{ Pa.s/m}^2$  و  $L = 4 \text{ cm}$ ).

اول؛ و لایه چهارم، جاذب متخلخل با مشخصات  $\sigma = 9041 \text{ Pa.s/m}^2$  و  $L = 2/5 \text{ cm}$ .

ساختار (c): لایه اول، صفحه سوراخ‌دار با مشخصات  $t = 1 \text{ mm}$ ,  $d = 0/2 \text{ mm}$ ,  $p = 10 \%$ ; لایه دوم، جاذب متخلخل با مشخصات  $\sigma = 9041 \text{ Pa.s/m}^2$  و  $L = 2/5 \text{ cm}$ ; لایه سوم، صفحه سوراخ‌دار با مشخصات  $t = 1 \text{ mm}$ ,  $d = 0/2 \text{ mm}$ ,  $p = 10 \%$ ; لایه چهارم، فاصله هوایی به ضخامت  $D = 2/5 \text{ cm}$ .

ساختار (d): لایه اول، صفحه سوراخ‌دار با مشخصات  $t = 1 \text{ mm}$ ,  $d = 0/2 \text{ mm}$ ,  $p = 10 \%$ ; لایه دوم، جاذب متخلخل با مشخصات  $\sigma = 9041 \text{ Pa.s/m}^2$  و  $L = 2/5 \text{ cm}$ ; لایه سوم، صفحه سوراخ‌دار با مشخصات  $t = 1 \text{ mm}$ ,  $d = 0/2 \text{ mm}$ ,  $p = 10 \%$ ; لایه چهارم، جاذب متخلخل با مشخصات  $\sigma = 9041 \text{ Pa.s/m}^2$  و  $L = 2/5 \text{ cm}$ .

ساختار در شکل ۲ مشاهده می‌شود. مدل ارائه‌شده شامل ۲۳۹۹ جزء مش است. موج تابشی، موجی تخت با فشار ۱ Pa معادل با ۹۴ dB SPL برای تمامی بسامدها در نظر گرفت شده است.

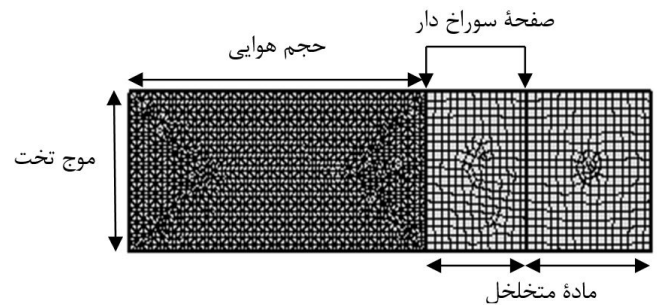


Fig. 2. Final mesh of the structure

شکل ۲: مش نهایی ساختار.

### ۳- نتایج و بحث

برای محاسبه ضریب جذب صوتی با استفاده از روش تحلیلی، روابط ارائه شده در بخش ۲ در نرم‌افزار متلب<sup>۱</sup> برنامه‌نویسی شده است و با توجه به سرعت و عملکرد مناسب این نرم‌افزار ضریب جذب صوتی برای تمامی بسامدها محاسبه شده و میزان میانگین ضریب جذب صوتی در بازه‌های بسامدی مورد نظر به دست آمده است.

#### ۳-۱- ارزیابی روش‌های تحلیلی و عددی

برای صحت‌گذاری<sup>۲</sup> مدل ریاضی ارائه شده و نتایج شبیه‌سازی اجزا محدود، در شکل‌های ۳ و ۴ میزان ضریب جذب صوتی برای دو نوع ساختار جاذب مرکب با استفاده از روش‌های تحلیلی و عددی به دست آمده و به ترتیب، با نتایج تجربی مرجع‌های [۱۷] و [۲۹] مقایسه شده است که تطابق مناسبی را نشان می‌دهند.

#### ۳-۲- مقایسه ضریب جذب صوتی ساختارهای ارائه شده

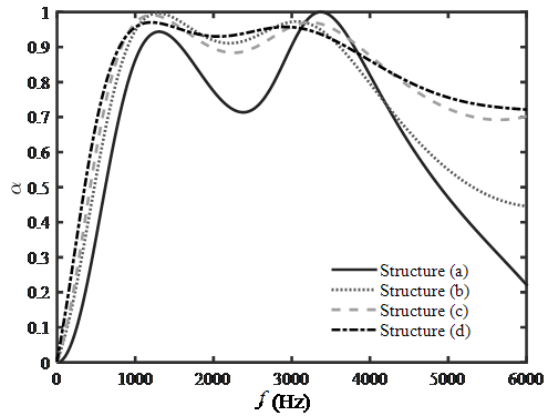
در این قسمت، میزان ضریب جذب صوتی ساختارهای ارائه شده در شکل ۱ محاسبه و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. مشخصات ساختارها در ادامه آورده شده است که در همه آن‌ها، ضخامت نهایی ساختار چهارلایه،  $H = 52 \text{ mm}$  است.

ساختار (a): لایه اول، صفحه سوراخ‌دار با مشخصات  $t = 1 \text{ mm}$ ,  $d = 0/2 \text{ mm}$ ,  $p = 10 \%$ ; لایه دوم، فاصله هوایی به ضخامت  $D = 2/5 \text{ cm}$ ; لایه سوم، صفحه سوراخ‌دار با مشخصات  $t = 1 \text{ mm}$ ,  $d = 0/2 \text{ mm}$ ,  $p = 10 \%$ ; لایه چهارم، فاصله هوایی به ضخامت  $D = 2/5 \text{ cm}$ .

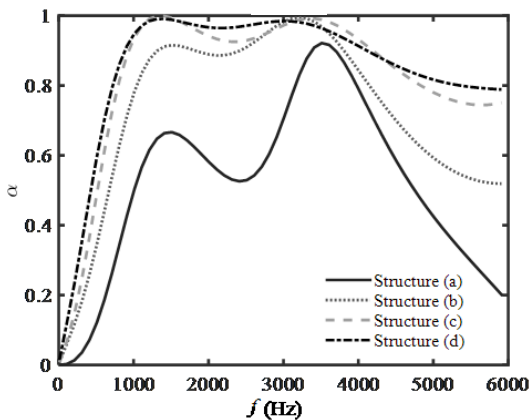
ساختار (b): لایه اول، صفحه سوراخ‌دار با مشخصات  $t = 1 \text{ mm}$ ,  $d = 0/2 \text{ mm}$ ,  $p = 10 \%$ ; لایه دوم، فاصله هوایی به ضخامت  $D = 2/5 \text{ cm}$ .

1 Matlab  
2 Verification

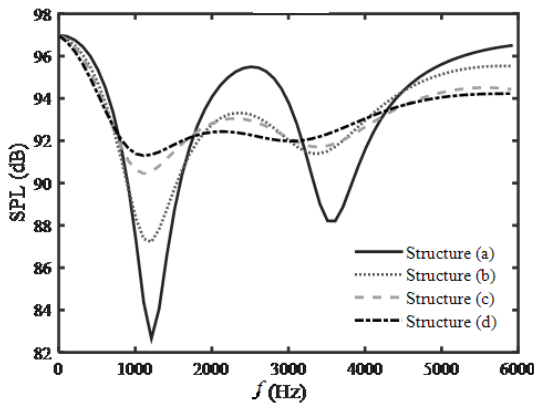




(الف)



(ب)

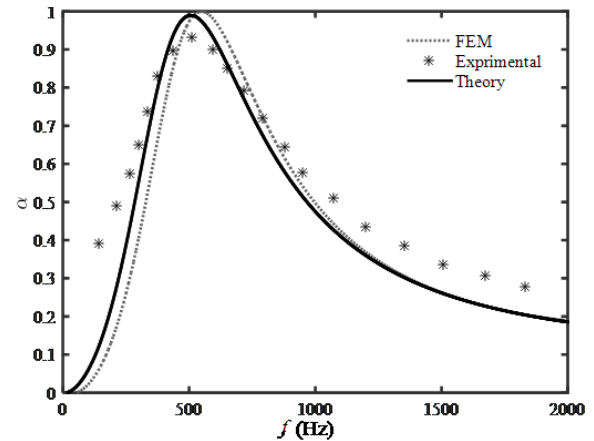


(ج)

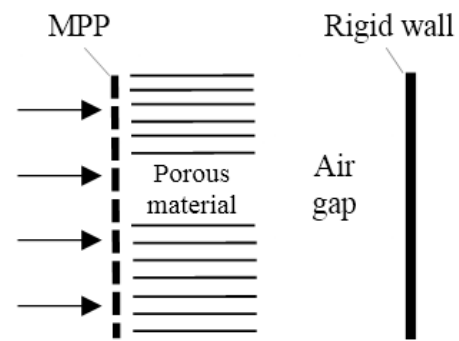
Fig. 5. Comparison of acoustic performance related to four proposed structures. (a) theoretical results of sound absorption coefficient; (b) finite element method (FEM) results of sound absorption coefficient; (c) finite element method (FEM) results of sound pressure level on the surface of the first layer.

شکل ۵: مقایسه عملکرد آکوستیکی ساختارهای ارائه شده، (الف) نتایج روش تحلیلی برای ضریب جذب صوتی، (ب) نتایج روش اجزا محدود برای ضریب جذب صوتی، (ج) تراز فشار صدا بر روی سطح لایه اول.

صدا با تغییرات بسامد تغییر می‌کند و برای ساختار (a)، میزان این تغییرات نسبت به سایر ساختارها بیشتر است. با مقایسه منحنی‌های ضریب جذب



(الف)



(ب)

Fig. 4. (a) Comparison of theoretical and numerical results with experimental results [29] for (b) composite absorber (first layer: MPP absorber with  $t = 6.3 \text{ mm}$ ,  $d = 0.75 \text{ mm}$ ,  $p = 4.7 \%$ ; second layer: porous absorber with  $\sigma = 16000 \text{ Pas/m}^2$ ,  $L = 2.5 \text{ cm}$ ; third layer: air gap with  $D = 2.5 \text{ cm}$  thickness).

شکل ۴: (الف) مقایسه نتایج روش‌های تحلیلی و عددی با نتایج تجربی [۲۹] برای (ب) جاذب مرکب (لایه اول، صفحه سوراخ‌دار با مشخصات  $t=6/3 \text{ mm}$ ,  $d=0/75 \text{ mm}$ ,  $p=4/7\%$ ؛ لایه دوم، جاذب متخلخل با مشخصات  $\sigma=16000 \text{ Pa.s/m}^2$  و  $L=2/5 \text{ cm}$ ؛ لایه سوم، فاصله هوایی به ضخامت  $D=2/5 \text{ cm}$ ).

در شکل ۵ نمودار ضریب جذب صوتی و تراز فشار صدا بر روی سطح اولین لایه، برای هر چهار ساختار مذکور به ازای گستره بسامدی ۶۰۰۰ Hz - ۱ Hz آورده شده است.

در قسمت‌های (الف) و (ب) از شکل ۵، ضریب جذب صوتی برحسب بسامد برای هر چهار ساختار به ترتیب با حل تحلیلی و روش عددی محاسبه و در مقایسه با یکدیگر نشان داده شده‌اند. همانطور که ملاحظه می‌شود استفاده از جاذب متخلخل در پشت صفحه سوراخ‌دار سبب بهبود عملکرد جذب صوت می‌شود. همچنین بدون افزایش ضخامت کل، ساختار (d) بیشترین میانگین ضریب جذب و عملکرد بهتر در جذب صوتی گستره بسامد پایین را دارد. در صورت استفاده از یک لایه جاذب متخلخل، ساختار (c) نسبت به ساختار (b) عملکرد بهتری را نشان داده است.

با توجه به قسمت (ج) از شکل ۵ که نشاندهنده منحنی تراز فشار صدا بر روی سطح لایه اول در هر چهار ساختار است، مشاهده می‌شود که تراز فشار

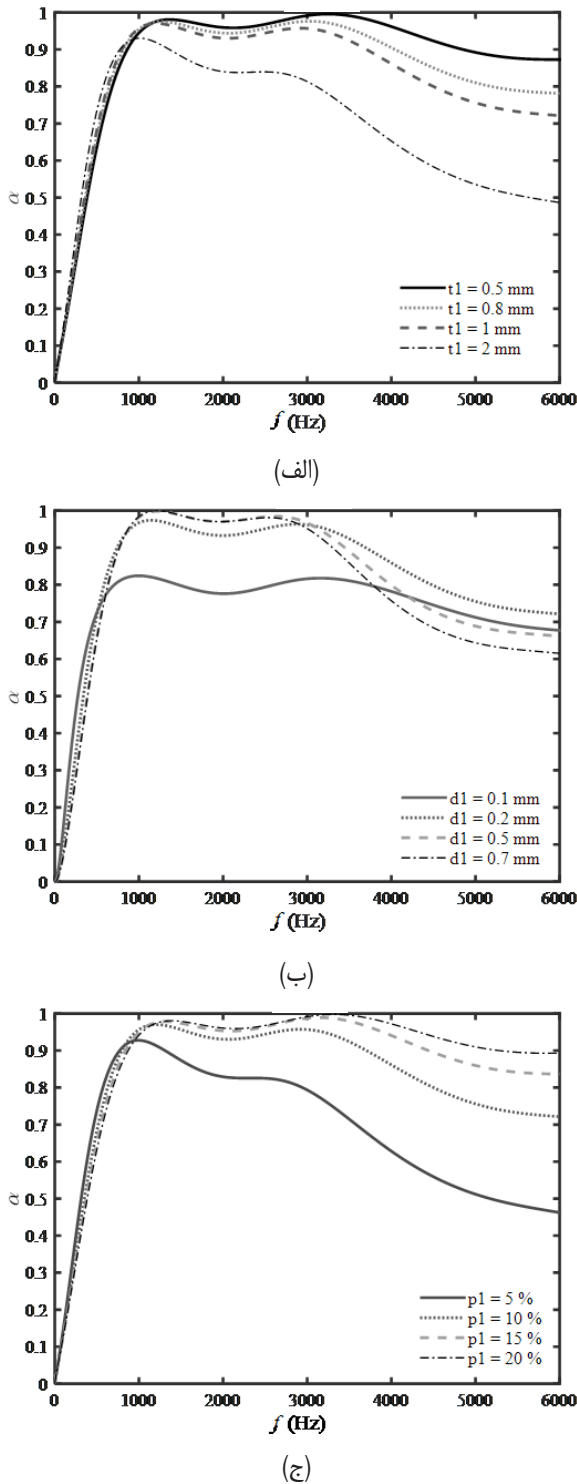


Fig. 6. The effect of parameters such as (a) thickness, (b) hole diameter and (c) perforation rate related to the first layer of structure (d) on sound absorption coefficient.

شکل ۶: تأثیر مشخصه‌هایی همچون (الف): ضخامت، (ب): قطر سوراخ، (ج): درصد سوراخ‌شدگی، از لایه اول ساختار (d) بر ضریب جذب صوتی آن.

ضریب جذب صوتی آورده شده است. با توجه به قسمت (الف) از شکل ۶ ملاحظه می‌شود که با افزایش ضخامت صفحه سوراخ‌دار، جذب صوتی ساختار کاهش می‌یابد.

صوتی و تراز فشار صدا مشاهده می‌شود که گستره بسامدی که کمترین نوسان را در منحنی تراز فشار صوتی دارد و بازه بسامدی که بیشترین میزان ضریب جذب صوتی را دارد با یکدیگر متناظر هستند؛ بنابراین ساختار با جذب مناسب سبب کاهش میزان نوسانات منحنی تراز فشار صوتی می‌شود. برای ساختارهای (c) و (d) به خصوص برای گستره بسامدی ۴۰۰۰ Hz - ۱۰۰۰ Hz میزان تغییرات تراز فشار صدا کمترین مقدار است؛ بنابراین ساختارهای (c) و (d) نسبت به دو ساختار دیگر دارای عملکرد بهتری هستند.

میانگین ضریب جذب صوتی ساختارهای ارائه شده، در جدول ۲ آورده شده است. به منظور مقایسه عملکرد جذب صوتی ساختارهای ارائه شده با ساختارهای ارائه شده در مقالات دیگر، میانگین ضریب جذب ساختار بهبودیافته وانگ [۳۰] نیز در این جدول آورده شده است. ساختار وانگ مشابه ساختار (c) در این مقاله است؛ با این تفاوت که در ساختار وانگ، لایه سوم یک پوسته نازک سوراخ‌دار است و ضخامت نهایی ساختار  $H=51$  mm است. از جدول ۲ مشاهده می‌شود که میانگین ضریب جذب صوتی ساختار (d) حتی قبل از بهبود از ساختار بهبودیافته وانگ بیشتر است که این نشان‌دهنده عملکرد مناسب این ساختار در جذب صوت است.

جدول ۲: مقایسه ضریب جذب صوتی ساختارهای پیشنهاد شده در شکل ۱.

Table 2. Comparison of sound absorption coefficient related to proposed structures in Fig 1.

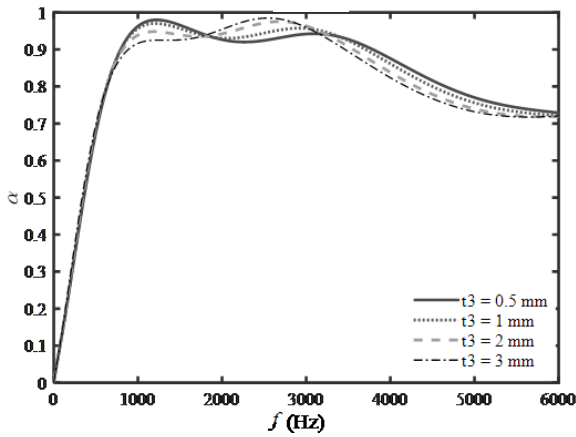
میانگین ضریب جذب در گستره بسامدی ۱ Hz - ۲۰۰۰ Hz	میانگین ضریب جذب در گستره بسامدی ۱ Hz - ۶۰۰۰ Hz	ساختار
۰/۶۳	۰/۶۶	ساختار (a)
۰/۷۳	۰/۷۴	ساختار (b)
۰/۷۵	۰/۸	ساختار (c)
۰/۷۷	۰/۸۲	ساختار (d)
۰/۷۷	۰/۸۵	ساختار بهبودیافته وانگ [۳۰]

### ۳-۳- بهبود عملکرد جذب صوتی

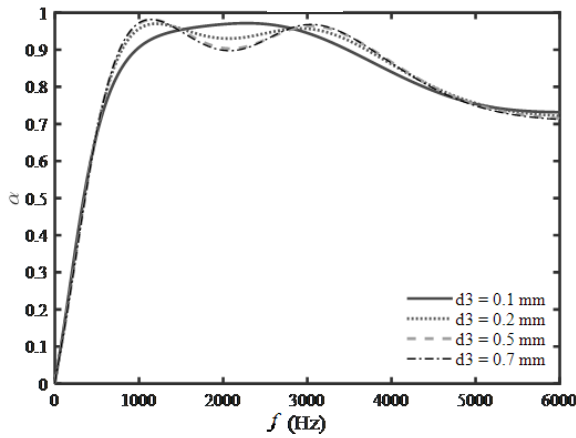
به منظور بررسی اثر تغییر مشخصه‌های هر لایه بر میزان ضریب جذب صوتی، ساختار (d) که بهترین عملکرد جذب صوتی را به‌ویژه برای بسامدهای پایین داشته، انتخاب شده است. به منظور طراحی ساختار بهبودیافته، با تغییر مشخصات هر لایه، تأثیر آن تغییر بر میزان ضریب جذب صوتی بررسی شده و در نهایت برای هر لایه، مشخصه‌هایی که سبب جذب صوتی بهتری شده‌اند به عنوان ساختار بهبودیافته انتخاب شده است.

### ۳-۳-۱- صفحه سوراخ‌دار (لایه اول)

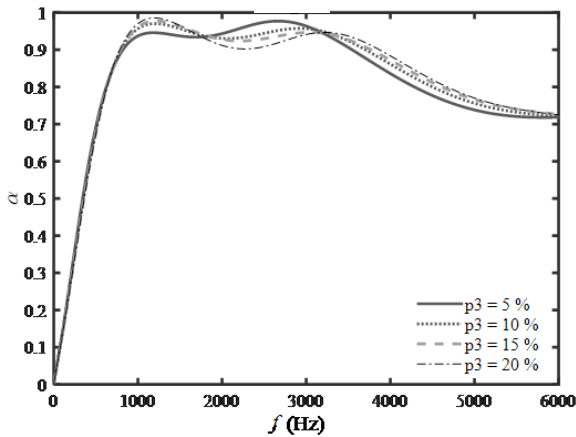
در شکل ۶ تأثیر تغییر مشخصه‌های لایه اول ساختار (d)، بر میزان



(الف)



(ب)



(ج)

Fig. 8. The effect of parameters such as (a) thickness, (b) hole diameter and (c) perforation rate related to the third layer of structure (d) on its sound absorption coefficient.

شکل ۸: تأثیر مشخصه‌هایی همچون (الف): ضخامت، (ب): قطر سوراخ، (ج): درصد سوراخ‌شدگی، از لایه‌ی سوم ساختار (d) بر ضریب جذب صوتی آن.

جذب صوتی دارد. با توجه به قسمت (الف) از شکل ۸ ملاحظه می‌شود که برای بسامدهای بالا با افزایش ضخامت، میزان ضریب جذب صوتی کاهش

در مورد تأثیر قطر سوراخ‌ها با توجه به قسمت (ب) از شکل ۶ می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش قطر سوراخ‌ها میزان جذب صوتی در گستره بسامدی ۳۰۰۰ Hz - ۱۰۰۰ Hz افزایش می‌یابد ولی پهنای باند جذب کاهش می‌یابد. همچنین طبق قسمت (ج) از شکل ۶ با افزایش درصد سوراخ‌شدگی، عملکرد جذب صوتی ساختار بهتر می‌شود. با توجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان چنین گفت که تغییر مشخصات لایه اول تأثیر متفاوتی بر روی جذب صوتی گستره بسامدی پایین و بالا دارد؛ بنابراین در طراحی باید با توجه به نیاز به جذب در گستره بسامدی پایین یا بالا، مشخصات لایه را تعیین نمود. با توجه به نتایج به‌دست آمده، به منظور افزایش پهنای بسامدی جذب صوتی، برای لایه اول  $t=0.5$  mm ,  $d=0.2$  mm ,  $p=20\%$  مشخصات بهبود یافته هستند.

### ۳-۳-۲- ماده متخلخل (لایه دوم)

در شکل ۷ تأثیر تغییر مشخصه‌های لایه دوم ساختار (d)، بر میزان ضریب جذب صوتی آورده شده است. با توجه به این که افزایش ضخامت کلی ساختار مدنظر نیست، برای لایه دوم تنها مشخصه مقاومت در برابر جریان ماده متخلخل مطابق جدول ۱ تغییر داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، پشم سنگ نوع ۱ و نوع ۲ که مقاومت در برابر جریان کمتری دارند به دلیل ایجاد تطبیق امپدانس بهتر با محیط اطراف، عملکرد بهتری در جذب صوت برای این ساختار دارند؛ بنابراین جاذب متخلخل با مقاومت در برابر جریان  $\sigma=9.41$  Pa.s/m<sup>2</sup> مشخصه بهبود یافته لایه دوم است.

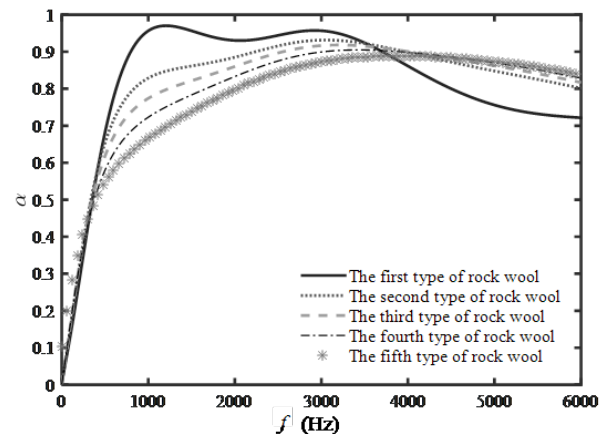


Fig. 7. The effect of porous material kind related to the second layer of structure (d) on its sound absorption coefficient.

شکل ۷: تأثیر جنس ماده متخلخل لایه دوم در ساختار (d) بر ضریب جذب صوتی آن.

### ۳-۳-۳- صفحه سوراخ‌دار (لایه سوم)

در شکل ۸ تأثیر تغییر مشخصه‌های لایه‌ی سوم ساختار (d) بر میزان ضریب جذب صوتی آورده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود تغییر مشخصه‌های لایه‌ی سوم نسبت به لایه اول، تأثیر کمتری در میزان ضریب



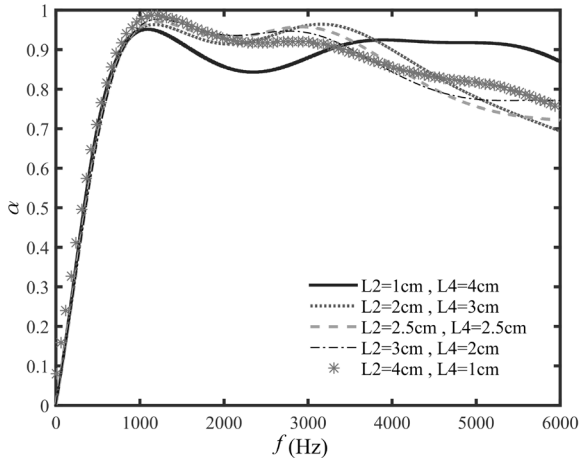


Fig. 10. The effect of porous material thickness in structure (d) on its sound absorption coefficient.

شکل ۱۰: تأثیر ضخامت ماده متخلخل در ساختار (d) بر ضریب جذب صوتی آن.

حالت  $L_2=4\text{ cm}$  و  $L_4=1\text{ cm}$  بیشترین جذب صوت را دارد و میانگین ضریب جذب صوتی در این حالت، برابر با  $0.78$  است. با توجه به این که هدف، افزایش پهنای بسامدی جذب صوتی است،  $L_2=1\text{ cm}$  و  $L_4=4\text{ cm}$  ضخامت‌های بهبودیافته برای لایه‌های دوم و چهارم هستند.

۳-۳-۶- ارائه ساختاری با ضریب جذب بهبودیافته

شکل ۱۱ منحنی ضریب جذب صوتی ساختاری را نشان می‌دهد که بیشترین میانگین ضریب جذب صوتی را در گستره بسامدی  $1\text{ Hz} - 6000\text{ Hz}$  دارد. میانگین ضریب جذب صوتی ساختار ارائه شده در این گستره بسامدی برابر  $0.9$  است. مشخصات ساختار بهبودیافته در ادامه آورده شده است:

لایه اول، صفحه سوراخ‌دار با مشخصات  $t=0.5\text{ mm}$  ,  $d=0.2\text{ mm}$  و  $p=20\%$ ؛ لایه دوم، جاذب متخلخل با مشخصات  $\sigma=90.41\text{ Pa.s/m}^2$  و

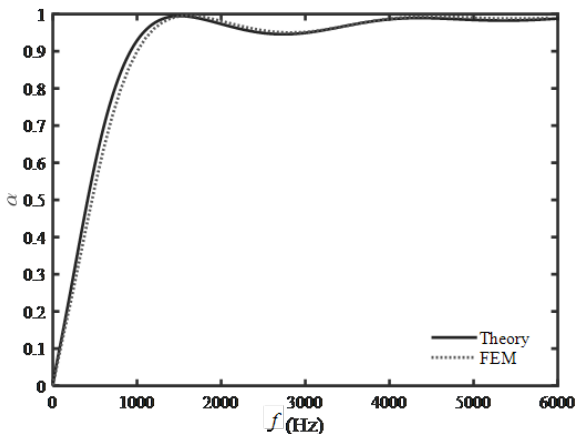


Fig. 11. Sound absorption coefficient of optimized structure.

شکل ۱۱: ضریب جذب صوتی ساختار بهبود یافته.

می‌یابد.

با توجه به قسمت (ب) از شکل ۸ می‌توان نتیجه گرفت که برای قطر سوراخ بزرگتر از  $0.1$  میلی‌متر، میانگین ضریب جذب صوتی تغییری نمی‌کند. با توجه به قسمت (ج) از شکل ۸ مشاهده می‌شود که با افزایش درصد سوراخ‌شدگی، میزان جذب صوتی ساختار افزایش می‌یابد؛ بنابراین برای لایه سوم  $p=20\%$  ,  $d=0.2\text{ mm}$  ,  $t=0.5\text{ mm}$  مشخصات بهبودیافته هستند.

۳-۳-۴- ماده متخلخل (لایه چهارم)

در شکل ۹ تأثیر تغییر مشخصه‌های لایه چهارم ساختار (d)، بر میزان ضریب جذب صوتی آورده شده است. برای لایه چهارم نیز با توجه به این که افزایش ضخامت کلی ساختار مدنظر نیست، تنها مشخصه مقاومت در برابر جریان ماده متخلخل مطابق جدول ۱ تغییر داده شده است.

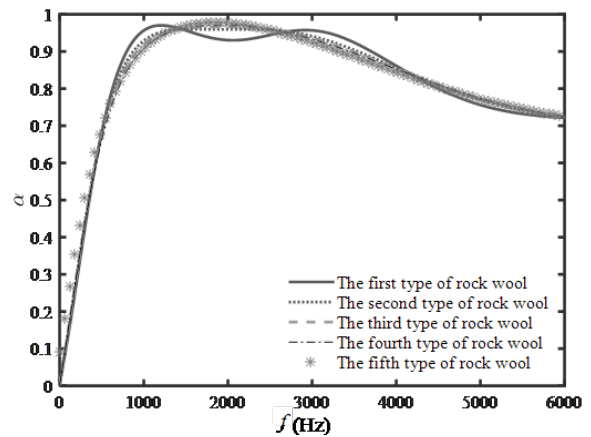


Fig. 9. The effect of porous material kind related to the fourth layer of structure (d) on its sound absorption coefficient.

شکل ۹: تأثیر جنس ماده متخلخل لایه چهارم در ساختار (d) بر ضریب جذب صوتی آن.

همانطور که ملاحظه می‌شود تغییر جنس این لایه نسبت به لایه دوم، تأثیر کمتری بر میزان ضریب جذب صوتی دارد. برای لایه چهارم نیز پشم سنگ نوع ۱ و نوع ۲ عملکرد بهتری را در جذب صوت نشان می‌دهند. از این رو جاذب متخلخل با مقاومت در برابر جریان  $\sigma=90.41\text{ Pa.s/m}^2$  مشخصه بهبودیافته لایه چهارم است.

۳-۳-۵- ضخامت ماده متخلخل

با توجه به اینکه افزایش ضخامت نهایی ساختار مدنظر نیست، ضخامت لایه‌های دوم و چهارم ساختار (d) طوری تغییر داده شده‌اند که مجموع ضخامت این دو لایه برابر با  $5$  سانتی‌متر ثابت بماند. شکل ۱۰ تأثیر این تغییر را بر ضریب جذب صوتی ساختار (d) نشان می‌دهد. با توجه به منحنی شکل ۱۰ در بسامدهای بالا، برای حالتی که  $L_2=1\text{ cm}$  و  $L_4=4\text{ cm}$  باشد، جذب صوتی ساختار (d) بهتر است و میانگین ضریب جذب صوتی در گستره بسامدی  $1\text{ Hz} - 6000\text{ Hz}$ ، به مقدار  $0.78$  می‌رسد. برای گستره بسامدی

بسامدهای بالا، بهتر است ضخامت ماده متخلخل لایه چهارم را بیشتر نمود. میانگین ضریب جذب صوتی ساختار بهبودیافته ارائه شده در گستره بسامدی ۶۰۰۰ Hz - ۱ Hz با ضخامت کل ۵۱ میلی متر، ۰/۹ است که در مقایسه با کارهای گذشته بدون افزایش ضخامت ساختار، سبب افزایش ۵٪ در میزان میانگین ضریب جذب صوتی شده است. به عبارت دیگر، با ساختار ارائه شده در این مقاله، با ضخامت کمتری به همان ضریب جذب متداول در ساختارهای موجود در صنعت می توان دست یافت و این امر از نظر مهندسی بسیار حائز اهمیت است؛ چرا که فضای کمتری اشغال می شود و هزینه اجرا نیز کاهش می یابد.

### فهرست علائم

$\rho$	چگالی هوا، $\text{kg/m}^3$
$c$	سرعت صوت در هوا، $\text{m/s}$
$f$	بسامد، $\text{Hz}$
$\sigma$	مقاومت در برابر جریان ماده متخلخل، $\text{Pa.s/m}^2$
$L$	ضخامت ماده متخلخل، $\text{m}$
$t$	ضخامت صفحه، $\text{mm}$
$d$	قطر حفره، $\text{mm}$
$p$	درصد سوراخ شدگی
$D$	ضخامت فاصله هوایی، $\text{m}$
$k$	عدد موج، $\text{rad/m}$

### منابع

- [1] S. Saffar, A. Abdullah, Determination of acoustic impedances of multi matching layers for narrowband ultrasonic airborne transducers at frequencies < 2.5 MHz—Application of a genetic algorithm, *Ultrasonics*, 52(1) (2012) 169-185.
- [2] S. Saffar, A. Abdullah, R. Othman, Influence of the thickness of matching layers on narrow band transmitter ultrasonic airborne transducers with frequencies < 100 kHz: Application of a genetic algorithm, *Applied Acoustics*, 75 (2014) 72-85.
- [3] J.M. Kim, D.H. Kim, J. Kim, J.W. Lee, W.N. Kim, Effect of graphene on the sound damping properties of flexible polyurethane foams, *Macromolecular Research*, 25(2) (2017) 190-196.
- [4] H. Bahrambeygi, A. Rabbi, K. Nasouri, A.M. Shoushtari, M.R. Babaei, Morphological and structural developments in nanoparticles polyurethane foam nanocomposite's synthesis and their effects on mechanical properties, *Advances in*

$L=1 \text{ cm}$ ؛ لایه سوم، صفحه سوراخدار با مشخصاتی همانند لایه اول و لایه چهارم، جاذب متخلخل با مشخصات  $\sigma=9.41 \text{ Pa.s/m}^2$  و  $L=4 \text{ cm}$ . ضخامت کلی ساختار چهارلایه  $H=51 \text{ cm}$  است.

با تعیین مناسب مشخصات صفحه سوراخدار، به پهنای باند بسامدی جذبی معادل با ۲ اکتاو می توان رسید و با افزایش تعداد صفحات سوراخدار این پهنای باند بسامدی تا ۳/۵ اکتاو افزایش می یابد. با توجه به این که صفحات سوراخدار برای جذب بسامدهای پایین و جاذب متخلخل برای جذب صوتی بسامدهای بالا استفاده می شوند، در این مقاله با اضافه نمودن جاذب متخلخل در پشت صفحات سوراخدار و نوع چینش چهارلایه در کنار یکدیگر ساختاری با پهنای باند بسامدی جذب ۵ اکتاو ارائه شده است که نشاندهنده عملکرد مناسب ساختار در افزایش پهنای باند بسامدی جذب صوتی است. در مقایسه با کارهای انجام شده در مقالات دیگر، در این مقاله از مدل های دقیق و به روزتر برای مدل سازی صفحات سوراخدار و جاذب متخلخل استفاده شده است و با ارائه مدلی جدید از چیدمان لایه ها در کنار یکدیگر، ساختاری با ۵٪ بهبود در میزان میانگین ضریب جذب صوتی ارائه شده است.

### ۴- نتیجه گیری

در این مقاله، عملکرد آکوستیکی ساختارهای چندلایه تخت متشکل از صفحه سوراخدار، ماده متخلخل موجود در ایران و فاصله هوایی بررسی شده است. همچنین تأثیر مشخصات هر لایه بر میزان ضریب جذب صوتی ساختار بررسی شده است. بدین منظور از دو روش حل تحلیلی و عددی (شبیه سازی اجزا محدود) استفاده شده است. در روش حل تحلیلی از روش ماتریس تبدیل استفاده شده است. ابتدا ماتریس تبدیل صفحه سوراخدار، ماده متخلخل و فاصله هوایی محاسبه شده و با استفاده از آن ضریب جذب صوتی ساختارهای مورد نظر محاسبه شده است. تغییر مشخصات هر لایه از جمله ضخامت صفحه، قطر حفره ها و درصد سوراخ شدگی صفحه، جنس و ضخامت ماده متخلخل بر روی عملکرد جذب صوتی ساختار مؤثر است. از این رو اثر تغییر مشخصات هر لایه بر روی میزان و پهنای باند جذب صوتی بررسی شده و مشخصه های بهینه استخراج شده است. با استفاده از این مشخصات بهینه، ساختار بهبودیافته با بیشترین میانگین ضریب جذب صوتی ارائه شده است.

نتایج نشان می دهند که در یک ساختار چهارلایه بدون افزایش ضخامت ساختار، استفاده از دو لایه جاذب متخلخل سبب بهبود عملکرد جذب صوتی می شود. همچنین با توجه به منحنی های ضریب جذب صوتی مشاهده می شود که تغییر مشخصات دو لایه ابتدایی نسبت به دو لایه انتهایی، تأثیر بیشتری در تغییر میزان ضریب جذب صوتی دارد؛ بنابراین حساسیت ضریب جذب صوتی به تغییر مشخصات در لایه های جلو بیشتر است؛ بنابراین برای طراحی دو لایه انتهایی، محدودیت کمتر است. در یک ضخامت مشخص برای جذب صوت بیشتر در بسامدهای پایین، بهتر است ضخامت ماده متخلخل لایه دوم را بیشتر کرد و برای جذب

- Acoustics*, 88 (2015) 123-128.
- [16] S.-H. Park, Acoustic properties of micro-perforated panel absorbers backed by Helmholtz resonators for the improvement of low-frequency sound absorption, *Journal of Sound and Vibration*, 332(20) (2013) 4895-4911.
- [17] H. Ruiz, P. Cobo, F. Jacobsen, Optimization of multiple-layer microperforated panels by simulated annealing, *Applied Acoustics*, 72(10) (2011) 772-776.
- [18] K. Sakagami, Y. Fukutani, M. Yairi, M. Morimoto, Sound absorption characteristics of a double-leaf structure with an MPP and a permeable membrane, *Applied Acoustics*, 76 (2014) 28-34.
- [19] M. Delany, E. Bazley, Acoustical properties of fibrous absorbent materials, *Applied acoustics*, 3(2) (1970) 105-116.
- [20] Y. Miki, Acoustical properties of porous materials-generalizations of empirical models, *Journal of the Acoustical Society of Japan (E)*, 11(1) (1990) 25-28.
- [21] N. Voronina, Acoustic properties of fibrous materials, *Applied Acoustics*, 42(2) (1994) 165-174.
- [22] T. Komatsu, Improvement of the Delany-Bazley and Miki models for fibrous sound-absorbing materials, *Acoustical science and technology*, 29(2) (2008) 121-129.
- [23] W. Qunli, Empirical relations between acoustical properties and flow resistivity of porous plastic open-cell foam, *Applied acoustics*, 25(3) (1988) 141-148.
- [24] J.F. Allard, Y. Champoux, New empirical equations for sound propagation in rigid frame fibrous materials, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 91(6) (1992) 3346-3353.
- [25] P.W. Jones, N.J. Kessissoglou, Simplification of the Delany-Bazley approach for modelling the acoustic properties of a poroelastic foam, *Applied Acoustics*, 88 (2015) 146-152.
- [26] D. Oliva, V. Hongisto, Sound absorption of porous materials—Accuracy of prediction methods, *Applied Acoustics*, 74(12) (2013) 1473-1479.
- [27] S. Liu, W. Chen, Y. Zhang, Design optimization of porous fibrous material for maximizing absorption of sounds under set frequency bands, *Applied Acoustics*, 76 (2014) 319-328.
- [28] M. Zainulabidin, M. Rani, N. Nezere, A.M. Tobi, *Polymer Technology*, 32(S1) (2013).
- [5] S. Basirjafari, R. Malekfar, S. Esmailzadeh Khadem, Low loading of carbon nanotubes to enhance acoustical properties of poly (ether) urethane foams, *Journal of Applied Physics*, 112(10) (2012) 104312.
- [6] M. Broghany, S. Basirjafari, S. Saffar, Optimization of flat multi-layer sound absorber by using multi-objective genetic algorithm for application in anechoic chamber, *Modares Mechanical Engineering*, 16(2) (2016) 215-222. (in Persian)
- [7] M. Dah-You, Theory and design of microperforated panel sound-absorbing constructions, *Scientia Sinica*, 18(1) (1975) 55-71.
- [8] D.-Y. Maa, Microperforated-panel wideband absorbers, *Noise Control Engineering J.*, 29 (1987) 77-84.
- [9] D.-Y. Maa, Potential of microperforated panel absorber, *the Journal of the Acoustical Society of America*, 104(5) (1998) 2861-2866.
- [10] X.-j. ZHANG, X.-d. ZHAO, Multilayer Micro Perforated Panel Optimization Design [J], *Audio Engineering*, 2 (2008) 024.
- [11] L. Lei, W. Zuomin, J. Zaixiu, Effect of sound-absorbing material on a microperforated absorbing construction, *Chinese Journal of Acoustics*, 30(2) (2011) 191-202.
- [12] D. Borelli, C. Schenone, I. Pittaluga, Analysis of sound absorption behaviour of polyester fibre material faced with perforated panels, in: *Proceedings of Meetings on Acoustics ICA2013*, ASA, 2013, pp. 015045.
- [13] D. Li, D. Chang, B. Liu, J. Tian, Improving sound absorption bandwidth of micro-perforated panel by adding porous materials, in: *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, Institute of Noise Control Engineering, 2014, pp. 1877-1882.
- [14] Y. Qian, D. Kong, Y. Liu, S. Liu, Z. Li, D. Shao, S. Sun, Improvement of sound absorption characteristics under low frequency for micro-perforated panel absorbers using super-aligned carbon nanotube arrays, *Applied Acoustics*, 82 (2014) 23-27.
- [15] X. Zhao, X. Fan, Enhancing low frequency sound absorption of micro-perforated panel absorbers by using mechanical impedance plates, *Applied*

and Acoustics Division Conference at InterNoise 2012, American Society of Mechanical Engineers, 2012, pp. 227-235.

[30] Y. Wang, C. Zhang, L. Ren, M. Ichchou, M.-A. Galland, O. Bareille, Sound absorption of a new bionic multi-layer absorber, *Composite Structures*, 108 (2014) 400-408.

Optimum sound absorption by materials fraction combination, *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering*, 14(2) (2014) 118-121.

[29] V. Dabbagh, R. Keshavarz, A. Ohadi, Accurate Designing of Flat-Walled Multi-Layered Lining System Using Genetic Algorithm for Application in Anechoic Chambers, in: ASME 2012 Noise Control

Please cite this article using:

M. Broghany, S. Saffar, S. Basirjafari, Increasing the Frequency Band of Sound Absorption for Flat Multi-Layered Absorbers Consisting of Porous Material, Perforated Panel and Air-Gap, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 50(1) (2018) 219-230.  
DOI: 10.22060/mej.2017.12042.5247

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:



