Journal of Occupational Hygiene Engineering Volume 7, Issue 3, Autumn 2020, Pages: 1-8

Original Article

doi: 10.52547/johe.7.3.1

Effect of Surface Shape on Perforated Acoustic Absorber Performance Using Numerical and Experimental Methods

Mohammad Reza Manzam[1], Ali Fahim[2], Saeed Ahmadi[3], Zahra Hashemi[4,*]

[1] *Professor, Department of Occupational Health Engineering, School of Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran*
[2] *Assistant Professor, Department of Engineering, Faculty of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran*
[3] *Assistant Professor, Department of Occupational Health Engineering, School of Health, Qazvin University of Medical Sciences, Qazvin, Iran*
[4] *School of Medical Sciences, Behbahan, Khuzestan Province, Iran*

*** *Corresponding Author:*** *Zahra Hashemi, School of Medical Sciences, Behbahan, Khuzestan Province, Iran. Email: Z_hashemi26@yahoo.com*

Received: 08/04/2020
Accepted: 15/07/2020

How to Cite this Article:
Manzam MR, Fahim A, Ahmadi S, Hashemi Z. Effect of Surface Shape on Perforated Acoustic Absorber Performance Using Numerical and Experimental Methods. *J Occup Hyg Eng*. 2020; 7(3): 1-8. DOI: 10.52547/johe.7.3.1

Abstract

Background and Objective: Perforated panels are one of the most common resonant absorbers for sound control. These types of absorbers are widely used due to their adjustable mechanical properties and ease of processing. This study was conducted to investigate the acoustic properties of non-flat perforated panels in oblique angle and diffusion field using both numerical and experimental methods.

Materials and Methods: To investigate the effect of surface shape on the performance of the perforated panel, three non-flat shapes were considered for the perforated panel and their absorption performance was compared with the usual shape of the perforated panel (i.e., flat) using the numerical method. Initially, the most appropriate shape was determined in terms of absorption coefficient. Afterward, the desired shape was constructed in the dimensions approved by the ISO 354 and subjected to a random incidence absorption coefficient test in the reverberation chamber.

Results: The results of numerical simulation indicated that the shapes defined in this research all could improve the absorption coefficient at the middle and high frequencies. Moreover, the shape C showed a higher absorption coefficient at the lower frequencies than the flat and the two defined shapes. Based on the measurement of a random incidence absorption coefficient, the highest absorption coefficient was obtained at a frequency of 160 Hz with a value of 0.77. These conditions were implemented in a numerical environment and the random incidence absorption coefficient was calculated according to the existing relationships.

Conclusion: It can be concluded that surface shape is effective in improving the absorption performance of these types of adsorbents. The comparison of numerical and laboratory results showed the acceptable agreement of these two methods and the numerical method is capable of predicting this quantity with good accuracy.

Keywords: Finite Element Method; Perforated Absorbent; Random Incidence Absorption Coefficient; Reverberation Chamber; Surface Shape

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.52547/johe.7.3.1]

Copyright © 2020 Journal of Occupational Hygiene Engineering. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits copy and redistribute the material just in noncommercial usages, provided the original work is properly cite

مقاله پژوهشی

doi: 10.52547/johe.7.3.1

بررسی تأثیر شکل ظاهری در عملکرد جاذب صوتی سوراخ‌دار با استفاده از روش‌های عددی و آزمایشگاهی

محمدرضا منظم[۱]، علی فهیم[۲]، سعید احمدی[۳]، زهرا هاشمی[۴،*]

[۱] استاد، گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران

[۲] استادیار، گروه علوم مهندسی، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

[۳] استادیار، گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی قزوین، قزوین، ایران

[۴] دانشکده علوم پزشکی بهبهان، بهبهان، ایران

* **نویسنده مسئول:** زهرا هاشمی، دانشکده علوم پزشکی بهبهان، بهبهان، ایران. ایمیل: Z_hashemi26@yahoo.com

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۱/۲۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۴/۲۵

تمامی حقوق نشر برای دانشگاه علوم پزشکی همدان محفوظ است.

چکیده

سابقه و هدف: پانل‌های سوراخ‌دار یکی از معمول‌ترین جاذب‌های تشدیدی برای کنترل صدا می‌باشند. این دسته از جاذب‌ها، قابلیت استفاده گسترده‌ای به دلیل خواص مکانیکی قابل تنظیم و سهولت پردازش دارند. در این راستا، در مطالعه حاضر ویژگی‌های آکوستیکی پانل‌های سوراخ‌دار غیر مسطح در زاویه مایل و میدان پخش‌شونده به دو روش عددی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها: به منظور بررسی شکل ظاهری روی عملکرد پانل سوراخ‌دار، سه شکل غیر تخت برای صفحه سوراخ‌دار در نظر گرفته شد و عملکرد جذبی آن‌ها با شکل معمول صفحه سوراخ‌دار (تخت) با استفاده از روش عددی مورد مقایسه قرار گرفت. پس از تعیین بهترین شکل به لحاظ میزان ضریب جذب، با توجه به استاندارد ISO 354 (International Organization for Standardization) شکل مورد نظر در ابعاد مورد تأیید استاندارد ساخته شد و در اتاق بازآوا، تحت آزمون ضریب جذب رندوم قرار گرفت.

یافته‌ها: نتایج شبیه‌سازی عددی نشان دادند که شکل‌های تعریف شده در این مطالعه همگی باعث بهبود ضریب جذب در فرکانس‌های میانی و بالایی شده‌اند. همچنین شکل C ضریب جذب بهتری در فرکانس‌های پایین نسبت به شکل تخت و دو شکل تعریف شده دارد. نتایج اندازه‌گیری ضریب جذب رندوم روی شکل منتخب حاکی از آن بودند که بیشترین ضریب جذب در فرکانس ۱۶۰ هرتز با مقدار ۰/۷۷ به دست آمده است. این شرایط در محیط عددی پیاده‌سازی شد و با توجه به روابط موجود، ضریب جذب رندوم محاسبه گردید.

نتیجه‌گیری: شکل ظاهری در بهبود میزان عملکرد جذبی این دسته از جاذب‌ها مؤثر است. مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی نشان دادند که میزان توافق این دو روش، مشاهده شده و روش عددی با دقت خوبی قادر به پیش‌بینی این کمیت می‌باشد.

واژگان کلیدی: اتاق بازآوا؛ جاذب سوراخ‌دار؛ روش المان محدود؛ شکل ظاهری؛ ضریب جذب رندوم

مقدمه

پانل‌های سوراخ‌دار یکی از معمول‌ترین جاذب‌های تشدیدی برای کنترل صدا می‌باشند. این دسته از جاذب‌ها، قابلیت استفاده گسترده‌ای به واسطه خواص مکانیکی قابل تنظیم و سهولت پردازش دارند. ویژگی فیزیکی منحصر به فرد پانل‌های سوراخ‌دار باعث به‌کارگیری آن‌ها در سیستم‌های مکانیکی پیچیده مانند اسکنرهای رزونانس مغناطیسی [۱]، سیستم‌های خنک‌کننده [۲]، ناسل موتورهای توربوفن [۳]، فضای داخلی محفظه موتورها [۴] و همچنین بسیاری از ساختمان‌ها [۵،۶] و مافلرها [۷،۸] شده است. پانل‌های سوراخ‌دار صفحه‌ای است شامل تعدادی حفره با قطر و فاصله مشخص که با فاصله معینی روی دیوار صلب قرار می‌گیرد. حفرات موجود در صفحه همانند تعداد زیادی رزوناتور هلم‌هولتز موازی و مرتبط با یکدیگر هستند. هنگامی که فرکانس موج برخوردی نزدیک به فرکانس طبیعی باشد، ستون هوایی تشکیل شده در حفرات به شدت مرتعش می‌شوند و به دیواره پشتی برخورد می‌کنند. انرژی صوتی به دلیل اثرات اینرسی و چسبندگی به انرژی حرارتی تبدیل می‌شوند و بدین‌ترتیب صدا

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.52547/johe.7.3.1]

کاهش می‌یابد [۹]. مطالعات صورت‌گرفته در سال‌های اخیر به منظور افزایش کارایی جاذب‌های سوراخ‌دار، نشان‌دهنده اهمیت این دسته از جاذب‌ها و نقش آن‌ها در کاهش میزان صدا در محدوده‌های مشخص فرکانسی هستند. در ادامه، تعدادی از این مطالعات بیان شده است. Wang در سال ۲۰۱۴ با استفاده از محفظه‌بندی فضای پشت صفحه سوراخ‌دار و ایجاد محفظه‌هایی با عمق مختلف توانست در فرکانس‌های مختلف، جذب بیشینه داشته باشد. این فرکانس‌ها متناسب با عمق هر زیرمحفظه بودند [۱۰]. Lee نیز در سال ۲۰۰۴ با قرار دادن چندین صفحه سوراخ‌دار، ضریب جذب را به میزان قابل توجهی افزایش داد [۱۱]. استفاده از مواد جاذب در پشت صفحه سوراخ‌دار، راه‌کار دیگری است. در این راستا، هاشمی در سال ۲۰۱۹ با قرار دادن فوم‌هایی با مقاومت جریانی مختلف و تغییر چیدمان آن‌ها، محدوده جذبی و مقدار جذب را بهبود بخشید [۱۲]. مطالعات اندکی به بررسی شکل ظاهری مواد جاذب پرداخته‌اند؛ به عنوان مثال، Chens تأثیر شکل جاذب‌های متخلخل در پشت صفحه سوراخ‌دار را مورد بررسی قرار داد. وی اشکال ساده، نیم دایره، مقعر و مثلثی را بررسی نمود و به این نتیجه دست یافت که بدون تردید، در برخی از فرکانس‌ها شکل جاذب‌های متخلخل بر ضریب جذب تأثیرگذار می‌باشند [۱۳]. همچنین Easwaran و همکاران با استفاده از روش گالرکین المان محدود، ضریب انعکاس صدا از لبه‌های فوم را مورد بررسی قرار دادند و گزارش نمودند که مواد متخلخل با شکل لبه‌دار باعث بهبود میزان ضریب جذب و افت انتقال در برخی از باندهای فرکانسی می‌شود [۱۴].

با توجه به بررسی‌های صورت‌گرفته به نظر می‌رسد تعداد مطالعاتی که به بررسی شکل ظاهری جاذب‌ها به ویژه جاذب‌های سوراخ‌دار پرداخته‌اند، انگشت‌شمار می‌باشند؛ از این رو در پژوهش حاضر به بررسی تأثیر شکل ظاهری جاذب‌های سوراخ‌دار بر عملکرد جذبی آن‌ها پرداخته شد.

باید خاطرنشان ساخت که در این مطالعه تنها سه شکل مورد بررسی قرار گرفته است؛ از این رو نتایج به دست آمده را نمی‌توان به سایر اشکال تعمیم داد.

مواد و روش‌ها

بخش تئوری

امپدانس یک کمیت کمپلکس است که دارای دو ترم واقعی و مجازی می‌باشد.

رابطه ۱

$$Z_M = X + j\omega M$$

قسمت واقعی امپدانس آکوستیکی X نشان‌دهنده انتشار انرژی و تلفات ویسکوز موج صوتی منتشر شده در میان سوراخ‌ها است که به رزیستانس معروف می‌باشد. بخش موهومی $j\omega M$، با عنوان راکتانس خوانده شده و مربوط به جرم هوای متحرک در میان سوراخ‌ها می‌باشد. روشن است که امپدانس وابسته به هر دو ترم حقیقی و مجازی می‌باشد. Maa یک معادله کاملاً شناخته شده برای تعیین امپدانس آکوستیکی صفحات سوراخ‌دار دارد [۱۵].

رابطه ۲

$$Z_{M(MPP)} = \frac{\sqrt{2}\eta k}{\emptyset d} + \frac{j\omega\rho_0}{\emptyset}\left\{\frac{0.85d}{\psi(\xi)} + t\left[1 - \frac{2}{k\sqrt{-j}}\frac{j_1(s\sqrt{-i})}{j_0(k\sqrt{-j})}\right]^{-1}\right\}$$

ρ_0 دانسیته هوا، ω فرکانس زاویه‌ای و $i = \sqrt{-1}$ نشان‌دهنده اعداد موهومی هستند. همچنین در $K = d\sqrt{\omega\rho_0/4\eta}$، d قطر حفرات، t ضخامت پانل، ηضریب ویسکوزیته و σ نسبت پرفوریشین بر حسب درصد می‌باشد. ψ نیز تابع FOK است که از معادله زیر به دست می‌آید:

رابطه ۳

$$\psi(\xi) = (1 - 1.40925\xi + 0.33818\xi^3 + 0.06793\xi^5 - 0.02287\xi^6 + 0.03015\xi^7 - 0.01641\xi^8 + \cdots)^{-1}$$

$\xi = 0.88d/b$ و b فاصله بین سوراخ‌ها می‌باشد. پانل‌های سوراخ‌دار برای تبدیل شدن به یک جاذب تشدیدی می‌بایست با فاصله‌ای به یک سطح سخت منتهی شوند. امپدانس سطح سوراخ‌دار و فضای پشت از رابطه زیر به دست می‌آید:

رابطه ۴

$$Z_s = Z - j\rho_0 c_0 cot\left(\frac{\omega D}{c_0}\right)$$

D فاصله هوا از پشت صفحه سوراخ‌دار تا دیوار صلب و Z امپدانس صفحه سوراخ‌دار می‌باشد. ضریب جذب پانل جاذب سوراخ‌دار برای حالت نرمال عبارت است از: نسبت فشار موج پراکنده به فشار موج جذب شده که از رابطه زیر به دست می‌آید:

رابطه ۵

$$\alpha = 1 - \left|\frac{Z_s - \rho_0 c_0}{Z_s + \rho_0 c_0}\right|^2$$

ضریب جذب مورب را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد:

رابطه ۶

$$\alpha_{\theta,\beta} = \frac{\iint_{S_{Inlet}} Re\left[(i\emptyset)\left[\partial\emptyset/\partial z\right]^*\right]dxdy}{K_0(\cos\theta)L_xL_y}$$

ضریب جذب در میدان دیفیوژ را نیز می‌توان به صورت زیر نوشت:

رابطه ۷

$$\alpha_S = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi}\left(\int_0^{\pi/2}\alpha_{\theta,\beta}\sin 2\theta d\theta\right)d\beta$$

در این رابطه، θ و β به ترتیب برابر با زاویه و آزیموت موج تابشی می‌باشند.

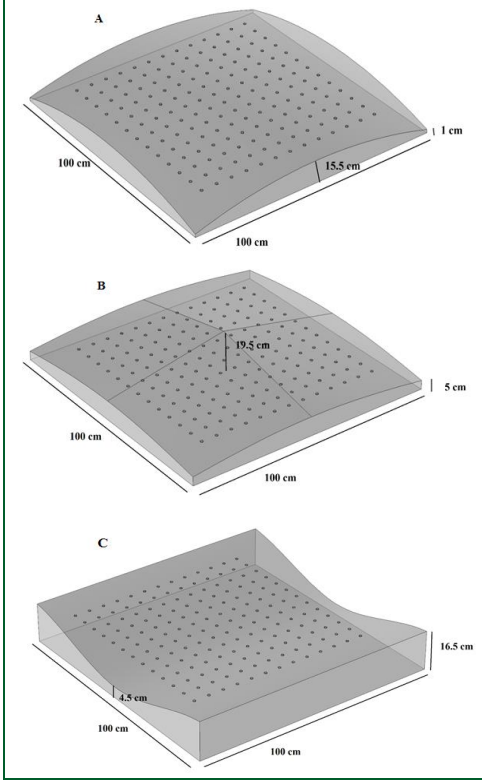
[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.52547/johe.7.3.1]

تنظیم عددی

به منظور شبیه‌سازی ضریب جذب پانل سوراخ‌دار غیر مسطح، از روش المان محدود در حوزه فرکانسی با بهره‌گیری از نرم‌افزار COMSOL 5.3a استفاده شد. دامنه محاسباتی شامل: فضای پشت صفحه سوراخ‌دار، خود صفحه سوراخ‌دار و کانال مجازی می‌باشد. این نرم‌افزار با حل معادله هلم‌هولتز در حوزه بسامد (Frequency domain) اقدام به حل معادله موج می‌کند. با توجه به سطح غیر تخت صفحه سوراخ‌دار، در صورتی که زاویه موج صوتی معادل "۰" در نظر گرفته شود، نمی‌توان ادعا کرد که ضریب جذب نرمال حاصل شده است؛ بنابراین در مطالعه حاضر، زوایه موج صوتی بین دو حالت "۰" (حداقل) و "۹۰" (حداکثر)، ۴۵ درجه در نظر گرفته شد و مدل‌سازی در محیط سه بعدی و براساس رسم دو مکعب که به وسیله صفحه سهمی از یکدیگر جدا می‌شوند، صورت پذیرفت. نوع شکل صفحه با استفاده از معادلات مشخص تعیین گردید. مکعب بالا مربوط به کانال مجازی بوده و کانال پایین مربوط به حجم پشت صفحه سوراخ‌دار است. میدان آکوستیک داخل کانال مجازی از طریق سوراخ‌های صفحه با فضای پشت صفحه مرتبط می‌باشد. طول و عرض کانال مجازی و کانال پشت صفحه برابر با ۱۰۰ × ۱۰۰ سانتی‌متر است. با توجه به شکل‌دار بودن صفحات، عمق پشت صفحه با ارتفاع مؤثر تعریف شد و با انتگرال‌گیری از حجم پشت صفحه به دست آمد. شایان ذکر است که عمق مؤثر پشت صفحه سوراخ‌دار، ۱۰ سانتی متر در نظر گرفته شد. همچنین شرایط مرزی ریجید، برای دیواره‌های کانال پشتی و شرایط پریودیک در مرزهای کانال مجازی لحاظ گردید. با اعمال شرط مرزی پرفوریتد برای صفحه سوراخ‌دار، امپدانس آکوستیکی صفحه سوراخ‌دار نسبت به هوا مطابق با فرمول Maa به دست می‌آید. شرایط مرزی Dirichlet- to - Neumann [۱۶] که در بخش ورودی کانال مجازی به کار گرفته شده است، موجب می‌شود که موج صوتی بدون انعکاس از این مرز عبور کند. به منظور بررسی تأثیر شکل ظاهری صفحه سوراخ‌دار، سه طرح A، B و C برای سطح صفحه سوراخ‌دار انتخاب شدند (جدول ۱). فاکتورهای مورد نظر این مطالعه عبارت بودند از: سادگی طرح‌ها چه از نظر رسم در نرم‌افزار و چه در مرحله ساخت و کاربری و همچنین مسائل مربوط به زیبایی‌شناسی و دکوراسیون. شایان ذکر است که شبیه‌سازی در محدوده فرکانسی ۱ تا ۲۰۰۰ هرتز انجام شد. ویژگی‌های ساختاری مانند قطر حفره، درصد پرفوریشن و ضخامت صفحه در تمامی اشکال، ثابت و به ترتیب برابر با ۱، ۰/۰۱۶ و ۱ میلی‌متر بود. نوع مش تتراهدرال و اندازه مش‌ها به صورت یکنواخت انتخاب شدند. علاوه بر اشکال ذکر شده، شکل تخت به عنوان رفرنس برای مقایسه با طرح‌های انتخابی در نظر گرفته شد. شبیه‌سازی‌های مربوط به ضریب جذب علاوه بر مقایسه با یکدیگر، با نتایج شکل تخت نیز مقایسه شدند و در نهایت با توجه به نتایج شبیه‌سازی، بهترین طرح از نظر ضریب جذب برای

جدول ۱: طرح‌های تعریف شده برای صفحه سوراخ‌دار و ابعاد آن‌ها

طرح	
	A B C

ساخت در ابعاد لازم جهت تعیین ضریب جذب رندوم در اتاق بازآوا انتخاب گردید.

یافته‌ها

نتایج عددی برای انتخاب بهترین شکل

نتایج حاصل از شبیه‌سازی به روش المان محدود، مربوط به طرح‌های در نظر گرفته شده برای صفحه سوراخ‌دار در مقایسه با شکل تخت (رفرنس) و در مقایسه با یکدیگر ارائه شده است.

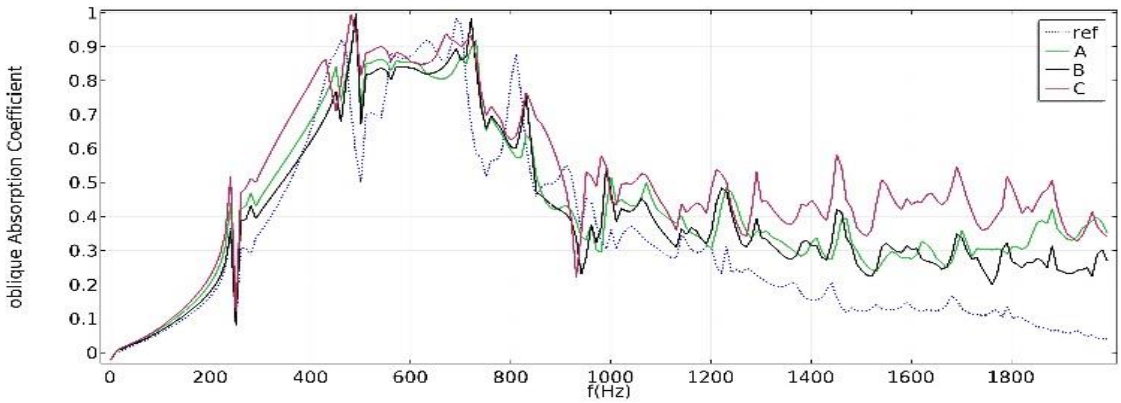
شکل ۱ به خوبی نشان‌دهنده این واقعیت است که در فرکانس‌های میانی و بالایی، اشکال تعریف شده در این مطالعه باعث بهتر شدن عملکرد این دسته از جاذب‌ها می‌گردند. در برخی از فرکانس‌ها، افزایش میزان جذب تا سه برابر هم مشاهده می‌شود. مهم‌ترین یافته در این نمودارها، تغییر الگوی جذب در جاذب‌هایی با شکل غیر معمول نسبت به شکل تخت بودند. از سوی دیگر در فرکانس ۲۴۰ هرتز، پیک کوچکی در هر دو نمودار مشاهده می‌شود که مربوط به رزونانس محفظه پشت صفحه سوراخ‌دار می‌باشد. شایان ذکر است که عمده جذب در محدوده فرکانسی ۴۵۰ تا ۸۰۰ هرتز مشاهده شده و عملکرد جاذب‌ها پس از فرکانس ۸۰۰ رو به افول گذاشته است؛ میزان ضریب جذب در شکل رفرنس با شیب تندتری کاهش یافته است.

اندازه‌گیری ضریب جذب در اتاق بازآوا- روش عددی

با توجه به نتایج حاصل از حل عددی، بهترین شکل به

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.52547/johe.7.3.1]



شکل ۱: مقایسه نتایج ضریب جذب در تمامی اشکال و شکل رفرنس

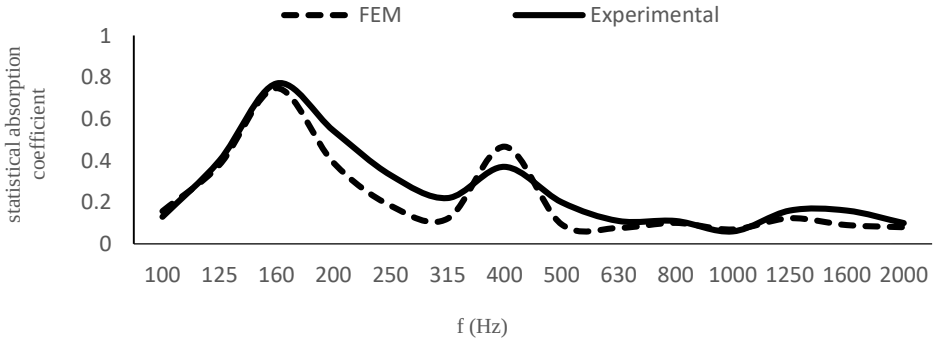
لحاظ ضریب جذب انتخاب گردید و پس از ساخت قطعه مورد نظر (طرح C)، ضریب جذب آماری در اتاق بازآوا اندازه‌گیری شد و نتایج به دست آمده با نتایج عددی مقایسه گردید. حجم اتاق بازآوا ۱۰۰ متر مکعب بود. اندازه‌گیری‌ها مطابق با استاندارد ISO 354:2003 انجام شدند [۱۷]. مطابق با این استاندارد، ابعاد جاذب به منظور اندازه‌گیری ضریب جذب آماری می‌بایست حداقل ۹ تا ۱۲ متر مربع باشد. در این مطالعه پانل سوراخ‌دار در ابعاد ۱۰ متر مربع و از کنار هم قرار دادن ۴۰ قطعه با ابعاد ۵۰ × ۵۰ سانتی متر ساخته شد. از روش قالب‌گیری برای ساخت قطعه مورد نظر استفاده گردید و به منظور سبک‌تر شدن قطعات و شکل‌پذیری راحت‌تر، از الیاف فایبرگلاس در ضخامت ۳ میلی‌متر بهره گرفته شد. برای سوراخ کردن صفحات از دستگاه سی ان سی استفاده گردید و حفراتی با اندازه ۳ میلی‌متر با فراوانی ۰/۵ درصد روی آن ایجاد شد. چینش نمونه طبق استاندارد، نباید با دیواره‌های اتاق موازی می‌بود و می‌بایست از هر دیوار نیم متر فاصله می‌داشت. صدا به وسیله بلندگوی ۱۲ بعدی در دو مکان در فرکانس‌های ۱۰۰ تا ۵۰۰۰ هرتز در گام‌های ۱/۳ اکتاوی در جهت‌های مختلف پخش شد و میکروفن در پنج مکان از پیش تعیین شده به صورت دستی قرار گرفت و در هر حالت، سه بار آزمایش تکرار گردید. در نهایت، میانگین ضریب جذب رندوم از مقادیر به دست آمده محاسبه گردید.

برای مقایسه روش آزمایشگاهی با روش عددی، با توجه به رابطه ۷، ضریب جذب در زوایای ۹۰-۰=θ و ۱۸۰-۰=β درجه در نرم‌افزار کامسول (COMSOL) به صورت جداگانه محاسبه گردید و از طریق میانگین‌گیری مقادیر آن‌ها، میزان ضریب جذب رندوم در فرکانس‌های ۱/۳ اکتاوی به دست آمد.

مقایسه میزان ضریب جذب رندوم به روش آزمایشگاهی و عددی (شکل ۳) نشان‌دهنده توافق قابل قبول هر دو روش در برآورد این کمیت است. اگر عدم تطابق نتایج در فرکانس ۴۰۰ هرتز نادیده گرفته شود می‌توان گفت که الگوی جذب در هر دو روش یکسان بوده و روش عددی با دقت قابل قبولی نتایج را شبیه‌سازی کرده است. آنچه که در این نمودار قابل توجه می‌باشد، میزان ضریب جذب قابل قبول در فرکانس‌های پایین است که با توجه به بلندای طول موج در فرکانس‌های پایین و ضعف عمده جاذب‌های تخلخلی و فیبری در این ناحیه، به دست آوردن چنین عملکرد جذبی در این ناحیه فرکانسی، قابل توجه بوده و بدون تردید، مرهون ویژگی‌های ساختاری و هندسه آن می‌باشد.



شکل ۲: چینش پانل سوراخ‌دار در اتاق بازآوا؛ جانمایی میکروفون و بلندگوی صوتی



شکل ۳: ضریب جذب رندوم به دو روش اتاق بازآوا و عددی در پانل سوراخ‌دار با ویژگی‌های ذکر شده

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.52547/johe.7.3.1]

بحث

در مطالعه حاضر شکل ظاهری جاذب‌های سوراخ‌دار مورد توجه قرار گرفت. نتایج نشان دادند که تغییر الگوی جذب در تمامی اشکال پیشنهادی نسبت به شکل تخت مشاهده می‌شود. در ادامه، دلایل و تئوری‌هایی در این زمینه ارائه شده است.

در صورت برخورد امواج صوتی با یک مانع سخت و انعطاف‌ناپذیر، سرعت ذرات در فاصله یک چهارم و سه چهارم طول موج صوتی به حداکثر خواهد رسید. اگر ضخامت جاذب کمتر از یک چهارم طول موج صوتی باشد، تأثیر آن بر جذب‌کنندگی کم خواهد شد [۱۸]. با توجه به اینکه شکل‌دهی صفحات باعث به وجود آمدن مناطقی با ارتفاعات متغیر می‌شود، انتظار می‌رود که مناطقی با ارتفاع بیشینه در محدوده ۱/۴ طول موج و یا نزدیک به این محدوده قرار بگیرند و در این مناطق بتوان به جذب حداکثری و یا قابل قبول دست یافت؛ به همین دلیل در فرکانس‌های بالایی، ضریب جذب در اشکال پیشنهادی افزایش چشمگیری داشته است. باید خاطرنشان ساخت که عمق‌های متفاوت منجر به فرکانس‌های شدید مختلف می‌شوند و بدین‌ترتیب با یک جاذب می‌توان در چندین فرکانس، جذب بیشینه و یا قابل قبولی را به دست آورد. در این راستا می‌توان به مطالعه صورت‌گرفته توسط Wang اشاره نمود [۱۰] که تا حدودی با نتایج به دست آمده از مطالعه حاضر همسویی دارد.

شکل نامتعارف و نامنظم فضای پشتی صفحه، فاکتور دیگری است که می‌توان آن را به عنوان عامل تغییر الگوی جذب مورد توجه قرار داد. از دیدگاه ویبرواکوستیک، جذب صدا در صفحات سوراخ‌دار تحت تأثیر رزونانس حجم هوای در حال ارتعاش در حفره‌ها و فضای پشتی می‌باشد. تغییر در پیکربندی هندسی فضای پشتی می‌تواند به طور مؤثری کوپلینگ ویبرواکوستیک بین محفظه و صفحه سوراخ‌دار را تغییر دهد. در محفظه‌های غیر منظم، قسمت واقعی امپدانس (رزیستانس) نه تنها شامل رزیستانس خود صفحه سوراخ‌دار می‌شود؛ بلکه انرژی آکوستیکی منتقل شده از محفظه را نیز دربرمی‌گیرد. انرژی آکوستیکی منتقل شده از این محفظه‌ها نسبت به شکل منظم محفظه پشتی، شکل متفاوتی دارد که به نوبه خود دارای ارتباطی نزدیک با تحریف شکل مودهای آکوستیکی در محفظه‌های غیر یکنواخت می‌باشد. در نتیجه این تغییرات، رزیستانس به طور یکنواخت در سطح صفحه سوراخ‌دار توزیع نشده و باعث تغییر در الگوی جذب می‌گردد. صفحات سوراخ‌دار با محفظه پشتی غیر یکنواخت از ویژگی‌های جذبی موضعی و چندگانه برخوردار هستند. ویژگی‌های جذبی موضعی در محفظه‌هایی با شکل غیر یکنواخت به شرایط متغیر امپدانس نسبت داده می‌شوند. در این زمینه می‌توان به مطالعه صورت‌گرفته توسط Wang و همکاران در سال ۲۰۱۰ اشاره کرد. آن‌ها با ایجاد محفظه ذوزنقه‌ای شکل در پشت صفحه میکروی سوراخ‌دار و مقایسه آن با شکل معمول (مستطیل) محفظه به این نتیجه دست یافتند که شکل محفظه پشتی در عملکرد جاذب‌های سوراخ‌دار بسیار مؤثر هستند و تغییرات قابل توجهی را در کارایی این دسته از جاذب‌ها ایجاد می‌کنند که باعث بهبود عملکرد جذبی و پهن شدن محدوده جذب می‌شود [۱۹]. Yang و همکاران نیز در سال ۲۰۱۶ طی مطالعه‌ای، فضای پشت صفحه سوراخ‌دار را به صورت لانه زنبوری پارتیشن‌بندی کردند. نتایج نشان دادند که شکل غیر معمول فضای پشت باعث افزایش کوپلینگ بین مودهای آکوستیکی در محفظه پشتی و به دنبال آن افزایش باند جذبی می‌شود [۲۰]. این مطالعات از بسیاری جهات، یافته‌های پژوهش حاضر را تأیید می‌کنند.

اختلاف فاز ناشی از اختلاف طول مسیر پیموده شده توسط امواجی که به محفظه پشت صفحه وارد شده‌اند نیز قابل بررسی می‌باشد. امواج وارد شده، یک موج فشار را به سمت ته محفظه حرکت داده و پس از برخورد با انتهای محفظه، به سمت بالا منعکس می‌شود. با توجه به متغیر بودن طول مسیر پیموده شده در محفظه‌های با شکل غیر منظم، این امواج در مسیر بازگشت نسبت به یکدیگر دچار اختلاف فاز می‌شوند. جذب بالا در دیفیوژرها بر اثر اختلاف فاز انعکاسی اولین بار توسط Miyajima و Fujiwara (۱۹۹۲) مشاهده شد [۲۱]. دیفیوژرهایی که براساس اصل تغییر فاز صدای منعکس شده کار می‌کنند، به شدت صدا را در فرکانس‌های کم جذب می‌کنند. با انتخاب مناسب عمق چاه به عرض می‌توان این مقدار را افزایش یا کاهش داد [۲۲]. بخش حقیقی یا رزیستانس به طور عمده مربوط به اتلاف انرژی بوده و راکتانس یا بخش مجازی مربوط به تغییر فاز امواج می‌باشد [۱۸]. اختلاف فاز به وجود آمده در شکل‌های پیشنهادی باعث تغییر راکتانس و در نتیجه تغییر امپدانس سطحی می‌شود. با تغییر امپدانس، ضریب بازتاب دستخوش تغییراتی می‌شود که بر ضریب جذب تأثیرگذار می‌باشد. عوامل ذکر شده در این بخش، همگی عوامل مرتبط با هندسه صفحه سوراخ‌دار هستند و با کوچکترین تغییر در هندسه، اختلافاتی در میزان جذب ایجاد می‌شود؛ بنابراین اختلاف نتایج ضریب جذب در سه شکل تعریف شده منطقی به نظر می‌رسد.

نتایج میزان ضریب جذب رندوم در شکل ۳ نشان داد که بالاترین میزان جذب در فرکانس‌های پایین و در ۱۶۰ هرتز حاصل شده است. چنین نتیجه‌ای بدون شک مرهون فاکتورهای تأثیرگذار بر کارکرد جاذب‌های سوراخ‌دار مانند قطر سوراخ‌ها، درصد پرفوریشن، عمق محفظه پشت صفحه و هندسه و پیکربندی پانل می‌باشد. از سوی دیگر، در محیط عددی شرایط آزمون آزمایشگاهی شبیه‌سازی شد و با نتایج حاصل از اتاق بازآوا مقایسه گردید. نتایج نشان دادند که میزان توافق این دو روش به ویژه در فرکانس‌های پایین قابل قبول است. میزان ضریب جذب در روش آزمایشگاهی در اکثر طیف‌های فرکانسی

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.52547/johe.7.3.1]

بیشتر می‌باشد. چندین مکانیسم در افزایش میزان ضریب جذب به روش آزمایشگاهی مؤثر هستند؛ به عنوان مثال جذب توسط فریم اطراف نمونه، ارتعاش صفحه سوراخ‌دار و اثر لبه‌ها را می‌توان ذکر کرد.

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج به دست آمده از این مطالعه می‌توان به طور خلاصه گفت:

۱.اشکال تعریف شده در این مطالعه باعث افزایش محسوس ضریب جذب در فرکانس میانی و بالایی شدند. در برخی از اشکال (C) می‌توان این برتری را تا حدودی در فرکانس‌های پایینی نیز مشاهده کرد؛ بنابراین می‌توان گفت که برخی از اشکال موجب بهتر شدن میزان جذب و همچنین افزایش باند جذبی می‌شوند.

۲.تغییر در پیکربندی هندسی فضای پشتی می‌تواند به طور چشمگیری بر کوپلینگ ویبرواکوستیک بین محفظه و صفحه سوراخ‌دار، بازتاب امواج و اختلاف فاز اثرگذار باشد که این امر باعث تغییر در الگوی جذب می‌شود.

۳.توافق قابل قبولی در مورد ضریب جذب آماری بین روش عددی و آزمایشگاهی مشاهده گردید. می‌توان گفت که استفاده از روش‌های عددی مانند المان محدود برای پیش‌بینی ویژگی‌های آکوستیکی مدیاهای مختلف- چه به لحاظ سرعت انجام کار و چه به لحاظ مسائل اقتصادی- می‌تواند بسیار کمک‌کننده باشد.

تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله نویسندگان مراتب تشکر و قدردانی خود را از معاونت پژوهشی این دانشگاه اعلام می‌نمایند.

تضاد منافع

در این پژوهش، هیچ‌گونه تضاد منافع و تعارضی وجود ندارد.

ملاحظات اخلاقی

در این پژوهش، کلیه ملاحظات اخلاقی مورد نظر دانشگاه علوم پزشکی و همچنین مقررات سنجش ضریب جذب رعایت گردیده است. کد اخلاق این مطالعه IR.TUMS.SPH.REC.1396.3451 می‌باشد.

سهم نویسندگان

محمدرضا منظم: استاد راهنما در تهیه پایان‌نامه

علی فهیم: استاد مشاور در تهیه پایان‌نامه

سعید احمدی: مشاور در تهیه بخشی از داده‌ها

زهرا هاشمی: گردآوری پایان‌نامه و تهیه‌کننده اصلی مقاله

حمایت مالی

تمام حمایت‌های مالی این طرح که بخشی از پایان‌نامه دکترا می‌باشد، با شماره گرنت: ۳۶۰۵۲ به عهده دانشگاه علوم پزشکی تهران بوده است.

REFERENCES

1. Li G, Mechefske CK. A comprehensive experimental study of micro-perforated panel acoustic absorbers in MRI scanners. *MAGMA*. 2010;**23**(3):177-85. PMID: 20464444 DOI: 10.1007/s10334-010-0216-9
2. Allam S, Åbom M. Fan noise control using microperforated splitter silencers. *J Vib Acoust*. 2014;**136**(3):31017. DOI: 10.1115/1.4027245
3. Jing X, Peng S, Sun X. A straightforward method for wall impedance education in a flow duct. *J Acoust Soc Am*. 2008; **124**(1):227-34. PMID: 18646970 DOI: 10.1121/1.2932256
4. Corin RA, Weste L. Sound of silence. Kent: Industrial Vehicle Technology International; 2005. P. 105-7.
5. Dalton DS, Cruickshanks KJ, Klein BE, Klein R, Wiley TL, Nondahl DM. The impact of hearing loss on quality of life in older adults. *Gerontologist*. 2003;**43**(5):661-8. PMID: 14570962 DOI: 10.1093/geront/43.5.661
6. Kramer SE, Kapteyn TS, Kuik DJ, Deeg DJ. The association of hearing impairment and chronic diseases with psychosocial health status in older age. *J Aging Health*. 2002;**14**(1):122-37. PMID: 11892756 DOI: 10.1177/089826430201400107
7. Fuchs HV, Zha X. Micro-perforated structures as sound absorbers-a review and outlook. *Acta Acust United Acustica*. 2006;**92**(1):139-46.
8. Fuchs HV, Zha X. Acrylic-glass sound absorbers in the plenum of the Deutscher Bundestag. *Appl Acoust*. 1997; **51**(2):211-7. DOI: 10.1016/S0003-682X(96)00064-3
9. Bies DA, Hansen C, Howard C. Engineering noise control. Florida: CRC Press; 2017.
10. Wang C, Huang L, Zhang Y. Oblique incidence sound absorption of parallel arrangement of multiple micro-perforated panel absorbers in a periodic pattern. *J Sound Vib*. 2014;**333**(25):6828-42. DOI: 10.1016/j.jsv.2014.08.009
11. Lee DH, Kwon YP. Estimation of the absorption performance of multiple layer perforated panel systems by transfer matrix method. *J Sound Vib*. 2004;**278**(4-5):847-60. DOI: 10.1016/j.jsv.2003.10.017
12. Hashemi Z, Monazzam MR, Fahim A. Estimation of sound absorption performance of complex perforated panel absorbers by numerical finite element method and examinining the role of different layouts behind it. *Fluctuation Noise Lett*. 2019;**18**(3):1950013. DOI: 10.1142/S0219477519500135
13. Chen WH, Lee FC, Chiang DM. On the acoustic absorption of porous materials with different surface shapes and perforated plates. *J Sound Vib*. 2000;**237**(2):337-55. DOI: 10.1006/jsvi.2000.3029
14. Easwaran V, Munjal ML. Finite element analysis of wedges used in anechoic chambers. *J Sound Vib*. 1993;**160**(2):333-50. DOI: 10.1006/jsvi.1993.1027
15. Maa DY. Potential of microperforated panel absorber. *J Acoust Soc Am*. 1998;**104**(5):2861-6. DOI: 10.1121/1.423870
16. Morse PM, Bolt RH. Sound waves in rooms. *Rev Mod Phys*. 1944;**16**(2):69.
17. Standard B, ISO B. Acoustics-Measurement of sound absorption in a reverberation room. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization ISO Central Secretariat; 2003.
18. Cox TJ, D'antonio P. Acoustic absorbers and diffusers: theory, design and application. Florida: CRC Press; 2009.
19. Wang C, Cheng L, Pan J, Yu G. Sound absorption of a micro-perforated panel backed by an irregular-shaped cavity. *J Acoust Soc Am*. 2010;**127**(1):238-46. PMID: 20058969 DOI: 10.1121/1.3257590
20. Yang C, Cheng L. Sound absorption of microperforated

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.52547/johe.7.3.1]

panels inside compact acoustic enclosures. *J Sound Vib*. 2016;**360**:140-55. DOI: 10.1016/j.jsv.2015.09.024
21. Fujiwara K, Miyajima T. Absorption characteristics of a practically constructed Shroeder diffuser of quadratic-residue type. *Appl Acoust*. 1992;**35**(2):149-52. DOI: 10.1016/0003-682X(92)90029-R
22. Wu T, Cox TJ, Lam YW. From a profiled diffuser to an optimized absorber. *J Acoust Soc Am*. 2000;**108**(2):643-50. PMID: 10955630 DOI: 10.1121/1.429596

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.52547/johe.7.3.1]