

ORIGINAL RESEARCH PAPER

## Estimation of Sound Absorption Behavior of Combined Panels Comprising Kenaf Fibers and Micro-Perforated Plates below 2500 Hertz

Zahra Hashemi<sup>1</sup>, Mohammadreza Monazzam Esmailpour<sup>2</sup>, Nafiseh Nasirzadeh<sup>2</sup>, Ehsan Farvareh<sup>2</sup>, Zahra Beigzadeh<sup>2</sup>, Samaneh Salari<sup>2\*</sup>

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

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

Received: 2022-03-14

Accepted: 2022-07-31

### ABSTRACT

**Introduction:** Natural materials are more efficient and attractive than synthetic materials. In this study, the sound absorption behavior by natural kenaf composite and Micro-Perforated Panel (MPP) at low and medium frequency region was investigated.

**Material and Methods:** Initially, the results of kenaf fibers with a thickness of 10 mm were validated by the Finite Element Method (FEM) based on COMSOL Multiphysics 5.3a. The studied combined panel is consisting kenaf fibers with micro-perforated plates and an air layer. This study examined the varying arrangement of the behind layers of the MPP, the different thickness of the layers, and the structural parameters of MPP. The structure with the best absorption coefficient was chosen for the following stage and was considered constant at each stage.

**Results:** The arrangement of composite layers indicated a strong direct effect on the sound absorption performance; as we discovered that kenaf fibers behind MPP led to better performance in frequencies below 2500 Hz. In addition to the chamber depth behind the MPP, the material and macroscopic properties of the layers, at the same depth, are also important determinants of the exact point of the resonant frequency. Furthermore, configurations in which air layer depth is more than the absorption layer, with the same diameter (hole) and depth (chamber), maximum resonant absorption peak is achieved.

**Conclusion:** Low-frequency sounds can be successfully dissipated by combining MP plates with kenaf fibers as reinforcing absorber in combined panel. In general, choosing the optimum structural parameters (Composite panel according to structure A with 0.5 mm hole diameter and 2% perforation percentage) allows a significant absorption at a specific frequency range. In this context, the use of numerical estimation to assess the sound absorption behavior can be meticulously substituted the difficult methods and laboratory costs.

**Keywords:** Micro-Perforated Plate (MPP), Kenaf natural absorption, Combined panel, Low and medium frequencies

### HOW TO CITE THIS ARTICLE

Hashemi Z, Monazzam Esmailpour MR, 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, *J Health Saf Work*. 2023; 12(4): 872-894.

\* Corresponding Author Email: [salari-s@razi.tums.ac.ir](mailto:salari-s@razi.tums.ac.ir)

### 1. INTRODUCTION

In the past two decades, rapid industrialization and urbanization have resulted in environmental issues such as noise pollution. One of the most significant approaches to mitigate noise pollution can be achieved by sound absorbers. Absorption fibers decreases total sound by raising the absorption coefficient value of internal surfaces and minimizing reflected sound. Because of their eco-friendliness, lightweight, excellent electrical resistance, and low cost, natural fibers, such as kenaf fibers, are becoming a viable alternative to synthetic fibers. Furthermore, multilayer structural design has great absorption properties as well as being efficient in the low-frequency range. In the low-frequency range, traditional sound absorbers have proven to be ineffective. On the other hand, low-frequency sound remains a significant challenge today. Hence, in this study, a novel combined panel

at frequencies below 2500 Hz was investigated.

### 2. MATERIAL AND METHODS

The combined panel under study consisted of three layers of micro-perforated plate, kenaf fibers, and air layer. Three A-B-C constructions were investigated to discover how the structural arrangement impacted the absorption performance (Fig 1). The first step was to relocate the layers behind the MPP, while keeping the same components and thickness. After identifying the optimum layout with the best absorption coefficient, the next steps in this research were to determine the best of hole diameter and afterwards perforation rate. Finally, the effect of different kenaf fiber thickness and depth layers behind the MPP on the absorption coefficient was investigated. The remaining modes were removed when determining the optimal factor, as well as the selected factor was input as the

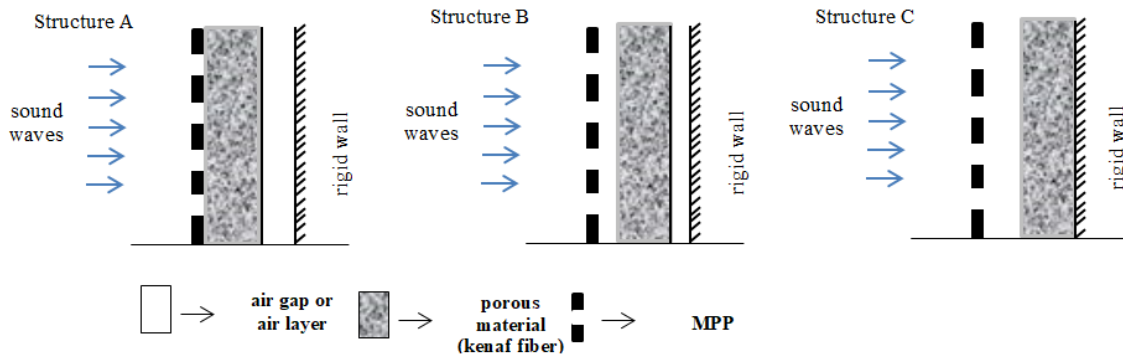


Fig. 1: Types of different structures and arrangement investigated in this research

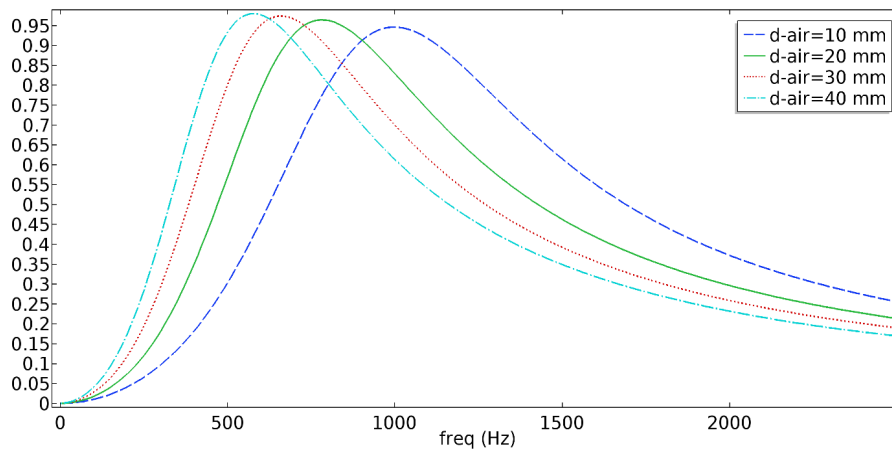


Fig. 2: The effect of air layer depth on the absorption performance at structure A. (MPP perforation 2%, hole diameter 0.5, porous absorbent layer thickness 10 mm.)

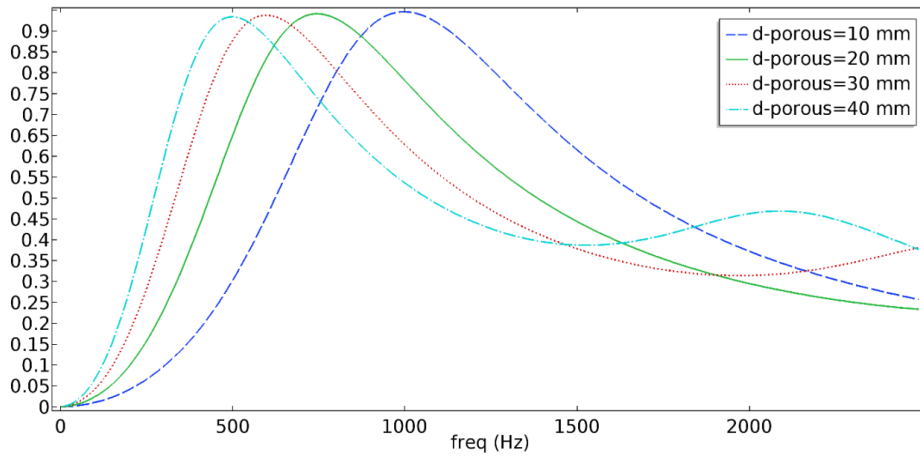


Fig. 3: The effect of kenaf fiber thickness on the absorption performance at structure A. (MPP perforation 2%, hole diameter 0.5, air layer thickness 10 mm.)

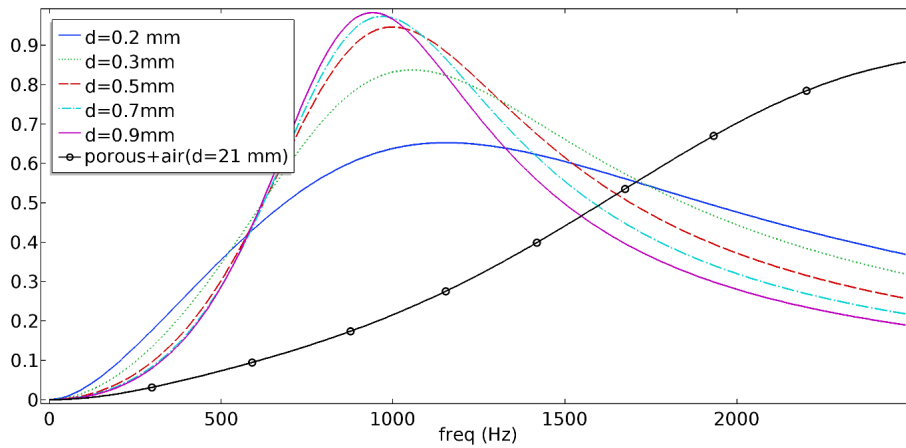


Fig. 4: The effect of hole diameter on the absorption performance at structure A. (MPP perforation 2%, air layer thickness 10 mm, porous absorbent layer thickness 10 mm.)

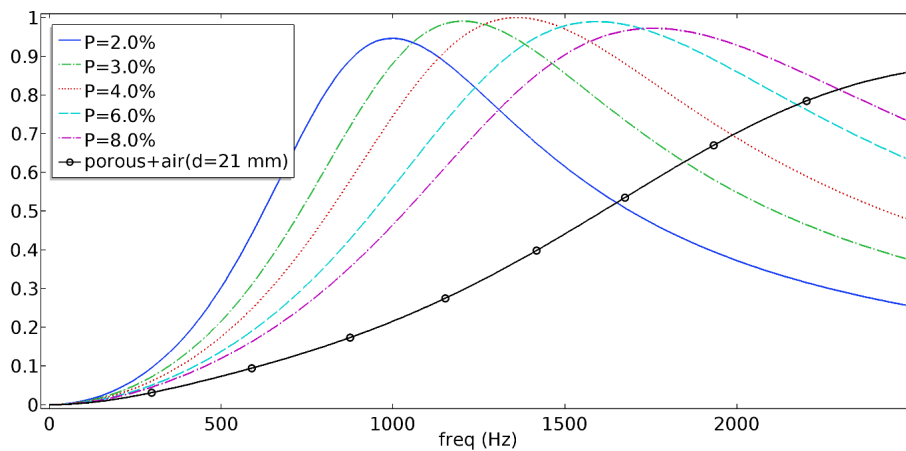


Fig. 5: The effect of perforation percentage on the absorption performance at structure A. (hole diameter of MPP 0.5, air layer thickness 10 mm, porous absorbent layer thickness 10 mm.)

constant variable in the following stage. All tests defined in this study were carried out using the Finite Element Method and COMSOL 5.3 software.

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

The validation kenaf fiber results derived using FEM simulation were comparable to laboratory procedure (impedance tube). According to the findings, inserting a kenaf fiber absorber behind MPP plate (structure A in fig 1) can effectively absorb lower frequencies. The effect of MPP hole diameter on absorption performance reveals that the smaller the hole diameter at the constant percentage of MPP perforation, the greater the adsorption range and lower the adsorption coefficient. As seen in fig 4 and 5, broadband absorption at low frequencies is improved as the percentage of perforation rises and the hole diameter lowers, assuming a constant MPP thickness and depth behind the MPP.

By applying twice the thickness of kenaf fiber relative to the air layer, higher absorption at lower frequencies can be achieved. As the depth of the air layer doubled from 10 to 20 mm, the resonant frequency shifted to lower frequencies. On the other hand a number of the studies support this assertion. Furthermore, the effect of the overall depth chamber behind the MPP on absorption

performance indicates that doubling the thickness of the overall depth chamber results in greater performance at lower frequencies. Broadly speaking, varying the structural properties of MPP's behind layers have generated a difference in their absorption performance.

### 4. CONCLUSION

The combined panel proposed can solve for MPPs' poor performance at low frequencies and kenaf fibers' narrow absorbing range. In this study, resonant frequency and broadband frequency absorbing depend on hole perforation, depth of chamber, perforation percentage, and MPP thickness parameters. According to the results of this research, resonant frequency and broadband frequency absorption are regulated by hole diameter and perforation percentage of MP plates, chamber depth, and absorber thickness behind MPPs. Each change on the thickness, material, and arrangement of the layers behind MPPs can affect the sound absorption performance. Increasing the thickness of kenaf fibers relative to the air layer immediately after MPP improves performance in absorbing lower frequencies. Finally, acoustic modeling of structures is a low-cost, high-performance approach for noise reduction.

## بر آورد رفتار جذب صوتی پانل ترکیبی متشکل از الیاف کف و صفحات میکروسوراخ‌دار در فرکانس‌های زیر ۲۵۰۰ هرتز

زهرا هاشمی<sup>۱</sup>، محمدرضا منظم اسماعیل پور<sup>۲</sup>، نفیسه نصیرزاده<sup>۲</sup>، احسان فروش<sup>۲</sup>، زهرا بیگ زاده<sup>۲</sup>، سمانه سالاری<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی بهبهان، خوزستان، ایران

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

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۲۳، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۰۹

### مکیده

**مقدمه:** در دو دهه اخیر، رشد سریع صنایع و شهرنشینی باعث به وجود آمدن مشکلات متعددی همچون آلودگی صوتی شده است. یکی از مهمترین روش‌های حذف یا کاهش آلودگی صوتی استفاده از جاذب‌های صوتی است. معمولاً جاذب‌های صوتی متداول در محدوده فرکانسی پایین ناکارآمد بوده‌اند. برای بهبود خواص جذب در این فرکانس‌ها می‌توان از ترکیب‌های مختلفی بهره‌گرفت. این مطالعه با هدف، بررسی رفتار جذب صوت پانل ترکیبی الیاف کف و صفحات میکرو سوراخ دار انجام گرفت.

**روش کار:** بعد از صحت‌سنجی نتایج الیاف کف با روش عددی المان محدود<sup>۱</sup>، از نرم افزار COMSOL 5.3a جهت مدل سازی جذب صوتی استفاده شد. پانل ترکیبی مورد مطالعه از ترکیب صفحه میکروسوراخ دار (MPP)، الیاف کف و لایه هوا تشکیل شده بود. در این تحقیق به ترتیب چیدمان‌های مختلف لایه‌های پشتی صفحه میکروسوراخ‌دار، خصوصیات ساختاری MPP و ضخامت و عمق مختلف لایه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. در هر مرحله، ساختاری که بهترین مقدار ضریب جذب را کسب کرده باشد؛ برای مرحله بعدی انتخاب و ثابت در نظر گرفته شدند.

**یافته‌ها:** نتایج صحت‌سنجی نشان داد که روند مدل FEM با نتایج آزمایشگاهی (لوله امپدانس) منطبق است. همچنین چیدمان لایه‌های پشت MPP تأثیر مستقیمی بر عملکرد پانل ترکیبی داشته؛ بطوریکه با قرار دادن الیاف کف در پشت MPP عملکرد بهتری در پیک فرکانسی حاصل شد. با وجود اینکه عمق محفظه پشت MPP تعیین‌کننده فرکانس رزونانسی است، اما در عمق یکسان، جنس و خصوصیات ماکروسکوپی لایه‌های پشت MPP نقش مهمی در این زمینه داشته است. همچنین در ساختارهایی که عمق بیشتری از لایه هوا نسبت به جاذب داشتند، در قطر (سوراخ) و عمق (محفظه) مشابه، ماکزیمم جذب حاصل شد.

**نتیجه‌گیری:** پانل ترکیبی مطابق ساختار A با قطر سوراخ ۰/۵ mm و درصد سوراخ شدگی ۲٪ می‌تواند عملکرد جذبی ضعیف محدوده باریک و پایین فرکانسی را به ترتیب با استفاده از الیاف کف و MPP بهبود بخشد. به طور کلی با انتخاب مناسب پارامترهای ساختاری، می‌توان در محدوده فرکانسی خاص، جذب مناسبی را بدست آورد. در این زمینه استفاده از روش برآورد عددی برای تعیین رفتار جذب صوتی یک ماده، می‌تواند با دقت بالایی جایگزین روش‌های سخت و هزینه بر آزمایشگاهی شود.

**کلمات کلیدی:** صفحه میکروسوراخ‌دار، جاذب طبیعی کف، فرکانس پایینی و میانی، پانل ترکیبی

1 Finite Element Method (FEM)

\* پست الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبه: [salari-s@razi.tums.ac.ir](mailto:salari-s@razi.tums.ac.ir)

در دهه اخیر، مواد گیاهی طبیعی، به‌ویژه مواد فیبری، به عنوان یک تکنیک مهندسی برای کنترل و جذب صوت مورد توجه واقع شده‌اند (۱۸). هم الیاف طبیعی و هم کامپوزیت‌های آن‌ها در مقایسه با الیاف مصنوعی قابلیت بالاتری در کاهش صدا دارند. در الیاف طبیعی همانند الیاف مصنوعی متداول مانند پشم شیشه، پشم سنگ، پلی استر، پلی اورتان، آزبست و ... انرژی صوتی در اثر اصطکاک مولکول‌های هوا با دیواره‌ها به گرما تبدیل شده و منجر به جذب صوت در طیف وسیعی از فرکانس‌ها می‌شود (۱۹). مزایای متعدد الیاف طبیعی مانند چگالی کم، غیر سمی بودن، مقاومت الکتریکی بالاتر، بازیافت‌پذیری یا زیست‌تخریب‌پذیری و مقرون به صرفه بودن در برابر هزینه بالا و پیامدهای منفی الیاف مصنوعی از جمله آلودگی هوا و عوارض سلامتی زمینه را برای توسعه و جایگزینی الیاف طبیعی به‌عنوان جاذب‌های صوتی برای کنترل آلودگی صوتی فراهم آورده است (۲۰). از سوی دیگر برخی پژوهش‌ها حاکی از آن است که استفاده از الیاف طبیعی باعث کاهش صوت در فرکانس‌های میانی و پایینی می‌شود (۲۱). از آنجایی که جاذب‌های صوتی متداول در محدوده فرکانسی پایین ناکارآمد بوده‌اند، در الیاف طبیعی با افزایش ضخامت مواد، می‌توان شاهد جذب صوتی قابل توجهی در فرکانس‌های پایین بود؛ و با اتخاذ استراتژی‌هایی مانند استفاده از لایه هوا یا صفحات سوراخ دار آن را بهبود بخشید (۲۲). مطالعات مختلف نشان می‌دهند که استفاده از ترکیب الیاف طبیعی همچون کف (۳-۱، ۱۳، ۲۳)، پوسته نارگیل (۱۴)، نیشکر، آناناس، نخل (۱۵) و ... به شکل کامپوزیت، به‌عنوان جاذب صوتی مناسب برای کاهش صوت در فرکانس‌های پایین مناسب هستند (۱۶). کف با نام علمی *Hibiscus cannabinus* گیاهی از تیره پنیرک، بوته مانند و دارای ساقه‌های پوشیده از خار است که بومی شرق آفریقا می‌باشد (۳). با توجه به اینکه کشت کف در استان‌های گیلان، مازندران و گلستان، کرمان، فارس، اهواز، بندرعباس، تهران، هرمزگان و ایلام متداول بوده و به صورت بومی در کشور به وفور در دسترس می‌باشد و در

در دو دهه اخیر، رشد سریع صنایع و شهرنشینی باعث به وجود آمدن مشکلات زیست محیطی متعدد؛ همچون آلودگی صوتی شده است که می‌تواند روی کیفیت زندگی، میزان بهره‌وری، سلامت جسمی و روان‌شناختی افراد تأثیرگذار باشد (۴). اثرات منفی مواجهه مکرر با سطوح مختلف صدای محیطی و شغلی، بر ایمنی و سلامتی انسان شناخته‌شده است (۷-۵). از سویی دیگر انعکاس صدا از سطوح داخلی به عنوان منبع ثانویه آلودگی صوتی در محیط‌های کاری قلمداد می‌شود (۸). مطالعات مختلف نشان می‌دهند که با اصلاح سطوح یادشده، می‌توان نسبت به حذف یا کاهش این منابع، تولید آلودگی صوتی را کنترل کرد (۹). در این راستا استفاده از جاذب‌های صوتی که از طریق افزایش ضریب جذب صوت و کاهش میزان صوت انعکاسی؛ صدای کلی محیط را کاهش دهند، مؤثر دانسته شده است (۱۰).

محققان زیادی با استفاده از الیاف طبیعی مانند کاه گندم، الیاف کف، پنبه و نیشکر پانل‌های جاذب صوتی ساخته‌اند که علاوه بر این که بسیار زیبا هستند، کم هزینه، تجدید پذیر و به آسانی نیز در دسترس بوده و به محیط زیست و سلامت انسان نیز آسیب نمی‌رساند (۱۱). خصوصیات جذب صوتی الیاف طبیعی در فرکانس‌های مختلف متفاوت می‌باشد به طوری که الیاف نارگیل و نخل در فرکانس‌های بالاتر جذب صوتی بهتری نسبت به فرکانس‌های پایین‌تر دارند (۱۲). بررسی الیاف کف، پوسته نارگیل (۱۳)، نیشکر (۱۴)، آناناس، نخل (۱۵) و ... به‌عنوان جایگزینی برای جاذب‌های صوتی الیاف مصنوعی نشان داد که الیاف مذکور در فرکانس‌های پایین ضریب جذب پایینی داشته و در فرکانس‌های متوسط و بالاتر ضریب جذب آن‌ها بالاتر از ۰/۵ درصد است که با افزایش ضخامت الیاف این مقدار بیشتر می‌شود (۱۳، ۱۶). جذب صوتی الیاف طبیعی مختلفی مانند کف و بامبو به صورت تجربی مورد آزمون قرار گرفت و نتایج نشان دهنده وجود رابطه بین جذب صدا، تراکم مواد، ضخامت و شکاف هوا بود (۱۷).

صنعت کامپوزیت نیز به عنوان تقویت کننده در صفحات فشرده با چگالی پایین استفاده می شود جهت انجام مطالعه انتخاب گردید. از سوی دیگر، یکی از ساختارهایی که برای رفع مشکل اصوات با باند فرکانسی پایین استفاده می شود، جاذب های سوراخ دار و صفحات میکرو سوراخ دار (MPP)<sup>۱</sup> می باشند. از مزایای چنین ساختاری، رزونانس فرکانسی است که بسته به هدف می توان آن را تنظیم و ایجاد نمود (۲۴). این دسته از جاذب ها به صورت موثری از تعدادی رزوناتورهای هلم هولتز تشکیل شده اند (۲۵)، وقتی فرکانس موج برخوردی، نزدیک به فرکانس طبیعی جاذب باشد، ستون هوای تشکیل شده در حفره ها به شدت مرتعش شده و به دیواره پشتی برخورد می کند؛ در این حالت انرژی صوتی به دلیل اثرات اینرسی و چسبندگی به انرژی حرارتی تبدیل شده و بدین ترتیب صدا کاهش می یابد (۲۶).

اگر چه صفحات سوراخ دار به عنوان یک جایگزین برای جاذب های متخلخل و فیبری در نظر گرفته شده اند، اما هم در مقدار جذب و هم محدوده جذبی، عملکرد پایین تری نسبت به مواد متخلخل دارند (۲۷). به منظور افزایش عملکرد آکوستیکی این دسته از مواد جاذب در سال های اخیر، مطالعات زیادی بر روی فاکتورهای تأثیرگذار انجام شده است که محفظه بندی فضای پشت صفحه و ایجاد فضاهایی با عمق های مختلف (۲۸)، استفاده از دو صفحه سوراخ دار پشت سر هم (۲۹)، استفاده از مواد جاذب در پشت صفحه (۳۰) از جمله آن ها است.

خواص صوتی پلیمرهای الیاف مصنوعی معمولاً با افزودن پرکننده ها، استفاده از ساختارهای سوراخ دار، ترکیب اندازه های مختلف منافذ، افزایش ضخامت مواد و ساختارهای کامپوزیتی چند لایه بهبود می یابد (۳۱). در یک نوع جدید ساختار جاذب صوت از یک پانل ریز سوراخ شده دو لایه برای بهبود جذب صدا در فرکانس متوسط استفاده شده است که نتایج پیش بینی شده جذب صدا با استفاده از یک لوله امیدانس صوت را تأیید می کند (۳۲)؛ و خواص صوتی مواد الیاف مصنوعی مانند پلیمرها،

الیاف فلزی و الیاف معدنی معمولاً با افزودن پرکننده ها، استفاده از ساختارهای سوراخ دار و کامپوزیتی چند لایه بهبود می یابد. اصلاح روش آماده سازی، افزایش ضخامت مواد و تحقیق در مورد مواد کامپوزیتی از جمله روش های رایج برای بهبود عملکرد جذب صوت الیاف معدنی هستند (۳۲). باتوجه به نتایج مطالعات گذشته، بهره گیری از ساختارهای چند لایه با خواص متفاوت و انتخاب مناسب پارامترهای تأثیرگذار می تواند باعث بهبود عملکرد کلی ساختار نسبت به هر جزء به تنهایی، در محدوده فرکانس مورد نظر شود (۱۱). مواد متخلخل طبیعی حوزه ای است که اخیراً به دلایلی که ذکر شد، مورد توجه محققین قرار گرفته و در حال رشد است. عمده مطالعات انجام شده در خصوص بکارگیری MPP و مواد متخلخل، مربوط به جاذب های متخلخل مصنوعی است و مطالعات کمتری چیدمان مواد متخلخل طبیعی و MPP را مورد بررسی قرار داده اند و از سوی دیگر کنترل صدا در طیف فرکانس های متوسط و پایین هنوز مسئله ساز بوده و به خوبی شناخته نشده است.

مطالعه حاضر با هدف بررسی عملکرد پانل ترکیبی متشکل از الیاف کنف، MPP و لایه هوا در محدوده فرکانس های زیر ۲۵۰۰ هرتز، با استفاده از روش عددی امان محدود و با در نظر گرفتن خصوصیات ابعادی و ماکروسکوپیک برای پانل ترکیبی مذکور، جهت بهبود عملکرد جذب صوتی انجام گرفت. امید است نتایج این مطالعه بتواند به شکل کاربردی مورد استفاده محققان واقع شود.

مباحث نظری حاکم بر عملکرد جذب آکوستیکی

امپدانس آکوستیکی MPP

امپدانس صوتی صفحه میکروسوراخ دار (MPP) اولین بار توسط Maa مطرح شد (۳۳) که شامل دو بخش حقیقی<sup>۲</sup> و موهومی<sup>۳</sup> است؛ بخش حقیقی امپدانس آکوستیکی معرف تلفات ویسکوز موج صوتی منتشره در میان سوراخ ها بوده و به رزیستانس معروف است. بخش

2 Resistance part

3 Imaginary part

1 Micro-perforated panel (MPP)

معادله ۷

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

پارامترهای فیزیکی در این معادلات شامل  $\sigma$  مقاومت جریان هوا،  $\phi$  تخلخل،  $\alpha_{\infty}$  تورتوزیته،  $\Lambda$  طول مشخصه ویسکوز،  $\hat{\Lambda}$  طول مشخصه حرارتی،  $\rho_0$  چگالی هوا،  $N_{pr}$  عدد پراتل هوا (۰/۷۵)،  $\eta$  ویسکوزیته هوا ( $85/1 \times 10^{-5}$ )،  $k$  نسبت گرمای ویژه برای هوا (۱/۴)،  $\omega$  سرعت زاویه‌ای،  $Z_c(\omega)$  امپدانس مشخصه و  $K_{\omega}$  عدد موج مشخصه است. امپدانس آکوستیکی سطحی جاذب متخلخل ( $Z_p$ ) و ضریب جذب آکوستیکی پیش بینی شده ( $K_c$ ) را می‌توان از روابط ۱۰-۸ بدست آورد:

$$Z_c(\omega) = \frac{1}{\phi} \sqrt{\rho(\omega) \cdot K(\omega)} \quad \text{معادله ۸}$$

$$K_c(\omega) = \omega \sqrt{\frac{\rho(\omega)}{K(\omega)}} \quad \text{معادله ۹}$$

$$Z_p = Z_c(\omega) \cdot \cot(K_c(\omega) \times d) \quad \text{معادله ۱۰}$$

برای برآورد امپدانس آکوستیکی سطحی کل ( $Z_s$ ) و ضریب جذب می‌توان از روش ماتریکس انتقال (تحلیلی) و یا از روش حل عددی (FEM, BEM) استفاده کرد. از میان روش‌های عددی زیادی که برای حل موجود است، روش المان محدود یکی از شناخته‌ترین روش‌ها است (۳۷). در این روش یک هندسه پیچیده به تعداد مشخصی اجزا با هندسه ساده بازسازی می‌شود که معادلات حاکم بر مسأله در هر یک از این اجزا دارای حل می‌باشد. با برقراری شرایط تعادل در نقاط گرهی (بر اساس متغیر حاکم)، یک دستگاه معادلات خطی حاصل می‌شود که از حل آن، مقدار عددی متغیر حاکم در نقاط گرهی محاسبه می‌گردد. در یک مسأله آکوستیکی شرایط مرزی متفاوتی برای یک ماده جاذب قابل تصور است. این شرایط مرزی

موهومی که تحت عنوان راکتانس خوانده می‌شود اشاره به جرم هوای متحرک در میان سوراخ‌ها دارد (۳۴، ۳۵). امپدانس آکوستیکی MPP توسط رابطه زیر بیان می‌شود:

$$Z_{MPP} = Z_{resistance} + Z_{reactance} = r + j\omega m \quad \text{معادله ۱}$$

$$r = \frac{32 \eta t}{\rho_0 c_0 d^2 p} \left( \sqrt{1 + \frac{x^2}{32}} + \frac{xd\sqrt{2}}{8t} \right) \quad \text{معادله ۲}$$

$$m = \frac{t}{pc_0} \left( 1 + \left( 9 + \frac{x^2}{2} \right)^{-1/2} + \frac{85/0d}{t} \right) \quad \text{معادله ۳}$$

$$x = \frac{d}{2} \sqrt{\frac{\omega \rho}{\eta}} \quad \text{معادله ۴}$$

در اینجا  $r$  و  $m$  به ترتیب، رزیستانس آکوستیکی نرمالیزه شده و راکتانس آکوستیکی نرمالیزه شده،  $\rho_0$  دانسته هوا،  $c_0$  سرعت موج صوتی در هوا،  $\omega$  سرعت زاویه‌ای،  $t$  ضخامت پانل،  $p$  درصد سوراخ شدگی،  $d$  قطره سوراخ‌ها و  $\eta$  ویسکوزیته هوا می‌باشد. معمولاً MPP با فاصله‌ای به عمق  $D$  برای جذب حداکثری نسبت به دیوار نصب می‌شوند. امپدانس لایه هوا از رابطه زیر بدست می‌آید (۳۳-۳۵).

$$Z_D = -j \cot\left(\frac{\omega D}{C}\right) \quad \text{معادله ۵}$$

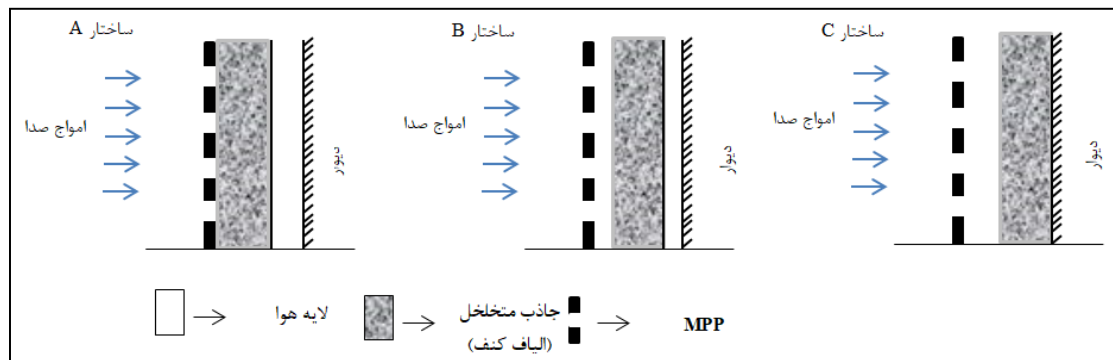
امپدانس آکوستیکی مواد متخلخل

Allard و Champoux در سال ۱۹۹۲ (۳۶) مدل پدیدارشناختی را به منظور مدل‌سازی انتشار صدا در مواد متخلخل پیشنهاد دادند. آن‌ها، مَدول بالک و چگالی معادل را به صورت زیر تعریف کردند:

$$\rho(\omega) = \alpha_{\infty} \rho_0 \cdot \left[ 1 + \frac{\sigma \phi}{j \omega \alpha_{\infty} \rho_0} \left( 1 + \frac{r i \alpha_{\infty} \eta \omega \rho_0}{(\sigma \Lambda \phi)^2} \right) \right]^{1/2} \quad \text{معادله ۶}$$

جدول ۱. ساختارهای مختلف، ترتیب چیدمان اجزای پانل و اندازه آنها

ضخامت (mm)	چیدمان	نوع ساختار
۲۱mm	MPP + الیاف کف ۱۰mm + لایه هوا ۱۰mm	ساختار A
۲۱mm	MPP + لایه هوا ۵mm + الیاف کف ۱۰mm + لایه هوا ۵mm	ساختار B
۲۱mm	MPP + لایه هوا ۱۰mm + الیاف کف ۱۰mm	ساختار C



شکل ۱. ساختارهای مختلف و چیدمان لایه‌ها

بر اساس فیزیک حاکم بر مرز ماده با اعمال جمله‌های انتگرال روی مرز در محاسبات قابل بیان می‌باشند. در صورتی که المان‌ها به شکل درستی انتخاب و به اندازه کافی کوچک باشند، پاسخ سیستم، به پاسخ واقعی نزدیک‌تر خواهد بود (۳۸).

### روش کار

بر اساس فیزیک حاکم بر مرز ماده با اعمال جمله‌های انتگرال روی مرز در محاسبات قابل بیان می‌باشند. در صورتی که المان‌ها به شکل درستی انتخاب و به اندازه کافی کوچک باشند، پاسخ سیستم، به پاسخ واقعی نزدیک‌تر خواهد بود (۳۸).

از آنجایی که در جاذب‌های چندلایه موقعیت قرارگیری اجزا نسبت به یکدیگر تفاوت معناداری در نتایج حاصل داشته است (۲۱). در گام اول، هدف شناسایی بهترین چیدمان لایه‌ها در پشت MPP بود. پانل ترکیبی مورد مطالعه شامل سه لایه صفحه میکروسوراخ‌دار صلب، الیاف کف و لایه هوا می‌باشد. به همین منظور سه ساختار A-B-C برای شناسایی بهترین چیدمان از لحاظ عملکرد جذبی مورد مطالعه قرار گرفت (شکل ۱ و جدول ۱). در این بخش اجزا و ضخامت سازنده این لایه‌ها یکسان و تنها موقعیت قرارگیری جاذب طبیعی (الیاف کف) تغییر می‌کند.

عملکرد کمی و کیفی آکوستیکی پانل ترکیبی، متأثر از فاکتورهای متعددی می‌باشد که به‌منظور بررسی این فاکتورها آزمون‌های مختلفی تعریف شده است. لازم به توضیح است در هر مرحله ساختار یا فاکتوری که بهترین عملکرد جذبی را در فرکانس‌های پایین دارد، بعنوان ساختار و فاکتور منتخب، شناسایی و بعنوان متغیر ثابت وارد مرحله بعد می‌شود. در این مطالعه هدف بررسی تمامی حالات و متغیرهای ممکن نمی‌باشد و فقط به موارد منتخب از لحاظ بهترین عملکرد جذبی بسنده می‌شود. آزمون‌های صورت پذیرفته در این مطالعه با بهره‌گیری از روش المان محدود و با استفاده از نرم‌افزار

یکی از مهم‌ترین مزیت‌های MPP وجود فاکتورهای ساختاری قابل تنظیم آن است (۴۰). به‌منظور بررسی تأثیر خصوصیات ساختاری MPP بر عملکرد پانل

جدول ۲. ساختارهای مختلف، ترتیب چیدمان و خصوصیات لایه‌ها در عمق یکسان محفظه

عمق کلی محفظه پشت MPP	ضخامت لایه‌ها	حالت‌های فرضی
۳۰ mm	ضخامت الیاف کف ۲۰ mm + ضخامت لایه هوا ۱۰ mm	a
	ضخامت الیاف کف ۱۰ mm + ضخامت لایه هوا ۲۰ mm	b
۴۰ mm	ضخامت الیاف کف ۳۰ mm + ضخامت لایه هوا ۱۰ mm	c
	ضخامت الیاف کف ۱۰ mm + ضخامت لایه هوا ۳۰ mm	d
۵۰ mm	ضخامت الیاف کف ۴۰ mm + ضخامت لایه هوا ۱۰ mm	e
	ضخامت الیاف کف ۱۰ mm + ضخامت لایه هوا ۴۰ mm	f

میلی‌متر و جنس صفحه در محاسبات، صلب<sup>۲</sup> در نظر گرفته شد.

لازم است جهت اطمینان از صحت نتایج حاصل از روش‌های شبیه‌سازی اعم از تحلیلی و عددی نتایج برآورد شده با نتایج حاصل از تست آزمایشگاهی، نتایج ارائه‌شده در یک مرجع معتبر و یا یک روش تحلیلی تأیید شده، مورد مقایسه قرار گیرند. تا بدین ترتیب اعتبار نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌سازی سنجیده شود (۴۱). بدین منظور ضریب جذب الیاف کف با ضخامت ۱۰ میلی‌متر که قبلاً مورد تست آزمایشگاهی قرار گرفته بود (۴۲) به روش عددی FEM شبیه‌سازی شد.

مطابق استاندارد ISO ۲۱۰۵۳۴- برای تعیین ضریب جذب نرمال به روش عددی، یک کانال مستطیلی نماینده لوله امپدانس می‌باشد (۴۳)؛ بنابراین هندسه مسئله به‌صورت یک مستطیل دوبعدی<sup>۳</sup> در نظر گرفته شد. نوع مش، مثلثی<sup>۴</sup> و سائز مش‌بندی برای رسیدن به جواب همگرا بصورت یکنواخت و ۱/۶ کوتاه‌ترین طول موج انتخاب شد. به‌منظور مدل‌سازی در حوزه فرکانس<sup>۵</sup> و برای به دست آوردن توزیع فشار ایجادشده در توده سیال در اثر انتشار موج صوتی، لازم است معادله هلم هولتز بکار گرفته شود که این معادله در شرایط مرزی فشار آکوستیکی<sup>۶</sup> تعریف شده است (۴۴). شرایط مرزی صلب برای دیواره‌ها و پشت ماده متخلخل بکار گرفته شد. این بدین مفهوم است که

2. Hard
- 3 2D
- 4 Free Triangular
- 5 Frequency domain
- 6 Pressure Acoustics

ترکیبی قطر سوراخ‌ها و درصد سوراخ شدگی<sup>۱</sup> MPP در ۶ سطح مورد بررسی قرار گرفت. لازم به توضیح است که بعد از شناسایی بهترین قطر سوراخ MPP به لحاظ عملکرد جذبی، این متغیر ثابت و آزمون تعیین درصد سوراخ شدگی انجام شد.

بعد از شناسایی ساختار، قطر سوراخ و درصد سوراخ شدگی MPP منتخب با توجه به نتایج ضریب جذب، در گام بعد، ضخامت الیاف کف، لایه هوا و ضخامت کلی محفظه پشت MPP بر تغییرات ضریب جذب مورد مطالعه قرار گرفت. بدین‌صورت که در مرحله اول، عمق لایه هوا با ثابت در نظر گرفتن ضخامت لایه کف تغییر داده شد. در مرحله بعد، ضخامت لایه کف با ثابت فرض شدن عمق لایه هوا تغییر یافت و در نهایت ساختارهایی با عمق مشابه (ضخامت متغیر لایه‌ها) به‌منظور بررسی عمق کلی محفظه پشت MPP بر عملکرد آکوستیکی مورد مطالعه قرار گرفت (جدول ۲). در ادامه به منظور بررسی مقدار ضریب جذب ساختارهای مختلف، میانگین جذب صوتی مطابق رابطه ۱۱ و ۱۲، در دوازده فرکانس یک سوم اکتاوباند از ۲۰۰ تا ۲۵۰۰ هرتز برآورد شد.

$$SAA = \frac{1}{12} \sum_{i=250}^{2500} \alpha_{fi} \quad \text{معادله ۱۱}$$

$$SAA = \frac{\alpha_{250} + \alpha_{275} + \alpha_{300} + \alpha_{325} + \alpha_{350} + \alpha_{375} + \alpha_{400} + \alpha_{425} + \alpha_{450} + \alpha_{475} + \alpha_{500} + \alpha_{525} + \alpha_{550} + \alpha_{575} + \alpha_{600} + \alpha_{625} + \alpha_{650} + \alpha_{675} + \alpha_{700}}{12} \quad \text{معادله ۱۲}$$

در این مطالعه ضخامت صفحه ثابت و برابر با یک

1 Perforation

جدول ۳. پارامترهای ماکروسکوپیکی الیاف کف و مشخصات ساختاری MPP جهت محاسبه امیدانس آکوستیکی

طول مشخصه دمایی ( $\mu m$ )	طول مشخصه ویسکوز ( $\mu m$ )	تور توزیته $\alpha\infty$	تخلخل $\emptyset(\%)$	مقاومت جریانی $Nm^4/s$	چگالی بالک $Kg/m^3$	ضخامت (mm)	
۱۹۰	۷۹	۱/۹	۸۹/۲۸	۴۱۵۰	۱۵۰	۱۰	الیاف کف
	ضخامت MPP (mm)			درصد سوراخ شدگی (%)	قطر سوراخ (mm)		
	۱			۰/۲	۰/۵		MPP

جریانی<sup>۵</sup>، طول مشخصه ویسکوز<sup>۶</sup> و طول مشخصه دمایی<sup>۷</sup> ماده متخلخل برای انجام محاسبات در این مدل الزامی است (جدول ۳). بعد از انجام مراحل شرح داده شده، دامنه فرکانسی، زاویه تابش موج صوتی و ضریب جذب نرمال به وسیله نرم افزار محاسبه گردید.

### یافته‌ها

نتایج مطالعه در چندین مرحله به ترتیب شامل؛ صحت‌سنجی مدل روش اجزا محدود<sup>۸</sup>، بررسی تأثیر موقعیت قرارگیری جاذب متخلخل، عمق لایه هوای پشت MPP، ضخامت ماده جاذب پشت MPP، عمق کلی محفظه پشت MPP، قطر سوراخ‌های MPP و درصد سوراخ شدگی MPP بر عملکرد جذبی بدست آمد.

#### صحت‌سنجی مدل روش اجزا محدود (FEM)

مقایسه بین نتایج ضریب جذب آزمایشگاهی (امیدانس تیوب) و روش اجزا محدود برای الیاف کف در ضخامت ۱۰ میلی متر در نمودار ۱ نمایش داده شده است. مطابق با این نمودار با افزایش فرکانس، ضریب جذب روند افزایشی دارد. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان بیان کرد که نتایج مدل FEM با نتایج آزمایشگاهی منطبق است. با این حال در بخش‌هایی از پهنه فرکانسی، این دو روش اندکی از یکدیگر فاصله دارند؛ اما در مجموع روند هر دو نمودار منطبق بوده است.

شتاب در مرز مربوطه صفر می‌باشد. با اعمال شرط مرزی برای صفحه میکروسوراخ‌دار، امیدانس آکوستیکی ویژه صفحه میکرو سوراخ‌دار نسبت به هوا طبق فرمول Maa به دست آمد (۳۴). در برخی مواقع مدل‌سازی تنها در بخش کوچکی از جاذب صورت می‌گیرد؛ اما گاهی طبیعت جریان و یا انتشار موج، ماهیت تناوبی دارد. در چنین مسائلی استفاده از شرط مرزی تناوبی<sup>۱</sup> در کاهش زمان محاسبه و همچنین حافظه موردنیاز بسیار مؤثر است. با استفاده از شرط مرزی تناوبی، معادله موج برای یک ناحیه کوچک حل شده و نتایج را می‌توان به سایر قسمت‌های جاذب نیز تعمیم داد. در این بخش شرایط تناوبی در مرزهای کانال مجازی در نظر گرفته شد. Perfectly Matched Layer در واقع یک فضای مجازی است که در بخش ورودی کانال مجازی بکار گرفته می‌شود. این شرایط موجب می‌شود که موج صوتی بدون انعکاس از این مرز عبور کرده و یا به عبارتی موج منعکس شده از نمونه را به صورت کامل جذب نماید. شرط مرزی پرواکوستیک<sup>۲</sup> برای محاسبه امیدانس آکوستیکی ویژه لایه متخلخل در نظر گرفته شد (۴۵). مدل‌های مختلفی به منظور محاسبه امیدانس آکوستیکی ویژه در ماده متخلخل وجود دارد که در فیزیک پرواکوستیک گنجانده شده است. در این تحقیق از مدل Johnson-Champoux- (JCA) Allard بهره‌گرفته شد. مدل JCA توانایی پیش‌بینی بهتری در مقایسه با مدل‌های دیگر از جمله-Delany Bazley دارد (۴۶). تور توزیته<sup>۳</sup>، تخلخل<sup>۴</sup>، مقاومت

5 Flow Resistivity

6 Viscous Characteristic Length

7 Termal Characteristic Length

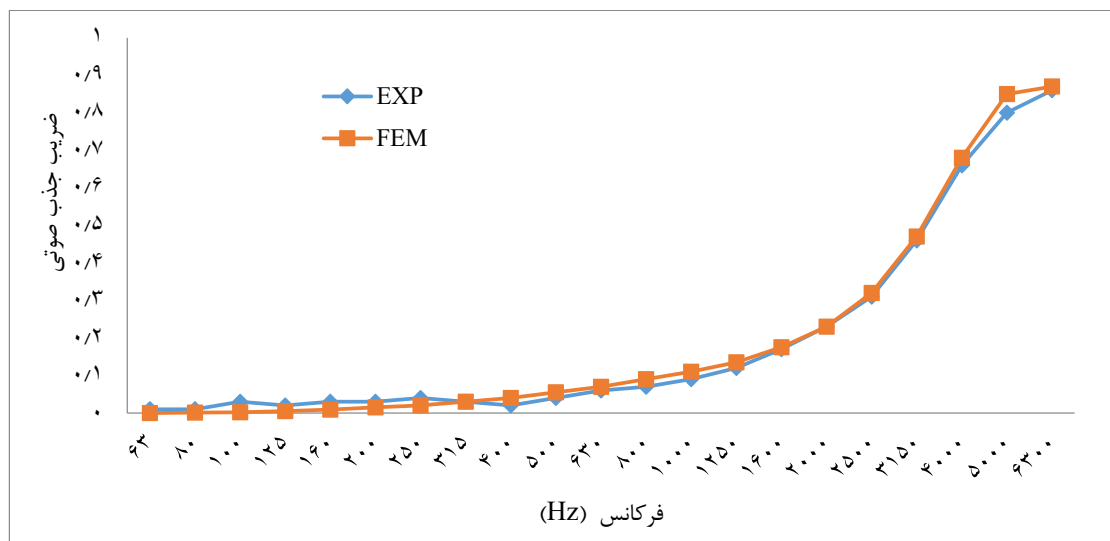
8 Finite Element Methods

1 Periodic Condition

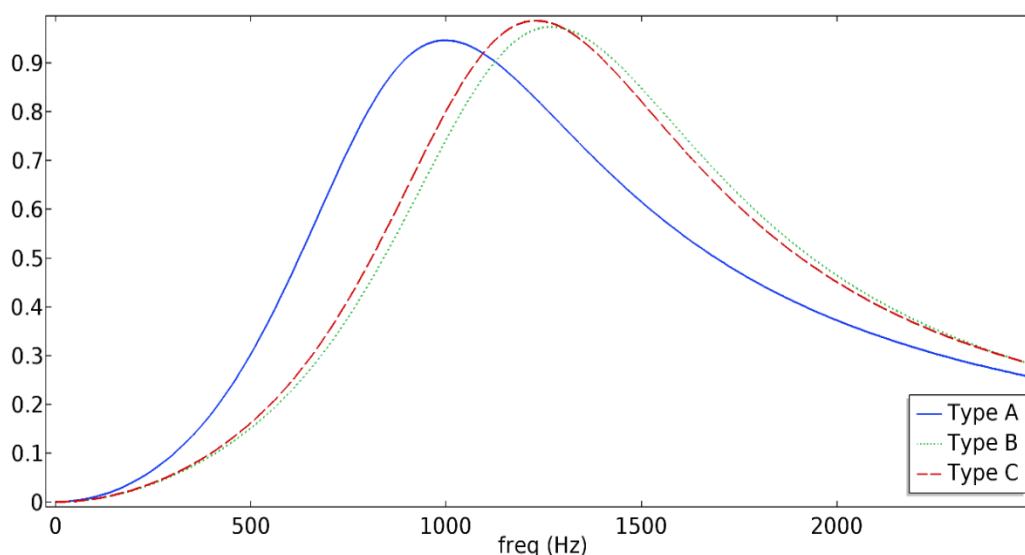
2 Poroacoustics boundry

3 Structure Factor (Tortuosity)

4 Porosity



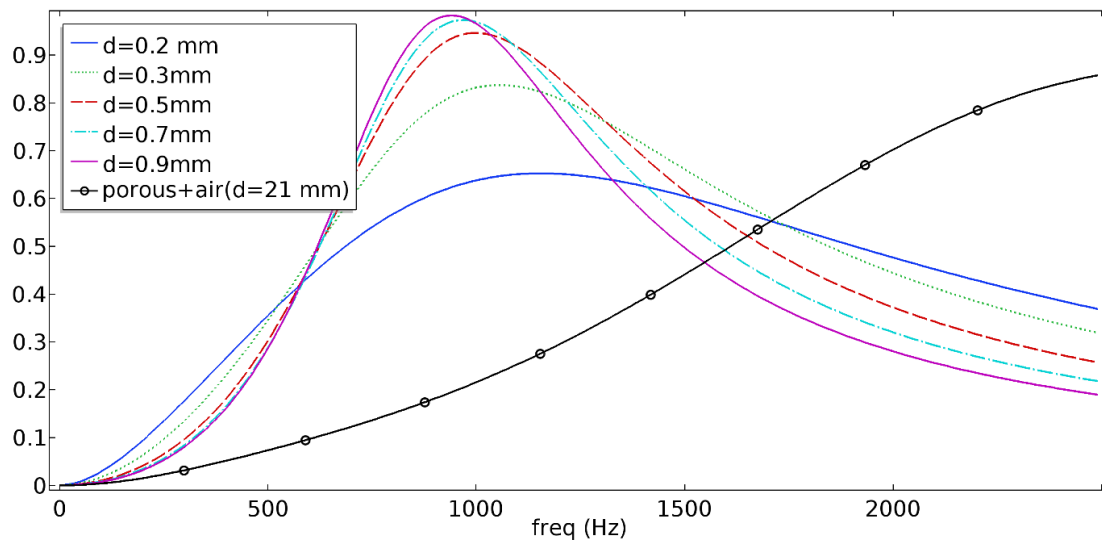
نمودار ۱. مقایسه نتایج ضریب جذب الیاف کف به روش آزمایشگاهی و FEM



نمودار ۲. بررسی جذب صوتی ساختارهای مختلف

ساختار A نسبت به دو ساختار B و C تغییر فرکانسی قابل توجهی به سمت فرکانس‌های پایین‌تر دارد. پیک رزونانسی این ساختار در فرکانس ۱۰۰۰ هرتز برابر ۰/۹۵ است. نتایج جذب دو ساختار B و C بسیار شبیه به یکدیگر و متفاوت از ساختار A است. فرکانس رزونانسی به ترتیب برای ساختارهای B و C برابر با ۱۲۰۰ و ۱۲۵۰ هرتز با مقادیر ضریب جذبی ۰/۹۹ برآورد شد. قرارگیری جاذب الیاف کف، بدون فاصله هوایی نسبت به صفحه MPP (ساختار A) نتایج بهتری را در فرکانس‌های

تأثیر موقعیت قرارگیری جاذب متخلخل بر عملکرد جذبی سه ساختار A-B-C در این مطالعه به منظور بررسی چیدمان لایه‌های پشت MPP بر عملکرد جذبی پانل ترکیبی تحت آزمون مورد بررسی قرار گرفت. در این بررسی اجزای سازنده و خصوصیات ساختاری MPP هر سه طرح یکسان و تنها موقعیت قرارگیری آنها نسبت به یکدیگر تغییر کرده است. ضخامت کلی پانل ترکیبی مورد مطالعه در هر ۳ ساختار یکسان و برابر با ۲۱ میلی متر بوده است. همانطور که در نمودار ۲ نشان داده شده است،



نمودار ۳. تأثیر قطر سوراخ بر عملکرد پانل ترکیبی در ساختار A. (درصد سوراخ شدگی MPP ۲٪، ضخامت الیاف کف ۱۰ mm و لایه هوا ۱۰ mm)

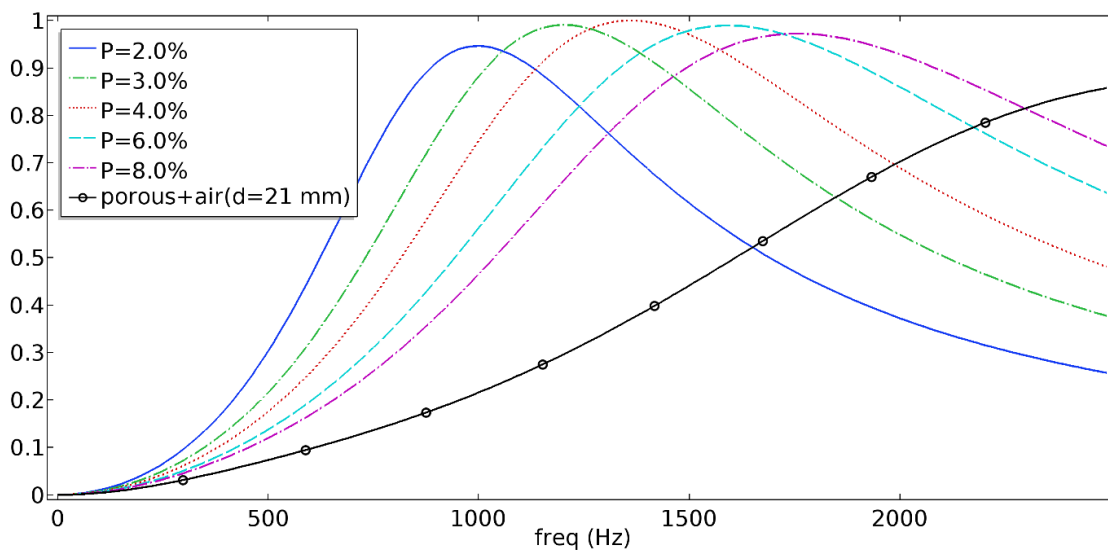
ضخامت یکسان با پانل ترکیبی (ساختار A) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، این ساختار در فرکانس‌های پایین‌تر از ۱۵۰۰، جذب ضعیفی دارد. به بیان دیگر استفاده از صفحات میکرو سوراخ دار با طراحی مناسب می‌تواند ضعف عملکردی جاذب‌های متخلخل را در این حیطه فرکانسی پوشش دهد. به عنوان مثال در فرکانس ۱۰۰۰ هرتز، ساختار A میزان ضریب جذب را حداقل ۵ برابر نسبت به پانل الیاف کف و لایه هوا بدون MPP بهبود داده است.

تأثیر درصد سوراخ‌شدگی MPP بر عملکرد جذبی به‌منظور بررسی تأثیر درصد سوراخ‌شدگی بر عملکرد جذبی، ۵ سطح از سوراخ‌شدگی در نظر گرفته شد و به جز درصد سوراخ‌شدگی، بقیه موارد ثابت فرض شدند. نتایج نشان داد که با افزایش درصد سوراخ‌شدگی، فرکانس رزونانسی بیشتر یا عبارتی پیک رزونانسی در فرکانس‌های بالاتری اتفاق می‌افتد (نمودار ۴). همانطور که در نمودار نشان داده شده است، در فرکانس‌های پایین، کاهش درصد سوراخ‌شدگی MPP باعث بهبود ضریب جذب می‌شود در حالی که در فرکانس‌های بالاتر، افزایش درصد سوراخ‌شدگی منجر به بهبود جذب می‌شود.

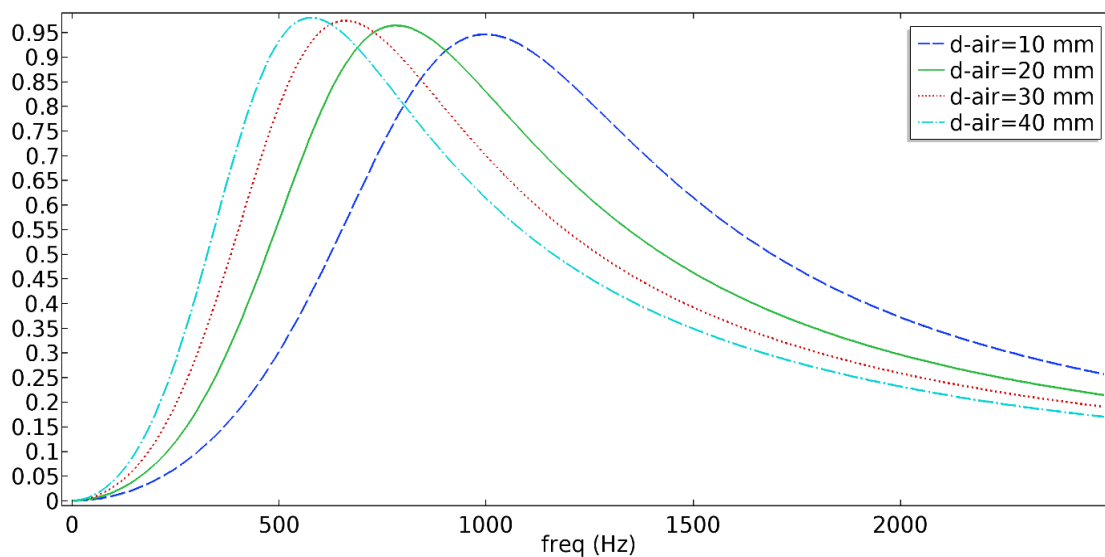
پایین‌تر بدنبال داشته است. از طرفی وجود یک لایه هوا بین جاذب متخلخل و MPP که در ساختارهای B و C به کار رفته است، باعث افزایش ماکزیمم ضریب جذب در فرکانس رزونانسی شده است.

#### تأثیر قطر سوراخ‌های MPP بر عملکرد جذبی

قطر سوراخ صفحات MPP یکی از مهم‌ترین فاکتورهای تأثیر گذار بر عملکرد این دسته از جاذب‌ها است که در این بخش از مطالعه مورد آزمون قرار گرفت. به همین منظور بجز قطر سوراخ، بقیه فاکتورهای مؤثر مانند سوراخ‌شدگی، جنس و ضخامت مواد پشت MPP ثابت در نظر گرفته شد (ساختار A). مشاهده می‌شود هر چه قطر سوراخ ریزتر باشد محدوده جذب، وسیع‌تر و مقدار ضریب جذب کمتر است. به عبارتی نقطه پیک یا فرکانس رزونانسی دیده نمی‌شود و پهنای جذب گسترده‌تر است. با افزایش قطر سوراخ‌ها به وضوح شاهد پیک رزونانسی هستیم و از طرفی گستردگی پهنای جذب کمتر می‌شود. همچنین افزایش قطر سوراخ‌ها باعث شده است که پیک رزونانسی اندکی به سمت فرکانس‌های پایین‌تر تغییر داده شود. در نمودار ۳، منحنی جذب الیاف کف و لایه هوای پشت آن (بدون MPP) در



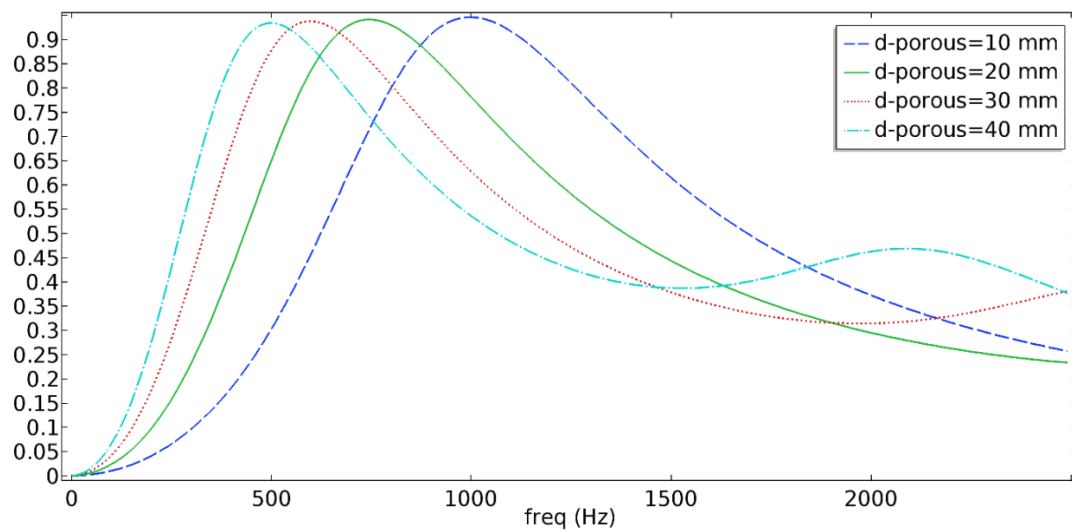
نمودار ۴. تأثیر درصد سوراخ‌شدگی سوراخ‌شدگی بر عملکرد جذبی (قطر سوراخ‌های MPP ۵/۰، ضخامت لایه جاذب متخلخل و لایه هوا ۱۰ mm)



نمودار ۵. اثر عمق لایه هوا بر عملکرد جذبی پانل ترکیبی ساختار A (درصد سوراخ‌شدگی MPP ۲٪، قطر سوراخ ۵/۰mm، ضخامت لایه جاذب متخلخل ۱۰ mm)

سوراخ‌شدگی MPP به ترتیب برابر با ۵/۰ و ۲ میلی‌متر بوده است. مشاهده می‌شود که افزایش عمق لایه هوا باعث بروز تغییر فرکانسی به سمت فرکانس‌های پایین‌تر شده است. به طوری که با دو برابر شدن عمق هوا از ۱۰ به ۲۰ میلی‌متر، فرکانس رزونانسی از ۱۰۰۰ به ۷۵۰ هرتز تغییر پیدا کرده است. به دنبال افزایش عمق لایه هوا،

تأثیر عمق لایه هوا پشت MPP بر عملکرد جذبی نمودار ۵، تغییرات عمق لایه هوا بر عملکرد جذبی پانل ترکیبی (ساختار A) را نشان می‌دهد. در این آزمون ضخامت لایه الیاف کف ثابت و ۱۰ میلی‌متر فرض شده است. لازم به ذکر است که ساختار کلی و ترتیب کلی پانل ترکیبی مطابق ساختار A و قطر سوراخ و درصد



نمودار ۶. تأثیر ضخامت الیاف کف بر عملکرد جذبی پانل ترکیبی ساختار A (درصد سوراخ شدگی MPP ۲٪، قطر سوراخ ۵mm، عمق لایه هوا ۱۰ mm)

همانطور که از نمودار ۷ مشخص است، در حالتی که ضخامت جاذب دو برابر لایه هوا است (a)، شاهد عملکرد بهتر در فرکانس‌های پایین‌تر هستیم. البته زمانی که عمق لایه هوا بیشتر (b) باشد، ماکزیمم جذب در فرکانس رزونانس مقدار بزرگتری دارد.

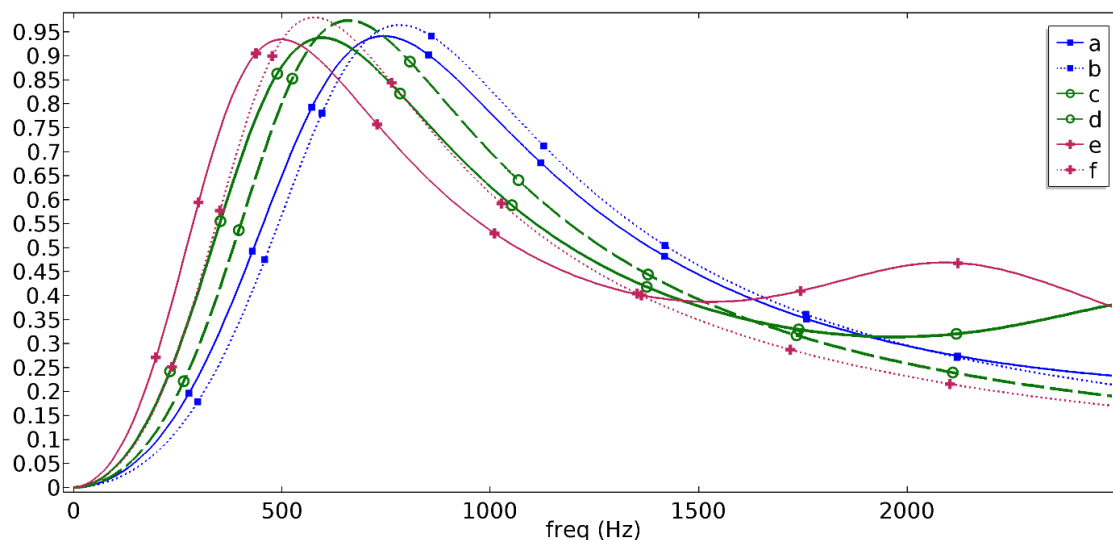
وقتی عمق کلی پشت MPP بیشتر می‌شود (۵۰mm و ۴۰)، تفاوت بین حالت‌های مختلف بیشتر نمایان می‌شود. در عمق کلی ۴۰mm، زمانی که سهم جاذب الیاف کف ۳۰mm است (c)، نسبت به حالتی که عمق لایه هوا ۳۰mm است (d)، پیک رزونانسی در فرکانس‌های پایین‌تری رخ داده است که شاهد رشد همین روند در نمودار e و f هستیم. ساختارهای b-d و f از لحاظ کمی در فرکانس رزونانسی بالاترین مقادیر جذب را نسبت به ساختارهای مشابه خود (a-c و e) دارند؛ و با افزایش عمق کلی و به طبع آن عمق لایه هوا در این ساختارها، پیک جذبی عدد بالاتری را نشان می‌دهد. برای بررسی مقدار کمی جذب در ساختارهای a تا f، میانگین جذب صوتی<sup>۱</sup> بر طبق استاندارد ASTM-C ۴۲۳ محاسبه شد. همانطور که در نمودار ۸ نشان داده شده است؛ نتایج میانگین ضریب جذب صوتی (SAA)

1. Sound Absorption Average

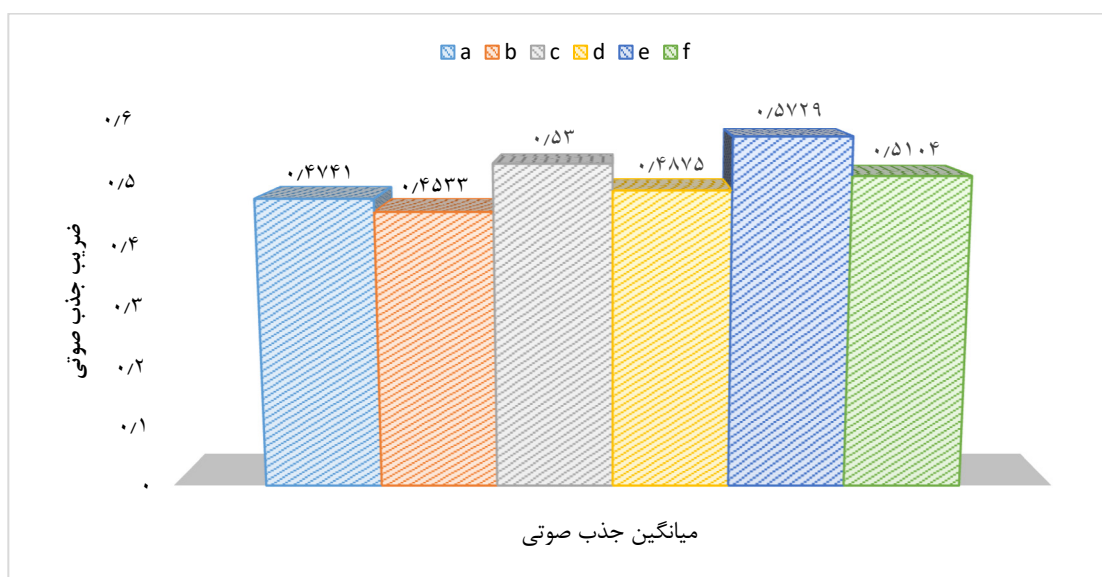
تغییرات اندکی در مقدار جذب فرکانس‌های رزونانسی نیز دیده می‌شود. هر چه عمق لایه هوا بیشتر باشد، ضریب جذب در نقطه پیک بیشتر می‌شود.

تأثیر ضخامت ماده جاذب پشت MPP بر عملکرد جذبی همانطور که در نمودار ۶ نشان داده شده است، با افزایش ضخامت الیاف کف (ثابت ماندن عمق لایه هوا)، فرکانس رزونانسی به سمت فرکانس‌های پایین‌تر تغییر پیدا کرده است. با این حال مقدار جذب حداکثر در فرکانس رزونانسی تغییرات چندانی محسوس نمی‌کند.

تأثیر عمق کلی محفظه پشت MPP بر عملکرد جذبی این آزمون در پی جواب دادن به این پرسش طراحی شده که آیا ضخامت یا عمق محفظه به تنهایی نشان‌دهنده محل دقیق فرکانس رزونانسی است و یا جنس لایه‌ها و بالطبع ضخامت هر لایه در این مورد تأثیرگذار است؟! در این قسمت از مطالعه یک بار، لایه هوا با ضخامت ثابت ۱۰mm و ضخامت‌های مختلف الیاف کف (حالت‌های a-c-e) و بار دیگر با ثابت فرض کردن ضخامت الیاف کف ۱۰mm و ضخامت‌های مختلف لایه هوا (حالت‌های b-d-f)، مورد بررسی قرار گرفت.



نمودار ۷. مقایسه عمق‌های یکسان در حالت‌های متفاوت لایه‌های الیاف کف و هوا



نمودار ۸. میانگین ضریب جذب صوتی (SAA) ساختارهای مختلف

سوراخ  $0.5 \text{ mm}$  و درصد سوراخ شدگی  $2\%$  است و همچنین بهترین ترتیب چیدمان آن به ترتیب صفحه سوراخ دار، لایه کف و هوا (ساختار A) می باشد. از طرفی هر قدر ضخامت لایه کف نسبت به لایه هوا بیشتر باشد فرکانس رزونانسی به سمت فرکانس‌های پایین‌تر تغییر داده شده است. به طور کلی، می توان چنین در

حالت‌های مختلف نشان می‌دهد. زمانی که سهم الیاف کف بیشتر از عمق لایه هوا است، میانگین ضریب جذب صوتی مقدار بیشتری است و با افزایش عمق محفظه این روند شتاب بیشتری می‌گیرد. در نهایت بر اساس یافته‌های مطالعه، بهترین عملکرد جذبی مربوط به ساختاری است که MPP دارای قطر

نظر گرفت در یک عمق برابر از محفظه پشت MPP، ساختاری بهترین عملکرد جذبی را از لحاظ کمی و کیفی دارد که ضخامت جاذب آن بیشتر از عمق هوا باشد.

### بحث

در مطالعه حاضر میزان عملکرد آکوستیکی ترکیبی متشکل از ساختارهای صفحه میکروسوراخ دار، الیاف کف و لایه هوا با روش عددی FEM و با کمک نرم افزار COMSOL مدلسازی شد. نتایج مطالعه نشان می‌دهد که ترکیب جاذب طبیعی و صفحات میکروسوراخ دار، با انتخاب صحیح خصوصیات ابعادی و ماکروسکوپی می‌تواند تا حدودی عملکرد جاذب را در محدوده فرکانس پایین (الیاف کف) و باریکی محدوده جذبی (MPP) بهبود بخشد. قطر سوراخ، عمق محفظه، درصد سوراخ شدگی و ضخامت لایه‌های پانل ترکیبی و ترتیب چیدمان از عوامل مهم تأثیرگذار بر میزان جذب صوتی بودند. صحت‌سنجی انجام شده برای مدل FEM نشان داد که نتایج بدست آمده، با نتایج حاصل از مطالعه آزمایشگاهی مطابقت دارد. با وجود اینکه انحراف بسیار کمی در برخی از فرکانس‌ها مشهود بود، ولی در مجموع روند هر دو نمودار یکسان بوده است. عدم تطابق نتایج دو روش را می‌توان به دلایلی مانند غیریکنواخت بودن امپدانس سطحی در نمونه واقعی، خطاهای ساخت و آزمایشگاهی نسبت داد؛ که این موارد در مدل FEM نادیده گرفته شده است. همچنین در کلیه روش‌های مدلسازی، شرایط مرزی در نظر گرفته شده باعث ساده‌سازی مسئله و ایجاد تفاوت‌هایی با شرایط واقعی آزمایش می‌شود. به طور کلی با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان استنباط کرد که روش FEM گزینه مناسبی برای مدل‌سازی در این زمینه می‌باشد. مطالعات زیادی را می‌توان نام برد که از روش عددی FEM برای بررسی خصوصیات آکوستیکی جاذب‌های متخلخل و یا سوراخ‌دار و انواع عایق‌ها استفاده کرده‌اند که از جمله آن‌ها می‌توان به مطالعه پانتگینی<sup>۱</sup> و همکاران (۴۷)، اونن<sup>۲</sup> و همکاران (۴۸)،

کیان<sup>۳</sup> و همکاران (۴۹)، وانگ<sup>۴</sup> و همکاران (۵۰)، بروگانی<sup>۵</sup> و همکاران (۵۱) و شن<sup>۶</sup> و همکاران (۵۲) اشاره کرد.

مطالعه حاضر نشان می‌دهد قرار گرفتن جاذب الیاف کف بدون فاصله هوایی نسبت به صفحه MPP می‌تواند نتایج بهتری را در فرکانس‌های پایین‌تر به دنبال داشته باشد. از طرفی وجود یک لایه هوا بین جاذب متخلخل و MPP که در ساختارهای B و C به کار رفته است، باعث افزایش ضریب جذب می‌شود. در این راستا نتایج یک مطالعه مروری توسط برینگاره<sup>۷</sup> و همکاران نشان می‌دهد که وجود لایه هوا در پشت صفحه جاذب در لوله امپدانس، جذب صوتی را در جاذب‌های طبیعی از جمله نارگیل، نیشکر و الیاف کف بهبود می‌بخشد (۵۳). همچنین مطالعه فولادی و همکاران که در زمینه استفاده از الیاف نارگیل در پانل جذب صوتی چند لایه بوده است نشان داد که الیاف نارگیل در فرکانس متوسط و بالا جذب خوبی دارد، اما پس از قرار دادن پانل سوراخ دار قبل و بعد از لایه الیاف، عملکرد آن در فرکانس پایین افزایش یافته اما عملکرد در فرکانس متوسط تا حدودی کاهش می‌یابد (۵۴). مطالعه بانسود<sup>۸</sup> و همکاران که در زمینه بررسی عملکرد جاذب کامپوزیتی نمد و لایه‌های سوراخ‌دار بود، نشان داد که نحوه چیدمان لایه‌های جاذب و صفحات سوراخ‌دار نقش مهمی در جذب صوت دارد (۵۵)؛ بنابراین می‌توان استنباط کرد که امپدانس کلی پانل کامپوزیت ترکیبی از امپدانس صفحه MPP و امپدانس فضای پشت صفحه تشکیل شده است؛ بنابراین تغییر در چیدمان، عاملی مؤثر بر توزیته هندسی آن ساختار است. هاشمی و همکاران نشان داده‌اند که قرارگیری جاذبی با مقاومت جریانی بالاتر در پشت MPP موجب بهبود ضریب جذب می‌شود (۴۱)؛ که همسو با مطالعه حاضر است.

یکی دیگر از یافته‌های مطالعه حاضر، بررسی تأثیر قطر سوراخ‌های MPP بر عملکرد جذبی بوده است. یافته‌های

3 Qian  
4 Wang  
5 Broghany  
6 Shen  
7 Bhingare  
8 Bansod

1 Panteghini  
2 Onen

جذبی نشان داد که افزایش عمق لایه هوا باعث افزایش ضریب جذب در فرکانس‌های پایین می‌شود. بطوری که که با دو برابر شدن عمق هوا از ۱۰ به ۲۰ میلی متر، فرکانس رزونانسی به سمت فرکانس‌های پایین‌تر حرکت کرده بود. نتایج مطالعه محمدی و همکاران نشان داد که وجود فاصله هوایی در پشت نمونه جاذب متخلخل باعث بهبود میزان ضریب جذب در فرکانس‌های بالاتر از ۲۵۰ هرتز شده و با بیشتر شدن ارتفاع فاصله هوایی، ماکزیمم جذب به سمت فرکانس‌های پایین متمایل می‌شوند (۵۷). در این راستا چین<sup>۳</sup> و همکاران گزارش کردند که ضریب جذب صوت پانل میکروسوراخ دار و الیاف کف، می‌تواند تحت تأثیر اختلاف درصد ترکیب الیاف باشد. همچنین ضمن اینکه تخلخل نمونه MPP همراه با افزایش ترکیب الیاف کف افزایش می‌یابد، با افزایش ضخامت لایه هوا در پشت پانل، حداکثر جذب نمونه MPP به محدوده فرکانس پایین‌تر نزدیک‌تر می‌شود (۵۸). با این حال افزایش عمق لایه هوا در پشت صفحه MPP که می‌تواند میزان جذب را در فرکانس‌های پایین بهبود بخشد، چیزی است که مطالعه حاضر را هم راستا با مطالعات مذکور نشان می‌دهد.

از دیگر یافته‌های مطالعه، تأثیر ضخامت الیاف کف در پشت MPP بر عملکرد جذبی بوده است. همان طور که انتظار می‌رفت با افزایش ضخامت الیاف کف (ثابت ماندن عمق لایه هوا) فرکانس رزونانسی به سمت فرکانس‌های پایین‌تر تغییر پیدا کرده بود؛ با این حال مقادیر ماکزیمم جذب در فرکانس رزونانسی تغییرات چندانی محسوس نداشتند (نمودار ۵). لیم<sup>۴</sup> و همکاران در مطالعه خود به تأثیر ضخامت جاذب، چگالی و ضخامت لایه هوا بر ضریب جذب صوت پرداختند. آن‌ها دریافتند که با افزایش چگالی و ضخامت جاذب، ضریب جذب صوتی افزایش می‌یابد (۵۹). براردی<sup>۵</sup> و همکاران الیاف طبیعی مختلف مانند کف، کناف، پنبه، نارگیل، الیاف چوب، چوب پنبه، پشم گوسفند و غیره را برای بررسی ضریب جذب صدا مورد مطالعه قرار دادند. همچنین آن‌ها در مورد تأثیر اندازه

مطالعه نشان می‌دهند که هر چه قطر سوراخ ریزتر باشد محدوده جذب، وسیع‌تر و مقدار ضریب جذب کمتر خواهد بود. همچنین افزایش قطر سوراخ‌ها باعث شده که پیک رزونانسی اندکی به سمت فرکانس‌های پایین‌تر تغییر داده شود. با ثابت فرض کردن درصد سوراخ‌شدگی، هنگامی که قطر سوراخ‌ها کاهش می‌یابد، رزیستانس تا حدودی افزایش می‌یابد که اگر از حد بهینه خود بالاتر نرود این افزایش امیدانسی سطحی موجب بهبود میزان ضریب جذب می‌شود. در همین ارتباط، مطالعه‌ای توسط لی<sup>۱</sup> و همکاران در ۲۰۱۰ صورت پذیرفت. نتایج نشان داد که کاهش قطر حفره‌ها باعث وسیع‌تر شدن پهنای باند جذبی می‌گردد (۲۶). مطالعه بهشتی و همکاران نیز نشان داد که استفاده از صفحه سوراخ دار در جلوی مواد متخلخل با ضخامت کم به طور قابل توجهی ماکزیمم ضریب جذب صوتی و پهنای باند جذب را در فرکانس‌های کمتر از ۳۰۰۰ هرتز بهبود می‌بخشد (۵۶). تأثیر درصد سوراخ‌شدگی MPP بر عملکرد جذبی یکی دیگر از پارامترهای مورد بررسی در این مطالعه بوده است. نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد که در فرکانس‌های پایین، کاهش درصد سوراخ‌شدگی باعث بهبود ضریب جذب خواهد شد، در حالی که در فرکانس‌های بالاتر، افزایش درصد سوراخ‌شدگی منجر به بهبود جذب می‌شود. واضح است که برای حصول محدوده جذب مناسب باید درصد سوراخ‌شدگی به درستی انتخاب شود. مطابق با مدل نظری ضریب جذب برای جاذب‌های ناهمگن، می‌توان استنباط کرد که در صورت ثابت فرض شدن ضخامت MPP و عمق محفظه پشت MPP، فرکانس رزونانسی رابطه مستقیمی با درصد سوراخ‌شدگی (P) دارد. به طوری که با افزایش P ضریب جذب به سمت فرکانس‌های بالاتر تغییر پیدا می‌کند (۳۹).

مطالعه لی<sup>۲</sup> نشان دهنده این موضوع است که با کاهش درصد تخلخل، پیک جذبی افزایش و فرکانس رزونانسی به سمت فرکانس‌های کمتر متمایل می‌شود (۲۹) که تا حدودی در تأیید مطالعه حاضر است

بررسی تأثیر عمق لایه هوا پشت MPP بر عملکرد

3 Chin  
4 Lim  
5 Berardi

1 Li  
2 Lee

و شاهد پیک رزونانسی در فرکانس‌های پایین‌تر باشیم. مطالعات مختلف این ادعا را تأیید می‌کند (۶۶-۶۴). در بررسی تأثیر عمق کلی محفظه پشت MPP بر عملکرد جذبی نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که در حالتی که ضخامت جاذب دو برابر لایه هوا باشد، شاهد عملکرد بهتر در فرکانس‌های پایین‌تر خواهیم بود. به عبارتی، زمانی که سهم الیاف کف بیشتر از عمق لایه هوا است، میانگین ضریب جذب صوتی مقدار بیشتری است که با افزایش عمق محفظه، این روند شتاب بیشتری می‌گیرد. البته زمانی که عمق لایه هوا بیشتر باشد، ماکزیمم جذب در فرکانس رزونانس مقدار بزرگ‌تری خواهد داشت. همسو با این نتایج، مطالعه موسا<sup>۱</sup> و همکاران که به بررسی ضریب جذب یک پانل دو لایه ناهمگن میکروسوراخ دار با عمق حفره‌های متعدد پرداخته است، نشان می‌دهد که پهنای باند را می‌توان با افزایش عمق حفره پشت MPP با قطر سوراخ بزرگ و نسبت سوراخ کوچک در فرکانس‌های پایین افزایش داد (۶۷).

همچنین نتایج نشان می‌دهند که نه تنها عمق محفظه پشت MPP در فرکانس رزونانسی مؤثر است، بلکه نوع لایه‌های پشت صفحه نیز عاملی تعیین کننده در محل دقیق فرکانس رزونانسی هستند. به عبارتی، در عمق یکسان، وقتی که سهم جاذب متخلخل نسبت به عمق لایه هوا بیشتر باشد، شاهد فرکانس رزونانسی پایین‌تری هستیم؛ بنابراین می‌توان استنباط کرد که مواد جاذب با خصوصیات ماکروسکوپی متفاوت، میزان جذب متفاوتی از خود نشان می‌دهند. این خصوصیات شامل تخلخل، مقاومت جریانی، تورنوزیته، طول مشخصه ویسکوز و طول مشخصه دمایی است. افزایش ضریب جذب می‌تواند ناشی از فرآیند استهلاکی طولانی‌تر در رسانایی حرارتی و افزایش اثر ویسکوز میان هوا و مواد جاذب در کامپوزیت باشد (۶۴). به عبارتی اگر جنس مواد جاذب به گونه‌ای انتخاب شود که مسیر طولانی‌تری را ایجاد کند (تورنوزیته) و استهلاک بیشتری را به سبب ویسکوز به وجود آورد (مقاومت جریانی)، مسلماً جذب بیشتری را

فیبر بر جذب صوت در الیاف طبیعی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که دانسیته و ضخامت نمونه، نقش مهمی در ضریب جذب صدا برای همه الیاف طبیعی مورد استفاده دارد (۲۲). در مطالعه آزمایشگاهی دیگری براردی و همکاران از نمونه‌های با ضخامت‌های مختلف (۱/۵، ۳ و ۴ میلی متر) از الیاف طبیعی استفاده کردند. آن‌ها گزارش دادند با افزایش ضخامت، میزان جذب صوتی جاذب در فرکانس‌های پایین افزایش یافته است (۶۰). با همه این‌ها مطالعاتی وجود دارند که از جاذب طبیعی در ترکیب با MPP استفاده شده‌است. مطالعه بهشتی و همکاران، در بررسی اثر ضخامت کامپوزیت متشکل از MPP و پنج نوع الیاف طبیعی مختلف (پشم گوسفند، پشم بز، پشم شتر و نیشکر و الیاف باگاس نیشکر) نشان داد که حداکثر ضریب جذب صوتی از محدوده فرکانس متوسط و بالا، با افزایش ضخامت لایه MPP و لایه متخلخل به سمت فرکانس‌های پایین‌تر تغییر پیدا می‌کند. در واقع عملکرد جذب صوتی به ضخامت صفحه MPP و لایه متخلخل در یک جاذب صوتی مرکب بستگی دارد (۵۶). مطالعه دیگری توسط راسلی<sup>۱</sup> و همکاران در بررسی آکوستیکی پانل MPP و الیاف نارگیل نشان می‌دهد که این مدل ساندویچی جذب صوت را با جابجایی حداکثر ضریب جذب به فرکانس پایین‌تر و ایجاد باند وسیع‌تری از جذب فرکانس تغییر می‌دهد. علاوه بر این، لایه هوا بین MPP و پانل الیاف، سهم کمتری در ساخت فرکانس رزونانس فرکانس دارد (۶۱). می‌توان استنباط کرد هنگامی که یک موج صوتی به یک سطح برخورد می‌کند، موج ایستاده تشکیل می‌شود (۶۲). در مواد متخلخل، زمانی بیشترین ضریب جذب صوتی ایجاد می‌شود که سرعت ذرات موج صوتی حداکثر باشد (۶۳). این اتفاق در فاصله  $\frac{\lambda}{4}$  اتفاق می‌افتد. از طرفی امواج کم فرکانس، طول موج بلندتری نسبت به امواج با فرکانس بالا دارند و برای داشتن جذب بالا احتیاج به فضا و ضخامت بیشتری دارند. به عبارتی  $\frac{\lambda}{4}$  برای این امواج در ضخامت‌های بیشتری ایجاد می‌شود. پس بدیهی است که با افزایش ضخامت، این شرایط برای امواج کم فرکانس ایجاد

### نتیجه گیری

مدل سازی ساختار آکوستیکی در این مطالعه نشان می‌دهد که فرکانس رزونانس و محدوده فرکانسی سیستم به پارامترهایی از جمله قطر سوراخ، عمق محفظه، درصد سوراخ‌شدگی و ضخامت MPP بستگی دارد. در حقیقت قطر سوراخ نشان‌دهنده ماکزیمم جذب می‌باشد، در حالی که ضخامت و جنس لایه‌های پشت صفحه تعیین کننده فرکانس دقیق ماکزیمم جذب است. با افزایش قطر سوراخ و کاهش درصد سوراخ‌شدگی، پیک رزونانسی در فرکانس‌های پایین‌تری دیده می‌شود. همچنین تغییر در ضخامت و چیدمان لایه‌های پشت و خود صفحه میکروسوراخ دار بر عملکرد جذبی پانل اثرگذار هستند. قرارگیری الیاف کف بلافاصله بعد از MPP موجب بهبود عملکرد در فرکانس‌های پایین‌تر شد. همچنین وقتی ضخامت الیاف کف نسبت به لایه هوا در محفظه پشت MPP بیشتر بود، ضریب جذب متوسط صوتی مقدار بیشتری را به خود اختصاص داد. به طور کلی در این مطالعه با استفاده از روش عددی نشان داده شد که ارتباط نزدیکی بین این روش‌ها در تعیین ضریب جذب نرمال وجود دارد و می‌توانند با دقت بالایی جایگزین روش‌های سخت و هزینه‌بردار آزمایشگاهی شوند. این مطالعه مقدمه‌ای در جهت بهبود خصوصیات آکوستیکی جاذب طبیعی کف است. در این خصوص پیشنهاد می‌شود که از سایر جاذب‌های طبیعی و یا ترکیبی از آنها به همراه جاذب‌های متداول در کنار صفحات MPP بهره گرفت.

### تشکر و قدردانی

نویسندگان وظیفه خود می‌دانند تا مراتب سپاس خود را از معاونت آموزشی، پژوهش و تحقیقات دانشکده علوم پزشکی بهبهان به‌جای آورند. در این پژوهش، کلیه ملاحظات اخلاقی مورد نظر دانشکده علوم پزشکی رعایت گردیده است. کد اخلاق این مطالعه IR.1401.009.1401.1.2251807.1401.12.4.11.7 [DOR: 20.1001.1.2251807.1401.12.4.11.7] BHN.REC. می‌باشد.

سبب می‌شود (۶۸). در مطالعه راسلی و همکاران از پانل دولایه MPP با الیاف برگ آناناس و نخل استفاده شده بود. نتایج آن‌ها حاکی از این است که در مدل ساندویچی MPP به علت بالا بودن چگالی در الیاف برگ آناناس، ضریب جذب بیشتر از الیاف نخل افزایش یافته است، ضمن اینکه استفاده از صفحه MPP در هر دو الیاف، حداکثر ضریب جذب را به سمت فرکانس‌های پایین‌تر متمایل کرده بود (۶۹). از طرفی افزایش ضخامت ماده جاذب سبب افزایش چگالی بالک می‌شود (۷۰) که به مفهوم افزایش تعداد الیاف در واحد سطح است. در نتیجه، اتلاف انرژی در امواج صوتی به دلیل افزایش اصطکاک سطح، افزایش می‌یابد. پس می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات بوجود آمده در خصوصیات ماکروسکوپی لایه‌های پشت MPP سبب تفاوت در عملکرد جذبی این ساختارها شده است. یانگ<sup>۱</sup> و همکاران تأثیر افزودن لایه الیاف کف به لایه الیاف نارگیل را به عنوان جاذب صوتی بررسی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که وقتی لایه الیاف کف در قسمت جلویی منبع صوتی قرار می‌گیرد بهترین نتیجه را می‌دهد. ضریب جذب صدا پس از جایگزینی لایه جلویی نارگیل به ضخامت ۳۰ میلی‌متر با لایه فیبر کف ۱۰ میلی‌متری از ۰/۶ به ۰/۸ برای فرکانس ۱۵۰۰ هرتز افزایش می‌یابد (۵۹).

یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که ترکیب جاذب‌هایی با خصوصیات متمایز از یکدیگر می‌تواند باعث بهبود عملکرد پانل ترکیبی نهایی شود. با انتخاب صحیح خصوصیات ابعادی و ماکروسکوپی که در بخش نتایج اشاره شد، می‌توان تا حدودی عملکرد جاذب را در فرکانس‌های پایین بهبود بخشید. با این حال این مطالعه به بررسی جذب صوتی جاذب ترکیبی متشکل از صفحه میکروسوراخ دار، الیاف کف و لایه هوا، به صورت مدل سازی عددی پرداخته است. لذا جهت دسترسی به نتایج واقعی‌تر، طراحی مطالعه تجربی با استفاده از لوله امیدانس پیشنهاد می‌شود. از دیگر محدودیت‌های این مطالعه می‌توان به عدم بررسی تمامی حالات موجود اشاره کرد.

1 Ying

## REFERENCES

1. Samaei SE, Mahabadi HA, Mousavi SM, Khavanin A, Faridan M, Taban E. The influence of alkaline treatment on acoustical, morphological, tensile and thermal properties of Kenaf natural fibers. *J Ind Text* . 2020;1528083720944240.
2. Samaei SE, Berardi U, Taban E, Soltani P, Mousavi SM. Natural fibro-granular composite as a novel sustainable sound-absorbing material. *Appl Acoust*. 2021;181:108157.
3. Samaei SE, Berardi U, Soltani P, Taban E. Experimental and modeling investigation of the acoustic behavior of sustainable kenaf/yucca composites. *Appl Acoust*. 2021;183:108332.
4. Paiva KM, Cardoso MRA, Zannin PHT. Exposure to road traffic noise: Annoyance, perception and associated factors among Brazil's adult population. *Sci Total Environ*. 2019;650:978-86.
5. Chatterjee A, Chatterjee S, Chatterjee S, Banerjee N, Santra T, Mukherjee S. Impact of Occupational Noise on Hearing Threshold Profile Among Male Industrial Workers. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*. 2021;18(4):73-8.
6. Münzel T, Gori T, Babisch W, Basner M. Cardiovascular effects of environmental noise exposure. *Eur Heart J*. 2014;35(13):829-36.
7. Rabiei H, Ramezanifar S, Hassanipour S, Gharari N. Investigating the effects of occupational and environmental noise on cardiovascular diseases: a systematic review and meta-analysis. *Environ Sci Pollut Res Int*. 2021;28(44):62012-29.
8. Bureš Z, Popelář J, Syka J. The effect of noise exposure during the developmental period on the function of the auditory system. *Hearing research*. 2017;352:1-11.
9. Van Kamp I. A systematic review of evidence of the effect of transport noise interventions on human health. *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*. 2016; Institute of Noise Control Engineering.
10. Opiela KC, Zieliński TG. Microstructural design, manufacturing and dual-scale modelling of an adaptable porous composite sound absorber. *Compos B Eng*. 2020;187:107833.
11. Asdrubali F, Schiavoni S, Horoshenkov K. A review of sustainable materials for acoustic applications. *Building Acoustics*. 2012;19(4):283-311.
12. Ren M, Jacobsen F. A method of measuring the dynamic flow resistance and reactance of porous materials. *Appl Acoust*. 1993 Jan 1;39(4):265-76.
13. Fouladi MH, Ayub M, Nor MJM. Analysis of coir fiber acoustical characteristics. *Appl Acoust*. 2011;72(1):35-42.
14. Da Silva CCB, Terashima FJH, Barbieri N, de Lima KF. Sound absorption coefficient assessment of sisal, coconut husk and sugar cane fibers for low frequencies based on three different methods. *Appl Acoust*. 2019;156:92-100.
15. Taban E, Khavanin A, Faridan M, Samaei S, Samimi K, Rashidi R. Comparison of acoustic absorption characteristics of coir and date palm fibers: experimental and analytical study of green composites. *Int J Environ Sci Technol (Tehran)*. 2020;17(1):39-48.
16. Adhika DR, Prasetyo I, Noeriman A, Hidayah N, Widayani S. Sound absorption characteristics of pineapple leaf/epoxy composite. *Archives of Acoustics*. 2020;45(2):233-40.
17. Nordin M, Wan L, Zainulabidin M, Kassim A, Aripin A. Research finding in natural fibers sound absorbing material. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2016;11(14):79-85.
18. Yang T, Hu L, Xiong X, Petrù M, Noman MT, Mishra R, et al. Sound absorption properties of natural fibers: A review. *Sustainability*. 2020;12(20):8477.
19. Azhar IA, Sari KAM. Comparison of sound absorption coefficient on natural fiber and recycle materials panel. *Progress in Engineering Application and Technology*. 2021;2(1):225-33.
20. Ramesh P, Durga Prasad B, Narayana K. Characterization of kenaf fiber and its composites: a review. *J Reinf Plast Compos*. 2018;37(11):731-7.
21. Keyvani S, Monazzam Esmailpour M, Fasih-Ramandi F, Ahmadi Asour A, Kolahdouzi M, Hashemi Z. Impact of Layout Sequence of the Natural and Synthetic Adsorbents in Double-Layered Composites on Improving the Natural Fiber Acoustic Performance Using the Numerical Finite Element Method. *Journal of Health and Safety at Work*. 2021;11(3):368-83.
22. Berardi U, Iannace G. Acoustic characterization of natural fibers for sound absorption applications. *Build Environ*. 2015;94:840-52.
23. Samaei SE, Taban E, Berardi U, Mousavi SM, Faridan M, Asilian Mahabadi H. Optimization and modeling

- of sound-absorption properties of natural fibers for Acoustical Application. *Journal of Natural Fibers*. 2021;1-17.
24. Fahy FJ. *Foundations of engineering acoustics*. Elsevier; 2000 Sep 12.
25. Zhao X-D, Yu Y-J, Wu Y-J. Improving low-frequency sound absorption of micro-perforated panel absorbers by using mechanical impedance plate combined with Helmholtz resonators. *Appl Acoust*. 2016;114:92-8.
26. Li G, Mechefske CK. A comprehensive experimental study of micro-perforated panel acoustic absorbers in MRI scanners. *Magnetic Resonance Materials in Physics, Biology and Medicine*. 2010;23(3):177-85.
27. Rozli Z, Zulkarnain Z. Noise control using coconut coir fiber sound absorber with porous layer backing and perforated panel. *Am J Appl Sci*. 2010;7(2):260-4.
28. Lee D, Kwon Y. Estimation of the absorption performance of multiple layer perforated panel systems by transfer matrix method. *J Sound Vib*. 60-847: (4-5)278;2004.
29. Sakagami K, Kobatake S, Kano Ki, Morimoto M, Yairi M. Sound absorption characteristics of a single microperforated panel absorber backed by a porousabsorbent layer. *Acoust Aust*. 2011;39(3).
30. Lee Y, Lee E, Ng C. Sound absorption of a finite flexible micro-perforated panel backed by an air cavity. *J Sound Vib*. 2005;287(1-2):227-43.
31. Jafari Nodoushan R, Azimzadeh M, Bagheri S, Dehghani Tafti A. Design and Compare Sound Absorption Coefficient Nanocomposites Containing Tea Waste and Polypropylene With and Without Nanoclay. *Journal of Health and Safety at Work*. 2021 Dec 10;11(4):544-55.
32. Hajizadeh R, Khavanin A, Jafari AJ, Barmar M, Dehghan SF. Investigation of Acoustic Properties of Polymer Nanocomposites Polymer Regarding Combined Sound Absorption and Insulation Characteristics. *Journal of Health and Safety at Work*. 2019;2019(9):4.
33. Maa D-Y. Theory and design of microperforated panel sound-absorbing constructions. *Sci Sin*. 1975;18:55-71.
34. Maa D-Y. Potential of microperforated panel absorber. *J Acoust Soc Am*. 1998;104(5):2861-6.
35. MAA D-Y. Microperforated panel wideband absorber. *Noise Control Eng J*. 1987:77-84.
36. Allard JF, Champoux Y. New empirical equations for sound propagation in rigid frame fibrous materials. *J Acoust Soc Am*. 1992;91(6):3346-53.
37. Huang H-C, Usmani AS. *Finite element method. Finite Element Analysis for Heat Transfer*: Springer; 1994. p. 21-47.
38. Bathe KJ. *Finite element method. Wiley encyclopedia of computer science and engineering*. 2007:1-12.
39. 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.
40. Wang C, Wang M, Mai K, Li H, Liu N. Structure design of low-frequency broadband sound-absorbing volute for a multi-blade centrifugal fan. *Appl Acoust*. 2020;165:107315.
41. Hashemi Z, Monazzam M, Fahim A. Estimation of sound absorption performance of complex perforated panel absorbers by numerical finite element method and examining the role of different layouts behind it. *Fluctuation and Noise Letters*. 2019;18(03):1950013.
42. Taban E, Soltani P, Berardi U, Putra A, Mousavi SM, Faridan M, et al. Measurement, modeling, and optimization of sound absorption performance of Kenaf fibers for building applications. *Build Environ*. 2020;180:107087.
43. Desrosiers TA, Lawson CC, Meyer RE, Richardson DB, Daniels JL, Waters MA, et al. Maternal occupational exposure to organic solvents during early pregnancy and risks of neural tube defects and orofacial clefts. *Occup Environ Med*. 2012;69(7):493-9.
44. Wang Z, Wu SF. Helmholtz equation-least-squares method for reconstructing the acoustic pressure field. *J Acoust Soc Am*. 1997;102(4):2020-32.
45. Bliss DB. Study of bulk reacting porous sound absorbers and a new boundary condition for thin porous layers. *J Acoust Soc Am*. 1982;71(3):533-45.
46. Komatsu T. Improvement of the Delany-Bazley and Miki models for fibrous sound-absorbing materials. *Acoust Sci Technol*. 2008;29(2):121-9.
47. Panteghini A, Genna F, Piana E. Analysis of a perforated panel for the correction of low frequency resonances in medium size rooms. *Appl Acoust*. 2007;68(10):1086-103.
48. Onen O, Caliskan M. Design of a single layer micro-perforated sound absorber by finite element analysis. *Appl Acoust*. 2010;71(1):79-85.
49. Qian Y, Kong D, Liu Y, Liu S, Li Z, Shao D, et al. Improvement of sound absorption characteristics under

- low frequency for micro-perforated panel absorbers using super-aligned carbon nanotube arrays. *Appl Acoust.* 2014;82:23-7.
50. Wang C, Huang L, Zhang Y. Oblique incidence sound absorption of parallel arrangement of multiple micro-perforated panel absorbers in a periodic pattern. *J Sound Vib.* 2014;333(25):6828-42.
  51. Broghany M, Saffar S, Basirjafari S. Increasing the Frequency Band of Sound Absorption for Flat Multi-Layered Absorbers Consisting of Porous Material, Perforated Panel and Air-Gap. *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering.* 2018;50(1):219-30.
  52. 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.
  53. Bhingare NH, Prakash S, Jatti VS. A review on natural and waste material composite as acoustic material. *Polym Test.* 2019;80:106142.
  54. Fouladi MH, Nor MJM, Ayub M, Leman ZA. Utilization of coir fiber in multilayer acoustic absorption panel. *Appl Acoust.* 2010;71(3):241-9.
  55. Bansod PV, Teja TS, Mohanty AR. Improvement of the sound absorption performance of jute felt-based sound absorbers using micro-perforated panels. *Journal of low frequency noise, vibration and active control.* 2017;36(4):376-98.
  56. Beheshti MH, Khavanin A, Safari Varyani A, Yahya MNB, Alami A, Khajenasiri F, et al. Improving the sound absorption of natural waste material-based sound absorbers using micro-perforated plates. *Journal of Natural Fibers.* 2021:1-12.
  57. Muhammad M, Sa'at N, Naim H, Isa MC, Yusof NHN, Yati MSD. The effect of air gap thickness on sound absorption coefficient of polyurethane foam. *Def ST Tech Bull.* 2012;5(2):176-87.
  58. Chin DDVS, Yahya MNB, Din NBC, Ong P. Acoustic properties of biodegradable composite micro-perforated panel (BC-MPP) made from kenaf fibre and polylactic acid (PLA). *Appl Acoust.* 2018;138:179-87.
  59. Lim Z, Putra A, Nor M, Muhammad N, Yaakob M. Sound absorption of multilayer natural coir and kenaf fibres. *Proceedings of the 23rd International Congress on Sound and Vibration (ICSV23), Athens, Greece; 2016.*
  60. Berardi U, Iannace G, Di Gabriele M. The acoustic characterization of broom fibers. *Journal of Natural Fibers.* 2017;14(6):858-63.
  61. Rusli M, Rahman F, Dahlan H, Bur M, editors. *Sound Absorption Characteristics of a Single Micro-Perforated Panel Backed by a Natural Fiber Absorber Material. Solid State Phenomena; 2020.*
  62. Ge S, Liu X, Qiao X, Wang Q, Xu Z, Qiu J, et al. Coherent longitudinal acoustic phonon approaching THz frequency in multilayer molybdenum disulphide. *Sci Rep.* 7: (1)4;2014.
  63. Zulkifli R, Nor MM, Tahir MM, Ismail A, Nuawi M. Acoustic properties of multi-layer coir fibres sound absorption panel. *Journal of Appl Sci.* 2008;8(20):3709-14.
  64. Abd ALRahman L, Raja RI, Rahman RA. Experimental study on natural fibers for green acoustic absorption materials. *Am J Appl Sci.* 2013;10(10):1307.
  65. Choe H, Sung G, Kim JH. Chemical treatment of wood fibers to enhance the sound absorption coefficient of flexible polyurethane composite foams. *Compos Sci Technol.* 2018;156:19-27.
  66. Yang M, Sheng P. Sound absorption structures: From porous media to acoustic metamaterials. *Annu Rev Mater Res.* 2017;47:83-114.
  67. Mosa AI, Putra A, Ramlan R, Esraa A-A. Absorption coefficient of a double-layer inhomogeneous micro-perforated panel backed with multiple cavity depths. *Acoust Aust.* 2020;48(1):69-78.
  68. Heard DJ. Reptile anesthesia. *Veterinary clinics of north America: exotic animal practice.* 2001;4(1):83-117.
  69. Rusli M, Nanda RS, Dahlan H, Bur M, editors. *Sound Absorption Characteristics of Sandwich Panel Made from Double Leaf Micro-perforated Panel And Natural Fiber. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering; 2020: IOP Publishing.*
  70. Rausch AM, Küng VE, Pobel C, Markl M, Körner C. Predictive simulation of process windows for powder bed fusion additive manufacturing: influence of the powder bulk density. *Materials.* 2017;10(10):1117.