

ORIGINAL RESEARCH PAPER

## Study of the effect of shape on acoustic performance of micro perforated absorbent at low frequencies

Zahra Hashemi<sup>1</sup>, Mohammad Reza Monazzam<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Behbahan Faculty of Medical Sciences, Behbahan, Iran

<sup>2</sup> Department of Occupational Health Engineering, School of Public Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

Received: 2019-12-24

Accepted: 2021-11-06

### ABSTRACT

**Introduction:** Micro-perforated absorbents are one of the structures that are widely used nowadays. The sound absorption mechanism is performed by viscous energy losses in the cavities on the plate. In this study, the acoustic properties of non-flat perforated panels in oblique angle was investigated in numerical method.

**Material and Methods:** This paper examined the effect of the surface shape on the micro perforated absorber performance at low frequencies (less than 500 Hz). The three-dimensional finite element method was used to predict the absorption coefficient of this group of adsorbents. Also, the results obtained from the shaped absorbents were compared with the flat micro perforated ones. After validating the numerical results, six different designs were defined as the surface shape of the micro perforated plates in the COMSOL Multiphasic, Ver. 5.3a software

**Results:** The results reflected the fact that the factor of the surface shape can be used as a contributing factor in lower frequencies. In general, the dented or concave shapes provide better outcomes than other flat designs and shapes and the convex or outward shapes bring the weakest results.

**Conclusion:** To explain this function, shaping creates a phase difference and angling the sound wave and creates a variable depth behind the micro-perforated plate. It also influences the reflection process which affect the absorption coefficient.

**Keywords:** Micro perforated absorbers, Surface shapes, Low frequency, Absorption coefficient

### HOW TO CITE THIS ARTICLE

Hashemi Z, Monazzam MR. Study of the effect of shape on acoustic performance of micro perforated absorbent at low frequencies. *J Health Saf Work*. 2022; 12(2): 244-258.

## 1. INTRODUCTION

Noise control can be done in a variety of forms such as controlling at the source, controlling at the receiver, and controlling in the sound propagation path. When the goal is to control the noise in the path of propagation, the issue of reduction in the reverberation time comes to the focus of attention. Reducing the reverberation time includes the control of noise transferred through the air, known as the airborne noise. One of the methods of noise control is the absorption phenomenon.

A micro-perforated absorbent typically contains a perforated plate, which is placed with a distance from a rigid wall. The sound absorption mechanism is performed by viscous energy losses in the cavities on the plate. It provides them the required conditions to become suitable absorbents with a broad absorption spectrum. This structure provides better performance than other resonance structures. The surface shape of these materials is one of the factors affecting the acoustic behavior of the absorbent materials. Few studies have looked at the apparent shape of the adsorbent materials. For

\* Corresponding Author Email: [esmaeelm@sina.tums.ac.ir](mailto:esmaeelm@sina.tums.ac.ir)

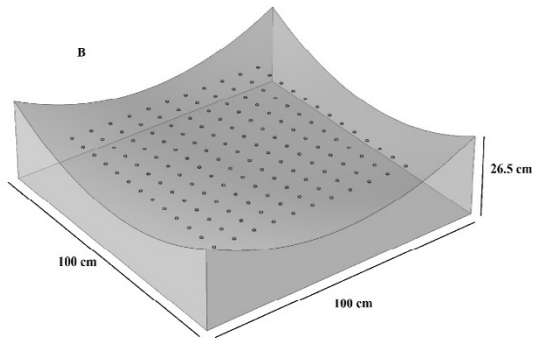


Fig. 1. Defined shape for the perforated panel and its dimensions

example, Chens examined the effect of the shape of porous absorbents behind the micro perforated plate. He examined the simple, semicircular, concave, and triangular shapes and concluded that the form of porous absorbents definitely affects the absorption coefficient at some frequencies. It seems that few studies have focused on the appearance of absorbents, particularly the micro-perforated absorbents. Therefore, in this study, we evaluated the effect of the surface shape on the performance

of micro-perforated absorbents using the finite element method.

## 2. MATERIAL AND METHODS

To ensure the accuracy of simulation results, these results need to be compared with the results obtained from the test or the results presented in a valid reference or an approved analytical method. To this end, we compared the FEM simulation results in this study with the absorption coefficient results of the impedance tube in the paper. There were many designs ranging from complex to simple shapes in order to examine the effect of the surface shape on the absorbance performance of micro-perforated absorbents. The factors considered in this study were the simplicity of designs, both in terms of drawing in the software and at the stage of making and use as well as the issues of aesthetics and decoration. Therefore, the designs provided below were selected as the surface shape of the micro-perforated plate. A flat micro-perforated plate (A) was used as a reference for comparison. The structural characteristics of the micro-perforated plates were considered to be the same in all modes.

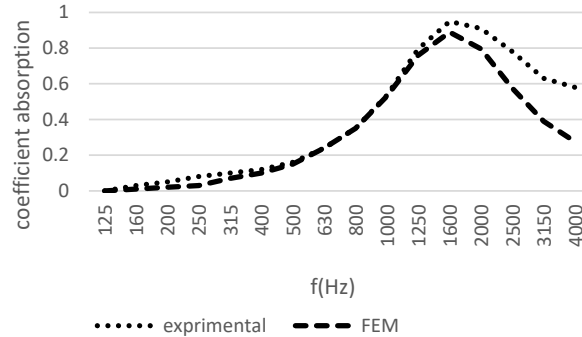


Fig. 2 . Comparison between the experimental and FEM method\*

\*A perforated stainless steel sheet with a thickness of 0.7 mm, the diameter of the holes 4.1mm and a porosity percentage of 10%.Second layer: A polyurethane foam with a thickness of 10 mm and the density of 12kg/m<sup>3</sup>.Third layer: A polyurethane foam with a thickness of 10 mm and the density of 25kg/m<sup>3</sup> Fourth layer: A simple stainless steel sheet with a thickness of 0.7 mm.

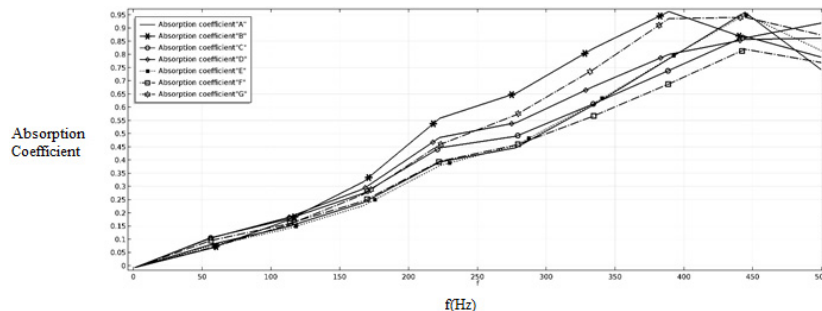


Fig. 3. Comparison of the results of the absorption coefficient of all shapes

The height behind the micro-perforated plates is a factor affecting the acoustic behavior of this group of absorbents. In this study, we considered the height or depth of the back compartment of the perforated plates identical and equal to 100 mm in all the designs. As the plates were shaped, the depth behind the micro-perforated plate was defined with the effective height, which was obtained by integrating the volume of the back of the micro-perforated plate. In this study, the oblique coefficient of absorption at the angle of  $\theta = 45$  was calculated with the assumption of constant  $\beta = 45$ , which was then compared with the flat shape as the reference.

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

As shown in Fig. 2, the results of both methods are somewhat close in the 1/3 octave frequency range and the graphs' trends are in perfect harmony with each other. The important point in this Figure is the closeness and similarity of the finite element method to the laboratory method at low and intermediate frequencies, while the difference between the two graphs has increased as the frequency increases. In sum, we can say this method is capable of predicting the sound performance rate of different acoustic structures. Figure 3. Shows the results of the absorption coefficient of all designs in the form of a graph. As can be seen, the best shape in terms of the coefficient of absorption is the concave shape "B". The inverse pyramid "G" is in the next rank. To explain this function, one can say that the shaping of the micro-perforated plate creates a space behind it with a variable height. We can see that the shape B has the highest maximum height at the edges and the lowest height in the middle part. Although the shapes are made in such a way that ultimately the effective height behind the micro-perforated plate remains constant in all shapes, the presence of space

with such a height behind the micro-perforated plate causes resonance at some frequencies and may help to absorption phenomenon at some frequencies. The resonance frequency and the frequency band of the system depend on some parameters. Also, the waves entering through the perforated surface move a pressure wave toward the bottom of the compartment, which will be also reflected upward after the collision with the bottom of the compartment, reaching the surface. These reflected waves have a phase difference with each other as the paths they have traversed have not been the same due to the difference in depth. This causes constructive and potentially destructive interactions and make changes in the rate of the absorption coefficient. The reflection mode or, in other words, the wave propagation in the back and front of the plate depends entirely on the shape of the plate. Hence, design or shape leads to the concentration and directing the sound wave toward the absorbent surface, and as a result, increases the performance, while other shapes cause the dispersion and distortion of the sound wave from the absorbent surface.

### 4. CONCLUSIONS

1. Shaping creates a variable depth behind the micro-perforated plate. In other words, when a plate is shaped, the height behind it varies throughout the plate that creates resonance at some frequencies and may help to the absorption phenomenon at certain frequencies.
2. Shaping creates a phase difference and
3. Angling the sound wave. It also influences the reflection process that affects the absorption coefficient.
4. Having shape increases the absorption area, which was expected to contribute to the absorption phenomenon. However, this factor seems not to be helpful in this study.

## بررسی تأثیر شکل بر عملکرد آکوستیکی جاذب‌های ریز سوراخ در فرکانس‌های پایین

زهرا هاشمی<sup>۱</sup>، محمدرضا منظم<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده علوم پزشکی بهبهان، بهبهان، ایران

<sup>۲</sup> گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۰۳، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۱۵

### چکیده

**مقدمه:** جاذب‌های ریز سوراخ<sup>۱</sup> یکی از ساختارهایی هستند که امروزه به‌صورت گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند. مکانیسم جذب صدا توسط تلفات انرژی ویسکوز در حفرات روی صفحه صورت می‌گیرد. در این مطالعه خصوصیات آکوستیکی پانل‌های سوراخ‌دار غیر مسطح در زاویه مایل به روش عددی مورد بررسی قرار گرفت.

**روش کار:** این مقاله به بررسی تأثیر شکل ظاهری بر روی عملکرد جاذب ریز سوراخ در فرکانس‌های پایین (کمتر از ۵۰۰ هرتز) می‌پردازد. جهت پیش‌بینی ضریب جذب این دسته از جاذب‌ها از روش المان محدود<sup>۲</sup> سه‌بعدی استفاده شد. همچنین نتایج به‌دست‌آمده از جاذب‌های شکل دار با جاذب ریز سوراخ تخت مورد مقایسه قرار گرفت. بعد از صحت‌سنجی نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی (امپدانس تیوب)، ۶ طرح مختلف به‌عنوان شکل ظاهری صفحات ریز سوراخ در نرم‌افزار کامسول مالتی فیزیکس نسخه 5.3a تعریف شد.

**یافته‌ها:** شکل دار کردن باعث ایجاد عمق متغیری در پشت صفحه سوراخ‌دار می‌شود و همین باعث ایجاد رزونانس در فرکانس‌های پایین‌تر می‌شود. به‌طور کلی شکل‌هایی که حالت فرورفته یا مقعر هستند نتایج بهتری نسبت به بقیه طرح‌ها و شکل تخت دارند و ضعیف‌ترین نتایج مربوط به شکل‌های محدب یا برآمده بودند.

**نتیجه‌گیری:** شکل‌دهی موجب ایجاد اختلاف‌فاز، زاویه‌دار شدن موج صوتی و همچنین نحوه انعکاسات موج صوتی می‌گردد و در نهایت باعث تغییر در ضریب جذب می‌شود.

**کلمات کلیدی:** جاذب ریز سوراخ، شکل ظاهری، فرکانس پایین، ضریب جذب

1- Micro perforated absorber

2- Finite element method

\* پست الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبه: [esmaelm@sina.tums.ac.ir](mailto:esmaelm@sina.tums.ac.ir)

### مقدمه

پیشرفت صنایع در ۶۰ سال اخیر توأم با افزایش آلاینده‌هایی مانند آلودگی آب‌وهوا، آلودگی بصری و صوتی بوده است. اگرچه آلودگی صوتی جزو لاینفک زندگی شهری محسوب می‌شود، در این میان تأثیر مواجهه بیش‌ازحد با صدا می‌تواند باعث بروز مشکلاتی شود که یکی از رایج‌ترین آن‌ها افت شنوایی است (۱). طبق آمار سازمان جهانی بهداشت، تعداد افرادی که در سراسر دنیا دچار کاهش شنوایی می‌باشند از ۱۲۰ میلیون نفر در سال ۱۹۹۵ به ۲۵۰ میلیون نفر در سال ۲۰۰۴ افزایش یافته است (۲). همچنین صدا می‌تواند منجر به اختلال در ارتباط با افراد از لحاظ کمی و کیفی شده و در نتیجه عدم درک صحیح و مؤثر علائم هشداردهنده را به دنبال خواهد داشت (۳). موارد دیگری همچون افزایش ریسک حوادث (۳)، افزایش استرس، افزایش فشارخون (۴)، افزایش ضربان قلب (۵)، صدمات روانی (۶، ۷)، آزدگی، اختلال در خواب و افزایش بیماری‌های قلبی عروقی را می‌توان نام برد (۸). برای پیشگیری از این امر بایستی تطابقی بین استانداردهای صدا و تکنولوژی، حمل‌ونقل، سایت‌های کاری و اماکن تفریحی صورت پذیرد که می‌تواند به روش‌های مختلف مانند به روز کردن ماشین‌آلات، تعویض وسایل نقلیه، طراحی و ساخت محیط‌های جدید داخلی و یا کنترل صدا انجام گیرد.

کنترل صدا می‌تواند به اشکال مختلفی مانند کنترل در منبع، کنترل در گیرنده و کنترل در مسیر انتشار صوت انجام شود. مواد آکوستیکی به‌طور معمول برای جذب صدا طراحی شده‌اند. جاذب‌های پسیو در فرکانس‌های میانی و بالایی، جایی که گوش حساسیت بالایی دارد مؤثرند. باین‌حال کنترل صدا در طیف فرکانس‌های پایین هنوز مسئله‌ساز است. این نوع صدا در محدوده‌ای از فرکانس واقع شده است که کمتر توسط دیوارها یا دیگر سازه‌ها کاهش می‌یابد، همچنین می‌تواند فرکانس‌های بالاتر را ماسکه کند و تنها با کاهش مختصر، مسافت‌های طولانی را طی کند. از دیگر ویژگی‌های صدای کم فرکانس ایجاد رزونانس در انسان و بروز واکنش‌های ذهنی و تا حدودی

فیزیولوژیکی است (۹). از جمله این عوارض می‌توان به وزوز گوش، سردرد، افزایش میزان ترشح هورمون کورتیزل، افزایش واکنش‌های استرس‌زا، اختلالات تنفسی، احساس ناراحتی و اظهار شکایت نام برد (۱۰، ۱۱).

یک جاذب پرفوریتد به‌صورت معمول شامل یک صفحه سوراخ‌دار است که با فاصله‌ای از دیواره‌ای صلب قرار می‌گیرد. مکانیسم جذب صدا توسط تلفات انرژی ویسکوز در حفرات روی صفحه صورت می‌گیرد. این ساختار نسبت به بقیه ساختارهای رزونانسی عملکرد بهتری را ارائه می‌دهد؛ اما در مقایسه با مواد متخلخل هم از لحاظ پهنای فرکانسی و هم از لحاظ میزان جذب عملکرد ضعیف‌تری را ارائه می‌دهد.

یکی از فاکتورهای تأثیرگذار بر رفتار آکوستیکی مواد جاذب شکل ظاهری این مواد است. مطالعات اندکی به مطالعه شکل ظاهری مواد جاذب پرداخته‌اند؛ به‌عنوان مثال، Chens به بررسی تأثیر شکل جاذب‌های متخلخل در پشت صفحه ریز سوراخ پرداخت. وی شکل‌های ساده، نیم‌دایره، مقعر و مثلثی را مورد بررسی قرار داد؛ و به این نتیجه رسید که قطعاً در برخی فرکانس‌ها شکل جاذب‌های متخلخل بر روی ضریب جذب تأثیرگذار است (۱۲). Easwaran و همکاران با استفاده از روش گالریکین المان محدود ضریب انعکاس صدا از لبه‌های فوم را مورد بررسی قرار داده‌اند (۱۳). Kang و همکاران میزان ضریب جذب و افت عبور صدا را در ساختار کامپوزیت پانل با روش المان محدود مورد بررسی قرار دادند (۱۴). نتایج هر دو مطالعه نشان داد که مواد متخلخل با شکل لبه‌دار باعث بهبود میزان ضریب جذب و افت انتقال در برخی باندهای فرکانسی می‌شود. همچنین Tsay و همکاران پژوهشی در خصوص بررسی میزان جذب آکوستیکی فوم‌های پلی اورتان با هندسه سطحی هرمی انجام دادند. نتایج حاصل نشان داد که بیشترین ضریب جذب در زاویه رأس ۲۹ درجه حاصل شده است (۱۵).

با توجه به مطالعات صورت گرفته، به نظر می‌رسد تعداد مطالعاتی که به بررسی شکل ظاهری جاذب‌ها، بخصوص جاذب‌های سوراخ‌دار پرداخته‌اند انگشت‌شمار می‌باشد؛ بنابراین در این مطالعه، به بررسی تأثیر شکل

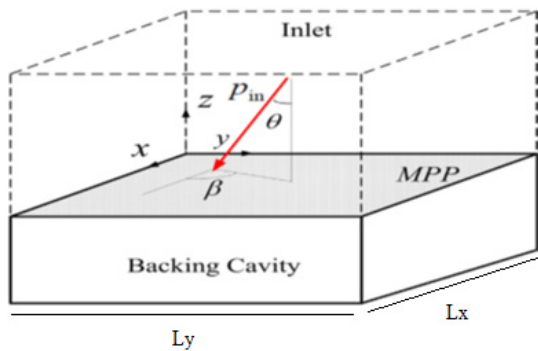
به فشار موج جذب شده که می‌توان آن را به صورت زیر نوشت:

$$\alpha_{\theta,\beta} = \frac{\iint_{\text{inlet}} \text{Re} \left[ (i\phi) \left( \frac{\partial \phi}{\partial z} \right)^* \right] dx dy}{k_0 (\cos \theta) L_x L_y}$$

تلاش‌های زیادی در جهت بهبود میزان کارایی این دسته از جاذب‌های تشدیدی صورت پذیرفته است که در این بین فاکتور شکل ظاهری مورد توجه کمی قرار گرفته است. مطالعه حاضر با هدف بررسی تأثیر شکل بر عملکرد آکوستیکی جاذب‌های ریز سوراخ در فرکانس‌های پایین انجام شد.

### روش کار

برای اطمینان از صحت نتایجی که بر اساس شبیه‌سازی به دست می‌آیند، لازم است این نتایج با نتایج حاصل از تست یا نتایج ارائه شده در یک مرجع معتبر و یا یک روش تحلیلی مورد تأیید، مقایسه گردند. به همین منظور، نتایج حاصل از شبیه‌سازی با روش FEM در این مطالعه با نتایج حاصل از امپدانس تیوب در مقاله (۱۹) مقایسه شد. در مرحله بعد به منظور بررسی تأثیر شکل ظاهری بر روی عملکرد جذبی جاذب‌های سوراخ‌دار، طرح‌های زیادی، از شکل‌های پیچیده تا ساده وجود داشتند. فاکتورهای مدنظر این مطالعه سادگی طرح‌ها چه از لحاظ رسم در نرم‌افزار و چه در مرحله ساخت و کاربری و همچنین مسائل مربوط به لحاظ زیباشناسی و دکوراسیون بود؛ بنابراین طرح‌هایی که در ادامه آورده شده است، به عنوان



شکل ۱. مدل تئوری صفحه سوراخ‌دار (۱۶)

ظاهری جاذب‌های سوراخ‌دار بر روی عملکرد جذبی آن‌ها پرداخته شده است. بررسی‌های صورت گرفته در این مطالعه به روش عددی المان می‌باشد که به تفصیل در بخش‌های بعد بیان می‌شود.

### بخش تئوری روش المان محدود

برای توضیح عملکرد آکوستیکی صفحه سوراخ‌دار، فرض می‌شود که موج صوتی با زاویه theta از منبع صوتی منتشر و در برخورد با صفحه، آزمون بتا را ایجاد می‌کند (شکل ۱). برای شبیه‌سازی عملکرد آکوستیکی جاذب‌های سوراخ‌دار از روش المان محدود در حوزه فرکانسی بهره گرفته شده است. دامنه محاسباتی شامل فضای پشت صفحه ریز سوراخ، خود صفحه ریز سوراخ و کانال مجازی با اندازه مشخص می‌باشد. میدان صوتی در فضای پشت و کانال عبور هوا با حل معادله هلم هولتز حل می‌شود.

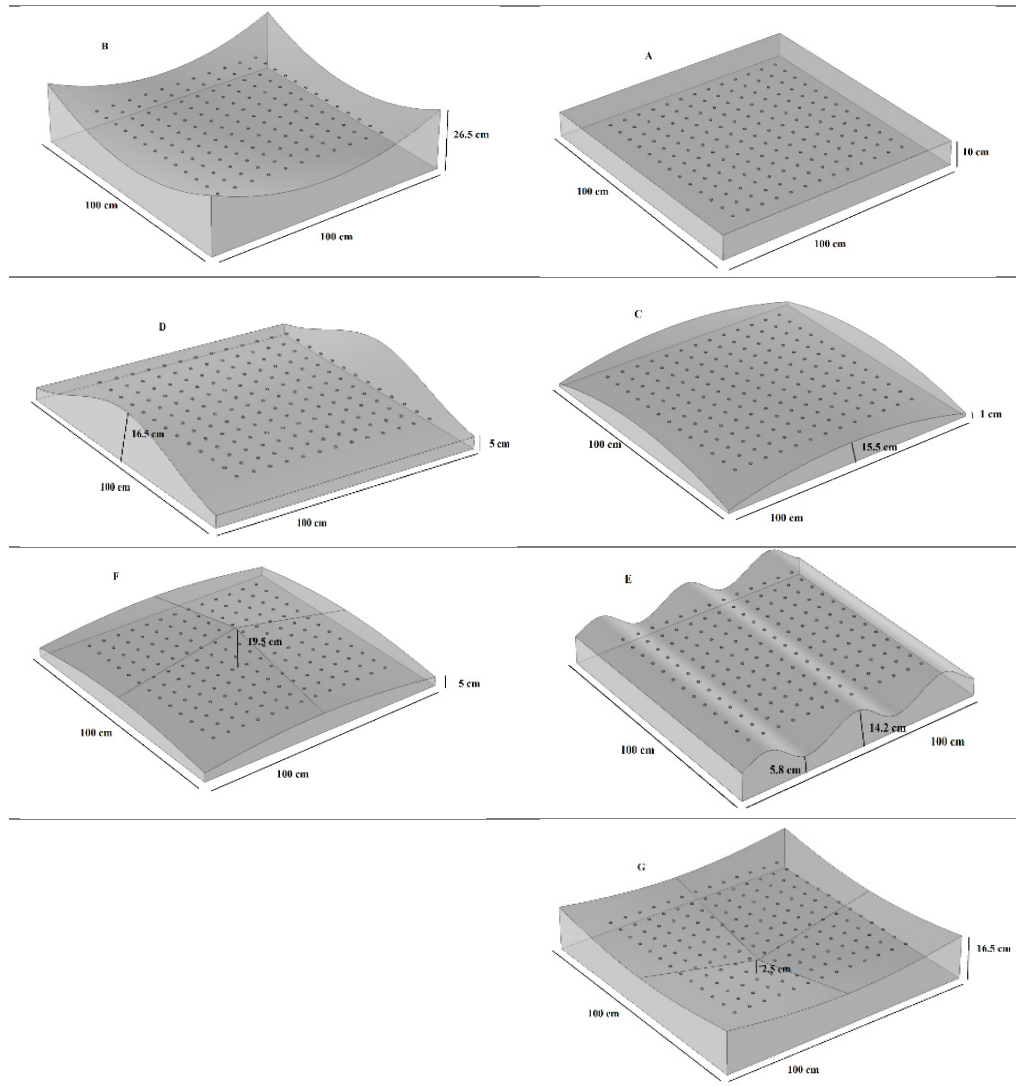
$$(\nabla^2 + K_0^2)\phi = 0 \quad ۱$$

در اینجا  $k = \omega / c_0$  عدد موج در میدان آزاد است و  $\phi$  پتانسیل سرعت است که با فشار صوت و سرعت آکوستیکی ذرات مرتبط است. امپدانس آکوستیکی صفحه ریز سوراخ نسبت به هوا طبق فرمول Maa (۱۷) از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$Z = \frac{32\eta t}{\sigma \rho_0 c_0 d^2} \left[ \left( 1 + \frac{k^2}{32} \right)^{1/2} + \frac{\sqrt{2}}{32} K \frac{d}{t} \right] + i \frac{\omega t}{\sigma c_0} \left[ 1 + \left( 9 + \frac{K^2}{2} \right)^{-1/2} + 0.85 \frac{d}{t} \right]$$

$$K = d \sqrt{\frac{\omega \rho_0}{4\eta}}$$

در اینجا  $d$  قطر حفرات،  $t$  ضخامت پانل، ضریب ویسکوزیته و نسبت پرفوریشن برحسب درصد می‌باشد. شرایط مرزی Dirichlet- to- Neumann (۱۸) که در بخش ورودی کانال مجازی بکارگرفته شده است، موجب می‌شود که موج صوتی بدون انعکاس از این مرز عبور کند. ضریب جذب مورب عبارت است از نسبت فشار موج پراکنده



شکل ۲. طرح‌های مورد مطالعه و خصوصیات ساختاری آن‌ها

جدول ۱. خصوصیات ساختاری جاذب‌های ریز سوراخ

theta	beta	Lx	Ly	Effective Height	MPP properties	dh	tp	$\sigma$
۴۵[deg]	۴۵ [deg]	۱۰۰۰[mm]	۱۰۰۰[mm]	۱۰۰[mm]		۰/۵[mm]	۱[mm]	۰.۰۱۶

عامل تأثیرگذار بر رفتار آکوستیکی این دسته از جاذب‌ها است. در این مطالعه ارتفاع یا عمق محفظه پشتی صفحات سوراخ‌دار یکسان و برابر با ۱۰۰ میلی‌متر در تمامی طرح‌ها در نظر گرفته شد. با توجه به شکل دار بودن صفحات، عمق پشت صفحه ریز سوراخ با ارتفاع مؤثر تعریف شد

شکل ظاهری صفحه ریز سوراخ انتخاب شدند و به منظور مقایسه از صفحه ریز سوراخ تخت (A) به عنوان رفرنس بهره گرفته شد (شکل ۲). خصوصیات ساختاری صفحات ریز سوراخ در تمامی حالت‌ها یکسان در نظر گرفته شده است (جدول ۲). ارتفاع پشت صفحات ریز سوراخ یک

جدول ۲. مساحت مؤثر صفحات ریز سوراخ

طرح	A	B	C	D	E	F	G
مساحت مؤثر (m <sup>2</sup> )	۱	۱/۰۸	۱/۰۲	۱/۰۴	۱/۱۱	۱/۰۲	۱/۰۲۵

برای پیش‌بینی میزان عملکرد صوتی ساختارهای صوتی مختلف را دارد.

نتایج میزان ضریب جذب مایل به روش عددی ابتدا طرح‌های موردنظر در محیط سه‌بعدی نرم‌افزار کامسول رسم شد و با در نظر گرفتن شرایط مرزی مناسب، ضریب جذب اریب در زاویه ۴۵ درجه در فرکانس ۱ تا ۵۰۰ هرتز شبیه‌سازی شد. در هر مرحله نتایج ضریب جذب طرح موردنظر با ریز سوراخ تخت (A) مقایسه شده است. شکل ۴. نشان‌دهنده میزان ضریب جذب شکل "A" می‌باشد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود فرکانس رزونانسی در فرکانس ۴۴۰ هرتز با مقدار ۰/۹۵ ایجاد شده است.

همان‌طور که به‌وضوح مشخص است در شرایط یکسان از لحاظ ساختاری و عمق مؤثر، طرح "B" یا به عبارتی شکل مقعر، ضریب جذب بالاتری نسبت به شکل رفرنس (تخت) دارد. پیک رزونانسی در شکل مقعر به سمت چپ، یعنی فرکانس ۳۸۰ هرتز شیفت و مقدار کمی پیک ماکزیمم برابر با ۰/۹۵ است که برابر با مقدار پیک رزونانسی در شکل تخت است.

شکل ۶ نشان می‌دهد که تفاوت اندکی بین میزان ضریب جذب شکل "C" و صفحه سوراخ‌دار رفرنس (A) وجود دارد و این تفاوت در فرکانس‌های زیر ۳۵۰ هرتز به نفع شکل "C" است؛ اما میزان آن ناچیز می‌باشد. پیک رزونانسی در هر دو طرح یکسان و در فرکانس حدود ۴۴۰ هرتز است که در طرح "C" مقدار جذب در نقطه پیک برابر با ۰/۸۵ و کمتر از طرح "A" است.

در شکل ۷- مشخص است که طرح "D" نسبت به شکل تخت دارای ضریب جذب بهتری در فرکانس‌های زیر ۴۰۰ هرتز می‌باشد. پیک رزونانسی خیلی ملایمی در فرکانس ۴۴۰ هرتز با مقدار ۰/۸۵ دارد.

و با انتگرال‌گیری از حجم پشت صفحه سوراخ‌دار به دست آمد. ضریب جذب نرمال ( $\theta=0$ ) برای جاذب و سطوحی تعریف شده است که دارای سطح تخت باشند. به عبارتی موج صوتی با زاویه صفر و یا به عبارتی به‌صورت عمود بر روی سطح جاذب فرود آید. وقتی سطح جاذبی شکل دار است عملاً موج صوتی با زاویه صفر بر سطح فرود نمی‌آید و همین امر امکان تعریف و محاسبه ضریب جذب نرمال را در این اشکال غیرممکن می‌کند؛ بنابراین در این مطالعه ضریب جذب مایل در زاویه  $\theta=45$  و با ثابت فرض کردن  $\beta=45$  محاسبه و با شکل تخت به‌عنوان رفرنس مقایسه شدند.

#### محاسبه مساحت مؤثر $M_{pp}$

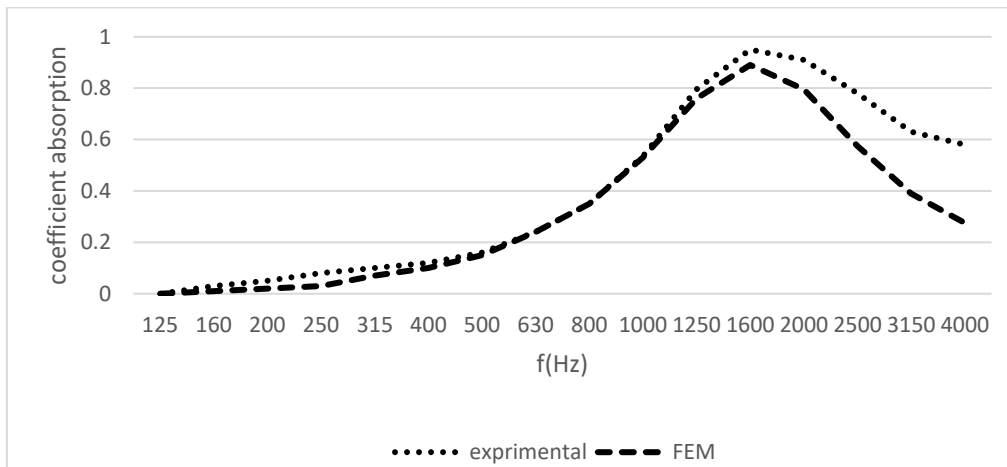
با توجه به اینکه صفحات شکل دار مساحت بیشتری نسبت به صفحه تخت دارند؛ و همین امر ممکن است باعث افزایش ضریب جذب در صفحات شکل دار شده باشد، در این قسمت مساحت هر کدام از صفحات اندازه‌گیری شده است. به همین منظور و با توجه به نامنظم بودن شکل‌ها، واژه‌ای به نام مساحت مؤثر تعریف شد. برای به دست آوردن مساحت مؤثر هر کدام از شکل‌ها، از طرح موردنظر انتگرال‌گیری شد.

#### یافته‌ها

##### اعتبارسنجی روش FEM

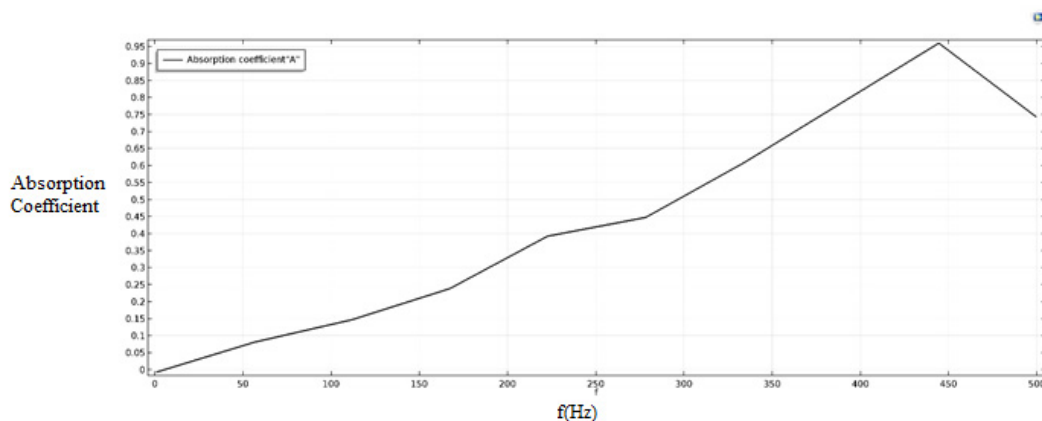
همان‌طور که از شکل ۲ مشخص است، نتایج هر ۲ روش در بیناب فرکانسی ۱/۳ اکتاوی تا حدودی نزدیک و روند نمودارها کاملاً با یکدیگر هماهنگ است. نکته مهم در این شکل نزدیکی و مشابهت روش المان محدود به روش آزمایشگاهی در فرکانس‌های پایین و میانی است و با افزایش فرکانس تفاوت دو نمودار افزایش یافته است. در مجموع می‌توان گفت که این روش اعتبار لازم





شکل ۳. مقایسه نتایج به دست آمده در شبیه‌سازی عددی در مقایسه با نتایج کسب شده از امیدانس تیوب (۱۹)\*

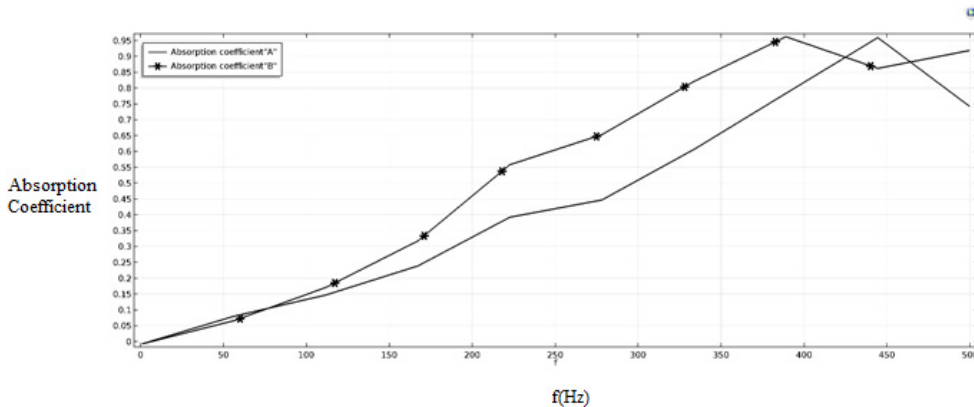
\* مشخصات صفحه سوراخ‌دار: لایه اول: ورق استیل سوراخ‌دار به ضخامت ۰/۷ mm و چگالی حجمی  $7850 \text{ kg/m}^3$ ، قطر سوراخ‌ها ۱/۴ mm و درصد تخلخل ۱۰٪، لایه دوم، فوم پلی اورتان به ضخامت ۱۰ mm چگالی حجمی  $12 \text{ kg/m}^3$ ، لایه سوم، فوم پلی اورتان به ضخامت ۱۰ mm و چگالی حجمی  $25 \text{ kg/m}^3$  و لایه چهارم، یک ورق استیل با خصوصیات مشابه لایه اول بدون سوراخ



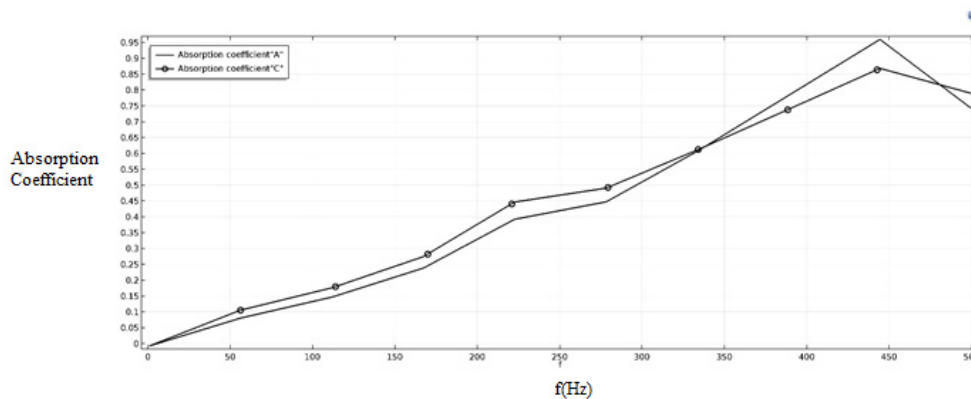
شکل ۴. نمودار ضریب جذب طرح "A" (طرح ریز سوراخ تخت)

نسبت به طرح تخت کمتر است. طرح هرم وارونه "G" در فرکانس‌های زیر ۴۳۰ هرتز دارای ضریب جذب بالاتری نسبت به شکل تخت شده است. شیفت فرکانس رزونانس در این شکل به سمت فرکانس‌های کمتر مشهود است. پیک جذبی به میزان ناچیزی از طرح "A" کمتر است. شکل ۱۱، نتایج ضریب جذب همه طرح‌ها در قالب یک نمودار را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است بهترین

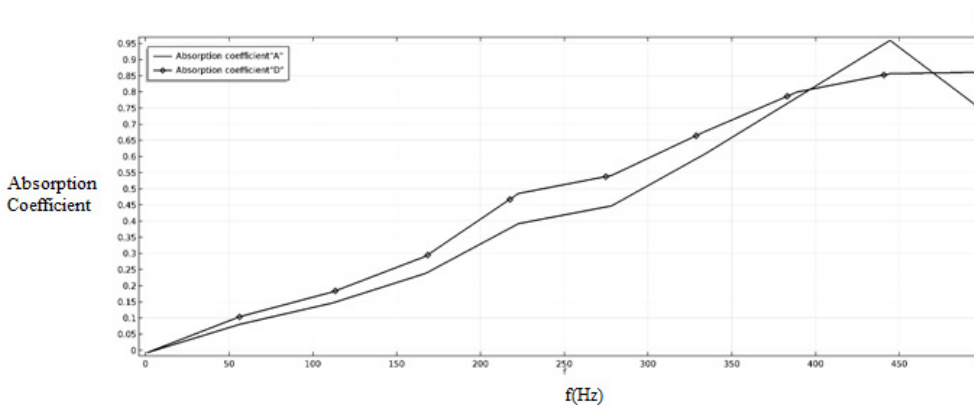
با توجه به نتایج عددی حاصل از شبیه‌سازی، دو طرح "E" و "A" رفتاری شبیه به هم در فرکانس‌های زیر ۵۰۰ هرتز نشان داده‌اند. همان‌طور که از شکل ۹ قابل فهم است، طرح "F" نه تنها کمکی به ضریب جذب نکرده است بلکه در بعضی از فرکانس‌ها باعث بدتر شدن وضعیت جذب شده است. در هر دو شکل فرکانس رزونانسی یکسان و برابر با ۴۴۰ هرتز است. مقدار پیک در شکل F برابر با ۰/۸ می‌باشد که



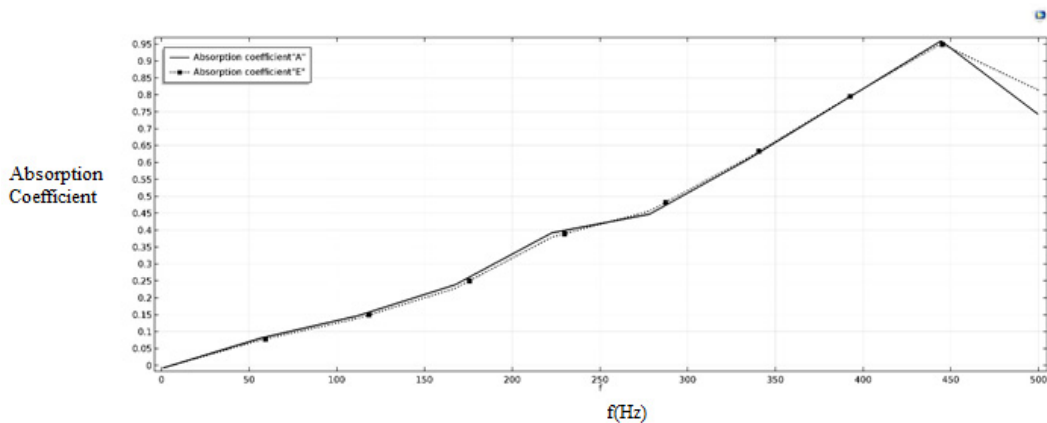
شکل ۵. مقایسه دو طرح "A" (تخت) و "B"



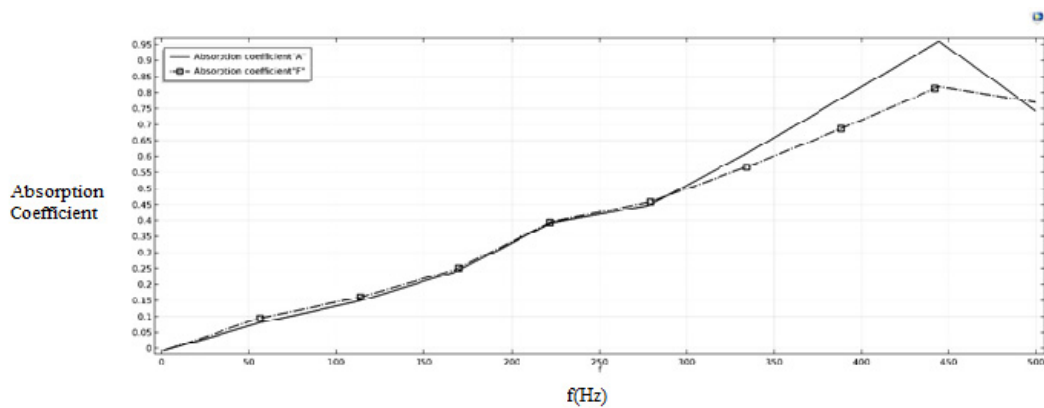
شکل ۶. مقایسه دو طرح "A" (تخت) و "C"



شکل ۷. مقایسه دو طرح "A" (تخت) و "D"



شکل ۸. مقایسه دو طرح "A" (تخت) و "E"



شکل ۹. مقایسه دو طرح "A" (تخت) و "F"

ناهمگن و اعمال شرایط مرزی مختلف است؛ بنابراین به کارگیری روش المان محدود برای حل معادلات حاکم بر سیستم هندسه محدود سه بعدی و با ناهمگنی‌های بزرگ ضروری می‌باشد و با توجه به هندسه به نسبت پیچیده در این پژوهش استفاده از روش عددی همچون المان محدود ضروری به نظر می‌رسد. مطالعات زیادی را می‌توان نام برد که از روش عددی المان محدود برای بررسی خصوصیات آکوستیکی جاذب‌های متخلخل و یا سوراخ‌دار و انواع عایق‌ها استفاده کرده اند که در این بین می‌توان به Wang (۱۶) و کیوانی (۲۰) اشاره کرد. بهبود رفتار آکوستیکی مواد جاذب صوت در فرکانس‌های پایین مسئله‌ای با اهمیت در طراحی جاذب‌های صوتی می‌باشد،

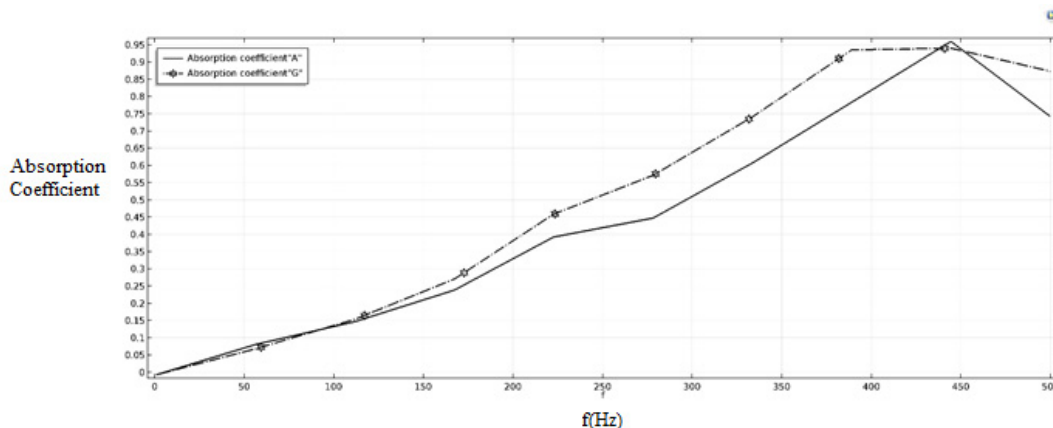
شکل از لحاظ ضریب جذب، شکل مقعر (B) است؛ و در مقام بعدی شکل هرم وارونه (G) قرار دارد.

#### نتایج محاسبه مساحت مؤثر

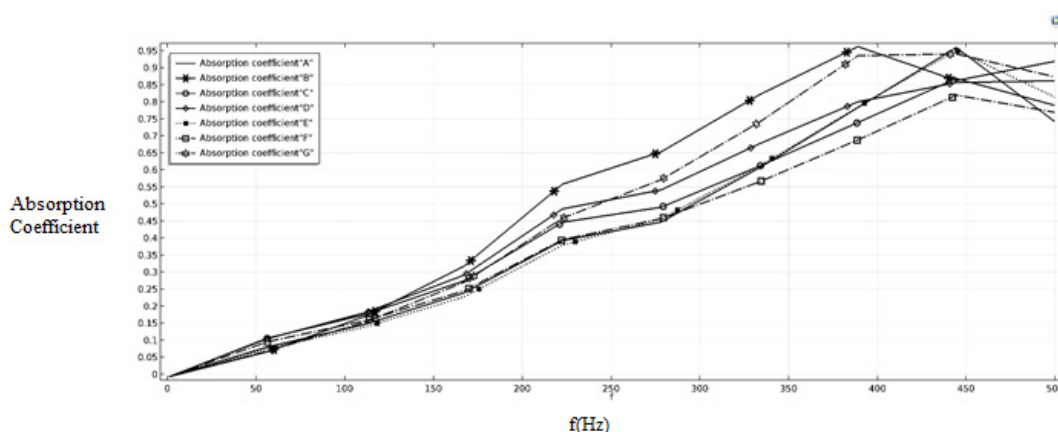
با توجه به توضیحات ارائه شده در روش کار، در جدول ۲ مساحت مؤثر هر کدام از شکل‌ها آورده شده است. داده‌های جدول، مشخص می‌کند که طرح E بیشترین مساحت و A کمترین مساحت را دارا می‌باشند.

#### بحث

روش FEM یک تکنیک عددی قدرتمند و انعطاف‌پذیر برای اجرای مدل‌های پیچیده، محیط‌های



شکل ۱۰. مقایسه دو طرح "A" (تخت) و "G"



شکل ۱۱. مقایسه ضریب جذب تمامی طرح‌ها با طرح "A" (تخت)

می‌شد صورت پذیرفته است. نتایج نشان داد که ضریب جذب ریز سوراخ با شکل‌دهی آن (منحنی شکل) بهبود یافته و به فرکانس‌های رزونانسی نزدیک‌تر شده است (۲۲). همچنین در پژوهشی که توسط خوانین و همکاران بر روی تأثیر زاویه هرم در صفحات سوراخ‌دار صورت پذیرفت، سه زاویه رأس ۲۹-۳۶ و ۲۴ درجه مورد آزمون قرار گرفتند. نتایج نشان داد که بالاترین میانه جذب در زاویه رأس ۳۶ درجه، در فرکانس ۱۰۰۰ هرتز و به میزان ۸۹/۵ درصد، در زاویه رأس ۲۹ درجه، در فرکانس ۹۰۰ هرتز، ۹۲ درصد و در زاویه رأس ۲۴ درجه، در فرکانس ۸۰۰ هرتز، ۹۳ درصد بود. همچنین آن‌ها دریافتند که با

چراکه غالباً جذب صوت فرکانس بالا در مواد جاذب صوت به‌خوبی صورت می‌گیرد و از آنجاکه میزان جذب صوت با کاهش فرکانس به سمت صفر نزدیک می‌شود، ایجاد جذب صوت بالا در فرکانس‌های پایین به‌عنوان هدفی برای سازندگان جاذب‌های صوتی مطرح می‌باشد (۲۱). این مقاله نتایج بررسی عملکرد آکوستیکی جاذب ریز سوراخ شکل دار را ارائه می‌دهد. این نتایج حاکی از این هستند که برخی از شکل‌ها (B-C-D-G) می‌تواند باعث افزایش میزان جذب در این دسته از جاذب‌ها شود. در این خصوص مطالعه‌ای توسط Lee در مورد پانل ریز سوراخ ارتجاعی<sup>۱</sup> منحنی شکل که در پشت به محفظه هوا ختم

1- Flexible

کاهش زاویه رأس هرم و با مساحت قاعده ثابت، ضریب جذب در بسامدهای اکتاو باند و در فرکانس‌های کمتر از ۱۰۰۰ هرتز افزایش می‌یابد. علاوه بر این، قله جذب به سمت فرکانس‌های پایین تغییر مکان می‌دهد (۲۳)؛ که این نتایج در تأیید نتایج حاصل از این مطالعه است.

با توجه به نمودارها و نتایج ارائه‌شده، مشخص است که طرح B بهترین کارایی را در مقایسه با شکل A (رفرنس) و بقیه طرح‌ها دارد (شکل‌های ۲ و ۹). طرح‌های G، D و C به ترتیب در رتبه‌های بعدی از لحاظ افزایش میزان ضریب جذب قرار گرفته‌اند. طرح E دقیقاً ضریب جذبی مانند شکل رفرنس و در نهایت طرح F در برخی فرکانس‌ها عملکرد جذبی بدتری از شکل رفرنس داشته است. در توضیح این عملکرد بایستی ذکر کرد که شکل دار شدن سطح جاذب باعث ایجاد فضایی در پشت آن با ارتفاع متغیر می‌شود. با نگاهی به اشکال و مراجعه به جدول ۱ می‌توان دریافت که طرح B دارای بیشترین ارتفاع ماکزیمم در لبه‌ها (۲۶/۵ cm) و کمترین ارتفاع در قسمت وسط (۰/۱ cm) است. باینکه طراحی‌ها به نحوی طراحی شده‌اند که در نهایت ارتفاع مؤثر پشت صفحه سوراخ‌دار در همه اشکال ثابت باشد؛ باین‌حال، وجود فضایی با چنین ارتفاعی در پشت صفحه روزنه دار باعث ایجاد رزونانس در برخی از فرکانس‌ها می‌شود و ممکن است که به پدیده جذب در برخی فرکانس‌ها کمک کند. خصوصیات جذبی موضعی در محفظه‌هایی با شکل غیریکنواخت به شرایط متغیر امپدانس نسبت داده می‌شود. در این خصوص می‌توان به مطالعه صورت گرفته توسط Wang و همکاران در سال ۲۰۱۰ اشاره کرد، وی با ایجاد محفظه دوزنقه‌ای شکل در پشت صفحه میکرو سوراخ‌دار و مقایسه آن با شکل معمول (مستطیل) محفظه به این نتیجه رسید که شکل محفظه پشتی در عملکرد جاذب‌های سوراخ‌دار بسیار مؤثر است و تغییرات قابل توجهی در کارایی این دسته از جاذب‌ها ایجاد می‌کند؛ که باعث بهبود عملکرد جذبی و پهن شدن محدوده جذب می‌شود (۲۴). همچنین Yang و همکاران در سال ۲۰۱۶ در مطالعه‌ای، فضای پشت صفحه سوراخ‌دار را به صورت

لانه‌زنبوری پارتیشن‌بندی کردند. نتایج حاصل نشان داد که شکل غیرمعمول فضای پشت باعث افزایش کوپلینگ بین مودهای آکوستیکی در محفظه پشتی و به طبع باعث افزایش باند جذبی می‌شود (۲۵). این مطالعات از بسیاری جهات در تأیید نتیجه به دست آمده از این مطالعه هستند. اگرچه وجود فضایی با ارتفاع متغیر توجیه‌کننده عملکرد بهتر طرح B نسبت به شکل رفرنس است اما توضیح‌دهنده عملکرد بقیه اشکال نیست؛ زیرا در تمامی حالات تعریف‌شده وجود شکل بر روی صفحه باعث ایجاد فضایی با ارتفاع متغیر در پشت صفحه سوراخ‌دار می‌شود؛ اما عملکرد آن‌ها با یکدیگر فرق دارند. طرح‌های G و D نیز دارای ارتفاع ماکزیمم ۱۶/۵ cm هستند اما نتایج نشان می‌دهند که عملکرد طرح G بهتر از D است. برای توضیح این نوع رفتار توجه به کیفیت شکل‌ها نیز دارای اهمیت است. در برخورد موج صوتی با صفحه روزنه دار غیر مسطح، قسمتی از موج به واسطه وجود حفرات وارد فضای پشت می‌شوند. امواجی که از سطح روزنه دار وارد می‌شوند یک موج فشار را به سمت ته محفظه حرکت داده و آن نیز پس از برخورد با ته محفظه به سمت بالا منعکس می‌شود و در مسیر بازگشت با یکدیگر اختلاف فاز پیدا می‌کنند زیرا مسیری که پیموده‌اند به دلیل اختلاف عمق یکسان نبوده است؛ و همین امر موجب تداخلات سازنده و احیاناً مخرب می‌شود و باعث تغییر در میزان ضریب جذب می‌شود. از طرفی زمانی که موج صوتی بر روی یک صفحه با سطح کاملاً مسطح برخورد می‌کند با همان زاویه انعکاس می‌یابد. وقتی سطح از حالت مسطح خارج می‌شود یا اصطلاحاً شکل دار یا زاویه‌دار می‌شود، بخشی از انرژی به جهتی غیر از زاویه انعکاس منتشر می‌شود. این انتشار و پراکندگی موج انعکاسی را به جهات مختلف، پخش می‌گویند. هر سطح ناصافی می‌تواند یک پخش‌کننده محسوب شود. نحوه انعکاس موج در فضای پشت و جلوی صفحه کاملاً به شکل صفحه بستگی دارد. بدین‌صورت که یک طرح باعث تمرکز و هدایت موج صوتی به سمت سطح جاذب و در نتیجه افزایش عملکرد و طرحی دیگر باعث پراکندگی و دور کردن موج

### نتیجه گیری

۱. شکل دار کردن باعث ایجاد عمق متغیری در پشت صفحه سوراخ‌دار می‌شود به عبارتی وقتی صفحه‌ای شکل دار است ارتفاع پشت آن در طول صفحه متغیر است و همین باعث ایجاد رزونانس در برخی فرکانس‌ها می‌شود و ممکن است که به پدیده جذب در برخی فرکانس‌ها کمک کند.

۲. شکل‌دهی موجب ایجاد اختلاف‌فاز، زاویه‌دار شدن موج صوتی و همچنین نحوه انعکاسات موج صوتی می‌گردد و در نهایت باعث تغییر در ضریب جذب می‌شود.

۳. شکل دار بودن باعث افزایش سطح جذبی شده و انتظار بر این بود که افزایش سطح به پدیده جذب کمک می‌کند اما به نظر می‌رسد این عامل در این مطالعه کمک‌کننده نبوده است.

### تشکر و قدردانی

این مطالعه حاصل طرح پژوهشی دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی تهران (شماره: ۳۶۰۵۲) می‌باشد. بدین‌وسیله نویسندگان مراتب تشکر و قدردانی خود را از معاونت پژوهشی این دانشگاه اعلام می‌داریم. همچنین کد اخلاق این مطالعه IR.TUMS.SPH.REC.1396.3451 می‌باشد.

صوتی از سطح جاذب می‌شود. نتایج این مطالعه نشان داد که به‌طور کلی طرح‌هایی که دارای حالت مقعر و یا فرورفتگی‌های منظم یا غیرمنظمی هستند ضریب جذب بهتری نسبت به طرح‌های دیگر و طرح رفرنس دارند؛ و طرح‌هایی که دارای حالت کلی محدب یا برآمده هستند ضریب جذب کمتری نسبت به بقیه اشکال و طرح رفرنس نشان داده‌اند. بهترین مثال در این مورد دو طرح G و D می‌باشد. طرح G تقریباً شکل مقعر دارد و شکل D دارای حالت هرمی و برآمده می‌باشد باوجود ارتفاع ماکزیمم برابر، طرح G ضریب جذب بهتری نسبت به D دارد. نکته دیگر وابستگی ضریب جذب به زاویه موج صوتی است. وقتی جاذب اصطلاحاً شکل دار باشد باعث زاویه‌دار شدن موج صوتی خواهد شد، بدیهی است که ضریب جذب در برخی زوایا بیشتر از برخی زوایای دیگر است. مسئله دیگر در این خصوص که بایستی ذکر شود این است که شکل دار شدن سطح جاذب باعث افزایش سطح جذبی می‌شود. نتایج جدول ۳ نشان داد که تمامی طرح‌های تعریف‌شده، مساحت بیشتری از شکل معمول (A) دارند. بیشترین مساحت مربوط به شکل E بود، میزان افزایش مساحت نسبت به شکل A، ۰/۱۱ مترمربع بود. انتظار بر این بود که افزایش مساحت جاذب به پدیده جذب کمک کند که نتایج نشان‌دهنده این مسئله نبود.

### REFERENCES

1. Cox TJ, D'Antonio P. Acoustic Absorbers and Diffusers: Theory, Design and Application. Spon Press. London and New York. 2005
2. Nelson DI, Nelson RY, Concha-Barrientos M, Fingerhut M. The global burden of occupational noise-induced hearing loss. Am. J. Ind. Med. 2005; 48(6):446-58.
3. Picard M, Girard SA, Simard M, Larocque R, Leroux T, Turcotte F. Association of work-related accidents with noise exposure in the workplace and noise-induced hearing loss based on the experience of some 240,000 person-years of observation. Accid Anal Prev. 2008; 40(5):1644-52.
4. Ni CH, Chen ZY, Yin Z, Zhou JW, Pan JJ, Nian LI, Jun WA, Liang CK, Zhang ZZ, Zhang YJ. Associations of blood pressure and arterial compliance with occupational noise exposure in female workers of textile mill. Chin. Med. J. 2007; 120(15):1309-13.
5. Niemann H, Bonnefoy X, Braubach M, Hecht K, Maschke C, Rodrigues C, Robbel N. Noise-induced annoyance and morbidity results from the pan-European LARES study. Noise and Health. 2006; 8(31):63.
6. Dalton DS, Cruickshanks KJ, Klein BE, Klein R, Wiley TL, Nondahl DM. The impact of hearing loss on quality of life in older adults. J. Gerontol. 2003; 43(5):661-8.
7. 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.
8. Babisch W. Transportation noise and cardiovascular risk: updated review and synthesis of epidemiological studies indicate that the evidence has increased. *Noise and Health*. 2006; 8(30):1.
  9. Berglund B, Hassmen P, Job RS. Sources and effects of low-frequency noise. *J. Acoust. Soc. Am.* 1996 May; 99(5):2985-3002.
  10. Waye KP, Bengtsson J, Kjellberg A, Benton S. Low frequency noise "pollution" interferes with performance. *Noise and health*. 2001; 4(13):33.
  11. Smith MG, Croy I, Ögren M, Waye KP. On the influence of freight trains on humans: a laboratory investigation of the impact of nocturnal low frequency vibration and noise on sleep and heart rate. *PloS one*. 2013; 8(2):e55829.
  12. Chen WH, Lee FC, Chiang DM. On the acoustic absorption of porous materials with different surface shapes and perforated plates. *Journal of sound and vibration*. 2000; 237(2):337-55.
  13. Easwaran V, Munjal ML. Finite element analysis of wedges used in anechoic chambers. *J. Sound Vib*. 1993; 160(2):333-50.
  14. Bolton JS, Green ER. Sound transmission through foam-lined double panel constructions. *The J. Acoust. Soc. Am* .1986; 79(S1):S31-.
  15. Tsay HS. Analysis of normal incidence absorption of pyramidal polyurethane foam by three-dimensional finite element frequency domain acoustical analysis. *J. Acoust. Soc. Am*. 2006; 120(5):2686-93.
  16. 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.
  17. Maa DY. Potential of microperforated panel absorber. *J. Acoust. Soc. Am*. 1998; 104(5):2861-6.
  18. Keller JB, Givoli D. Exact non-reflecting boundary conditions. *J. Comput. Phys*. 1989; 82(1):172-92.
  19. Hashemi Z, Monazzam MR, Fahim A. Estimation of Sound Absorption Performance of Complex Perforated Panel Absorbers by Numerical Finite Element Method and Examining the Role of Different Layouts Behind It. *Fluct. Noise Lett*. 2019:1950013.
  20. Keyvani S, Monazzam Esmailpour M, Fasih-Ramandi F, Ahmadi Asour A, Kolahdouzi M, Hashemi Z. Impact of Layout Sequence of the Natural and Synthetic Adsorbents in Double-Layered Composites on Improving the Natural Fiber Acoustic Performance Using the Numerical Finite Element Method. *J Health Saf Work*. 2021; 11 (3) :368-383
  21. Pirani M, Monazzam M R, Pourjandaghi S Q. Correlation Between the Acoustic and Cell Morphology of Polyurethane/Silica Nanocomposite Foams: Effect of Various Proportions of Silica at Low Frequency Region. *J Health Saf Work* .2021; 11 (1) :1-12
  22. Lee YY, Lee EW, Ng CF. Sound absorption of a finite flexible micro-perforated panel backed by an air cavity. *J. Sound Vib*. 2005; 287(1-2):227-43.
  23. Khavanin A, Sadeghi M, et al. The effect of apex angle on acoustic absorption coefficient in perforated sheet with pyramidal geometry. *Journal of Acoustical Engineering Society of Iran*. 2016; 4: 21-28. [Persian]
  24. 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.
  25. Yang C, Cheng L. Sound absorption of microperforated panels inside compact acoustic enclosures. *J Sound Vib*. 2016; 360:140-55.