

ORIGINAL RESEARCH PAPER

# Numerical Optimization of Microperforated panel Absorbers: The Impact of Series-Parallel Configuration, Air Gap, and Porous Materials on the Sound Absorption Bandwidth

Mohammad Javad SheikhMozafari<sup>1</sup>, Zahra Hashemi<sup>2\*</sup>, Ali Mohsenian<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Occupational Health Engineering, School of Public Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

<sup>2</sup>Department of Occupational Health Engineering, School of Medical Sciences, Behbahan Faculty of Medical Sciences, Behbahan, Iran.

<sup>3</sup>Department of Occupational Health and Safety Engineering, School of Health, Shiraz University of Medical Sciences, Shiraz, Iran.

Received: 20-10-2024

Accepted: 19-11-2024

## ABSTRACT

**Introduction:** Micro-perforated panel (MPP) absorbers are emerging as next-generation absorbers due to their considerable advantages. However, their main drawback compared to other absorbers is their limited bandwidth. This study aims to investigate methods for enhancing the bandwidth of an MPP in the frequency range of 1 to 1500 Hz through simulation using the Finite Element Analysis (FEA) in COMSOL software.

**Material and Methods:** The modeling was conducted using FEA in COMSOL version 5.3a. To increase the bandwidth, techniques such as series-parallel configurations, symmetrical and asymmetrical air gap depths, and the incorporation of two porous absorbing materials in symmetric and asymmetric air gap layers were employed. In the initial phase, the best configuration was selected and retained for the subsequent stages.

**Results:** The optimal arrangement involved two upper MPPs having larger holes and a lower perforation percentage compared to the two lower MPPs. It was also found that increasing the depth difference between the air layers of the upper and lower MPPs led to a greater increase in bandwidth than when they were closer together. Furthermore, the use of fibrous porous materials in one of the layers resulted in a reduction of resonance peak while enhancing the bandwidth.

**Conclusion:** MPP absorbers exhibit diverse behaviors due to their Helmholtz structure and parametric design. If their constituent parameters are tailored to match the acoustic characteristics of the target sound, they achieve optimal efficiency. Additionally, employing numerical methods such as FEA serves as a suitable alternative to more costly laboratory methods.

**Keywords:** Micro-perforated panel, Finite element numerical method, Bandwidth increase

## HOW TO CITE THIS ARTICLE

SheikhMozafari MJ, Hashemi Z, Mohsenian A. Numerical Optimization of Microperforated panel Absorbers: The Impact of Series-Parallel Configuration, Air Gap, and Porous Materials on the Sound Absorption Bandwidth. *J Health Saf Work*. 2024; 14(4): 772-795.

## 1. INTRODUCTION

Noise is one of the most well-known environmental stressors, negatively affecting behavioral, physiological, and psychological factors.

As such, noise pollution is considered as one of the most serious global public health issues. In general, when ambient sound pressure levels exceed 70 dB, physiological responses in humans begin to appear. One effective method of controlling and reducing

\* Corresponding Author Email: [z\\_hashemi26@yahoo.com](mailto:z_hashemi26@yahoo.com)

ambient sound pressure levels is using sound absorbers. Sound absorbers are generally classified into two types: porous absorbers and resonant absorbers. Porous absorbers, such as fibrous and granular types, have several limitations. Firstly, to achieve adequate absorption at low frequencies, they must be as thick as the wavelength of the incident sound, which is why they typically perform poorly at low frequencies. Secondly, their fibrous and granular nature can cause skin and respiratory issues in humans. Additionally, due to particle dispersion, they are unsuitable for environments like restaurants and food industries. Micro-perforated panel (MPP) absorbers, a type of resonator absorber, have gained significant attention over the past few decades and have been introduced as an alternative to porous absorbers. Typically, an MPP consists of a metallic or plastic panel with holes or slits smaller than one millimeter, backed by an air cavity of a specific thickness. Recently, MPPs have been widely used for reducing environmental noise and sounds generated in indoor spaces such as residential buildings, offices, theaters, cinemas, and more. Despite the many advantages of MPPs, their resonance-based absorption mechanism limits their sound absorption to the natural frequency range of the MPP, restricting their performance to 2 or 3-octave bands. This limitation reduces their suitability for environments with a wide frequency range, particularly those in residential, office, and commercial settings, where frequencies typically range from 1 to 1500 Hz. The acoustic performance of a Micro-Perforated Panel (MPP) absorber is typically measured using the absorption coefficient, often through an impedance tube. However, due to the high costs and complexity of using this equipment, alternative methods like algorithms and numerical simulations are used. Accordingly, this study evaluates the acoustic performance of an MPP absorber through Finite Element Analysis (FEA) in COMSOL across the 1-1500 Hz frequency range. To enhance the absorption bandwidth, techniques such as series-parallel configurations, increasing air layer depth, and adding porous fibrous materials were employed. The Johnson-Champoux-Allard (JCA) model was used for the fibrous materials, and the Maa model for the MPP absorber.

## 2. MATERIAL AND METHODS

2.1 One of the simplest methods for calculating the acoustic impedance of an MPP is through

the equations introduced by Maa. To calculate the acoustic impedance of the MPP using these equations, the Equivalent Circuit Method (ECM) was applied.

$$Z_{MPP} = Z_{resistance} + Z_{reactance} = R + j\omega M \quad (1)$$

$$R = \frac{32\eta t}{\rho_0 c_0 d^2 p} \left( \sqrt{1 + \frac{x^2}{32}} + \frac{xd\sqrt{2}}{8t} \right) \quad (2)$$

$$M = \frac{t}{pc_0} \left( 1 + \left( 9 + \frac{x^2}{2} \right)^{-1/2} + \frac{0.85d}{t} \right) \quad (3)$$

$$x = \frac{d}{2} \sqrt{\frac{\omega\rho}{\eta}} \quad (4)$$

### Calculation of the Absorption Coefficient of the Air Layer Behind the MPP Panel

An MPP absorber consists of an air layer of a specified thickness (D) behind it, which has a significant impact on the acoustic performance of the MPP. The acoustic impedance of this air layer is calculated using the following formula:

$$Z_D = -jZ_0 \cot(kD) \quad (5)$$

Where k represents the wave number, and  $Z_0$  is the impedance of air.

The total acoustic impedance of the MPP absorber surface and, ultimately, the absorption coefficient are obtained using the following equations:

$$Z_{total} = Z_{MPP} + Z_D \quad (6)$$

$$R = \frac{Z_{total} - Z_0}{Z_{total} + Z_0} \quad (7)$$

$$\alpha = 1 - |R|^2 \quad (8)$$

### Calculation of the Acoustic Impedance of Porous Materials

The acoustic impedance of these materials was calculated using the Johnson-Champoux-Allard (JCA) model. This model was developed in 1992 by Allard and Champoux to simulate sound propagation in porous materials. They proposed two parameters for calculating the acoustic impedance of porous materials: bulk modulus and

equivalent density.

$$\rho(\omega) = \alpha_{\infty}\rho_0 \left[ 1 + \frac{\sigma\phi}{j\omega\rho_0\alpha_{\infty}} \left( 1 + \frac{4i\alpha_{\infty}^2\eta\omega\rho_0}{(\sigma\Lambda\phi)^2} \right)^{1/2} \right] \tag{9}$$

$$k(\omega) = k\rho_0 \left( k - (k - 1) \left[ 1 + \frac{\sigma\phi}{i\omega\rho_0\alpha_{\infty}N_{pr}} \left( 1 + \frac{4i\alpha_{\infty}^2\eta N_{pr}\omega\rho_0}{(\sigma\Lambda\phi)^2} \right)^{1/2} \right]^{-1} \right) \tag{10}$$

*Identifying the Optimal Serial-Parallel Configuration*

In this phase, four different scenarios were designed to assess the best sound absorption performance across the frequency range of 1 to 1500 Hz. These scenarios are outlined in Table 1, and the arrangement of the MPPs in each of the four configurations is illustrated in Figure 1.

*Impact of Air Cavity Depth on the Acoustic Performance of the MPP Hybrid Absorber*

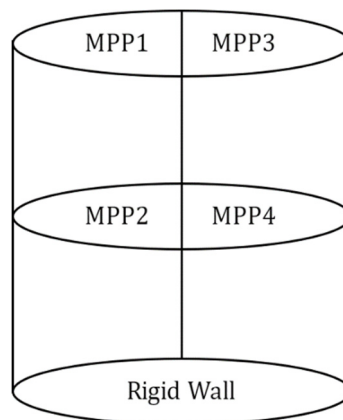
In this phase, the influence of air cavity depth on acoustic performance was analyzed. After identifying the optimal configuration from the previous step, that scenario was retained for this phase, and the effect of air layer depth was assessed. In this hybrid absorber, there were two air cavities, D1 and D2. The total air cavity depth was set to 50 mm. Figure 2 illustrates the various scenarios explored.

*Adding a Porous Material to the Air Layers*

In the next step, the impact of adding a porous material to the air gap behind the MPP was investigated to assess its effect on the acoustic behavior of the MPP. Four different scenarios were considered for this case, as shown in Figure 3. Thus, the MPPs were arranged symmetrically, and two types of porous materials—fibrous and wood chips—were placed in two air cavities.

**Table 1:** Analyzed Scenarios for Identifying the Optimal Series-Parallel Configuration

	Mpp1		Mpp2		Mpp3		Mpp4	
	holes diameter (d), mm	perforation ratio (φ), %	holes diameter (d), mm	perforation ratio (φ), %	holes diameter (d), mm	perforation ratio (φ), %	holes diameter (d), mm	perforation ratio (φ), %
Scenario 1	0.3	1	0.1	4	0.4	2	0.2	3
Scenario 2	0.1	4	0.3	1	0.2	3	0.4	2
Scenario 3	0.3	4	0.1	1	0.4	3	0.2	2
Scenario 4	0.1	1	0.3	4	0.2	2	0.4	3



**Fig. 1:** Arrangement of the four MPPs in the four defined scenarios.

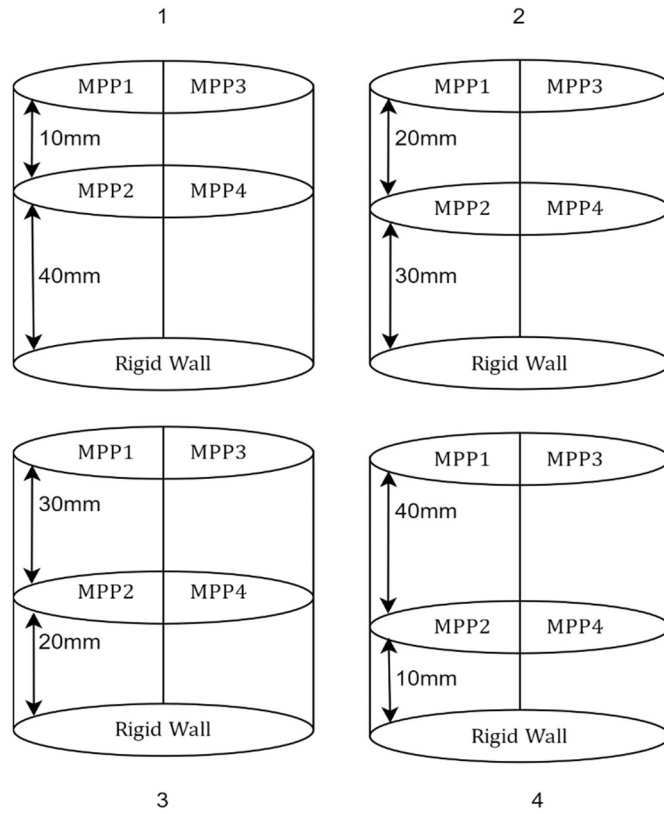


Fig. 2: Various Scenarios Examining Different Air Layer Depths in a Homogeneous Manner

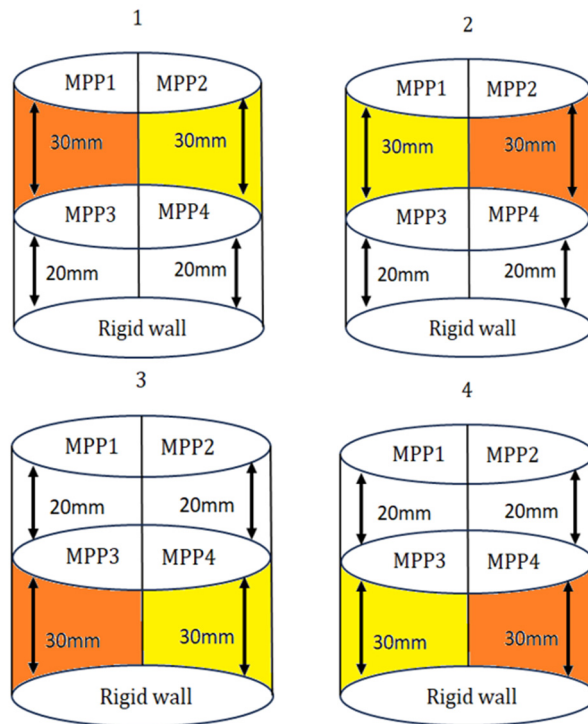


Fig. 3: Investigating the effect of adding porous material in air layers symmetrically on acoustic behavior

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

#### Optimal Series-Parallel Configuration

The results of the technique used to determine the optimal series-parallel arrangement are presented in Figure 4.

Among the evaluated configurations, Scenario 1 aligns best with the study's goals. In this scenario, the upper MPPs have larger hole diameters and lower porosity, compared with the lower MPPs, yielding the most effective results. In the 500-1000 Hz range, important for speech in office and residential environments, the average sound absorption coefficients for the four scenarios were 0.86, 0.75, 0.74, and 0.62, respectively. A frequency

shift was also observed, with Scenario 1 achieving a sound absorption coefficient of 0.58 at 400 Hz, compared to 500 Hz in Scenario 4.

#### Impact of Homogeneous Air Cavity Depth Adjustment on the Acoustic Performance of the Combined MPP Absorber

The results of this phase, aimed at evaluating the influence of homogeneous air layer depth on the overall acoustic behavior of the absorber, are displayed in Figure 5.

Scenario 4 shows slightly higher peak absorption and a broader bandwidth compared to the other scenarios. Increasing the distance between MPPs

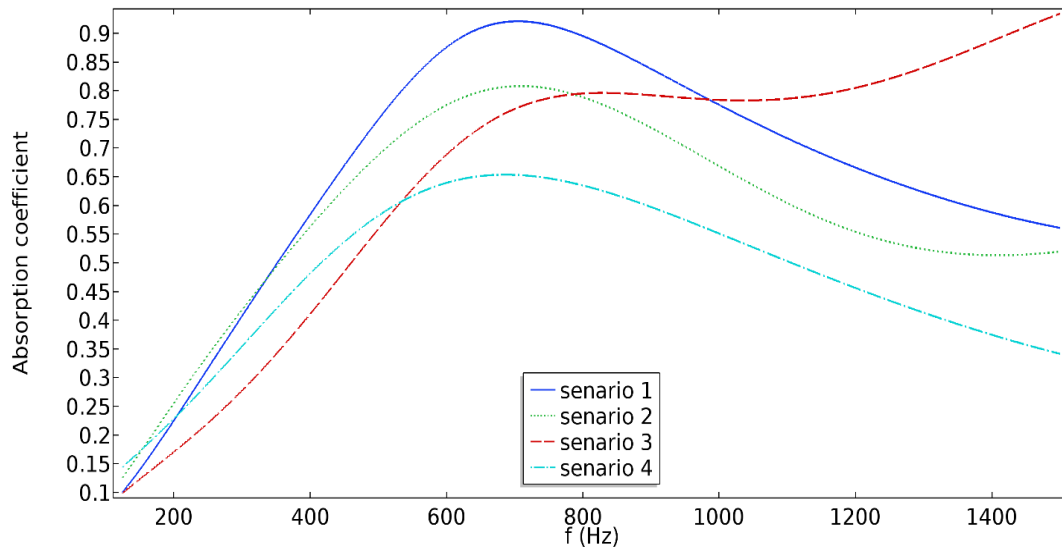


Fig. 4: The effect of different series-parallel configuration on the acoustic behavior of the MPP absorber

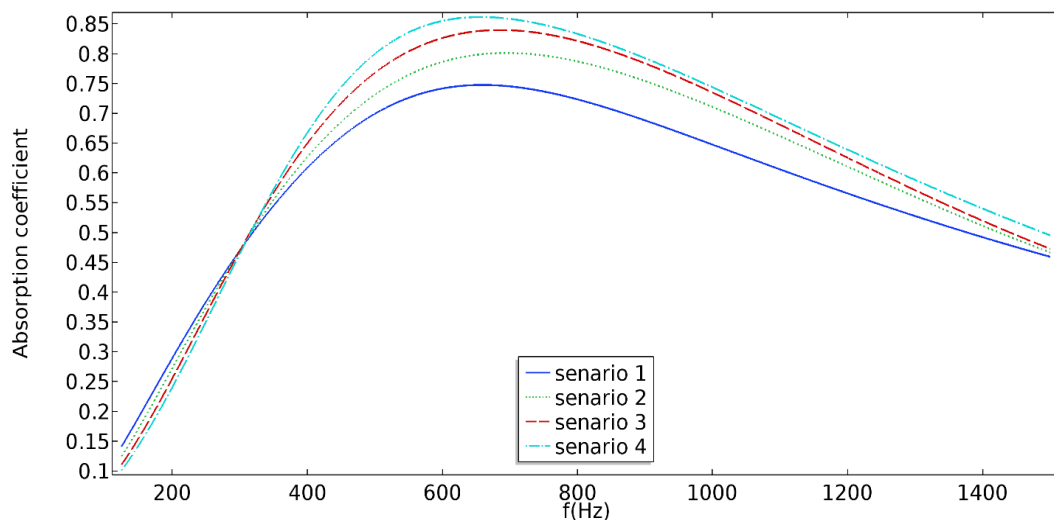


Fig. 5: The effect of homogeneous air layer depth on the overall acoustic behavior of the MPP absorber.

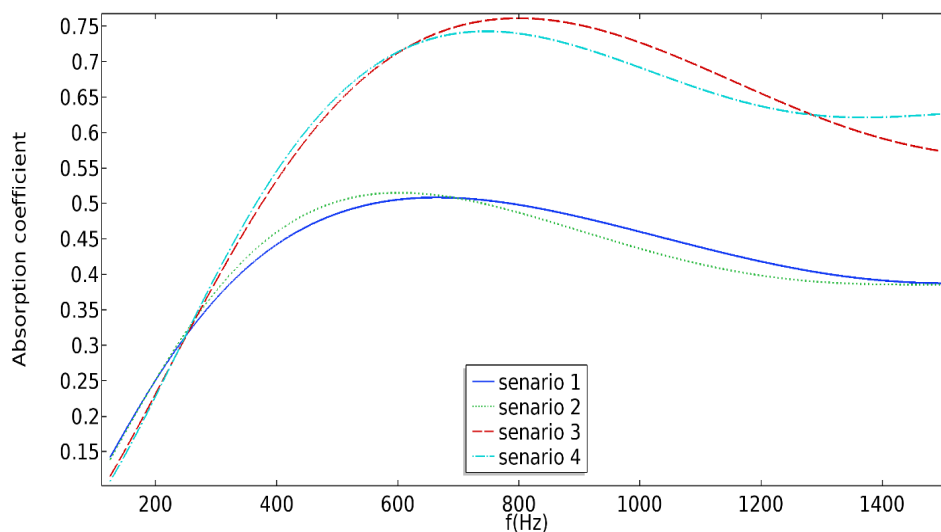


Fig. 6: The effect of adding porous material symmetrically in air layers

and MPP2 improved absorption in the 500–900 Hz range, but this effect did not extend to frequencies below 300 Hz. In the 500–1000 Hz range, the average absorption coefficients were 0.63, 0.67, 0.70, and 0.72, with scenario 4 performing the best. A frequency shift was observed, with Scenario 1 showing an absorption coefficient of 0.68 at 500 Hz, while the same value occurred at 412 Hz in Scenario 4.

#### *Impact of Adding a Porous Material to the Air Layers*

In this phase, the effect of adding porous material homogeneously to the air layers was examined, and the results are shown in Figure 6.

As shown in Figure 6, scenarios 3 and 4 demonstrated better performance compared to Scenarios 1 and 2. In scenarios 3 and 4, porous materials were placed in air cavities 3 and 4, while only air was present in cavities 1 and 2. The average sound absorption coefficient in the 500 to 1000 Hz frequency range for scenarios 1 and 2 was approximately 0.44, while for scenarios 3 and 4, it was around 0.68. Notably, there was no observed significant frequency shift in these scenarios.

In symmetrical configurations, placing porous materials in the lower cavities resulted in higher absorption because it reduced impedance, allowing sound waves to enter, while placing them in the upper cavities increased impedance, causing more reflection and less absorption. No significant

frequency shift was observed across the scenarios.

#### 4. CONCLUSIONS

Micro-Perforated Panel (MPP) absorbers are advanced sound absorbers with benefits such as aesthetics, durability, non-flammability, and resistance to environmental factors, but they have limited bandwidth. This study explored ways to expand their bandwidth through different configurations and modeling techniques using Finite Element Method (FEM) in COMSOL. Key strategies included using MPPs with varying hole diameters and porosities in series-parallel setups, adjusting air layer depths, and adding porous materials. Results showed that using larger holes and lower porosity for upper MPPs improved low-frequency absorption, while greater air layer differences expanded bandwidth. Including porous materials increased bandwidth at the cost of lowering the resonant peak. The study concludes that MPP absorbers can be optimized as an alternative to traditional absorbers by carefully adjusting their functional parameters for specific environments.

#### 5. ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to express their sincere gratitude to the Behbahan Faculty of Medical Sciences for their financial support under grant number 402112.

## بهینه‌سازی عددی جاذب‌های پنبلی میکروسوراخدار: تاثیر استفاده از پیکربندی سری-موازی، فاصله هوایی و مواد متخلخل بر پهنای باند جذب صوتی

محمدجواد شیخ‌مظفری<sup>۱</sup>، زهرا هاشمی<sup>۲\*</sup>، علی محسنیان<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران  
<sup>۲</sup>گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده علوم پزشکی بهبهان، بهبهان، ایران  
<sup>۳</sup>گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای و ایمنی کار، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی شیراز، شیراز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۷/۲۹، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۸/۲۹

### چکیده

**مقدمه:** جاذب‌های میکروسوراخدار (MPP) به عنوان جاذب‌های نسل بعد دارای مزایای زیادی هستند. اما بزرگترین عیب آن‌ها نسبت به جاذب‌های دیگر پهنای باند اندک آن‌ها می‌باشد. هدف از این مطالعه بررسی چگونگی افزایش پهنای باند یک MPP در بازه فرکانسی ۱ تا ۱۵۰۰ هرتز از طریق شبیه‌سازی با استفاده از روش المان محدود (FEM) در نرم افزار کامسول می‌باشد.

**روش کار:** برای انجام مدلسازی از FEM در نرم افزار کامسول نسخه ۵,۳a استفاده گردید. به منظور افزایش پهنای باند از تکنیک‌های پیکربندی سری-موازی، عمق‌های هوایی متقارن و نامتقارن و بکاربردن دو ماده جاذب متخلخل در لایه‌های هوا به صورت متقارن و نامتقارن استفاده گردید. در مرحله اول ابتدا بهترین پیکربندی انتخاب و سپس برای مراحل بعدی ثابت در نظر گرفته شد.

**یافته‌ها:** بهترین حالت چیدمان پیکربندی حالتی است که دو MPP بالاتر نسبت به دو MPP پایین‌تر، دارای سوراخ‌های بزرگتر و درصد تخلخل کمتری باشد. همچنین مشخص گردید در صورتی که اختلاف عمق لایه‌های هوا دو MPP بالا و پایین از هم بیشترین باشد، پهنای باند افزایش بیشتری پیدا می‌کند تا زمانی که بهم نزدیک‌تر باشند. همچنین با استفاده از مواد متخلخل الیافی در یکی از لایه‌ها پیک رزونانس کاهش اما پهنای باند افزایش پیدا کرد.

**نتیجه‌گیری:** جاذب‌های MPP به دلیل ساختار هلمهولتزی و ساختار پارامتریک خود دارای رفتارهای متفاوتی هستند و در صورتی که پارامترهای تشکیل دهنده آن‌ها متناسب با خصوصیات آکوستیکی صدای مد نظر طراحی شود بالاترین راندمان را خواهند داشت. همچنین استفاده از روش‌های عددی مثل FEM جایگزین مناسبی برای روش‌های هزینه بر آزمایشگاهی باشد.

**کلمات کلیدی:** جاذب میکروسوراخدار، روش عددی المان محدود، افزایش پهنای باند

(MPP) به عنوان نوعی جاذب رزوناتور در طی دو دهه اخیر توجهات زیادی را به خود جلب کرده است و به عنوان جایگزینی برای جاذب‌های متخلخل معرفی شده است (۱۸). به طور کلی MPP معمولاً یک صفحه فلزی یا پلاستیکی با سوراخ‌ها یا شیارهای با سایز کمتر از یک میلی‌متر است که در پشت آن یک فاصله هوایی با ضخامت مشخصی قرار گرفته است. اخیراً MPPها به طور گسترده برای کاهش صدای محیطی و اصوات تولید شده در محیط‌های داخلی مثل محیط‌های مسکونی، اداری، تئاترها، سینما و... بکار برده می‌شود. مکانیسم کاهش صدا در MPPها بدین صورت است که هنگام برخورد موج صوتی با آن، میکروسوراخ‌ها و حفره هوایی پشت خود دچار رزونانس می‌شوند و انرژی صوتی تبدیل به گرما می‌شود (۱۹). عملکرد جذب صوتی این جاذب‌ها به قطر و عمق سوراخ‌ها، نسبت میزان سوراخ‌ها به کل مساحت صفحه و عمق فاصله هوایی بستگی دارد (۲۰). MPPها علاوه بر کنترل صدا در محیط‌های داخلی در بسیاری از محیط‌های دیگر مانند موانع صوتی، مافله‌های خودروها، تجهیزات پزشکی و سیستم‌های انتقال نیرو نیز کاربرد دارند (۱۸، ۲۱). جدای از همه مزایای جاذب‌های MPP به دلیل مکانیسم رزونانسی در این دسته از جاذب‌ها، عمده جذب در محدوده فرکانس طبیعی MPP صورت می‌گیرد، لذا محدوده جذب و عملکردی آن محدود به ۲ یا ۳ اکتاو باند است که این موضوع کاربرد آنها را در بسیاری از محیط‌ها محدود می‌کند. و از آنجا که اینگونه جاذب‌ها بیشتر در محیط‌های مسکونی و اداری و تجاری که بازه فرکانسی بین ۱ تا ۱۵۰۰ هرتز است قرار می‌گیرند عملکرد مناسبی ندارند. تاکنون مطالعات مختلفی به منظور بهبود پهنای باند جاذب‌های MPP انجام شده است مثل تکنیک چند لایه بندی، افزایش عمق حفره هوایی، تغییر شکل حفره هوایی، تیوب‌های گسترده شده (extended tubes)، shunted loudspeakers و... که همگی این موارد نتایج مختلف و مثبتی را ایجاد کرده‌اند (۲۲-۲۴).

عملکرد آکوستیکی یک جاذب MPP را با استفاده از یک شاخصی به نام ضریب جذب اندازه‌گیری می‌کنند که

صدا یکی از شناخته شده‌ترین استرسور محیطی است که بر فاکتورهای رفتاری و خلقی، فیزیولوژیکی و روانی تاثیر مخرب می‌گذارد (۱، ۲). از این رو آلودگی صوتی یکی از جدی‌ترین مشکلات برای بهداشت عمومی جهانی است. تخمین زده می‌شود که در کشور آمریکا یک چهارم از کارگران دارای مواجهه صوتی خطرناک هستند (۳). همچنین طبق گزارش منتشر شده از سوی آژانس محیط زیست اروپا بیش از ۲۲ میلیون نفر تحت تاثیر اثرات مخرب صدا قرار دارند (۴). به طور کلی هنگامی که تراز فشار صوت زمینه از ۷۰ دسی‌بل بیشتر شود پاسخ‌های فیزیولوژیکی در انسان ظاهر می‌شود (۵). طبق پیش‌بینی‌ها حدود ۱۰۴ میلیون نفر با صدای بالاتر از ۷۰ دسی‌بل مواجهه دارند و حدود ۲۲ میلیون آمریکایی در محیط‌هایی مشغول به کار هستند که برای صحبت کردن مجبور به بالا بردن صدای خود هستند (۶). بالا بودن تراز فشار صوت زمینه در محیط‌های داخلی مثل محیط‌های اداری، سالن‌های کنفرانس و کنسرت و... موجب کاهش کیفیت آکوستیکی محیط می‌شود. یکی از روش‌های کنترل و کاهش تراز فشار صوت زمینه استفاده از جاذب‌های صوتی می‌باشد (۷). جاذب‌های صوتی به کلی به دو دسته جاذب‌های متخلخل و جاذب‌های رزونانت تقسیم می‌شوند (۸). جاذب‌های متخلخل مثل انواع جاذب‌های الیافی (۹-۱۲) و گرانوله (۱۳، ۱۴) دارای محدودیت‌های فراوانی هستند، اولاً برای اینکه جذب مناسبی در فرکانس‌های پایین داشته باشند باید ضخامتی در حدود طول موج صدای برخوردی داشته باشند و به همین دلیل اصولاً جذب خوبی در فرکانس‌های پایین ندارند، و ثانیاً به دلیل اینکه ماهیت ذره‌ای و الیافی باعث ایجاد مشکلات پوستی و تنفسی برای انسان‌ها می‌شوند. همچنین به دلیل پخش ذرات برای محیط‌هایی مثل رستوران و صنایع غذایی مناسب نیستند (۱۵، ۱۶). علاوه بر این، جاذب‌های متخلخل به دلیل ضعف‌های مکانیکی، استقامتی و اشتعال پذیری خود برای استفاده در محیط‌های خشن و صنعتی مناسب نیستند (۱۷). جاذب‌های میکروسوراقدار



$$R = \frac{32\eta t}{\rho_0 c_0 d^2 p} \left( \sqrt{1 + \frac{x^2}{32}} + \frac{xd\sqrt{2}}{8t} \right) \quad (2)$$

$$M = \frac{t}{pc_0} \left( 1 + \left( 9 + \frac{x^2}{2} \right)^{-1/2} + \frac{0.85d}{t} \right) \quad (3)$$

$$x = \frac{d}{2} \sqrt{\frac{\omega\rho}{\eta}} \quad (4)$$

در فرمول‌های بالا R بخش حقیقی امپدانس آکوستیکی، معرف تلفات ویسکوز موج صوتی منتشره در میان سوراخ‌ها است و به رزیستانس معروف است و M بخش موهومی که تحت عنوان راکتانس خوانده می‌شود اشاره به جرم هوای متحرک در میان سوراخ‌ها دارد.  $\rho_0$  دانسته هوا،  $c_0$  سرعت موج صوتی در هوا،  $\omega$  سرعت زاویه‌ای، t ضخامت پانل، p درصد سوراخ شدگی، d قطر سوراخ‌ها و  $\eta$  ویسکوزیته هوا می‌باشد. معمولاً MPP با فاصله ای به عمق D برای جذب حداکثری نسبت به دیوار نصب می‌شوند.

**محاسبه ضریب جذب لایه هوا در پشت صفحه MPP**  
همانطور که گفته شده یک جاذب MPP از یک لایه هوا با یک ضخامت مشخص (D) در پشت آن تشکیل شده است و این لایه هوا بر عملکرد آکوستیکی MPP تاثیر زیادی دارد. برای محاسبه امپدانس آکوستیکی این لایه هوا از فرمول زیر استفاده می‌شود:

$$Z_D = -jZ_0 \cot(kD) \quad (5)$$

در فرمول بالا k عدد موج و  $Z_0$  امپدانس هوا می‌باشد امپدانس آکوستیک سطح کلی جاذب MPP و در نهایت ضریب جذب از روابط زیر بدست می‌آید:

$$Z_{total} = Z_{MPP} + Z_D \quad (6)$$

در محدوده ۰ تا ۱ می‌باشد. برای اندازه‌گیری ضریب جذب در بیشتر اوقات از دستگاهی به امپدانس تیوب استفاده می‌شود که با استفاده از روش تابع انتقال و مطابق با استانداردهای ۲-۱۰۵۳۵ ISO یا ۱۰۵۰ ASTM ضریب جذب را اندازه‌گیری می‌کند (۲۵). اما متأسفانه دستیابی به امپدانس تیوب و امکانات آزمایشگاهی آن در بیشتر موارد به دلیل هزینه‌های بالا، پیچیدگی کار با دستگاه، هزینه ساخت نمونه با ابعاد میکرو سوراخ‌ها و... امکان‌پذیر نیست، بنابراین روش‌های جایگزین مثل الگوریتم‌ها و مدل‌های ریاضی و مدل‌های عددی گزینه‌های مناسبی می‌باشند.

لذا هدف از این مطالعه بررسی عملکرد آکوستیکی یک نوع جاذب MPP شبیه‌سازی شده با روش عددی المان محدود (FEM) در نرم‌افزار کامسول در بازه فرکانسی ۱ تا ۱۵۰۰ هرتز می‌باشد همچنین به منظور بهبود پهنای باند جذبی آن از تکنیک‌های مختلف مثل استفاده از پیکربندی سری و موازی، افزایش عمق لایه هوا در پشت MPP و استفاده از دو نوع ماده متخلخل الیافی در حفره هوا استفاده شد. به منظور محاسبه خواص آکوستیکی دو نوع ماده الیافی استفاده شده، از مدل ریاضی Johnson-Champoux-Allard (JCA) استفاده و بمنظور محاسبه خصوصیات آکوستیکی جاذب MPP از مدل Maa بهره گرفته شد.

### روش کار

**محاسبه ضریب جذب آکوستیکی یک صفحه MPP ساده**  
یکی از ساده‌ترین روش‌های محاسبه امپدانس آکوستیکی MPP با استفاده از معادلات معرفی شده توسط Maa می‌باشد (۲۶). برای محاسبه امپدانس آکوستیکی MPP با استفاده از این معادلات باید از روش مدار معادل (ECM) استفاده کرد. در این روش امپدانس آکوستیکی، اختلاف فشار و سرعت ذره به ترتیب معادل با امپدانس الکتریکی، اختلاف ولتاژ و جریان الکتریکی تصور می‌شود.

$$Z_{MPP} = Z_{resistance} + Z_{reactance} = R + j\omega M \quad (1)$$

جدول ۱: مشخصات آکوستیکی دو ماده متخلخل استفاده شده در حفره هوایی MPP

ماده متخلخل	ضخامت (cm)	تخلخل (%)	مقاومت جریان هوا ( $Nm^{-4}s$ )	طول مشخصه ویسکوز ( $\mu m$ )	طول مشخصه حرارتی ( $\mu m$ )	تور توزیته
ماده الیافی	۳	۸۷	۲۴۱۶۵	۹۹	۳۰۱	۱.۹۳
تراشه‌ی چوب	۳	۶۳	۶۰۸۰	۶۶	۱۹۴	۲.۲

$$K_C(\omega) = \omega \sqrt{\frac{\rho(\omega)}{k(\omega)}}$$

$$R = \frac{Z_{total} - Z_0}{Z_{total} + Z_0} \quad (7)$$

$$Z_S = -i \frac{Z_C(\omega)}{\phi} \cdot \cot(K_C(\omega) \cdot d)$$

$$\alpha = 1 - |R|^2 \quad (8)$$

### محاسبه امیدانس آکوستیکی ماده متخلخل

در نهایت با استفاده از فرمول‌های ۷ و ۸ ضریب جذب ماده متخلخل تعیین می‌شود. برای بررسی تاثیر اضافه شدن ماده متخلخل از مشخصات دو ماده متخلخل الیافی و تراشه چوب ذکر شده در مطالعات دیگر استفاده شد (۱۰).

یکی از روش‌های بهبود پهنای باند جاذب‌های MPP استفاده از یک ماده متخلخل در حفره هوایی پشت آن می‌باشد. در این مطالعه از دو نوع ماده متخلخل (یک ماده الیافی و تراشه‌های چوب) استفاده شد. برای محاسبه امیدانس آکوستیکی آن‌ها از مدل ریاضی JCA استفاده شد. این مدل در سال ۱۹۹۲ توسط آلارد و چمپوکس برای مدلسازی انتشار صوت در داخل مواد متخلخل توسعه داده شد (۲۷). آن‌ها برای محاسبه امیدانس آکوستیکی مواد متخلخل دو پارامتر مدول بالک و چگالی معادل را پیشنهاد دادند:

### روش المان محدود در نرم‌افزار کامسول

همانطور که گفته شد، در این مطالعه برای بررسی رفتار آکوستیکی جاذب MPP و مواد متخلخل از روش المان محدود در نرم‌افزار کامسول استفاده شد. روش‌های دیگری هم مثل روش المان مرزی (BEM) بررسی این موارد وجود دارد اما FEM به نسبت روشی پرکاربردتر و پراهمیت‌تر است. در این روش با استفاده از نرم‌افزار کامسول موج آکوستیکی از طریق فشار آکوستیکی در یک دامنه مشخصی مدلسازی می‌شود. در روش FEM برای تعیین رفتار آکوستیکی در حوزه فرکانس و برای بدست آوردن توزیع فشار ایجاد شده در سیال در اثر نفوذ موج صوتی از معادله هلمهولتز استفاده می‌شود (۱۵).

$$\rho(\omega) = \alpha_{\infty} \rho_0 \left[ 1 + \frac{\sigma \phi}{j \omega \rho_0 \alpha_{\infty}} \left( 1 + \frac{4i \alpha_{\infty}^2 \eta \omega \rho_0}{(\sigma \Lambda \phi)^2} \right)^{1/2} \right]$$

$$k(\omega) = k \rho_0 \left( k - (k - 1) \left[ 1 + \frac{\sigma \phi}{i \omega \rho_0 \alpha_{\infty} N_{pr}} \left( 1 + \frac{4i \alpha_{\infty}^2 \eta N_{pr} \omega \rho_0}{(\sigma \Lambda \phi)^2} \right)^{1/2} \right]^{-1} \right)^{-1}$$

برای محاسبه مدول بالک و چگالی موثر به ۵ پارامتر مقاومت جریان هوا ( $\sigma$ )، تخلخل ( $\phi$ )، تور توزیته ( $\alpha_{\infty}$ )، طول مشخصه ویسکوز ( $\Lambda$ ) و حرارتی ( $\Lambda$ ) نیاز است که این پارامترها در جدول ۱ مشخص شده‌اند.

در نهایت با استفاده از امیدانس آکوستیکی مشخصه  $Z_C(\omega)$  و عدد موج پیچیده  $k(\omega)$  امیدانس آکوستیکی سطحی تعیین و ضریب جذب مشخص می‌شود.

$$Z_C(\omega) = \sqrt{\rho(\omega) \cdot k(\omega)}$$

مطابق با استاندارد ISO ۱۰۵۳۴-۲، یک کانال مستطیلی شکل دو بعدی نماینده لوله امیدانس برای تعیین ضریب جذب نرمال است. نوع مش در نظر گرفته شده برای رسیدن به بهترین جواب همگرا مثلثی و سائز مش‌بندی از نوع یکنواخت و برابر با یک ششم طول موج صوت مورد نظر در نظر گرفته شد (۲۸). در این روش

معادله هلمهولتز در شرایط مرزی آکوستیک فشار تعریف می‌شود و برای دیواره‌ها و پشت ماده متخلخل شرایط مرزی صلب در نظر گرفته شد. با اعمال شرایط مرزی برای MPP امیدانس آکوستیکی ویژه MPP نسبت به هوا با استفاده از فرمول Maa تعیین شد (۲۹). در برخی اوقات مدل‌سازی تنها برای بخش کوچکی از جاذب صورت می‌گیرد اما گاهی موجی صوتی خاصیت تناوبی دارد، که در این چنین شرایطی از شرط مرزی تناوبی استفاده می‌شود تا زمان محاسبه و همچنین حجم اشغال شده در نرم‌افزار کاهش یابد (۲۸). با استفاده از این شرط، معادله موج برای یک بخش کوچک حل می‌شود و نتایج آن به تمام بخش‌های دیگر تعمیم داده می‌شود.

محدوده امیدانس ماده متخلخل در نظر گرفته شد. در این بخش مدل‌های مختلفی مثل دلانی بازلی (DB)، یا JCA وجود دارد که همانطور که در بخش ۳،۲ گفته شد در این مطالعه از مدل JCA به دلیل دقت بالای آن استفاده گردید. برای استفاده از این مدل به ۵ پارامتر نیاز داریم که مشخصات آن در جدول ۱ ذکر شده است. در شکل ۱ لوله امیدانس مش‌بندی شده با روش FEM در نرم‌افزار کامسول نشان داده شده است.

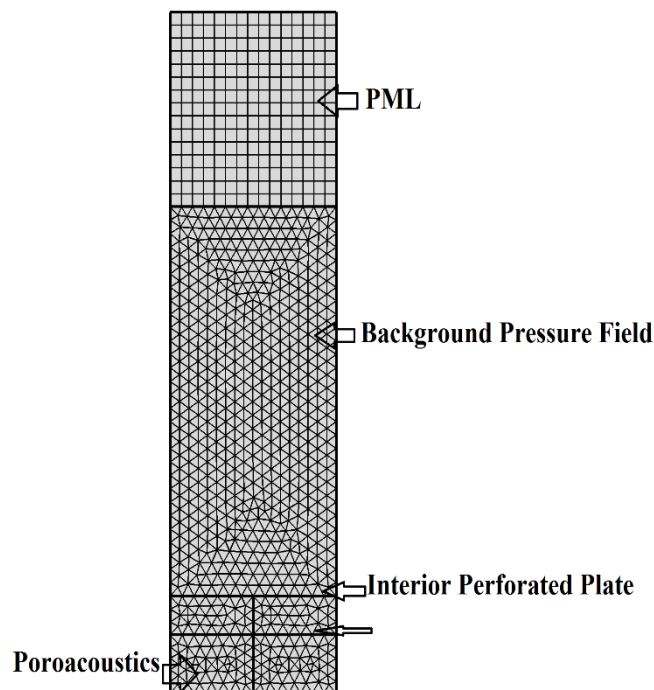
#### بررسی سناریوهای مختلف به منظور بهبود پهنای باند

در این مطالعه ابتدا به منظور تعیین بهترین پیکربندی که عملکرد بالاتری را در فرکانس‌های کمتر از ۱۵۰۰ هرتز ایجاد کند سناریوهای مختلف بررسی شد. بعد از تعیین بهترین سناریو، این حالت برای مراحل بعد به صورت ثابت در نظر گرفته شد.

#### تعیین بهترین حالت چیدمان پیکربندی سری-موازی

در این مرحله ۴ سناریو مختلف برای بررسی بهترین

PML یا (Perfectly matched layer) در نرم‌افزار کامسول یک بخش مجازی است که در ابتدای کانال لوله امیدانس فرضی قرار داد. استفاده از این آیتم باعث می‌شود که موج صوتی بدون انعکاس از این ناحیه عبور کند و موج صوتی به طور کامل جذب شود. بخش دیگر شرط مرزی پروآکوستیک (Poroacoustics Domain) است که برای



شکل ۱: امیدانس تیوب فرضی مش‌بندی شده در نرم‌افزار کامسول

عملکرد آکوستیکی پرداخته شده است. پس از تعیین بهترین سناریوهای انتخاب شده در مرحله قبل، آن سناریو در این مرحله ثابت در نظر گرفته شده و تاثیر عمق لایه هوا روی آن بررسی شد. در این جاذب ترکیبی دو حفره هوایی به نام D1 و D2 وجود دارد. در این مرحله جمع کل عمق حفره هوایی برابر با ۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. در شکل ۳ سناریوهای مختلف نشان داده شده است.

قابل ذکر است که در این مرحله ۴ حفره به صورت دو به دو همگن هستند، بدین معنا که حفره زیر MPP1 و MPP3 به یک اندازه تغییر می‌کنند و این مورد برای MPP2 و MPP4 نیز صادق است. اما در مرحله بعد حفره‌ها به صورت ناهمگن تغییر پیدا می‌کنند، بدین صورت که حفره‌های زیر MPPهای ۳ و ۴ ثابت و به ترتیب ۴۰ و ۱۰ میلی‌متر در نظر گرفته شدند و حفره‌های زیر MPPهای

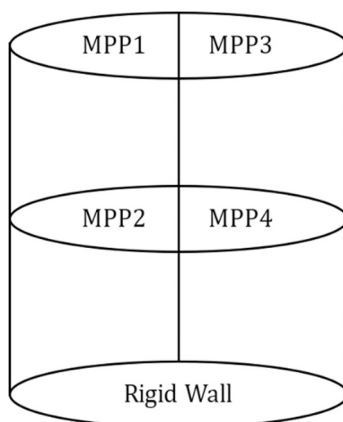
عملکرد جذب صوتی در بازه فرکانسی ۱ تا ۱۵۰۰ هرتز تعیین شد که در جدول ۲ نشان داده شده است. ترتیب قرارگیری MPPها در این ۴ سناریو در شکل ۲ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۲ مشخص است در این جاذب ترکیبی شبیه‌سازی شده، MPP1 و MPP3 در بالا و MPP2 و MPP4 در پایین قرار دارند، به عبارت دیگر MPP1 با MPP3 و MPP2 با MPP4 به صورت موازی با هم قرار دارند و مجموع MPP1 و MPP3 با MPP2 و MPP4 به صورت سری بایکدیگر قرار دارند. هدف از بررسی این سناریوها این بود که تاثیر میزان قطر سوراخ و درصد تخلخل بروی میزان جذب بررسی شود.

### تعیین تاثیر عمق حفره هوایی بر عملکرد آکوستیکی جاذب ترکیبی MPP

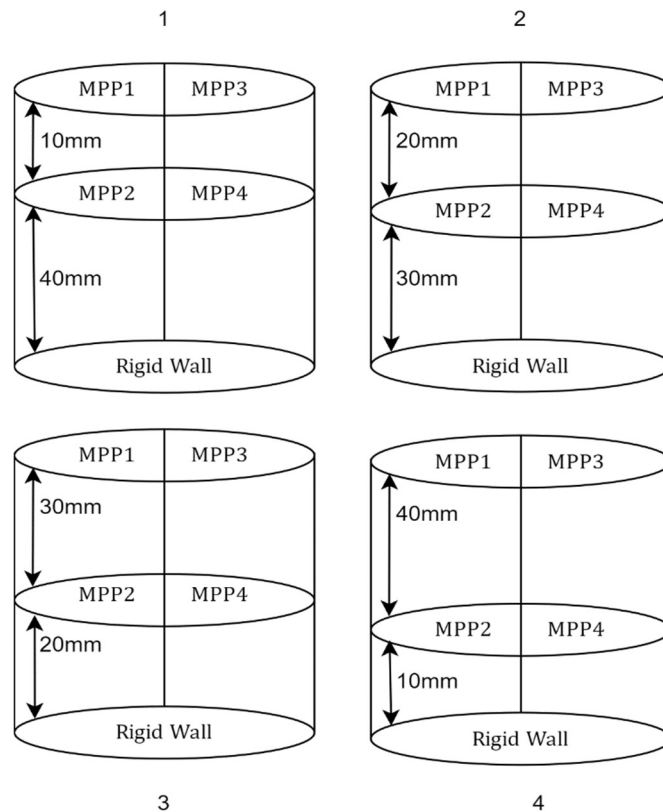
در این مرحله به بررسی تاثیر عمق حفره هوا بر

جدول ۲: سناریوهای مختلف تعریف شده برای چیدمان مختلف پیکربندی سری-موازی

سناریوها	MPP 1		MPP 2		MPP 3		MPP 4	
	درصد تخلخل (%)	قطر سوراخ (d) mm	درصد تخلخل (%)	قطر سوراخ (d) mm	درصد تخلخل (%)	قطر سوراخ (d) mm	درصد تخلخل (%)	قطر سوراخ (d) mm
الف	۱	۰.۳	۴	۰.۱	۲	۰.۴	۳	۰.۲
ب	۴	۰.۱	۱	۰.۳	۳	۰.۲	۲	۰.۴
ج	۴	۰.۳	۱	۰.۱	۳	۰.۴	۲	۰.۲
د	۱	۰.۱	۴	۰.۳	۲	۰.۲	۳	۰.۴



شکل ۲: ترتیب قرارگیری MPP ۴ در ۴ سناریو تعریف شده



شکل ۳: سناریوهای مختلف بررسی عمق‌های مختلف لایه هوا به صورت همگن

تراشه چوب در دو عدد از حفره‌های هوایی قرار گرفتند. در شکل بالا، رنگ نارنجی مربوط به ماده متخلخل تراشه چوب و رنگ زرد مربوط به ماده متخلخل الیافی است. در مرحله بعد مواد متخلخل در لایه‌های هوای نامتقارن قرار گرفتند که در شکل ۷ نشان داده شده است. منظور قرارگیری نامتقارن این است مواد متخلخل هم در لایه‌های بالا و هم لایه‌های پایین قرار دارند، ولی در حالت متقارن یا در قسمت بالا قرار داشتند یا در پایین، و همچنین در این حالت نامتقارن لایه‌های هوا ۱ با ۲ و یا ۳ با ۴ هم اندازه نیستند.

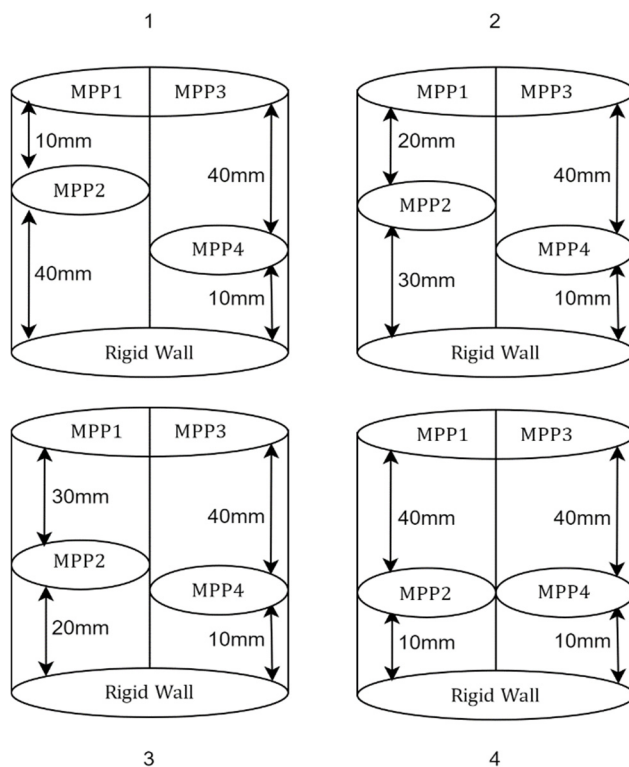
### ≡ یافته‌ها

**بهترین حالت چیدمان پیکربندی سری-موازی**  
نتایج این تکنیک که به منظور یافتن بهترین حالت چیدمان سری-موازی انجام شد در شکل ۷ نشان داده

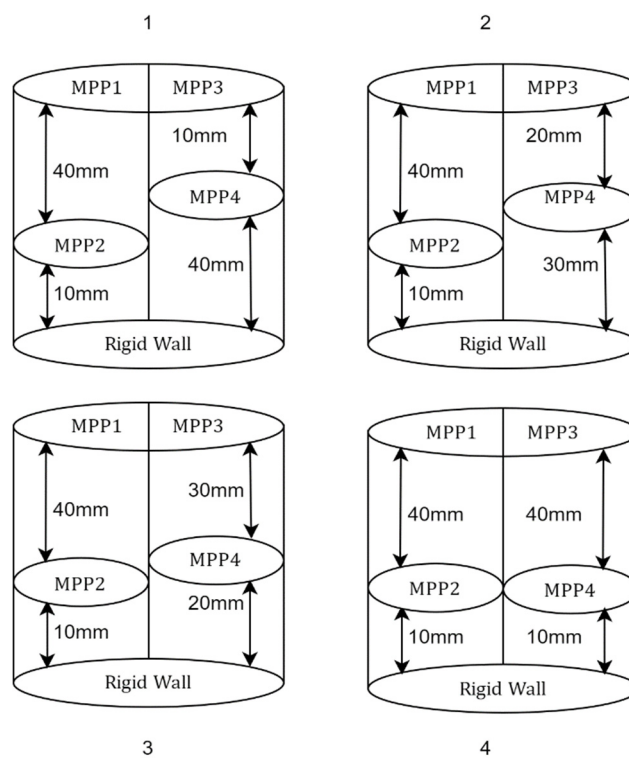
۱ و ۲ به صورت متغیر و هر کدام اندازه متفاوتی دارند. سناریوهای در نظر گرفته شده برای این مرحله در شکل ۴ نشان داده شده است. در مرحله بعد دقیقاً همانند مرحله قبل حفره‌های ۱ و ۲ ثابت در نظر گرفته شدند و حفره‌های ۳ و ۴ متغیر در نظر گرفته شدند. در شکل ۵ سناریوهای مفروض نشان داده شده است.

### اضافه کردن ماده متخلخل در لایه‌های هوا

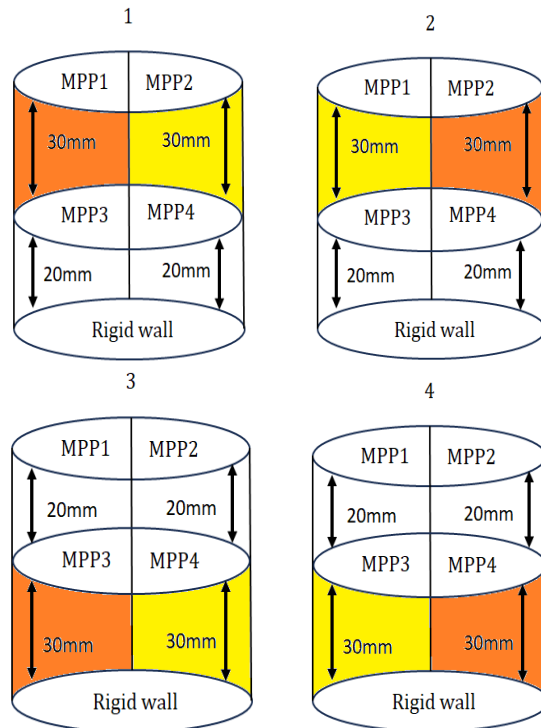
در مرحله بعد نیز به بررسی اضافه کردن یک ماده متخلخل در فاصله هوایی پشت MPP پرداخته شد تا تاثیر این عمل بر رفتار آکوستیکی MPP بررسی شود. برای این حالت نیز ۴ سناریو مختلف در نظر گرفته شد که در شکل ۶ نشان داده شده است. در این مرحله چیدمان MPPها متقارن در نظر گرفته شد و دو ماده متخلخل الیافی و



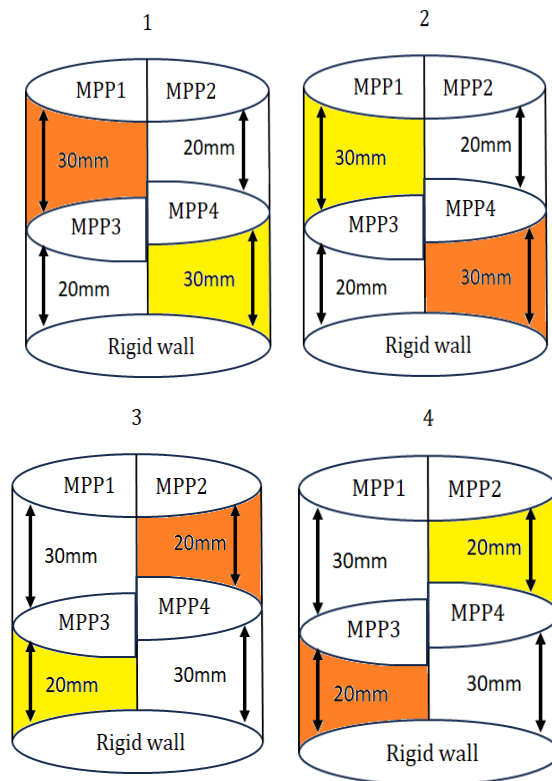
شکل ۴: سناریوهای مختلف بررسی عمق‌های مختلف لایه هوا به صورت ناهمگن با ثابت بودن عمق حفره ۳ و ۴



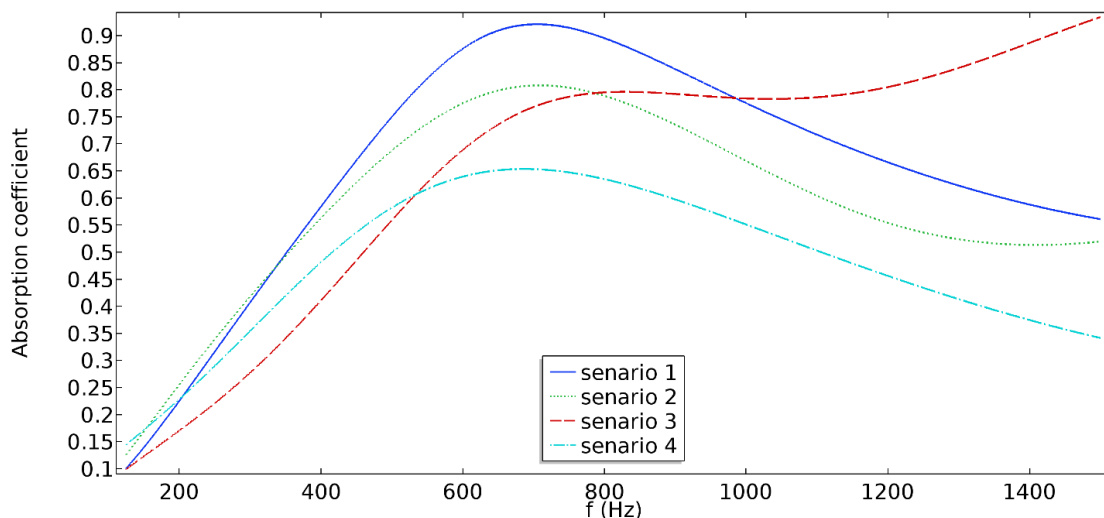
شکل ۵: سناریوهای مختلف بررسی عمق‌های مختلف لایه هوا به صورت ناهمگن با ثابت بودن عمق حفره ۱ و ۲



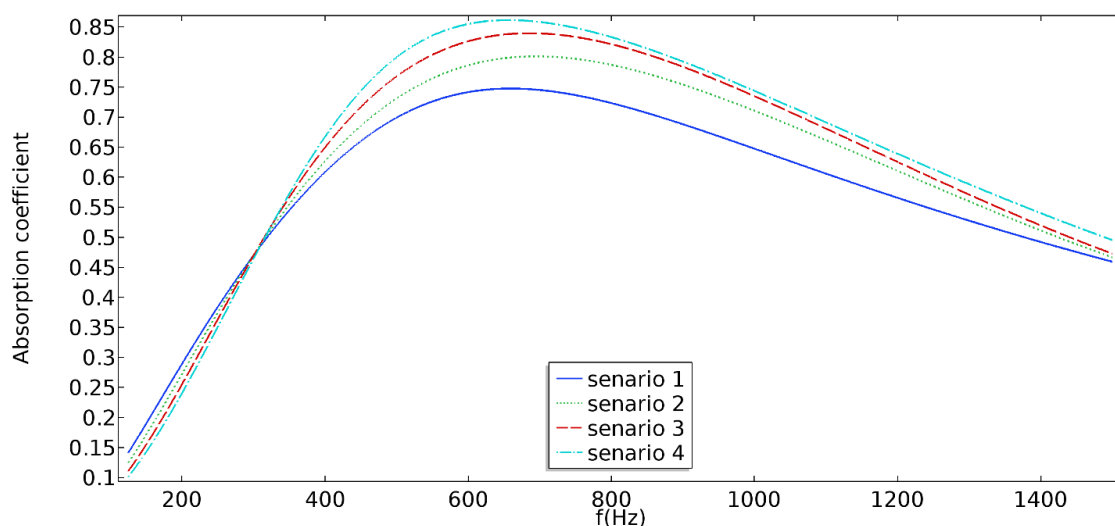
شکل ۶: بررسی تاثیر اضافه کردن ماده متخلخل در لایه‌های هوا به صورت متقارن بر رفتار آکوستیکی



شکل ۶: بررسی تاثیر اضافه کردن ماده متخلخل در لایه‌های هوا به صورت نامتقارن بر رفتار آکوستیکی



شکل ۷: تاثیر پیکربندی مختلف سری-موازی بر رفتار آکوستیکی جاذب MPP

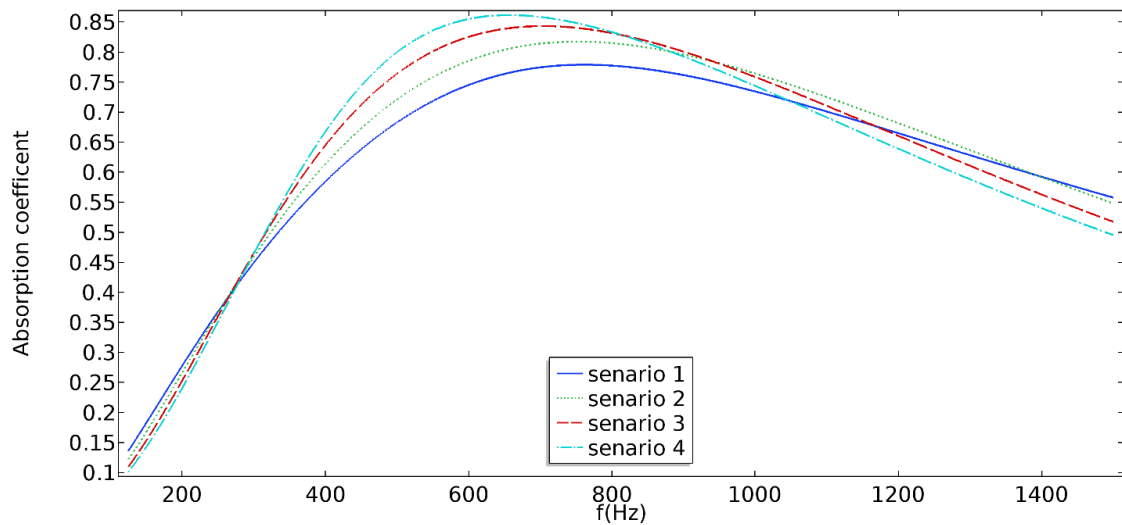


شکل ۸: تاثیر عمق لایه هوا به صورت همگن بر رفتار آکوستیکی کلی جاذب MPP

بزرگتری و درصد تخلخل کمتری باشند نتیجه مورد نظر بهتر می‌باشد. به طور مثال در بازه فرکانسی ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ هرتز که جز فرکانس‌های غالب گفتاری محیط‌های اداری و مسکونی می‌باشد، میانگین ضریب جذب صوتی در ۴ سناریو مطرح شده به ترتیب ۰,۷۵، ۰,۷۴، ۰,۶۲ و ۰,۸۶ می‌باشد. همچنین در این ۴ سناریو شیفت فرکانسی محسوسی هم در فرکانس‌های مختلف و مهم

شده است. همانطور که در شکل ۷ مشخص است پیکربندی‌های مختلف باعث ایجاد رفتار آکوستیکی مختلف شده است. در بین سناریوهای ذکر شده، سناریو شماره ۱ از بقیه سناریوهای به هدف مورد نظر در این مطالعه نزدیک‌تر است. به عبارت دیگر هر چه MPP‌های بالاتر (۱ و ۳) نسبت به MPP‌های پایین‌تر (۲ و ۴) دارای قطر سوراخ





شکل ۹: تاثیر عمق لایه هوا به صورت ناهمگن بر رفتار آکوستیکی کلی جاذب MPP

است. از لحاظ انتقال فرکانسی نیز، باید ذکر شود که به طور مثال در سناریو ۱، ضریب جذب ۰٫۶۸ در فرکانس ۵۰۰ هرتز وجود دارد، ولی این ضریب جذب برای سناریو شماره ۴ در فرکانس ۴۱۲ هرتز نمایان شده است.

#### تاثیر جابجایی عمق حفره هوا به صورت ناهمگن بر عملکرد آکوستیکی جاذب ترکیبی MPP

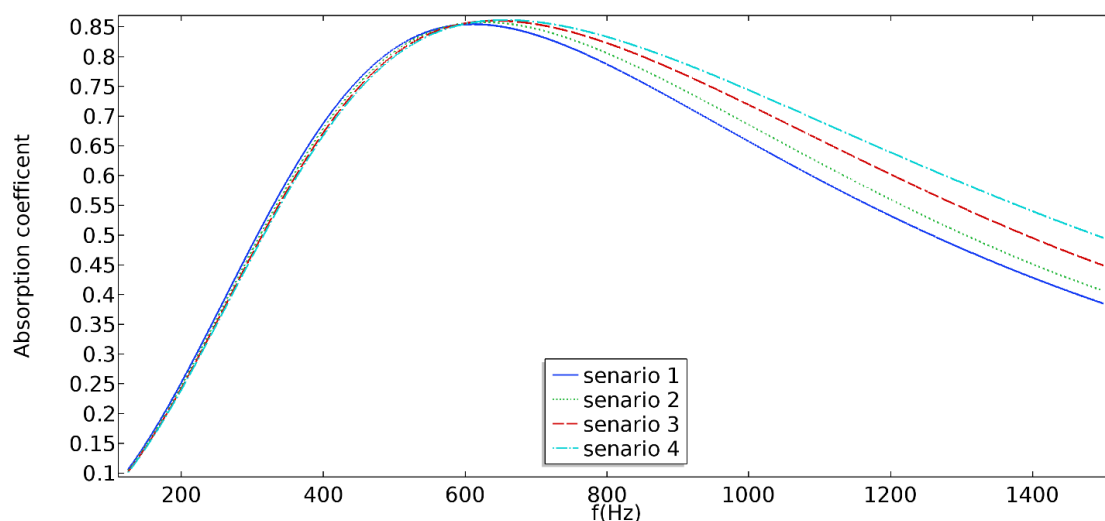
در این مرحله بر خلاف مرحله قبل که حفره‌های ۱ و ۳ یا ۲ و ۴ به یک اندازه تغییر می‌کردند، تغییر نمی‌کنند. نتایج این تکنیک نیز در شکل ۹ نشان داده شده است. در این مرحله حفره‌های ۳ و ۴ ثابت و عمق حفره‌های ۱ و ۲ متغیر بود. بر طبق شکل ۹ سناریو شماره ۴ نسبت به بقیه سناریوها رفتار بهتری ایجاد می‌کند. به عبارت دیگر، بنظر می‌رسد که هر چه فاصله هوایی پشت صفحه اول نسبت به دوم بیشتر باشد نتایج بهتری در فرکانس‌های ۴۰۰ تا ۸۰۰ هرتز می‌دهد. در این حالت میانگین ضریب جذب ۴ سناریو مختلف در بازه فرکانسی ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ هرتز تفاوت اندکی باهم دارند و میانگین ضریب جذب سناریوهای ۲، ۳ و ۴ برابر با ۰٫۷۲ و برای سناریو شماره ۱ این مقدار ۰٫۷۱ بود. در این تکنیک اما شیفت فرکانسی به سمت فرکانس‌های

مشاهده می‌شود، به طور مثال در سناریو ۴ ضریب جذب ۰٫۵۸ در فرکانس ۵۰۰ هرتز وجود دارد اما با استفاده از سناریو شماره ۱ این ضریب جذب در فرکانس ۴۰۰ دیده می‌شود.

#### تاثیر جابجایی عمق حفره هوا به صورت همگن بر عملکرد آکوستیکی جاذب ترکیبی MPP

نتایج این مرحله که به منظور بررسی تاثیر عمق لایه هوا به صورت همگن بر رفتار آکوستیکی کلی جاذب انجام شد در شکل ۸ نشان داده شده است.

همانطور که در شکل ۸ مشخص است سناریو شماره ۴ نسبت به بقیه سناریوها پیک جذبی و تا حدودی پهنای باندی بیشتری دارد. به نظر می‌رسد که در ضخامت‌های یکسان هر چه فاصله بین MPP۱ و MPP۲ بیشتر باشد ضریب جذب در فرکانس‌های ۵۰۰ تا ۹۰۰ هرتز بیشتر می‌شود. اما قابل ذکر است که همانطور که مشخص است در فرکانس‌های زیر ۳۰۰ هرتز این قضیه صادق نمی‌باشد. همانند نتایج مرحله قبل، در بازه فرکانسی ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ هرتزی میانگین ضریب جذب در ۴ سناریو مطرح شده به ترتیب ۰٫۶۳، ۰٫۶۷، ۰٫۷۰ و ۰٫۷۲ می‌باشد که نشان می‌دهد در این بازه فرکانسی سناریو ۴ بهتر عمل کرده



شکل ۱۰: تاثیر عمق لایه هوا به صورت ناهمگن بر رفتار آکوستیکی کلی جاذب MPP

۴ نسبت به سناریو ۱ و ۲ عملکرد بهتری را از خود نشان داده است. در سناریو ۳ و ۴ مواد متخلخل در حفره‌های هوا ۳ و ۴ بکار برده شدند و در حفره‌های ۱ و ۲ تنها هوا وجود دارد. میانگین ضریب جذب در بازه فرکانسی ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ هرتز در سناریو ۱ و ۲ حدوداً ۰,۴۴ و برای سناریو ۳ و ۴ حدوداً ۰,۶۸ می‌باشد. در این سناریوها شیف‌ت فرکانسی چشمگیری وجود ندارد.

در شکل ۱۲ به بررسی نتایج حاصل از چیدمان نامتقارن مواد متخلخل در حفره‌های هوا پرداخته است، که شماتیک آن در شکل ۶ نشان داده شده است.

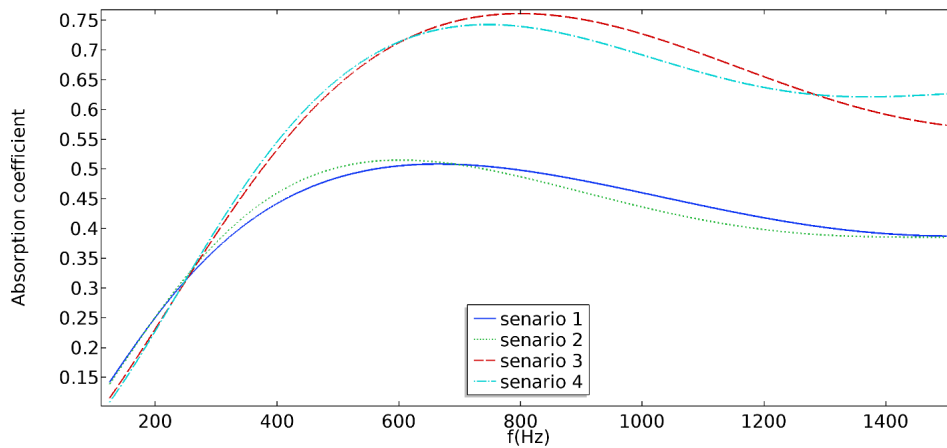
در این حالت و ۴ سناریو تغییرات چشمگیری به نسبت یکدیگر دیده نمی‌شود، اما سناریو ۱ و ۲ نسبت به سناریو ۳ و ۴ پیک جذبی بیشتری در فرکانس‌های پایین دارند، اما در فرکانس‌های بالاتر، نمودار شماره ۴ بهتر عمل کرده است. میانگین ضریب جذب در ۴ سناریو به ترتیب ۰,۵۶، ۰,۵۸، ۰,۵۶ و ۰,۶۰ می‌باشد. از لحاظ انتقال پیک فرکانسی نیز، ضریب جذب ۰,۵۳ در فرکانس ۵۰۰ هرتز برای سناریو شماره ۴ دیده می‌شود اما در سناریو ۱، این میزان جذب در فرکانس ۴۰۴ هرتز دیده می‌شود.

پایین‌تر نیز داشتیم، بطوریکه مثلاً جذب ۰,۶۸ در فرکانس ۵۰۰ هرتز برای سناریو شماره ۱، در سناریو شماره ۴ در حدود فرکانس ۴۰۷ هرتز پیدا شد. در مرحله بعد بر خلاف مرحله قبل، حفره‌های ۱ و ۲ ثابت و حفره‌های ۳ و ۴ متغیر در نظر گرفته شدند که نتایج آن در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

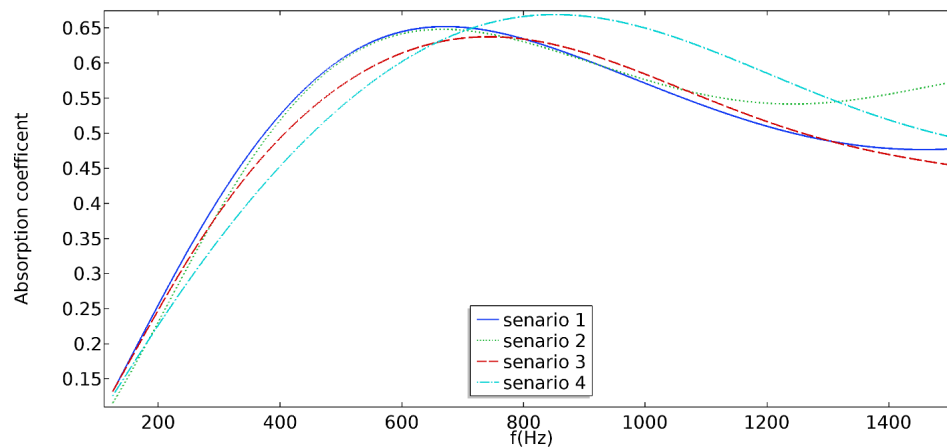
با توجه به شکل ۱۰، در این حالت نیز سناریو ۴ بهتر است و هر چه فاصله بین صفحات ۳ و ۴ بیشتر باشد در فرکانس‌های بالاتر ضریب جذب بالاتر می‌رود، به عبارت دیگر با این حالت جذب بیشتر در فرکانس‌های بالاتر از ۷۰۰ بهبود می‌یابد و کمتر از آن بهبود خاصی مشاهده نمی‌شود، به عبارت دیگر با استفاده از این تکنیک پهنای باند به سمت فرکانس‌های بالاتر افزایش می‌یابد تا فرکانس‌های پایین‌تر.

#### تاثیر اضافه شده ماده متخلخل در لایه‌های هوا

در این مرحله تاثیر اضافه شدن ماده متخلخل به صورت همگن در لایه‌های هوا بررسی شده است که نتایج آن در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۱۱ مشخص است، سناریو ۳ و



شکل ۱۱: تاثیر اضافه شدن ماده متخلخل به صورت همگن در لایه‌های هوا



شکل ۱۲: تاثیر اضافه شدن ماده متخلخل به صورت ناهمگن در لایه‌های هوا

### بحث

از آن به منظور افزایش پهنای باند استفاده شده است (۳۰، ۳۱). در این مطالعه به منظور افزایش پهنای باند به طور همزمان از ترکیب این دو پیکربندی استفاده شد و چندین سناریو مختلف برای دستیابی به بهترین عملکرد تعریف گردید. به منظور تعیین بهترین حالت مشخص گردید که اگر بخواهیم از تکنیک سری-موازی استفاده کنیم، در صورتی که این چیدمان بگونه‌ای باشد که MPP‌های موازی بالایی (MPP۱ و MPP۳) نسبت به MPP‌های موازی پایینی (MPP۲ و MPP۴) که حالت سری ایجاد می‌کند، دارای سوراخ‌های بزرگتر و درصد تخلخل کمتری باشد عملکرد بهتری در فرکانس‌های پایین ظاهر می‌شود. علت این موضوع می‌تواند بخاطر این

این مطالعه با هدف بررسی و بهبود پهنای باند و ضریب جذب در فرکانس‌های پایین برای جاذب‌های MPP از طریق شبیه‌سازی با FEM در نرم‌افزار کامسول نسخه ۵،۳ انجام شد. در این مطالعه به منظور افزایش پهنای باند از تکنیک‌های مختلفی همچون استفاده از پیکربندی موازی-سری، افزایش عمق لایه هوا به صورت همگن و غیر همگن، و اضافه کردن ماده متخلخل به صورت همگن و غیر همگن در لایه‌های هوا استفاده شد. استفاده از هر یک از تکنیک‌ها باعث ایجاد تغییرات آکوستیکی خاصی شد. یکی از روش‌های افزایش پهنای باند استفاده از پیکربندی سری یا موازی است و در بسیاری از مطالعات

پهنای باند محدودی است، لذا در صورتی که از چندین MPP به صورت موازی یا سری استفاده شود، می‌توان چندین پیک رزونانسی ایجاد کرد و در نتیجه پهنای باند را افزایش داد (۳۵).

مکانیسم جذب در جاذب‌های MPP از طریق عبور امواج صوتی از داخل میکروسوراها انجام می‌شود که باعث ایجاد افت ویسکوزیته-حرارتی می‌شود و این مکانیسم باعث تبدیل انرژی صوتی به گرما می‌شود. جذب صوتی یک ماده جاذب به شدت به پارامتر امیدانس آن وابسته است و از آنجا که امیدانس یک پارامتر مرکب است و از دو بخش رزیستنس و راکتانس تشکیل شده است، یک جاذب برای اینکه جذب خوبی داشته باشد علاوه بر رزیستنس باید راکتانس مناسبی هم داشته باشد، که برای ایجاد راکتانس، از فاصله هوایی در پشت MPP استفاده می‌شود (۳۶). وجود فاصله هوایی در پشت MPP برای افزایش جذب بسیار ضروری است. اما افزایش بیش از حد این فاصله هوایی منجر به بزرگ شدن بیش از حد جاذب و در نتیجه محدودیت فضا و افزایش هزینه‌ی ساخت می‌شود. بنابراین در این مطالعه پس از انتخاب پیکربندی سری-موازی مناسب به بررسی تاثیر عمق و نحوه شکل دهی این فاصله هوایی به منظور افزایش جذب پرداخته شد. در مرحله اول تنها به بررسی تغییر عمق لایه‌های هوا به صورت همگن پرداخت شد و مشخص شد که سناریو شماره ۴ نسبت به بقیه سناریوها پیک جذبی تا حدودی پهنای باندی بیشتری دارد. به عبارت دیگر در ضخامت‌های یکسان هر چه فاصله‌ی بین MPP‌های بالاتر نسبت به MPP‌های پایین‌تر بیشتر باشد ضریب جذب در فرکانس‌های ۵۰۰ تا ۹۰۰ هرتز بیشتر می‌شود. اما قابل ذکر است که همانطور که مشخص است در فرکانس‌های زیر ۳۰۰ هرتز این قضیه صادق نبود. در بازه فرکانسی ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ هرتز میانگین ضریب جذب در ۴ سناریو مطرح شده به ترتیب ۰٫۶۳، ۰٫۶۷، ۰٫۷۰ و ۰٫۷۲ بود که نشان می‌دهد در این بازه فرکانسی نه تنها سناریو ۴ بهتر عمل کرده بلکه انتقال فرکانسی نیز صورت گرفته بود. در مرحله بعد، این تغییر عمق لایه‌های هوا به صورت

مورد باشد که از آنجا که جذب فرکانس‌های پایین به دلیل طول موج بلندتر دشوار است لذا هر چه قطر سوراخ بزرگتر باشد میزان رزیستنس کمتر است و امواج راحت‌تر می‌توانند وارد جاذب شوند.

از سوی دیگر یکی از یافته‌های مهم این بود که برای MPP‌های بالاتر، هر چه قطر سوراخ بزرگتر و تخلخل بیشتر باشد جذب در فرکانس‌های بالاتر بیشتر می‌شود. علت این مورد این است با افزایش قطر سوراخ و تخلخل میزان رزیستنس آکوستیکی کمتر می‌شود و امواج صوتی راحت‌تر به داخل سوراخ‌ها نفوذ می‌کنند و اصطکاک بیشتری در داخل سوراخ‌ها رخ می‌دهد. این افزایش اصطکاک در سوراخ‌ها باعث می‌شود که بخش بیشتری از انرژی صوتی به حرارت تبدیل و جذب شود. در فرکانس‌های بالا، نقش راکتانس کاهش می‌یابد زیرا امواج با طول موج کوتاه‌تر تعامل کمتری با اینرسی هوای داخل سوراخ‌ها دارند. وقتی قطر سوراخ‌ها بزرگ‌تر می‌شود، مقدار هوای به دام افتاده در داخل سوراخ کمتر می‌شود، و این باعث کاهش واکنش اینرسی می‌شود که معمولاً در فرکانس‌های پایین بیشتر تأثیرگذار است. طبق گفته‌های Y.J. Qian، از لحاظ تئوری برای اینکه پهنای باند یک جاذب MPP افزایش پیدا کند، باید قطر سوراخ‌ها کاهش و درصد تخلخل افزایش پیدا کند (۳۲). هاشمی و همکاران در مطالعه خود از سه پیکربندی ساده، سری و موازی برای سه جاذب به منظور افزایش پهنای باند استفاده کردند و پی بردند که استفاده از حالت موازی و سری به ترتیب در بازه فرکانسی ۲۰۰ تا ۱۵۰۰ هرتز و ۵۰۰ تا ۳۰۰۰ هرتز بهترین نتیجه حاصل می‌شود (۲۱). Faisal Rafique در مطالعه خود از یک پیکربندی دو لایه موازی برای MPP استفاده کرد و در بازه فرکانسی ۱۷۵ تا ۴۳۰ هرتز ضریب جذبی در حدود ۰٫۸۳ بدست آورد (۳۳). همچنین Cobo و همکاران با استفاده از یک پیکربندی سه لایه توانستند پهنای باند جاذب را تا حدود ۵ اکتاو باند افزایش دهند (۳۴). پس به طور کلی می‌توان نتیجه‌گیری از آنجا که جاذب MPP بخاطر مکانیسم رزونانس هلمهولتزی خود دارای عملکرد رزونانسی با

مورد باعث شده بود جذب در فرکانس‌های کمتر از ۵۰۰ هرتز به طور چشمگیری افزایش پیدا کند (۲۳، ۳۷). یا در مطالعه‌ی Liu و Sakagami از ساختار لانه زنبوری برای شکل دهی به عمق لایه پشت MPP استفاده کردند و توانستند پهنای باند را افزایش دهند (۳۸، ۳۹).

یکی دیگر از روش‌هایی که محققین به منظور افزایش پهنای باند جاذب‌های MPP استفاده می‌کنند استفاده از یک ماده متخلخل در لایه هوا MPP هستش. مواد متخلخل به دلیل ویژگی ذاتی خود دارای جذب خوبی در فرکانس‌های میانی و بالا هستند و زمانی که با MPP که دارای جذب رزونانسی محدود می‌باشد ترکیب می‌شوند، پهنای باند افزایش چشمگیری پیدا می‌کند. در مطالعه Shen و همکاران به منظور افزایش پهنای باند از ترکیب جاذب متخلخل فلزی و جاذب MPP استفاده نمود و در نتایج مشخص گردید که در صورت استفاده از ضخامت ۳ و ۵ سانتی‌متری ماده متخلخل در MPP در بازه فرکانسی ۱۰۰ تا ۱۸۰۰ هرتزی ضریب جذبی در حدود ۰٫۶۳ تا ۰٫۷۳ حاصل می‌شود (۴۰). در این مطالعه از دو ماده متخلخل متفاوت استفاده گردید و یکبار با ترکیب متقارن و یکبار دیگر با ترکیب نامتقارن در لایه‌های هوا جاسازی شدند. منظور از ترکیب متقارن این است که دو ماده متخلخل به صورت همزمان در دو حفره هوایی مجاور هم قرار می‌گرفتند. در نتایج مشخص شد که در حالت متقارن هنگامی که مواد متخلخل دو حفره هوایی زیرین قرار می‌گیرند نتیجه بهتری حاصل می‌شود تا زمانی که در پشت MPP‌های بالایی قرار بگیرند. در این حالت میانگین ضریب جذب حدوداً ۰٫۶۸ بود که نسبت به دو حالت دیگر بالاتر بود. علت این که اگر مواد متخلخل در دو حفره هوایی پایینی باشند جذب بالاتری ایجاد می‌شود این است که اگر مواد متخلخل در دو حفره هوایی بالایی قرار بگیرند امپدانس کلی جاذب زیاد می‌شود و موج صوتی امکان ورود به جاذب را پیدا نمی‌کنند. و در نتیجه منعکس می‌شود. در حالت استفاده نامتقارن از مواد متخلخل دو حفره هوایی غیر مجاور نیز نتایج خیلی متفاوتی بدست نیامد و ۴ سناریو تقریباً عملکرد مشابهی داشتند بجز سناریو شماره

ناهمگن انجام شد، بدین معنا که عمق دو MPP کنار هم بر خلاف مرحله قبل به صورت یکسان تغییر نمی‌کند. در این مرحله یکبار عمق دو حفره‌های سمت چپ ثابت در نظر گرفته شدند و عمق دو حفره دیگر متغیر و یکبار دیگر بالعکس این مورد. در نتایج ثابت شد که در صورتی که عمق دو حفره سمت راست ثابت در نظر گرفته شود باید اختلاف عمق دو حفره سمت چپ حداکثر باشد تا جذب در فرکانس‌های پایین بیشتر شود، به عبارت دیگر MPP سمت چپ پایینی باید بیشترین اختلاف را با MPP سمت چپ بالایی داشته باشد. اما در صورتی که عمق دو حفره سمت چپ ثابت در نظر گرفته شود و عمق دو حفره سمت راست متغیر در نظر گرفته شود و همانند مرحله قبل اختلاف MPP بالا با MPP پایین حداکثر باشد در فرکانس‌های بالاتر جذب بهتر می‌شود. بنابراین به نظر می‌رسد که به طور کلی عمق دو حفره سمت چپ تاثیر بیشتری در افزایش جذب در فرکانس‌های پایین دارند تا عمق دو حفره سمت راست، که علت این موضوع در قطر سوراخ و درصد تخلخلی است که برای MPP‌های سمت چپ در نظر گرفته شده است. علت تاثیر فاصله هوایی در عملکرد آکوستیکی این است که در یک MPP، همانند سایر رزوناتورها به دلیل اینکه از سیستم جرم-فنر پیروی می‌کنند، فاصله هوایی پشت صفحه مثل یک فنر عمل می‌کند که ویژگی آن به عمق این فضا بستگی دارد. هرچه عمق این فاصله بیشتر باشد، فنریت آن کاهش می‌یابد، و این کاهش فنریت منجر به افزایش جذب فرکانس‌های پایین تر می‌شود. از لحاظ آکوستیکی جذب صوت در یک MPP تحت تاثیر رزونانس حجم هوای در حال ارتعاش در حفره‌ها و فضای پشت صفحه قرار دارد و به همین دلیل ضریب جذب در این محدوده فرکانسی افزایش می‌یابد. به طور کلی هر چه عمق لایه هوا بیشتر شود جذب بیشتر می‌شود منتهی به دلیل محدودیت‌ها این کار همیشه عملی نیست، در بسیاری از مطالعه بجای افزایش عمق لایه هوا، از شکل دهی این لایه استفاده می‌شود. به طور مثال در مطالعه‌ی Gai و Rafique از حفره‌های هوایی L و J شکل استفاده شده بود که این

مواد الیافی دارای ویژگی‌های خیلی زیادی همچون زیبایی، استحکام زیاد، عدم اشتغال پذیری، مقاومت در برابر شرایط محیطی و... هستند، اما بزرگترین عیب آن پهنای باند محدود آن‌ها می‌باشند. در این مطالعه سعی شد با راهکارهای مختلف همچون پیکربندی سری-موازی که در آن‌ها از MPP‌های با قطر سوراخ و درصد تخلخل متفاوت استفاده شده بود پهنای باند جاذب افزایش پیدا کند. همچنین از تکنیک‌های دیگری همچون بررسی تأثیر عمق لایه هوا به صورت متقارن و نامتقارن و استفاده از مواد متخلخل در یکی از لایه‌های هوا پهنای باند جاذب زیاد شود. در این مطالعه سعی شد بجای استفاده از تکنیک‌ها و روش‌های تجربی اندازه‌گیری مستقیم امپدانس تیوب از روش‌های مدل‌سازی مثل روش عددی المان محدود (FEM) در نرم‌افزار کامسول استفاده شود. نتایج نشان داد که بهترین حالت چیدمان پیکربندی سری-موازی برای افزایش جذب در فرکانس‌های پایین زمانی ایجاد می‌شود که دو MPP‌های بالای نسبت به دو MPP‌های پایینی، دارای سوراخ‌های بزرگتر و درصد تخلخل کمتری باشد. از لحاظ بررسی تأثیر عمق لایه هوا در پشت MPP‌ها مشخص گردید در صورتی که اختلاف لایه هوا دو MPP بالا و پایین از هم بیشترین باشد، پهنای باند افزایش بیشتری پیدا می‌کند تا زمانی که چهار MPP بهم نزدیک‌تر باشند. همچنین مشخص گردید که در صورتی که از مواد متخلخل الیافی در یکی از لایه‌ها استفاده شود پیک رزونانس کاهش می‌یابد اما پهنای باند افزایش پیدا می‌کند. به طور کلی جاذب‌های MPP با خصوصیات و ویژگی‌های معرفی شده جایگزین مناسبی برای مواد متخلخل الیافی متداول در محیط‌های داخلی هستند، اما برای رسیدن به عملکرد مطلوب باید پارامترهای عملکردی آن را متناسب با محیط مد نظر و خصوصیات موج صوتی تنظیم کرد.

### ≡ کد اخلاق

این پژوهش با رعایت کامل اصول اخلاقی انجام شده است و دارای کد اخلاقی با شماره IR.BHN.REC.1403.004 می‌باشد.

۴ که در آن به علت اینکه ماده متخلخل الیافی در یکی از لایه‌های بالایی بکار برده شده بود جذب را در فرکانس‌های بالاتر از ۷۰۰ هرتز تا ۱۳۰۰ هرتز نسبت به بقیه سناریوها افزایش بیشتری داده بود. در مطالعه‌ی Duan و همکاران نیز از ترکیب ماده متخلخل فلزی و جاذب MPP استفاده شد، در نتایج مشخص گردید که با استفاده از یک ماده متخلخل فلزی با ضخامت ۲ سانتی‌متر، میانگین ضریب جذب در بازه فرکانسی ۱۰۰ تا ۲۰۰۰ هرتز در حدود ۰,۴۷ حاصل می‌شود (۴۱). هر چند قابل ذکر است که همانطور که ذکر شد در صورت استفاده از مواد الیافی در بسیار محیط‌ها مثل محیط‌های بیمارستانی یا رستورانی، یا صنایع الکترونیکی، یا مسیرهای عبور جریان هوای با سرعت بالا امکان استفاده از این مواد وجود ندارد، و همچنین استفاده از مواد متخلخل باعث سنگین شدن وزن کلی جاذب می‌شود که باید تمامی این موارد در نظر گرفته شود (۴۲). از دیگر محدودیت‌های این مطالعه می‌توان به عدم ساخت نمونه جاذب‌ها و اندازه‌گیری نکردن ضریب جذب به صورت تجربی با امپدانس تیوب اشاره کرد که علت هزینه‌های بالای ساخت نمونه و کار با دستگاه امپدانس تیوب است. لذا پیشنهاد می‌گردد در مطالعات آینده علاوه بر مدل‌سازی با روش FEM نتایج آن با نتایج اندازه‌گیری مستقیم مقایسه شود، و همچنین از دیگر تکنیک‌های پیکربندی و ساختارهای رزونانسی مثل متامتریال‌ها و... استفاده شود و تأثیر آن در فرکانس‌های پایین مورد بررسی قرار بگیرد. همچنین پیشنهاد می‌گردد که به منظور آنالیز دقیق‌تر و بررسی بیشتر عوامل مختلف تأثیرگذار بر رفتار آکوستیکی، تأثیر رفتار ویسکوزیته-حرارتی هوا در میکروسوراخ‌های جاذب‌های MPP و تأثیر جرم صوتی و ممان اینرسی صوتی در کاهش سرعت انتقال صوت و جذب صوت بررسی شود.

### ≡ نتیجه‌گیری

جاذب‌های MPP که تحت عنوان جاذب‌های نسل جدید شناخته می‌شوند نسبت به جاذب متخلخل متداول مثل

## REFERENCES

1. Sheikhmozafari M J, Mohammad Alizadeh P, Ahmadi O, Mazloomi B. Assessment of Noise Effect on Employee Comfort in an Open-Plan Office: Validation of an Assessment Questionnaire. *J Occup Health Epidemiol.* 2021;10(3):193-203.
2. Sheikhmozafari M J, Ahmadi O. Reliability and Validity Assessment of the Persian Version of the Noise Exposure Questionnaire (NEQ): An NIH Predictor Tool. *J Occup Health Epidemiol* 2022; 11 (3) :209-222.
3. Liang P, Li J, Li Z, Wei J, Li J, Zhang S, et al. Effect of low-frequency noise exposure on cognitive function: a systematic review and meta-analysis. *BMC Public Health.* 2024;24(1):125.
4. Fan Y, Liang J, Cao X, Pang L, Zhang J. Effects of noise exposure and mental workload on physiological responses during task execution. *Int J Environ Res Public Health.* 2022;19(19):12434.
5. Golmohammadi R, Darvishi E, Motlagh MS, Faradmal J, Aliabadi M, Rodrigues MA. Prediction of occupational exposure limits for noise-induced non-auditory effects. *Appl Ergon.* 2022;99:103641.
6. Jacobs N, Roberts B, Reamer H, Mathis C, Gaffney S, Neitzel R. Noise exposures in different community settings measured by traditional dosimeter and smartphone app. *Appl Acoust.* 2020;167:107408.
7. Sun W, Pan B, Song X, Xiao H, Zhou J, Sui D. A novel sound absorber design of nanofibrous composite porous material. *Mater Des.* 2022;214:110418.
8. Mohammad Alizadeh P, Ahmadi O, Shekoohian S. et al. Comprehensive analysis of acoustic properties of cellulose nano fibers absorbers: experimental and FEM-based mathematical modeling evaluation. *Int J Environ Sci Technol.* 2024:1-16.
9. Hemmati N, Mirzaei R, Soltani P, Berardi U, Mozafari MJS, Edalat H, et al. Acoustic and thermal performance of wood strands-rock wool-cement composite boards as eco-friendly construction materials. *Constr Build Mater.* 2024;445:137935.
10. Lashgari M, Taban E, SheikhMozafar MJ, Soltan P, Attenborough K, Khavanin A. Wood chip sound absorbers: Measurements and models. *Appl Acoust.* 2024;220:109963.
11. Berardi U, Fattahi M, Taban E, Stasi R, SheikhMozafari MJ. Waste Corn Husk Fibers for Sound Absorption Applications. *Can Acoust.* 2023;51(3):v-vi.
12. Halashi K, Taban E, Soltani P, Amininasab S, Samaei E, Moghadam DN, et al. Acoustic and thermal performance of luffa fiber panels for sustainable building applications. *Build Environ.* 2024;247:111051.
13. Hemmati N, Sheikhmozafari M, Taban E, Tajik L, Faridan M. Pistachio shell waste as a sustainable sound absorber: an experimental and empirical investigation. *Int J Environ Sci Technol.* 2024;21(5):4867-80.
14. SheikhMozafari MJ, Taban E, Soltani P, Faridan M, Khavanin A. Sound absorption and thermal insulation performance of sustainable fruit stone panels. *Appl Acoust.* 2024;217:109836.
15. SheikhMozafari MJ. Enhancing Sound Absorption in Micro-Perforated Panel and Porous Material Composite in Low Frequencies: A Numerical Study Using FEM. *Sound Vib.* 2024;58(1):81-100.
16. Sheikhmozafari M J, Ahmadi Asour A, Hajinejad S. Enhancing High-Frequency Bandwidth in MPP-Porous Material Composite Absorbers: A Numerical Simulation Approach for Optimal Parameter Selection. *J Occup Health Epidemiol.* 2024; 13(2):119-131
17. Zhang Y, Wang G, Zhu Z, Liu Q. Vibro-acoustic coupling characteristics of the microperforated panel with local resonators. *Int J Mech Sci.* 2023;245:108125.
18. Yang W, Choy Y, Li Y. Acoustical performance of a wavy micro-perforated panel absorber. *Mech Syst Signal Process.* 2023;185:109766.
19. Zhang Y, Zhu Z, Sheng Z, He Y, Wang G. Sound absorption properties of the metamaterial curved microperforated panel. *Int J Mech Sci.* 2024;268:109003.
20. Pan L, Martellotta F. A parametric study of the acoustic performance of resonant absorbers made of micro-perforated membranes and perforated panels. *Appl Sci.* 2020;10(5):1581.
21. Hashemi Z, Asadi N, Sadeghian M, Putra A, Ahmadi S, Alidosti M, et al. Optimization and Comparative Analysis of micro-perforated panel sound absorbers: A study on structures and performance enhancement. *Measurement.* 2024;236:115123.
22. Cobo P, Simón F. Multiple-layer microperforated panels as sound absorbers in buildings: a review. *Buildings.* 2019;9(2):53.
23. Rafique F, Wu JH, Liu CR, Ma F. Low-frequency sound absorption of an inhomogeneous micro-perforated

- panel with j-shaped cavities of different depths. *Acoust Aust.* 2022;50(2):203-14.
24. Wang C, Liu X. Investigation of the acoustic properties of corrugated micro-perforated panel backed by a rigid wall. *Mech Syst Signal Process.* 2020;140:106699.
  25. Corredor-Bedoya A, Acuña B, Serpa A, Masiero B. Effect of the excitation signal type on the absorption coefficient measurement using the impedance tube. *Appl Acoust.* 2021;171:107659.
  26. Maa D. Theory and design of microperforated panel sound-absorbing constructions. *Sci Sin.* 1975;18(1):55-71.
  27. Allard JF, Champoux Y. New empirical equations for sound propagation in rigid frame fibrous materials. *J Acoust Soc Am.* 1992;91(6):3346-53.
  28. Hashemi Z, Monazzam Esmailpour M, Nasirzadeh N, Farvaresh E, Beigzadeh Z, Salari S. Estimation of sound absorption behavior of combined panels comprising Kenaf fibers and micro-perforated plates below 2500 Hertz. *J Health Saf Work.* 2022;12(4):872-94.
  29. Maa D-Y. Potential of microperforated panel absorber. *J Acoust Soc Am.* 1998;104(5):2861-6.
  30. Qian Y, Zhang J, Sun N, Kong D, Zhang X. Pilot study on wideband sound absorber obtained by adopting a serial-parallel coupling manner. *Appl Acoust.* 2017;124:48-51.
  31. Li D, Chang D, Liu B. Enhancing the low frequency sound absorption of a perforated panel by parallel-arranged extended tubes. *Appl Acoust.* 2016;102:126-32.
  32. Qian Y, Kong D, Liu S, Sun S, Zhao Z. Investigation on micro-perforated panel absorber with ultra-micro perforations. *Appl Acoust.* 2013;74(7):931-5.
  33. Rafique F, Wu JH, Waqas M, Lushuai X, Ma F. A thin double-layer multiple parallel-arranged inhomogeneous microperforated panel absorber for wideband low-frequency sound absorption. *J Braz Soc Mech Sci Eng.* 2022;44:1-18.
  34. Cobo P, de la Colina C, Roibas-Millan E, Chimeno M, Simon F. A wideband triple-layer microperforated panel sound absorber. *Compos Struct.* 2019;226:111226.
  35. Mosa AI, Putra A, Ramlan R, Esraa A-A. Wideband sound absorption of a double-layer microperforated panel with inhomogeneous perforation. *Appl Acoust.* 2020;161:107167.
  36. Mosa AI, Putra A, Ramlan R, Prasetyo I, Esraa A-A. Theoretical model of absorption coefficient of an inhomogeneous MPP absorber with multi-cavity depths. *Appl Acoust.* 2019;146:409-19.
  37. Gai X-L, Xing T, Li X-H, Zhang B, Wang F, Cai Z-N, et al. Sound absorption of microperforated panel with L shape division cavity structure. *Appl Acoust.* 2017;122:41-50.
  38. Liu J, Herrin D. Enhancing micro-perforated panel attenuation by partitioning the adjoining cavity. *Appl Acoust.* 2010;71(2):120-7.
  39. Sakagami K, Yamashita I, Yairi M, Morimoto M. Effect of a honeycomb on the absorption characteristics of double-leaf microperforated panel (MPP) space sound absorbers. *Noise Control Eng J.* 2011;59(4):363-71.
  40. Shen X, Bai P, Yang X, Zhang X, To S. Low frequency sound absorption by optimal combination structure of porous metal and microperforated panel. *Appl Sci.* 2019;9(7):1507.
  41. Duan H, Shen X, Yin Q, Yang F, Bai P, Zhang X, et al. Modeling and optimization of sound absorption coefficient of microperforated compressed porous metal panel absorber. *Appl Acoust.* 2020;166:107322.
  42. Yan S, Wu J, Chen J, Xiong Y, Mao Q, Zhang X. Optimization design and analysis of honeycomb micro-perforated plate broadband sound absorber. *Appl Acoust.* 2022;186:108487.