

ORIGINAL RESEARCH PAPER

Optimizing Microperforated Panel Sound Absorbers Using Response Surface Methodology: Measurement, Modeling, and Performance Evaluation

Zahra Hashemi¹, Mohammad Javad SheikhMozafari^{2*}, Azma Putra³, Marzie Sadeghian⁴, Nasrin Asadi⁵, Saeid Ahmadi⁶, Masoumeh Alidostie⁷

¹Department of Occupational Health Engineering, School of Medical Sciences, Behbahan Faculty of Medical Sciences, Behbahan, Iran

²Department of Occupational Health Engineering, School of Public Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

³School of Civil and Mechanical Engineering, Curtin University, Kent Street, Bentley 6102, WA, Australia.

⁴Department of Occupational Health, School of Health, Ahvaz Jundishapur University of Medical Sciences, Ahvaz, Iran

⁵School of Medical Sciences, Behbahan Faculty of Medical Sciences, Behbahan, Iran

⁶Department of Occupational Health and Safety, School of Health, Qazvin University of Medical Sciences, Qazvin, Iran

⁷Department of Public Health, School of Health, Social Health Determinate Shahrekord University of Medical Sciences, Shahrekord, Iran

Received: 2 - 9 - 2024

Accepted: 29 - 9 - 2024

ABSTRACT

Introduction: Microperforated panels (MPPs), often considered as potential replacements for fiber absorbers, have a significant limitation in their absorption bandwidth, particularly around the natural frequency. This study aims to address this challenge by focusing on the optimization and modeling of sound absorption in a manufactured MPP.

Material and Methods: The study employed Response Surface Methodology (RSM) with a Central Composite Design (CCD) approach using Design Expert software to determine the average normal absorption coefficient within the frequency range of 125 to 2500 Hz. Numerical simulations using the Finite Element Method (FEM) were conducted to validate the RSM findings. An MPP absorber was then designed, manufactured, and evaluated for its normal absorption coefficient using an impedance tube. Additionally, a theoretical Equivalent Circuit Model (ECM) was utilized to predict the normal absorption coefficient for the manufactured MPP.

Results: The optimization process revealed that setting the hole diameter to 0.3 mm, the percentage of perforation to 2.5%, and the air cavity depth behind the panel to 25 mm resulted in maximum absorption within the specified frequency range. Under these optimized conditions, the average absorption coefficient closely aligned with the predictions generated by RSM across numerical, theoretical, and laboratory assessments, demonstrating a 13.8% improvement compared to non-optimized MPPs.

Conclusion: This study demonstrates the effectiveness of using RSM to optimize the parameters affecting MPP performance. The substantial correlation between the FEM numerical model, ECM theory model, and impedance tube results positions these models as both cost-effective and reliable alternatives to conventional laboratory methods. The consistency of these models with the experimental outcomes validates their potential for practical applications.

Keywords: Noise control, Micro-perforated panel Absorber, Optimization, RSM, FEM, ECM

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Hashemi Z., SheikhMozafari M.J., Putra A., Sadeghian M., Asadi N., Ahmadi S., Alidostie M. Optimizing Microperforated Panel Sound Absorbers Using Response Surface Methodology: Measurement, Modeling, and Performance Evaluation. *J Health Saf Work.* 2024; 14(3): 556-576.

* Corresponding Author Email: mj.sheikhmozafari@gmail.com

Copyright © 2024 The Authors.
Published by Tehran University of Medical Sciences

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

1. INTRODUCTION

Controlling and absorbing low-frequency sound presents a significant challenge in noise control due to the long wavelengths involved. While traditional porous materials like rock wool and glass wool are commonly utilized for noise absorption, they still require thicknesses matching the wavelength of the target frequency, making them impractical due to space and cost constraints. Additionally, these materials are unsuitable for sterile environments like hospitals and food industries, as they can disperse harmful fibers, posing health risks. Micro-perforated panels (MPPs) have emerged as a new-generation solution for noise absorption, offering advantages such as durability, easy cleaning, aesthetic appeal, and cost-effectiveness. MPPs, when compared to materials of similar thickness, provide a broader frequency band for sound absorption, better fire resistance, and superior performance at lower frequencies. Consequently, MPPs are widely adopted in architectural acoustics, automotive muffler systems, medical equipment, and power distribution transformers. However, MPPs have a fundamental limitation: their absorption is confined to a specific natural frequency range due to resonance phenomena, leading to a narrow absorption bandwidth. Various strategies have been explored to enhance MPPs performance, including the incorporation of honeycomb structures, multi-MPP configurations, and non-planar panels, yet practical implementation remains limited due to technical and cost challenges. Given the impact of parameters like hole diameter, panel thickness, and perforation percentage on MPPs performance, optimization is crucial. While complex optimization methods like genetic algorithms and particle swarm optimization have been used, they often lack simplicity and convergence. In contrast, Response Surface Methodology (RSM) offers a simpler and more effective approach. This study introduces RSM as a technique for optimizing MPP absorbers, with a specific focus on improving the average sound absorption coefficient between 125 and 2500 Hz. The effectiveness of this approach is validated through Finite Element Method (FEM) simulations and experimental evaluations conducted using an impedance tube.

2. MATERIAL AND METHODS

Response Surface Methodology (RSM) involves statistical techniques and applied

mathematics to create empirical models aimed at optimizing a response (dependent variable) influenced by multiple input variables (independent variables). By adjusting these input variables in each experiment, RSM identifies the factors that cause changes in the response variable. After constructing an approximate model, it is tested for adequacy; if the results are not satisfactory, the process is repeated with additional tests. This approach minimizes the number of required experiments and allows for the estimation of coefficients in first and second-degree regression models, including the interaction effects between factors.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \beta_{ij} X_i X_j \quad (1)$$

Here, the symbol 'k' denotes the count of independent variables, while X_i and X_j stand for specific independent variables. The term β_0 signifies the constant coefficient, and $\beta_{ij} X_i X_j$ indicate the coefficients of linear effects, square effects, and reciprocal effects respectively. This research focused on optimizing MPP absorbers through the application of RSM, employing the CCD approach, facilitated by the Design Expert software version 11. The response was the average absorption coefficient within the frequency range of 125 to 2500 Hz, measured at 1 Hz intervals, derived from the following formula:

$$\text{Maximise: } \bar{\alpha} = \frac{\sum_{i=1}^{N_0} \alpha(f_i)}{N_0}, i = 1, 2, 3, \dots, N_0 \quad (2)$$

$\alpha(f_i)$ represents the value of normal sound absorption coefficient at f_i frequency. N_0 represents the ratio of the difference between the upper and lower limits of the frequency range over the frequency steps. The average normal absorption coefficient, considered as the response, was simulated using the FEM numerical approach. Models generated by Design Expert software were analyzed for significance through p-value analysis. Coefficients with p-values above 0.05 were deemed insignificant and removed, leaving a refined model with only significant parameters ($p < 0.05$). The model's adequacy was confirmed by checking both the correlation coefficient and the adjusted correlation coefficient. Furthermore, three-dimensional designs and contour plots of the regression models were employed to visually and graphically assess the effects of the independent variables.



Fig. 1: Two-microphone impedance Tube setup

Finite Element Method (FEM) Analysis

FEM was used to simulate the response using COMSOL software. FEM works by dividing the solution domain into smaller subdomains, where values are interconnected through interpolation functions. According to ISO 10534-2, the normal absorption coefficient was numerically determined using a two-dimensional rectangular representation of an impedance tube with a channel length of 250 mm and a width of 100 mm. The simulation used a maximum mesh size of 4 mm, air density of 1.225 kg/m³, and sound speed of 343 m/s. The MPP panel was assumed to be rigid enough to neglect vibrations from sound waves.

Equivalent Circuit Model (ECM)

The ECM for MPP absorbers, initially proposed by Maa, is based on the idea that reducing hole diameter enhances sound absorption without needing fibrous or porous materials. The absorption coefficient, indicative of the MPP's impedance, is calculated using the below equation:

$$\alpha = \frac{4R[Z_{tot}]}{(1 + Re[Z_{tot}])^2 + Im[Z_{tot}]^2} \quad (3)$$

The MPP absorber is conceptualized as an array of slender tubes on the panel's surface, and sound transmission through these tubes is described by differential equations. The particle velocity within these tubes is computed using Bessel functions and results in an equation for acoustic impedance. For intermediate values of the perforation constant, Maa's approximation method provides a practical

formula. The overall impedance of the MPP is derived by dividing the impedance of a single hole by the perforation percentage. To account for additional effects such as air viscosity and mass diffusion, correction coefficients are added to the impedance calculations. MPPs are typically installed at a specific distance from the wall to optimize absorption. The total acoustic impedance is then determined by combining the impedance of the MPP and the air layer using series and parallel rules. The abovementioned calculations were implemented in MATLAB code to estimate the MPP's normal absorption coefficient based on the ECM theory.

Experimental validation

The experimental validation of the optimized MPP absorber involved crafting the absorber using UV epoxy resin with 3D printing technology. Two MPP samples with diameters of 30 and 100 mm were produced. The normal sound absorption coefficient was measured using a BSWA two-microphone impedance tube, following the transfer function method as per ISO 10534-2 standards. In this setup, a specific noise signal is transmitted through a speaker, and the sound pressure at two fixed positions on the tube wall is measured using microphones. These measurements allow the calculation of the sound pressure transfer function, which is used to derive the acoustic reflection coefficient "R" and the sound absorption coefficient "α." The experiment employed a setup that included a speaker, a digital frequency measurement system, two tubes, an amplifier, microphones, and software. Finally, the absorption coefficients obtained from

theoretical, numerical, and experimental models were compared to analyze the performance of the MPP absorber.

3. RESULTS AND DISCUSSION

The study revealed that smaller hole diameters in micro-perforated panel (MPP) absorbers result in a higher average sound absorption coefficient within the frequency range of 125-2500 Hz. Specifically, reducing the hole diameter from 1 mm to 0.4 mm decreased the absorption peak but expanded the absorption frequency range, aligning with findings from other studies. This improvement is attributed to the interplay between resistance and reactance in the absorber. As hole diameters decrease, the mass of moving air (reactance) reduces, necessitating an increase in acoustic resistance to maintain impedance balance, thus enhancing the average absorption coefficient. However, there are limits to this approach, and optimizing these factors requires careful consideration of various parameters. Response Surface Methodology (RSM) was used to determine the optimal hole diameter for broadening the absorption range and achieving a significant peak within the frequency range of 125-2500 Hz. The optimal diameter identified was 0.3 mm. Additionally, the perforation percentage was found to impact performance significantly. Decreasing the perforation percentage led to an increased average absorption coefficient by shifting the resonant frequency to lower frequencies, which aligns with theoretical predictions and previous studies. Another crucial factor was the depth or air gap behind the panel. An increased depth resulted in a higher average absorption coefficient across the frequency range. This is because a larger air gap acts like a spring with reduced stiffness, allowing lower-frequency sound waves to effectively induce vibration. This mechanism enhances absorption by enabling longer wavelengths to penetrate the absorber and interfere constructively, which was consistent with findings from other studies. The optimal absorption peak was observed at approximately 1400 Hz, corresponding to a wavelength of about 23.8 cm. The study's findings suggest that with a total panel depth of 2.5 cm, the absorption peak occurred at a depth less than the

recommended $\frac{1}{4}$ wavelength rule. This indicates that thinner structures can be designed through optimization, which is particularly beneficial in space-constrained environments. The study also validated the Finite Element Method (FEM) used in the RSM optimization tests with results showing good agreement between simulated and experimental outcomes. Similarly, the Equivalent Circuit Model (ECM) provided accurate predictions of absorption coefficients. Both FEM and ECM models proved to be effective and cost-efficient alternatives to traditional laboratory techniques, supporting their integration into acoustic design and optimization practices. These models offer a robust approach to predicting and enhancing acoustic performance while reducing the need for extensive experimental testing.

4. CONCLUSIONS

In this study, MPP optimization was conducted using Response Surface Methodology (RSM) and the Central Composite Design (CCD) approach within Design Expert software, targeting a frequency range of 125 to 2500 Hz through both experimental and numerical methods. Key findings include:

- Decreasing the perforation percentage and hole diameter, combined with increasing the air gap behind the panel, significantly improved the average absorption coefficient across the studied frequency range.
- RSM proved to be an effective and efficient method for evaluating the impact of multiple parameters on MPP absorber performance.
- RSM results closely matched laboratory outcomes, showing a strong correlation with decision variables, parameter limits, and study constraints.
- The Finite Element Method (FEM) and Equivalent Circuit Model (ECM) both demonstrated good agreement with impedance tube results, suggesting they are reliable alternatives to complex and expensive laboratory techniques.

5. ACKNOWLEDGMENT

The study was funded by Tehran University of Medical Sciences (TUMS).

بهینه‌سازی جاذب‌های صوتی میکروسوراخدار با استفاده از روش‌شناسی سطح پاسخ: اندازه‌گیری، مدل‌سازی و ارزیابی عملکرد

زهرا هاشمی^۱، محمدجواد شیخ‌مظفری^{۲*}، آزما پوترا^۳، مرضیه صادقیان^۴، نسرين اسدی^۵، سعید احمدی^۶، معصومه علی‌دوستی^۷

^۱دانشکده علوم پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی بهبهان، بهبهان، ایران

^۲گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران

^۳دانشکده مهندسی عمران و مکانیک، دانشگاه کورتین، خیابان کنت، بنتلی ۶۱۰۲، WA، استرالیا

^۴گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی جندی شاپور اهواز، اهواز، ایران

^۵دانشکده علوم پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی بهبهان، بهبهان، ایران

^۶گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای و ایمنی کار، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی قزوین، قزوین، ایران

^۷گروه بهداشت عمومی، دانشکده بهداشت، مرکز تحقیقات عوامل اجتماعی موثر بر سلامت، دانشگاه علوم پزشکی شهرکرد، شهرکرد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۶/۱۲، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۷/۸

مکیده

مقدمه: با وجود اینکه پنل‌های میکروسوراخدار (MPP) به عنوان نسل جدیدی از جاذب‌های صوتی و جایگزینی موثر برای جاذب‌های الیافی معرفی می‌شوند، این فناوری همچنان با چالش‌هایی مواجه است. مهم‌ترین ضعف این پنل‌ها، پهنای باند جذب محدود آنهاست که عمدتاً در اطراف فرکانس طبیعی متمرکز است. این محدودیت باعث می‌شود که MPP ها نتوانند به‌طور موثری طیف وسیعی از فرکانس‌ها را پوشش دهند، که این امر کارایی آنها را در کاربردهای مختلف کاهش می‌دهد. در نتیجه، بهینه‌سازی طراحی این پنل‌ها برای بهبود عملکرد جذب در گستره وسیع‌تری از فرکانس‌ها، به یکی از اهداف اصلی تحقیقات در این حوزه تبدیل شده است.

روش کار: در این مطالعه از روش سطح پاسخ (RSM) با رویکرد طراحی مرکب مرکزی (CCD) و نرم‌افزار Design Expert برای تعیین میانگین ضریب جذب نرمال در محدوده فرکانسی ۱۲۵ تا ۲۵۰۰ هرتز استفاده شد. همچنین شبیه‌سازی‌های عددی به روش اجزاء محدود (FEM) برای اعتبارسنجی نتایج RSM انجام گرفت. پس از بهینه‌سازی، یک جاذب MPP طراحی، ساخته و ضریب جذب نرمال آن با استفاده از لوله امپدانس اندازه‌گیری شد. مدل تئوریک مدار معادل (ECM) نیز برای پیش‌بینی ضریب جذب نرمال برای MPP ساخته شده استفاده شد.

یافته‌ها: فرایند بهینه‌سازی نشان داد که با تنظیم قطر سوراخ‌ها، درصد تخلخل و عمق حفره هوایی پشت پنل به ترتیب بر روی ۰.۳ میلی‌متر، ۲.۵٪ و ۲۵ میلی‌متر، حداکثر جذب در محدوده فرکانسی مورد نظر حاصل می‌شود. تحت این شرایط بهینه، میانگین ضریب جذب با پیش‌بینی‌های RSM در شبیه‌سازی‌های عددی، تئوریک و آزمایشگاهی هماهنگی نزدیک داشت و بهبود چشمگیری به میزان ۱۳۸٪ نسبت به MPP غیر بهینه‌شده نشان داد.

نتیجه‌گیری: این مطالعه کارایی و اثربخشی استفاده از RSM را برای ارزیابی پارامترهای مختلف مؤثر بر عملکرد MPP به نمایش گذاشت. همچنین مدل عددی FEM و مدل تئوریک ECM همبستگی قابل توجهی با نتایج لوله امپدانس نشان دادند و به‌عنوان جایگزین‌های مقرون‌به‌صرفه و قابل اعتماد برای روش‌های آزمایشگاهی سنتی پیشنهاد می‌شوند. این مدل‌ها سطح توافق قابل قبولی با نتایج تجربی ارائه دادند و پتانسیل خود را در کاربردهای عملی تایید کردند.

کلمات کلیدی: کنترل صدا، جاذب میکروسوراخدار، بهینه‌سازی، RSM، FEM، ECM

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبه: Mj.SheikhMozafari@gmail.com

کن خودرو (۲۱-۲۳)، وسایل پزشکی (۲۴) و حتی ترانسفورماتورهای توزیع برق (۲۵) شده است.

MPP یک پانل نازک و سخت با تعدادی سوراخ زیر یک میلی‌متر است که با نسبت معینی روی سطح پانل توزیع شده است. وقتی این پانل با فاصله‌ی مشخصی از دیوار نصب گردد باعث ایجاد ساختار تشدید می‌شود. جدای از مزایای فراوان این دسته از جاذب‌ها، عیب اصلی آن این است که جذب تنها در محدوده‌ی یک فرکانس طبیعی مشخصی، به علت وقوع پدیده‌ی تشدید در حجم هوای متصل به سوراخ هلم هولتز یا در فضای بین صفحه‌ی سوراخ‌دار و دیوار صلب، صورت می‌گیرد و انرژی انعکاس یافته کسر کوچکی از انرژی ورودی خواهد بود، در نتیجه پهنای باند جذب اندک خواهد بود (۲۶، ۲۷). مطالعات زیادی به منظور بهبود عملکرد این دسته از جاذب‌ها انجام شده است که می‌توان به ساختار لانه زنبوری در فضای پشت MPP (۲۸)، مالتی MPP با عمق‌های متفاوت حفره پشتی (۲۹)، MPP دو لایه با غشا نفوذپذیر (۳۰) و استفاده از پانل‌های MPP غیر مسطح (۳۱) اشاره کرد. متأسفانه، این راه‌حل‌ها به دلیل مشکلات فنی نصب و یا به دلیل در نظر نگرفتن هزینه بیش از حد، به ندرت به مرحله عمل در می‌آیند.

از آنجایی که پارامترهای مختلف یک MPP مانند قطر سوراخ، ضخامت صفحه، درصد تخلخل و ... تاثیر بسیار زیادی بر عملکرد آکوستیکی آن‌ها دارد، لذا یک استراتژی مهم جهت بهبود عملکرد آکوستیکی و سهولت استفاده MPPها، بهینه‌سازی این پارامترها است (۲۱، ۲۲). در سیستم‌های چند متغیره، زمانی که نوبت به شناسایی محدوده‌های واقعی یا تنظیمات بهینه می‌رسد، استفاده از بهینه‌سازی اغلب مورد نیاز است. در مطالعات مختلف به منظور بهینه‌سازی جاذب میکرو پرفوریتد از روش‌های بهینه‌سازی همچون الگوریتم ژنتیک (۳۲)، Simulated annealing (SA) (۳۳-۳۵) و Particle Swarm Optimization Algorithm (PSO) (۳۶) استفاده شده است. اگر چه نتایج قابل قبولی از این مطالعات حاصل شده اما این روش‌ها اغلب پیچیده و همگرایی کمی دارند.

با رشد و توسعه فناوری، صنعتی‌تر شدن فرایندها و گسترش شهرنشینی کنترل اصوات مخرب ناشی از آن به یک پدیده دشوار برای متخصصین آکوستیک تبدیل شده است (۱، ۲). کنترل و جذب صدا در فرکانس‌های پایین به دلیل طول موج بلند آن‌ها به یک چالش اساسی در حیطه کنترل صدا بدل شده است. مواد متخلخل نظیر مواد الیافی (پشم سنگ و پشم شیشه) به طور گسترده در کاربردهای مختلف برای کنترل و جذب صدا مورد استفاده قرار می‌گیرند (۳-۸)، اما این مواد برای اینکه جذب مناسبی در فرکانس‌های پایین داشته باشند، باید ضخامتی در حدود طول موج فرکانس مورد نظر داشته باشند، که این موضوع در بسیاری از موارد به دلیل محدودیت‌های فضای کنترلی و هزینه‌های تولید مقرون به صرفه نمی‌باشد (۹). از سوی دیگر مواد متخلخل الیافی در بسیاری از محیط‌های پاک مانند بیمارستان‌ها، صنایع غذایی، رستوران و غیره به دلیل اینکه استفاده از الیاف به دلیل پخش شدن ذرات الیافی در محیط محدودیت دارد کاربرد پذیری پایینی دارند. جدای از این مورد، مواد الیافی به دلیل ماهیت الیافی خود باعث ایجاد بیماری‌های پوستی و ریوی برای افراد می‌شود که باید در نظر گرفته شود.

پانل‌های میکرو سوراخ‌دار (MPP) که به عنوان جاذب‌های نسل جدید برای کنترل و کاهش صدا شناخته می‌شوند، دارای مزایای فراوانی همچون استحکام بالا، قابلیت شستشوی آسان، ظاهر زیبا، ماشین کاری فوق العاده و هزینه تولید پایین هستند (۱۰-۱۳). تحت شرایط ضخامت یکسان، MPP باند فرکانس جذبی گسترده‌تری نسبت به فلزات متخلخل دارد (۱۴، ۱۵). در همین حال، MPP ساخته شده از فلز در برابر شعله مقاومت و پایداری بالاتری نسبت به الیاف پلی استر نشان می‌دهد (۱۶، ۱۷). علاوه بر این، عملکرد جذب صدای MPP در فرکانس‌های پایین بهتر از مواد متخلخل با همان محدودیت ضخامت است (۱۸). مزایای ذکر شده MPP باعث استفاده گسترده در آکوستیک ساختمان (۱۹، ۲۰)، سیستم‌های خفه

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_u X_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \beta_{ij} X_i X_j \quad (1)$$

در این رابطه، k بیانگر تعداد متغیرهای مستقل است. X_i و X_j بیانگر متغیرهای مستقل هستند. β_0 نشان‌دهنده ضریب ثابت، $\beta_{ij} X_i X_j$ به ترتیب نشان‌دهنده ضرایب اثرهای خطی، اثرهای مربعی و متقابل می‌باشند. در این مطالعه، فرآیند بهینه‌سازی جاذب‌های میکروپرفوریتد با استفاده از روش‌شناسی سطح پاسخ (RSM) با رویکرد طراحی مرکب مرکزی (CCD) و با استفاده از نرم‌افزار Design Expert (11) بررسی شد. مورد بررسی میانگین ضریب جذب در پهنه فرکانسی ۱۲۵ تا ۲۵۰۰ هرتزی با گام‌های ۱ هرتزی است، که از فرمول زیر بدست می‌آید (۳۶).

$$\text{Maximise: } \bar{\alpha} = \frac{\sum_{i=1}^{N_0} \alpha(f_i)}{N_0}, i=1, 2, 3, \dots, N_0 \quad (2)$$

$\alpha(f_i)$ بیانگر مقدار ضریب جذب صدای نرمال در فرکانس f_i است. N_0 نماینده نسبت تفاوت بین حد بالا و پایین محدوده فرکانسی بر گام‌های فرکانسی است. متغیرهای تصمیم‌گیری و حدود آنها در این مطالعه عبارتند از:

$$0.1 \text{ mm} \leq d \leq 0.9 \text{ mm}$$

$$2\% \leq p \leq 4\%$$

$$10 \leq D \leq 30$$

$$t = 1 \text{ mm}$$

پاسخ (میانگین ضریب جذب نرمال) توسط روش عددی FEM شبیه‌سازی شد. معنی‌دار بودن یا نبودن هر یک از ضرایب مدل‌های ارائه شده توسط نرم‌افزار Design Expert، از طریق بررسی p -value مشخص شد و مقادیری که ارزشی بالاتر از ۰.۰۵ داشتند، معنی‌دار نبوده و از مدل حذف شدند تا مدل جدیدی با پارامترهای معنی‌دار ($p < 0.05$) به دست آیند. کیفیت مدل‌های مناسب از طریق بررسی ضریب همبستگی و ضریب همبستگی تنظیم شده مورد بررسی قرار گرفتند. همچنین برای بررسی تصویری و

از طرف دیگر روش به نسبت ساده‌ای همچون RSM برای بهینه‌سازی برخی ساختارهای اکوستیکی (۳۷-۴۰) همچون انواع مافرها (۳۶-۳۹) و جاذب متخلخل طبیعی (۴۰) بکارگرفته شده است. اما در مورد جاذب‌های MPP کمتر بکار برده شده است. بنابراین این مطالعه تلاشی است بمنظور معرفی روش بهینه‌سازی RSM در بهینه‌سازی پارامترهای ساختاری جاذب میکروپرفوریتد. در این مطالعه بمنظور بهینه‌سازی جاذب MPP از روش سطح پاسخ (RSM) استفاده شد. بهینه‌سازی بر اساس میانگین ضریب جذب نرمال صوتی در محدوده فرکانسی ۱۲۵ تا ۲۵۰۰ هرتز صورت پذیرفت. آزمون‌های RSM توسط روش عددی FEM شبیه‌سازی شدند. در نهایت جاذب بهینه شده طراحی، ساخته و ضریب جذب نرمال آن بوسیله امیدانس تیوب دو میکروفون و به روش تابع انتقال اندازه‌گیری شد. همچنین کاربرد روش تئوری مدار معادل (ECM) برای پیش‌بینی ضریب جذب نرمال در MPPها در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفت.

روش کار

روش سطح پاسخ

متدولوژی سطح پاسخ یک مجموعه از تکنیک‌های آماری و ریاضیات کاربردی برای ساخت مدل‌های تجربی است. هدف در طرح‌های سطح پاسخ، بهینه‌سازی پاسخ (متغیر وابسته) است که متأثر از چندین متغیر مستقل (متغیرهای ورودی) می‌باشد. در هر آزمایش تغییرات در متغیرهای ورودی به منظور تعیین علل تغییرات در متغیر پاسخ ایجاد می‌شوند. به محض اینکه یک مدل تقریبی به دست آمد، برازش شده و مورد آزمون قرار می‌گیرد که آیا جواب رضایت بخش است یا خیر، اگر جواب تایید نشود تخمین فرآیند دوباره شروع می‌شود و آزمایشات بیشتری انجام می‌شود. در این روش، تعداد آزمایش‌ها کاهش یافته و تمامی ضرایب مدل رگرسیون درجه اول و دوم و اثر متقابل فاکتورها، قابل برآورد هستند. در روش سطح پاسخ، تابع وابستگی بین متغیر وابسته (Y) و متغیرهای مستقل با رابطه چند جمله‌ای درجه دوم زیر بیان می‌شود:

از قطر خود اما کوچکتر از طول موج صوت برخوردی از یکدیگر جدا شده‌اند (۱۰). انتشار صدا داخل یک لوله‌ی باریک برای اولین بار توسط Rayleigh و بعد از آن توسط Crandall مورد بررسی قرار گرفت (۴۴، ۴۵). معادله‌ی دیفرانسیلی سرعت ذره‌ی (u) درون چنین لوله‌ی از رابطه‌ی (۳) بدست می‌آید.

$$j\omega\rho_0 u = \frac{\mu}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{\Delta p}{t} \quad (3)$$

در اینجا ω بسامد زاویه‌ای، ρ_0 چگالی هوا، μ ضریب چسبندگی هوا، r شعاع لوله، ΔP اختلاف فشار، t طول لوله (معادل با ضخامت پانل) و δ عملگر مشتق است. با حل معادله‌ی ۳ برای سرعت ذره‌ی و میانگین‌گیری بر روی سطح کلی لوله، سرعت ذره‌ی مطابق معادله‌ی ۴ حاصل می‌شود.

$$\bar{u} = -\frac{1}{j\omega\rho_0} \left[1 - \frac{2}{s\sqrt{-i}} \frac{j_1(s\sqrt{-i})}{j_0(s\sqrt{-i})} \right] \quad (4)$$

در رابطه‌ی (۴) J_1 و J_0 تابع بسل نوع اول با مرتبه‌ی صفر و مرتبه‌ی یک است. با حل این رابطه بر حسب فشار و سرعت ذره، امپدانس اکوستیکی یک حفره (تک سوراخ) حاصل می‌شود (رابطه ۵).

$$Z_{p(MPP)} = \frac{\Delta p}{u} = j\omega\rho_0 t \left[1 - \frac{2}{s\sqrt{-i}} \frac{j_1(s\sqrt{-i})}{j_0(s\sqrt{-i})} \right]^{-1} \quad (5)$$

در اینجا s ثابت سوراخ شدگی $s = d\sqrt{\frac{\omega\rho_0}{4\mu}}$ و d قطر حفره است. Crandall (۴۵) امپدانس تیوب‌های باریک را در محدوده‌ی $s < 1$ و $s > 10$ مورد مطالعه قرار داد. وی مشاهده کرد که در حالت اول نسبت رزیستانس به جرم راکتانس خیلی بزرگ است در حالی که این نسبت برای حالت دوم خیلی کوچک است. یک راه حل برای امپدانس یک حفره در مقادیر میانه s استفاده از روش تقریبی Maa، (رابطه (۶)) است (۱۰).

گرافیکی تاثیرات متغیرهای مستقل، از طرح‌های سه بعدی و کانتور مدل‌های رگرسیونی استفاده شد.

روش عددی المان محدود

بمنظور شبیه‌سازی پاسخ از روش عددی روش المان محدود (FEM) و نرم‌افزار COMSOL (5.3a) استفاده شد. ایده اصلی روش المان محدود بر این اساس استوار است که حوزه‌ی حل به زیر حوزه‌های کوچکتری تقسیم شده، مقادیر مجهول مسئله در هر زیر حوزه بر اساس یک مجموعه توابع درون یابی به مقادیر گره‌ها یا لبه‌های آن زیر حوزه مرتبط می‌شود. مطابق استاندارد ISO 10534-2 (۴۱) برای تعیین ضریب جذب نرمال به روش عددی، یک کانال مستطیلی نماینده امپدانس تیوب است. بنابراین هندسه مسئله بصورت یک مستطیل دو بعدی با طول کانال ۲۵۰ میلی‌متر و عرض ۱۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. بزرگترین اندازه مش برابر با ۴ میلی‌متر، دانسیته هوا برابر با $1,225 \text{ kg/m}^3$ و سرعت صوت برابر با ۳۴۳ m/s است. در حین شبیه‌سازی فرض بر این بوده که پانل MPP به اندازه‌ی سخت است که می‌توان ارتعاش MPP بر اثر برخورد موج صوتی به آن را نادیده گرفت.

مدل مدار معادل (ECM)

اولین بار Maa مفهوم ایجاد جاذب MPP، مبانی نظری و دستورالعمل‌های طراحی آن را پیشنهاد داد (۱۰، ۴۲). ایده انقلابی Maa بر این اساس استوار بود که با کاهش قطر سوراخ‌های سطح پانل می‌توان مقاومت را تا حدی بالا برد که بدون نیاز به جاذب‌های فیبری و متخلخل، جذب صدای قابل قبولی ایجاد کرد. ضریب جذب در واقع تخمینی از امپدانس جاذب MPP است که توسط رابطه زیر بدست می‌آید (۴۲).

$$\alpha = \frac{4R[Z_{tot}]}{(1 + \text{Re}[Z_{tot}])^2 + \text{Im}[Z_{tot}]^2} \quad (2)$$

جاذب MPP را می‌توان توزیعی از لوله‌های کوتاه و باریک روی سطح پانل در نظر گرفت که با فاصله‌ای بزرگتر

حداکثری نسبت به دیوار نصب می شوند. امپدانس لایه هوا از رابطه زیر بدست می آید.

$$Z_D = -j \rho c \cot\left(\frac{\omega D}{c}\right) \quad (11)$$

ρc امپدانس مشخصه در هوا است. با توجه به قوانین سری و موازی در مدارهای الکتریکی، امپدانس آکوستیکی معادل از رابطه زیر بدست می آید.

$$Z_{tot} = \left(\frac{1}{R-M}\right)^{-1} + Z_D \quad (12)$$

Z_{tot} برابر با امپدانس کلی MPP ساده و تک حفره است و می توان از آن برای تخمین ضریب جذب (رابطه ۲) استفاده کرد. مدل مدار معادل بر پایه نظریه Maa تدوین شده است و یک روش ساده برای محاسبه امپدانس ورودی می باشد. در مدل مدار معادل، امپدانس آکوستیکی، اختلاف فشار و سرعت ذره‌ای به ترتیب، معادل با امپدانس الکتریکی، اختلاف ولتاژ و جریان الکتریکی است (شکل ۱). این روابط (۲-۱۲) در متلب کد نویسی و ضریب جذب نرمال MPP تحت عنوان مدل تئوری مدار معادل بدست آمد.

تأیید تجربی

برای تأیید صحت و اثربخشی بهینه‌سازی عملی به روش RSM، همچنین تأیید نتایج مدلسازی تئوری (ECM) و عددی (FEM) لازم است این نتایج با نتایج حاصل از تست آزمایشگاهی (امپدانس تیوب) مقایسه گردند. برای ساخت جاذب MPP بهینه شده از رزین اپوکسی UV بود که توسط پرینتر سه بعدی و با استفاده از تکنولوژی MSLA در دو سایز ۳۰ و ۱۰۰ میلی متری ساخته و ضریب جذب صوتی نرمال آن، توسط لوله امپدانس تیوب دو میکروفون BSWA مدل SW420-470 ساخت کشور چین و بر اساس روش تابع انتقال و استاندارد ISO10534-2 اندازه‌گیری شد. در روش

$$Z_{P(MPP)} = \frac{32\mu t}{d^2} \sqrt{1 + \frac{s^2}{32}} + j\omega\rho_0 t \left(1 + \frac{1}{\sqrt{3^2 + \frac{s^2}{2}}} \right) \quad (6)$$

بر اساس این فرضیه که سوراخ‌های روی پانل با فاصله‌ای بیش از قطرشان روی سطح توزیع شده است می توان گفت که امپدانس آکوستیکی پانل MPP برابر می شود با تقسیم امپدانس یک سوراخ بر درصد سوراخ شدگی.

$$Z_{MPP} = \frac{Z_P}{P\rho_0 c} = r - m \quad (7)$$

$$R = \frac{32\mu t}{Pd^2} \left(\sqrt{1 + \frac{s^2}{32}} + \frac{\sqrt{2}sd}{32t} \right) \quad (8)$$

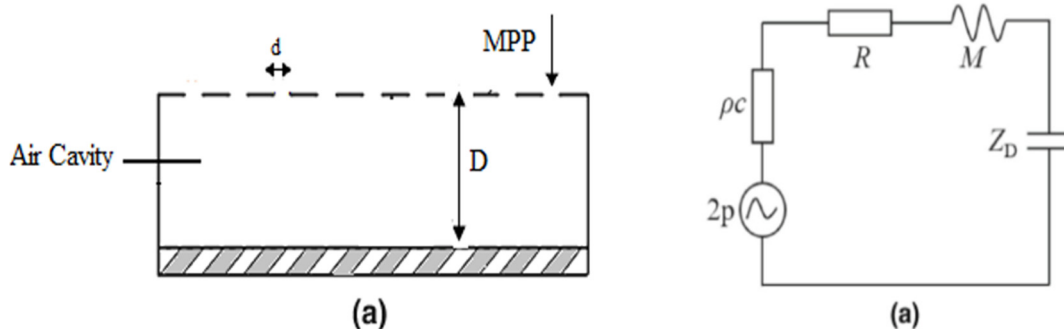
$$M = \frac{j\omega t \rho_0}{P} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{3^2 + \frac{s}{2}}} + 0.85 \frac{d}{t} \right) \quad (9)$$

در اینجا R و M به ترتیب، رزیستانس آکوستیکی نرمالیزه شده و راکتانس آکوستیکی نرمالیزه شده، ρ_0 دانسیته هوا، c_0 سرعت موج صوتی در هوا، p درصد سوراخ شدگی و η ویسکوزیته هوا می باشد.

جملات پایانی در معادلات ۸ و ۹ معرف تصحیح پایانی است که توسط Ingard و Maa (۱۰) پیشنهاد شده است. ضریب تصحیح R_s ضریبی است که به رزیستانس به دلیل ویسکوز اضافی ناشی از ارتعاش مولکول‌های هوا بر روی لایه مرزی ویسکو ترمال (سطح پانل) اضافه شده است. همچنین ضریب تصحیح $j0.85 \omega \rho_0 d$ مقدار تصحیحی است که به دلیل افزایش ظاهری ضخامت پانل ناشی از انتشار جرم هوا در داخل سوراخ‌ها به راکتانس اضافه شده است (۴۴). بنابراین تصحیح پایانی امپدانس مطابق رابطه‌ی زیر ارائه می‌شود:

$$Z_{end-cor} = \frac{\sqrt{2\mu\omega\rho_0}}{2} + j0.85\omega\rho_0 d \quad (10)$$

معمولاً MPP با فاصله‌ای به عمق D برای جذب



شکل ۱: مدار معادل مربوط به جاذب میکروپرفوریتد



شکل ۲: مجموعه امپدانس تیوب ۲ میکروفون استفاده شده در مطالعه

یافته‌ها

طراحی آزمایش، آنالیز آماری و بهینه‌سازی

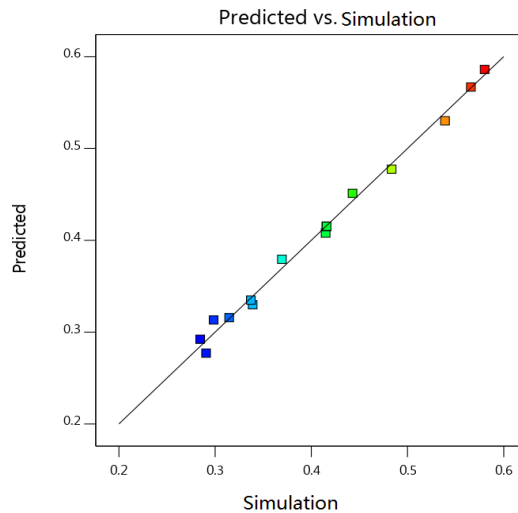
با توجه به سطوح متغیرها و بر اساس طرح مرکب مرکزی و چهار تکرار در نقطه مرکزی تعداد ۱۸ آزمون توسط RSM تعیین شد. در جدول شماره ۱ ماتریس مورد استفاده در این مطالعه نشان داده شده است. آزمایش‌ها به صورت تصادفی انجام شدند تا خطاهای سیستماتیک به حداقل برسند. در این مطالعه از روش عددی FEM برای انجام آزمون‌های پیشنهادی RSM استفاده شد. میانگین ضریب جذب صوتی پیش‌بینی شده و شبیه‌سازی در محدوده‌ی فرکانسی ۱۲۵ تا ۲۵۰۰ هرتز در جدول شماره ۱ آمده است. همانطور که مشاهده می‌شود مقادیر شبیه‌سازی شده هم خوانی مناسبی با مقادیر پیش‌بینی

تابع انتقال ابتدا سیگنال صوتی مورد نظر با استفاده از کامپیوتر و نرم‌افزار مربوطه تولید و از طریق بلندگو در طول لوله منتشر می‌گردد. سپس به وسیله اندازه‌گیری هم زمان فشارصوت در دو موقعیت ثابت میکروفن‌ها که در دیواره لوله می‌باشند، تابع انتقال فشار صوت و در نتیجه محاسبات ضریب جذب نرمال برای مواد آکوستیکی انجام می‌شود. مجموعه کلی لوله امپدانس شامل یک دستگاه اسپیکر، یک سیستم دیجیتال اندازه‌گیری فرکانس، دو لوله امپدانس با قطرهای ۳۰ و ۱۰۰ میلی‌متری، آمپلی‌فایر PA50، دو میکروفون مدل MPA416، و نرم‌افزار VA lab می‌باشد که در شکل ۲ نشان داده شده است. در نهایت نتایج ضریب جذب مدل‌های تئوری، عددی و آزمایشگاهی با یکدیگر مقایسه شدند.

جدول ۱: مقادیر میانگین ضریب جذب نرمال MPP پیش بینی شده و مقادیر واقعی

مقادیر وابسته		مقادیر مستقل			run
ضریب جذب		C: ضخامت فاصله هوایی (میلی‌متر)	B: درصد تخلخل (%)	A: قطر سوراخ (میلی‌متر)	
شبه سازی شده	پیش‌بینی شده				
۰.۵۳۹۰	۰.۵۳۱۰	۱۵	۲.۵	۰.۳	۱
۰.۳۳۹۰	۰.۳۲۹۸	۱۵	۲.۵	۰.۷	۲
۰.۴۱۵۹	۰.۴۱۵۳	۲۰	۳	۰.۵	۳
۰.۴۱۵۹	۰.۴۱۵۳	۲۰	۳	۰.۵	۴
۰.۲۹۸۵	۰.۳۱۳۳	۱۰	۳	۰.۵	۵
۰.۳۱۴۶	۰.۳۱۵۸	۲۵	۳.۵	۰.۷	۶
۰.۲۸۴۵	۰.۲۹۲۳	۲۰	۳	۰.۹	۷
۰.۴۱۵۹	۰.۴۱۵۳	۲۰	۳	۰.۵	۸
۰.۴۸۳۵	۰.۴۷۷۵	۱۵	۳.۵	۰.۳	۹
۰.۴۶۶۵۸	۰.۵۶۷۰	۲۰	۳	۰.۱	*۱۰
۰.۵۶۵۹	۰.۵۶۵۹	۲۵	۳.۵	۰.۳	۱۱
۰.۲۹۰۷	۰.۲۷۷۱	۱۵	۳.۵	۰.۷	۱۲
۰.۳۶۹۴	۰.۳۷۹۳	۲۰	۴	۰.۵	۱۳
۰.۴۱۴۸	۰.۴۰۷۹	۳۰	۳	۰.۵	۱۴
۰.۴۴۲۸	۰.۴۵۱۲	۲۰	۲	۰.۵	۱۵
۰.۴۱۵۹	۰.۴۱۵۳	۲۰	۳	۰.۵	۱۶
۰.۵۸۰۱	۰.۵۸۶۱	۲۵	۲.۵	۰.۳	۱۷
۰.۳۳۷۱	۰.۳۳۵۰	۲۵	۲.۵	۰.۷	۱۸

* آزمون حذف شده از آنالیز



شکل ۳: مقادیر شبه سازی شده در مقابل مقادیر پیش بینی شده

نتایج این آزمون در بخش بهینه‌سازی استفاده نگردد. در شکل ۳ اختلاف بین مقادیر شبه‌سازی و مقادیر پیش‌بینی شده پاسخ‌ها و نحوه پراکندگی خطاها آورده شده است. تجمع نقاط در اطراف خط وسط نشان می‌دهد

شده توسط روش "سطح پاسخ" داشتند. تنها یک مورد ناهمخوانی در ران شماره ۱۰ دیده شد. در گام نخست این آزمون مجدداً تکرار شد و چون نتایج حاصله با مقادیر پیش‌بینی شده متفاوت بودند تصمیم بر این شد که از

جدول ۲: آنالیز واریانس انجام شده روی پارامترها

مدل	جمع مربعات	df	مربع میانگین	F-value	P-value
	۰.۱۳۹۰	۷	۰.۰۱۹۹	۱۹۳.۸۴	< ۰.۰۰۱
A- قطر سوراخ (d)	۰.۱۱۴۱	۱	۰.۱۱۴۱	۱۱۱۳.۹۴	< ۰.۰۰۱
B- درصد تخلخل (p)	۰.۰۰۵۲	۱	۰.۰۰۵۲	۵۰.۳۸	< ۰.۰۰۱
C- ضخامت فاصله هوایی (D)	۰.۰۰۸۹	۱	۰.۰۰۸۹	۸۷.۳۳	< ۰.۰۰۱
AC	۰.۰۰۱۳	۱	۰.۰۰۱۳	۱۲.۵۸	۰.۰۰۶۳
BC	۰.۰۰۰۶	۱	۰.۰۰۰۶	۵.۴۹	۰.۰۴۳۹
A ²	۰.۰۰۷۷	۱	۰.۰۰۷۷	۷۵.۰۲	< ۰.۰۰۱
C ²	۰.۰۰۴۵	۱	۰.۰۰۴۵	۴۴.۱۴	< ۰.۰۰۱
Residual	۰.۰۰۰۹	۹	۰.۰۰۰۱		
Lack of Fit	۰.۰۰۰۹	۶	۰.۰۰۰۲		
Pure Error	۰.۰۰۰۰	۳	۰.۰۰۰۰		
Cor Total	۰.۱۳۹۹	۱۶			

R²=0.9934, Adjust R²= 0.9883

ضریب جذب داشته‌اند بترتیب پارامترهای خطی قطر حفره با علامت منفی، درصد پرفوریشن، عمق پشت پانل و پارامترهای درجه دوم قطر حفره بودند. (p<0.05) بر اساس نتایج حاصل از جدول آنالیز واریانس، مشخص شد که فاکتور قطر حفره در مقایسه با درصد پرفوریشن و عمق پشت صفحه MPP تاثیر جزیی بیشتری بر میانگین ضریب جذب صوتی MPP نشان می‌دهد. به عبارتی سهم تاثیرگذاری قطر حفره چه بصورت خطی و چه بصورت درجه دو بیشتر از دو متغیر درصد پرفوریشن و عمق حفره می‌باشد. همچنین با توجه به مقدار F (۱۹۳.۸۴) مشخص می‌شود که مدل قابلیت تخمین نتایج را در محدوده مورد بررسی برای پاسخ مورد نظر به خوبی دارا می‌باشد.

معادله نهایی بر اساس پارامترهای واقعی:

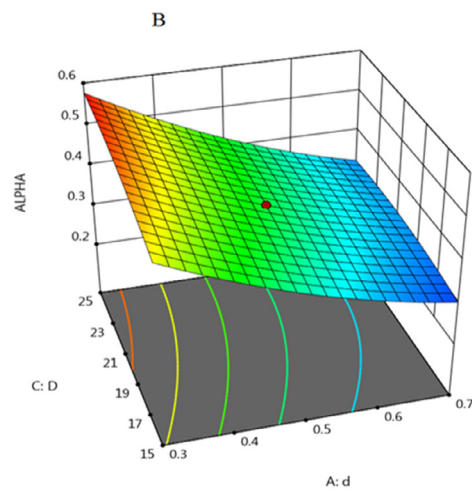
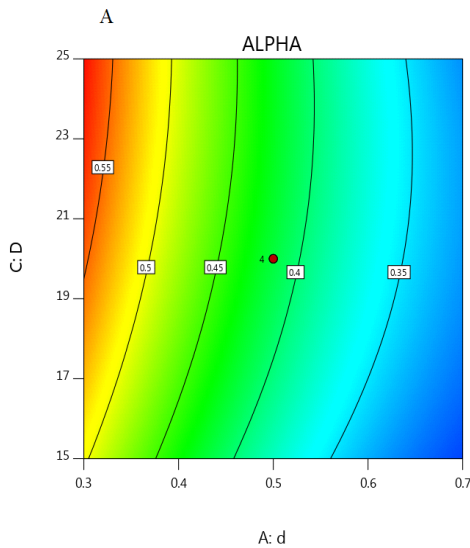
$$\text{ALPHA} = 6787 - 0.952932d - 0.102968p + 0.022880D - 0.012691dD + 0.003353pD + 0.642485d^2 - 0.000547D^2 \quad (13)$$

که نتایج شبیه‌سازی با نتایج به دست آمده از رابطه هم خوانی خوبی دارد. ضمناً همبستگی رضایت بخش و قابل قبولی بین مقادیر پیش‌بینی شده و شبیه‌سازی گزارش شد که قدرت مدل را تایید می‌کند (R²=0.9934). با استفاده از نرم Design Expert مدل درجه دومی برای متغیر پاسخ (میانگین ضریب جذب صوتی) بدست آمد و مشخصات آماری مجموع مربعات، درجه آزادی، میانگین مربعات و مقادیر P و F برای مدل ارائه شده در جدول ۲ آمده است. در فرمول ارائه شده (رابطه ۱۳)، ALPHA معرف میانگین ضریب جذب نرمال جاذب MPP است. و d-p-D بترتیب معرف قطر حفره، درصد پرفوریشن و عمق پشت صفحه MPP است. ضرایب رگسیون مثبت حاصل از مدل، نشان‌دهنده تاثیر مستقیم و ضرایب رگسیون منفی نشان‌دهنده تاثیر عکس پارامترها بر مقدار ضریب جذب است. بدیهی است که هرچه مقدار ضرایب در این مدل ارائه شده، بیشتر باشد، نشان‌دهنده تاثیر بیشتر آن پارامتر تلقی می‌شود. بر این اساس متغیرهایی که بیشترین تاثیر را بر مقدار میانگین

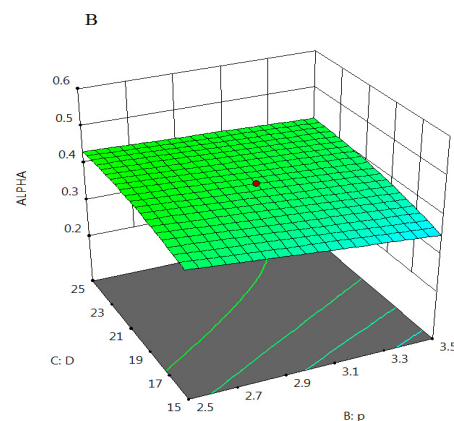
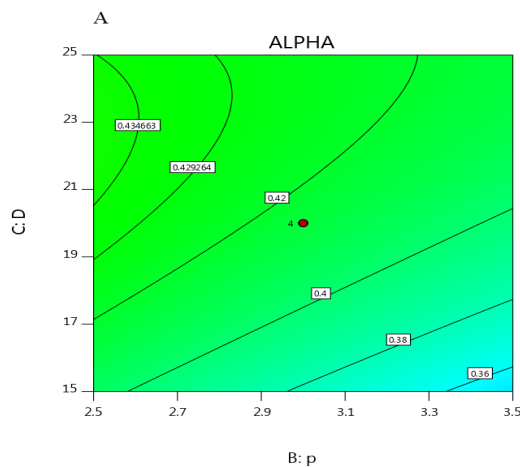
تاثیر متغیرهای مستقل بر میانگین ضریب جذب نرمال بنا بر شکل ۴- (A-B) میانگین ضریب جذب بیشینه در محدوده فرکانسی ۱۲۵ تا ۲۵۰۰ هرتز زمانی اتفاق می‌افتد که قطر حفره در محدوده ۰,۳ میلیمتر و عمق پشت صفحه MPP در حدود ۲۰ تا ۲۵ میلیمتر انتخاب شود.

از طرفی با توجه به شکل ۵ می‌توان اینچنین گفت که در عمق ۲۰ الی ۲۵ میلیمتر پشت صفحه MPP زمانی که درصد پرورش در محدوده ۲,۵ تا ۲,۷ درصد باشد

برای مشهود شدن اثر متغیرهای مستقل بر پاسخها، نحوه تاثیرگذاری این فاکتورها بر میانگین ضریب جذب صوتی و همچنین نحوه تاثیر متقابل پارامترها برهم، ارائه نمودارهای سه بعدی و کانتورها بسیار موثر است. از طریق بررسی این اشکال گرافیکی، می‌توان تاثیر متغیرهای مستقل بر پاسخ را در نقاط مختلف بررسی کرد و بدین ترتیب با یافتن نقطه تقاطع بین متغیرها، می‌توان مقدار دقیق ویژگی اندازه‌گیری شده تحت عنوان پاسخ را یافته و ثبت نمود.



شکل ۴: نمای دو بعدی (A) و سه بعدی (B) تاثیر متغیرهای d و D بر روی ضریب جذب



شکل ۵: دو بعدی (A) و سه بعدی (B) تاثیر متغیرهای P و D بر روی ضریب جذب

بسیار شبیه به یکدیگر می‌باشد. فرکانس رزونانس در روش عددی FEM برابر با ۱۳۰۰ هرتز و با اندکی اختلاف در روش تئوری ۱۳۱۰ هرتز می‌باشد. در فرکانس‌های پایین‌تر از فرکانس رزونانس، روش عددی FEM مقادیر بیشتری نشان می‌دهد، در حالی که در فرکانس‌های بالاتر از فرکانس رزونانس، این روش تئوری است که نتایج بالاتری را پیش‌بینی کرده است. فرکانس رزونانس در روش آزمایشگاهی برابر با ۱۳۹۰ هرتز بود. در فرکانس‌های زیر ۱۵۰۰ هرتز روش آزمایشگاهی مقادیر کمتری را نسبت به دو روش تئوری و عددی نشان می‌دهد. اگر چه مقادیر ضریب جذب آزمایشگاهی بعد از فرکانس رزونانس اندکی بالاتر از دو روش دیگر بود با این حال روند کاهشی با شبیهی ملایم و تقریباً هم راستا با دو روش تئوری و عددی می‌باشد.

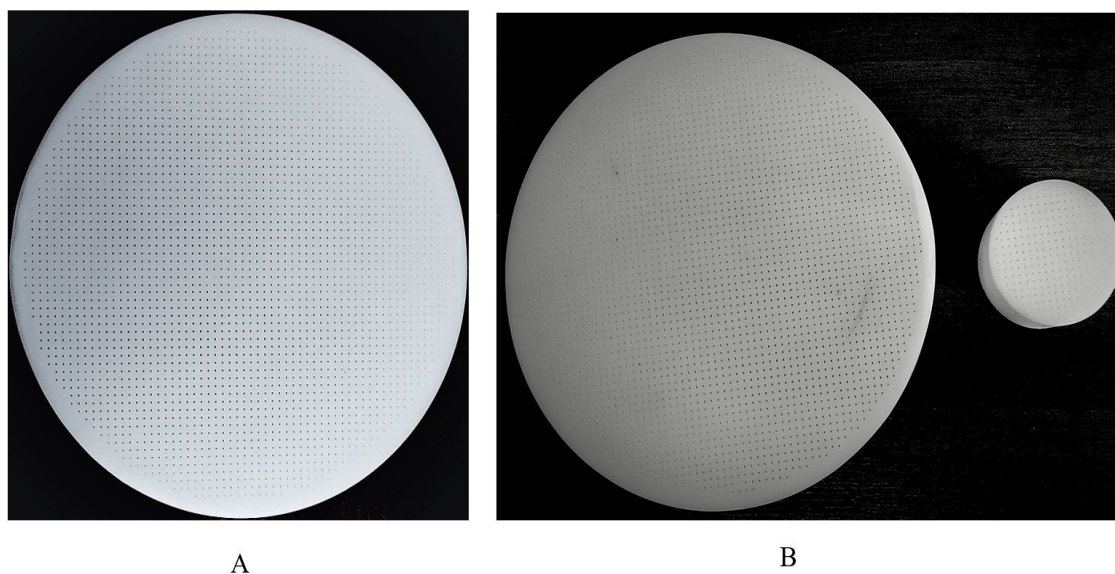
شکل ۸، مقایسه نتایج ضریب جذب نرمال در

جذب بیشینه اتفاق می‌افتد. در راستای بررسی سایر نتایج، تاثیر متقابل بین دو پارامتر قطر حفره و درصد پرفوریشن بر میانگین ضریب جذب بارز نبود. پس از اجرای برنامه بهینه‌سازی، پارامترهای بهینه شده MPP، در جدول شماره ۳ آورده شده است.

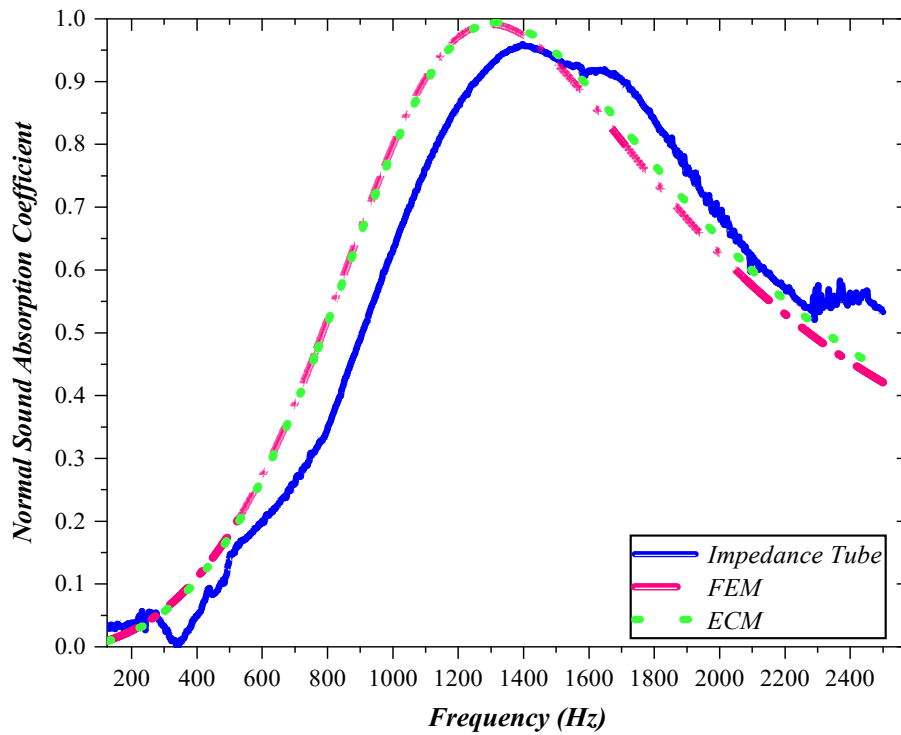
نمونه‌ی بهینه‌ی ساخته شده در دو قطر ۱۰ و ۳ سانتی‌متر در شکل ۶ نشان داده شده است. همچنین مقادیر بهینه‌سازی شده در معادلات مربوطه (۲-۱۲) که در متلب کد نویسی شده بود، قرار گرفت و ضریب جذب نرمال MPP به روش ECM محاسبه شد. نتایج حاصله با نتایج بدست آمده از روش عددی FEM و نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفت (شکل ۷). همانطور که از شکل ۷ مشخص است، دو روش عددی و تئوری تقریباً روند یکسانی دارند و نتایج بدست آمده

جدول ۳: پارامترهای ساختاری بهینه شده برای جاذب MPP

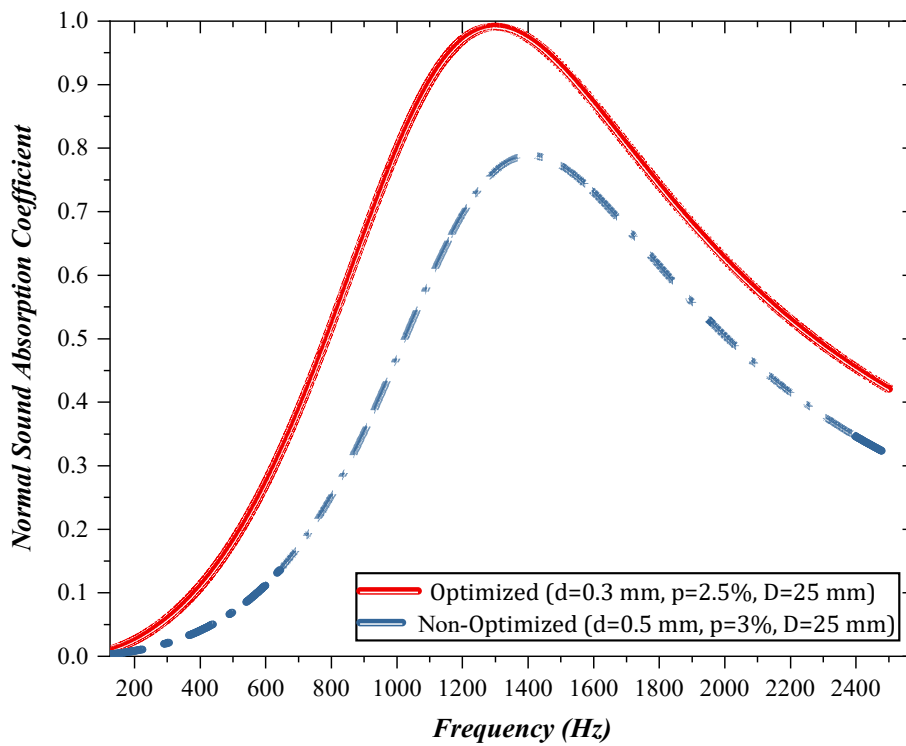
پارامتر	قطر حفره (میلی‌متر)	درصد تخلخل (%)	ضخامت فاصله هوایی (میلی‌متر)
MPP	۰.۳	۲.۵	۲۵



شکل ۶: نمونه‌های MPP ساخته شده، (A: از نمای نزدیک، B: دو نمونه در کنار یکدیگر)



شکل ۷: مقایسه نتایج ضریب جذب نرمال MPP بهینه شده توسط روش های آزمایشگاهی، عددی و تئوری



شکل ۸: مقایسه ضریب جذب نرمال در دو حالت بهینه شده و غیر بهینه شده

جدول ۴: نتایج آزمایشات تاییدی و مقایسه آن با نتایج شرایط بهینه

۹۵% PI high	میانگین داده‌ها			۹۵% PI low	SE Pred	n	پاسخ
۰.۶۱۰۱۹۵	FEM	ECM	تجربی	۰.۵۶۱۹۱۶	۰.۰۱۰۱۲۱۲	۳	آلفا
	۰.۵۸۰۴۲۴	۰.۵۸۳۹۲۸	۰.۵۶۱۹۶				

نیز بدست آمده است (۴۸، ۴۹). این پدیده را می‌توان اینگونه توضیح داد که یک جاذب MPP با مشخصات معلوم دارای یک امپدانس مشخص است که مشتمل بر دو بخش رزیستانس و راکتانس می‌باشد. رزیستانس معرف تلفات ویسکوز موج صوتی منتشره در میان سوراخ‌ها است و راکتانس اشاره به جرم هوای متحرک در میان سوراخ‌ها دارد. وقتی به واسطه کاهش قطر حفره، جرم هوای متحرک یا به عبارتی راکتانس کاهش می‌یابد برای ثابت ماندن امپدانس سیستم، لازم است که رزیستانس آن افزایش پیدا می‌کند. بنابراین می‌توان این چنین نتیجه گرفت که دلیل افزایش میانگین ضریب جذب، رزیستانس اکوستیکی بالا و جرم اکوستیکی کمتر ناشی از حفرات کوچکتر است. در ادامه این بحث می‌توان این سوال را مطرح کرد تا چه حد روند کاهش قطر حفره می‌تواند باعث افزایش میانگین ضریب جذب شود. آیا افزایش رزیستانس (کاهش راکتانس) می‌تواند به بهبود عملکرد جاذب منتهی شود؟ بخاطر داشته باشیم که بسیاری از فاکتورهای تاثیر گذار بر کارکرد جاذب‌های MPP دارای حدودی هستند که خارج از آن محدوده، افت شدید عملکرد جاذب را در پی دارد. مسلماً تعیین حدود بهینه با آزمودن سناریوهای مختلف زمان زیادی به خود اختصاص می‌دهد (۵۰). در اینجا است که روش‌های بهینه‌سازی اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کنند. انتخاب روش مناسب بهینه‌سازی، تعداد متغیرها، حدود انتخابی برای هر پارامتر و محدودیت‌های مطالعه (به عنوان مثال محدوده فرکانسی مورد نظر) از مهمترین عوامل تاثیر گذار بر در مقادیر بهینه شده و در نهایت مقدار پاسخ دارد. در این مطالعه روش RSM با در نظر گرفتن عوامل ذکر شده قطری از حفره را مشخص می‌کند که در عین

حالت‌های بهینه و غیر بهینه جاذب میکروپرفوریتد را نشان می‌دهد. در هر دو حالت عمق پشت صفحه میکروسوراخ‌دار یکسان و برابر با ۲۵ میلی‌متر فرض شده است. همان طور که در شکل قابل مشاهده است ضریب جذب در حالت بهینه در تمام طیف فرکانسی مورد بررسی بالاتر از حالت غیر بهینه است و این تفاوت در پایین‌تر از فرکانس رزونانس مشهودتر است. میانگین ضریب جذب در حالت بهینه ۱,۳۸ برابر میانگین ضریب جذب در حالت غیر بهینه است.

در این مطالعه ۳ آزمون برای هر کدام از روش‌های تئوری، عددی و آزمایشگاهی بمنظور تایید مدل در شرایط بهینه صورت گرفت. همانطور که از جدول شماره ۴ مشخص است میانگین ضریب جذب در هر سه روش عددی، تئوری و آزمایشگاهی در محدوده پیش‌بینی RSM قرار گرفته است و بدین معنی است که مدل قابلیت دست یافتن به مقادیر پیش‌بینی شده توسط روش سطح پاسخ را دارد. از طرفی اگر چه اختلاف این سه روش در پیش‌بینی مقدار ضریب جذب ناچیز است اما روش آزمایشگاهی مقدار پایین‌تری را نسبت به دو روش دیگر نشان داده است.

بحث

همانطور که در بخش نتایج مشخص شد، با کوچکتر شدن قطر حفره میانگین ضریب جذب در محدوده مورد بررسی (۱۲۵-۲۵۰ هرتز) افزایش داشته است. نتایج مطالعه موسی و همکاران نشان داد که با کاهش قطر حفره از ۱ به ۰.۴ میلی‌متر پیک جذب کاهش و گستره فرکانسی جذب افزایش می‌یابد (۴۷) این نتیجه که همسو با مطالعه‌ی حاضر است در مطالعات دیگری

بلندتری (فرکانس‌های کمتر) می‌توانند در جاذب وارد شوند و در این رفت و برگشت بخشی از امواج همدیگر را تضعیف کرده و روی هم رفته باعث کاهش دامنه حاصل موج صوتی می‌شود. مطالعات زیادی همسو با این نتیجه هستند که می‌توان به رفرنس‌های (۴۷، ۵۱، ۵۲) اشاره کرد.

همچنین پیک MPP بهینه در فرکانس حدوداً 1400 هرتز رخ داده است که طول موج متناظر با آن برابر 23.8 سانتیمتر است. با توجه به قانون ($D_{total} = \lambda/5.3$) (۵۳) و عمق ساختار MPP ($d_{total} = 2.5 \text{ cm}$) مشاهده می‌شود که پیک جذبی در عمقی کمتر از قانون $1/4$ طول موج اتفاق افتاده است. این بدان معناست که می‌توان با بهینه‌سازی، ساختارهایی با ضخامت کمتر طراحی کرد و در مکان‌هایی که از لحاظ فضا دارای محدودیت هستند این مسئله اهمیت زیادی دارد.

همانطور که در بخش متد نیز ذکر شد از مدل FEM برای شبیه‌سازی آزمون‌های بهینه‌سازی RSM استفاده شد. چانگ و همکاران در مطالعه‌ای به منظور بهینه‌سازی MPP به روش PSO نیز از روش FEM برای شبیه‌سازی استفاده کرده است که نتایج موید هم خوانی قابل قبول نتایج شبیه‌سازی و نتایج آزمایشگاهی بود (۳۶). همچنین در مطالعه ALISAH بمنظور بهینه‌سازی Expansion Chamber از روش RSM استفاده شد و آزمون‌های پیشنهاد شده بمنظور بهینه‌سازی توسط BEM شبیه‌سازی شد. به منظور صحت‌گذاری BEM، افت انتقال Expansion Chamber با استفاده از امیدانس تیوب ۴ میکروفون مورد تست قرار گرفت و تشابه خوبی بین نتایج دو روش دیده شد (۵۴). بکارگیری مدل‌های پیش‌بینی‌کننده در حوزه‌ی آکوستیک و جذب صدا اعم از مدل‌های عددی و تئوری روز به روز در حال توسعه و پیشرفت است. یکی از کارآمدترین این مدل‌ها، روش عددی FEM است که در مطالعات زیادی به منظور پیش‌بینی عملکرد آکوستیکی انواع جاذب‌ها، عایق‌ها و مافلرها استفاده شده است. نتایج مطالعات مختلف نشان می‌دهد اگر چه تفاوت‌هایی بین نتایج FEM و

گسترده‌ی وسیع دارای پیک قابل توجه در محدوده‌ی فرکانسی مورد نظر (۱۲۵-۲۵۰۰ هرتز) باشد. که در این مطالعه قطر 0.3 میلی‌متر به عنوان قطر بهینه انتخاب شد. فاکتور تاثیر گذار بعدی بر عملکرد آکوستیکی جاذب MPP درصد پرفوریشن است. نتایج نشان داد که کاهش درصد پرفوریشن باعث افزایش میانگین ضریب جذب در محدوده فرکانسی مورد مطالعه می‌شود. مطابق با روابط نظری بیان شده توسط maa (۴۳) وقتی ضخامت پانل MPP و فاصله هوایی پشت پانل ثابت در نظر گرفته شود، رزونانس فرکانسی رابطه مستقیمی با درصد پرفوریشن دارد. بدین معنی که کاهش درصد پرفوریشن منجر به کاهش فرکانس رزونانس (فرکانس پیک) می‌شود. و چون محدوده‌ی مورد بررسی در این مطالعه در رنج فرکانسی پایین و تا حدودی میانی است، شیفت فرکانس رزونانس به فرکانس‌های پایین به واسطه کاهش درصد پرفوریشن منجر به بهبود و ارتقا عملکرد MPP شده است. مطالعات دیگری همسو با نتایج این بخش هستند که می‌توان به موسی و همکاران (۴۷) و Bucciarelli (۵۱) اشاره کرد. در این مطالعات با کاهش درصد پرفوریشن شاهد پیک رزونانس در فرکانس‌های پایین‌تر هستیم. عمق یا فاصله هوایی پشت پانل فاکتور تاثیر گذار بعدی در مدل پیشنهاد شده RSM است. نتایج نشان دادند که با افزایش عمق پشت صفحه، میانگین ضریب جذب در محدوده فرکانسی ۱۲۵ تا ۲۵۰۰ هرتز افزایش می‌یابد. در جاذب‌های تشدیدی، فاصله هوایی در واقع نقش فنریت را ایفا می‌کند که مقدار آن تحت کنترل اندازه‌ی عمق است. هر چه عمق فاصله هوایی بیشتر باشد سختی یا فنریت آن کمتر می‌شود بعبارتی برای به ارتعاش در آوردن سیالی با درجه سختی کمتر انرژی صوتی کمتری لازم است و امواج صوتی با فرکانس کمتر (انرژی کمتر) قادر به ارتعاش آن می‌شوند. از دیدگاه ویبرواکوستیک جذب صدا در صفحات سوراخ‌دار تحت تاثیر رزونانس حجم هوای در حال ارتعاش در حفره‌ها و فضای پشتی است و در نتیجه ضریب جذب در این محدوده فرکانسی افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش فاصله‌ی هوایی طول موج‌های

- کاهش درصد پرفوریشن و افزایش عمق پشت صفحه باعث افزایش میانگین ضریب جذب در محدوده فرکانسی مورد مطالعه شد.
- روش RSM بدلیل امکان ارزیابی اثرات پارامترهای متعدد بر عملکرد جاذب‌های میکروپوریتند بسیار موثر و کارا است. و نتایج بدست آمده از آن هم خوانی نسبتا خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. همچنین نتایج بهینه‌سازی ارتباط مستقیمی با متغیرهای تصمیم‌گیری، حدود انتخابی برای هر پارامتر و محدودیت‌های در نظر گرفته شده در آن فرآیند دارد.
- نتایج بدست آمده از RSM به خوبی با یافته‌های آزمایشگاهی تطابق داشت، علاوه بر این، خروجی‌های بهینه‌سازی مستقیما با متغیرهای تصمیم‌گیری، حدود پارامترها، و محدودیت‌های مشخص شده ارتباط داشت.
- مدل عددی FEM و مدل تئوری ECM هم خوانی قابل قبولی با نتایج بدست آمده از امپدانس تیوب دارند و می‌توان جایگزین مناسبی برای روش‌های هزینه بر و سخت آزمایشگاهی شوند.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله لازم می‌دانند مراتب قدردانی و تشکر خود را از دانشکده علوم پزشکی بهبهان بخاطر حمایت مالی به شماره ۴۰۹۳ اعلام نمایند.

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 NIHIL Predictor Tool. *J Occup Health Epidemiol* 2022; 11 (3):209-222.
3. 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.*

نتایج بدست آمده از آزمون‌های آزمایشگاهی (امپدانس تیوب و اتاق بازآوا) دیده می‌شود با این حال این روش همچنان یک ابزار شبیه‌سازی قدرتمند در حوزه اکوستیک محسوب می‌شود (۵۵-۶۲). همچنین روش ECM به عنوان یک روش تئوری در محاسبه ضریب جذب ساختارهای اکوستیکی و بخصوص MPPها کاربرد گسترده‌ای دارد (۵۵-۶۱). نتایج مطالعه حاضر نیز نشان داد که تشابه خوبی بین نتایج حاصل از روش تئوری ECM و روش آزمایشگاهی وجود دارد و می‌توان در کنار سایر روش‌ها، این روش نیز به کار گرفته شود. در نهایت با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان گفت که مدل‌سازی ساختارهای اکوستیکی (تئوری عددی) یک راه حل مقرون به صرفه برای طراحی ساختارهایی با عملکرد بالا به منظور کاهش میزان صدا است و می‌توان با دقت بالایی جایگزین روش‌های سخت و هزینه بردار آزمایشگاهی شوند.

نتیجه گیری

در این مطالعه، فرآیند بهینه‌سازی MPP با استفاده از RSM و با رویکرد CCD و با استفاده از نرم‌افزار Design Expert در بازه فرکانسی ۱۲۵ تا ۲۵۰۰ هرتز با استفاده از روش‌های تجربی و عددی بررسی شد. مهم‌ترین یافته‌های مطالعه به شرح زیر است:

- Mater. 2024;445:137935.
4. Mohammad Alizadeh P, Ahmadi O, Shekooihiyan S, SheikhMozafari M. 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.
5. Lashgari M, Taban E, SheikhMozafar MJ, Soltan P, Attenborough K, Khavanin A. Wood chip sound absorbers: Measurements and models. *Appl Acoust.* 2024;220:109963.
6. 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.

7. 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.
8. Haghghat M, Samaei SE, Amininasab S, Faridan M, Mehrzad S, Sheikhmozafari MJ, et al. The impact of fiber size on the sound absorption behavior of composites made from sugarcane bagasse wastes fibers. *J. Nat. Fibers.* 2023;20(1):2175760.
9. Dupont T, Leclair P, Panneton R, Umnova O. A microstructure material design for low frequency sound absorption. *Appl Acoust.* 2018;136:86-93.
10. Maa D-Y. Potential of microperforated panel absorber. *J. Acoust. Soc Am.* 1998;104(5):2861-6.
11. Chiang Y, Choy YS. Acoustic behaviors of the microperforated panel absorber array in nonlinear regime under moderate acoustic pressure excitation. *J. Acoust. Soc Am.* 2018;143(1):538-49.
12. Kim H-S, Ma P-S, Kim S-R, Lee S-H, Seo Y-H. A model for the sound absorption coefficient of multi-layered elastic micro-perforated plates. *JSV.* 2018;430:75-92.
13. 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.
14. Bansod PV, Teja TS, Mohanty AR. Improvement of the sound absorption performance of jute felt-based sound absorbers using micro-perforated panels. *J. low freq. noise vib. act. control.* 2017;36(4):376-98.
15. Gai X-L, Li X-H, Zhang B, Xing T, Zhao J-J, Ma Z-H. Experimental study on sound absorption performance of microperforated panel with membrane cell. *Appl Acoust.* 2016;110:241-7.
16. Toyoda M, Fujita S, Sakagami K. Numerical analyses of the sound absorption of cylindrical microperforated panel space absorbers with cores. *J. Acoust. Soc Am.* 2015;138(6):3531-8.
17. Chang D, Lu F, Jin W, Liu B. Low-frequency sound absorptive properties of double-layer perforated plate under grazing flow. *Appl Acoust.* 2018;130:115-23.
18. Yang M, Sheng P. Sound absorption structures: From porous media to acoustic metamaterials. *Annu. Rev. Mater. Res.* 2017;47:83-114.
19. Yu X, Lau S-K, Cheng L, Cui F. A numerical investigation on the sound insulation of ventilation windows. *Appl Acoust.* 2017;117:113-21.
20. Yu X, Cui F, Cheng L. On the acoustic analysis and optimization of ducted ventilation systems using a sub-structuring approach. *J Acoust. Soc Am.* 2016;139(1):279-89.
21. Allam S, Åbom M. A new type of muffler based on microperforated tubes. *J Vib Acoust.* 2011;133(3):031005.
22. Xiang L, Zuo S, Wu X, Liu J. Study of multi-chamber micro-perforated muffler with adjustable transmission loss. *Appl Acoust.* 2017;122:35-40.
23. Shi X, Mak C-M. Sound attenuation of a periodic array of micro-perforated tube mufflers. *Appl Acoust.* 2017;115:15-22.
24. Li G, Mechefske CK. A comprehensive experimental study of micro-perforated panel acoustic absorbers in MRI scanners. *Magn. Reson. Mater. Phys. Biol. Med.* 2010;23:177-85.
25. Liu D, Du B, Yan M, Wang S. Suppressing noise for an HTS amorphous metal core transformer by using microperforated panel absorber. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity.* 2016;26(7):1-5.
26. Wang C, Huang L, Zhang Y. Oblique incidence sound absorption of parallel arrangement of multiple micro-perforated panel absorbers in a periodic pattern. *JSV.* 2014;333(25):6828-42.
27. 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.
28. 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. *NCEJ.* 2011;59(4):363-71.
29. 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.
30. Sakagami K, Fukutani Y, Yairi M, Morimoto M. Sound absorption characteristics of a double-leaf structure with an MPP and a permeable membrane. *Appl Acoust.* 2014;76:28-34.
31. Hashemi Z, Fahim A, Monazzam MR. Investigation of the Effect of Non-Flat Surfaces on the Performance of Perforated Acoustic Absorber. *Arch. Acoust.* 2023;171-

- 81--81.
32. Qian Y, Cui K, Liu S, Li Z, Shao D, Kong D, et al. Optimization of multi-size micro-perforated panel absorbers using multi-population genetic algorithm. *NCEJ*. 2014;62(1):37-46.
 33. Chang Y-C, Yeh L-J, Chiu M-C. Optimization of constrained composite absorbers using simulated annealing. *Appl Acoust*. 2005;66(3):341-52.
 34. Ruiz H, Cobo P, Jacobsen F. Optimization of multiple-layer microperforated panels by simulated annealing. *Appl Acoust*. 2011;72(10):772-6.
 35. 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.
 36. Lu C-H, Chen W, Zhu Y-W, Du S-Z, Liu Z-E. Comparison analysis and optimization of composite micro-perforated absorbers in sound absorption bandwidth. *Acoust. Aust*. 2018;46:305-15.
 37. Qin X, Wang Y, Lu C, Huang S, Zheng H, Shen C. Structural acoustics analysis and optimization of an enclosed box-damped structure based on response surface methodology. *Mater. Des*. 2016;103:236-43.
 38. Li Z, Liang X. Vibro-acoustic analysis and optimization of damping structure with Response Surface Method. *Mater. Des*. 2007;28(7):1999-2007.
 39. Wang Y, Qin X, Huang S, Lu L, Zhang Q, Feng J. Structural-borne acoustics analysis and multi-objective optimization by using panel acoustic participation and response surface methodology. *Appl Acoust*. 2017;116:139-51.
 40. Samaei SE, Taban E, Berardi U, Mousavi SM, Faridan M, Hassan A. Optimization and modeling of sound-absorption properties of natural fibers for acoustical application. *J. Nat. Fibers*. 2022;19(13):7157-73.
 41. British Standards Institution, Acoustics — Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes — Part 2: Transfer-function method, Bs En Iso 10534-2:2001. (2001).
 42. Maa D. Theory and design of microperforated panel sound-absorbing constructions. *Sci. Sin*. 1975;18(1):55-71.
 43. Maa D-Y. Microperforated-panel wideband absorbers. *NCEJ*. 1987;29(3):77-84.
 44. Rayleigh JWSB. *The theory of sound*: Macmillan; 1894.
 45. GH L. *Theory of Vibrating Systems and Sound*. Nature. 1927;120(3024):544.
 46. Ingard U. On the theory and design of acoustic resonators. *J. Acoust. Soc Am*. 1953;25(6):1037-61.
 47. 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.
 48. 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.
 49. Hashemi Z, Esmailpour MM, Nasirzadeh N, Farvareh E, Beigzadeh Z, Salari S. Estimation of Sound Absorption Behavior of Combined Panels Comprising Kenaf Fibers and Micro-Perforated Plates below 2500 Hertz. *JHSW*. 2023;12(4):872-94.
 50. İç YT. An experimental design approach using TOPSIS method for the selection of computer-integrated manufacturing technologies. *ROBOT CIM-INT MANUF*. 2012;28(2):245-56.
 51. Bucciarelli F, Fierro GM, Meo dM. A multilayer microperforated panel prototype for broadband sound absorption at low frequencies. *Appl Acoust*. 2019;146:134-44.
 52. Prasetyo I, Sihar I, Sudarsono AS. Realization of a thin and broadband microperforated panel (MPP) sound absorber. *Appl Acoust*. 2021;183:108295.
 53. 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.
 54. Alisah MI, Ooi LE, Ripin ZM, Yahaya AF, Ho K. Acoustic Attenuation Performance Analysis and Optimisation of Expansion Chamber Coupled Micro-perforated Cylindrical Panel Using Response Surface Method. *Arch. Acoust*. 2021;46(3):507-17.
 55. Mukae S, Okuzono T, Tamaru K, Sakagami K. Modeling microperforated panels and permeable membranes for a room acoustic solver with plane-wave enriched FEM. *Appl Acoust*. 2022;185:108383.
 56. 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.
 57. Guo W, Min H. A compound micro-perforated panel sound absorber with partitioned cavities of different depths. *Energy Procedia*. 2015;78:1617-22.

58. 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.
59. Carbajo J, Ramis J, Godinho L, Amado-Mendes P. Perforated panel absorbers with micro-perforated partitions. *Appl Acoust.* 2019;149:108-13.
60. Liu X, Wang C, Zhang Y, Huang L. Investigation of broadband sound absorption of smart micro-perforated panel (MPP) absorber. *Int. J. Mech. Sci.* 2021;199:106426.
61. Zhang Y, Shrestha M, Chen S, Chin YW, Lau G-K, Liu K, et al. An investigation on the acoustic impedance of a viscously damped micro-perforated rectangular membrane. *Appl Acoust.* 2023;209:109401.
62. Wang C, Liu X. Investigation of the acoustic properties of corrugated micro-perforated panel backed by a rigid wall. *MSSP.* 2020;140:106699.