

ORIGINAL RESEARCH PAPER

## 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

Sepideh keyvani<sup>1</sup>, Mohammadreza Monazzam Esmailpour<sup>1</sup>, Fatemeh Fasih-Ramandi<sup>1</sup>, Akbar Ahmadi Asour<sup>1,2</sup>, Malihe Kolahdouzi<sup>1,\*</sup>, Zahra Hashemi<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup> Department of Occupational Health Engineering, School of Health, Sabzevar University of Medical Sciences, Razavi Khorasan, Iran

<sup>3</sup> Department of Occupational Health Engineering, School of Health, Behbahan University of Medical Sciences, Khuzestan, Iran

Received: 2020-08-01

Accepted: 2021-02-21

### ABSTRACT

**Introduction:** The acoustic performance of natural fiber adsorbents has been investigated in numerous studies. A part of these materials show a poor adsorption within the frequency range of less than 1000 Hz. In the present study, attempts were made to investigate the effect of layout sequence of double-layered composites consisting of natural and synthetic fibers on improving the acoustic adsorption coefficient of natural fiber in the low-frequency range (63 to 1000 Hz) using the numerical finite element method.

**Material and Methods:** In this study, the finite element method and the Johnson-Champoux-Allard model in COMSOL software version 5.3a were used to investigate the acoustic performance of the double-layered composites consisting of natural and synthetic adsorbents. The acoustic absorbers under study included date palm fiber, polyurethane foam and cellular rubber. Each double-layered composite included a date palm fiber with 10mm in thickness and a synthetic adsorbent (polyurethane foam or cellular rubber) with 10mm in thickness. In sum, four double-layered composite structures with different layouts of adsorbents in each structure were studied.

**Results:** The location of natural fiber can play a critical role in the acoustic performance of the double-layered composite structures such that comparing the studied double-layered composites revealed that when the natural fiber was the first layer exposed to the normal sound in the double-layered composites with 20mm in thickness, the trend of acoustic performance was approximately the same as the single-layered composite of natural fiber with 20mm in thickness; but in the composite structures, when the synthetic adsorbent was the first layer exposed to the sound, the trend of acoustic absorption was improved.

**Conclusion:** On the basis of the results, the double-layered composite structure with a higher-density and lower-porosity upper layer showed a better acoustic absorption trend than the single-layered composite including the natural adsorbent.

**Keywords:** Acoustic Performance, Natural Fiber, Synthetic Adsorbent, Finite Element Method

### 1. INTRODUCTION

Due to the conversion of sound energy to heat and consequently sound absorption, the acoustic absorbers have many applications in controlling the noise and sound. These materials are divided into two categories in terms of the fibers' nature:

natural fibers (plant, animal) and synthetic fibers (polymer fibers, non-polymeric). High stability, good acoustic performance, resistance to fungal and mold growth, flexibility, elasticity, and low water absorption are from the properties of synthetic fibers such that, they are resistant to water, stress, heat, and chemicals. The sound

\* Corresponding Author Email: [mkolahdouzi89@gmail.com](mailto:mkolahdouzi89@gmail.com)

absorbers can be used separately or in multilayer structures. Multilayer structures enable the improvement of sound adsorption coefficient of an adsorbent through reducing the composite density and thickness without any reduction in the sound absorption. On the other hand, orientation of sound absorbing panels in a multilayer system plays a significant role in the acoustic performance of materials. Compared to the empirical methods, the numerical methods are seen as an appropriate scientific alternative for examining the issues. Some numerical methods, such as Finite Element Method (FEM) and Boundary Element Method (BEM), are able to model the acoustic spaces in more details as well as the complex behaviors such as interference and deviation, and their functioning is excellent in the low-frequency range. Therefore, before conducting the experimental and field studies, modeling is suggested to save time and money. In this study, the impact of layout sequence of double-layered composites consisting of natural and synthetic fibers on improvement of the sound adsorption coefficient of date palm fiber at low frequency (63 to 1000 Hz) was investigated by FEM. Similarly, the weakness of the reduced sound performance of this natural fiber is covered at the low frequencies.

## 2. MATERIAL AND METHODS

In addition to the empirical method, there are modeling techniques including mathematical, analytical, and numerical methods to investigate the performance of acoustic absorption of porous adsorbents. In this study, the Johnson-Champoux-Allard (JCA) model and also FEM was used with

COMSOL Multiphysics software version 5.3a. The studied sound absorbers in this research included date the palm fiber, polyurethane foam and cellular rubber. The results of experimental studies on the date palm fiber showed that the best acoustic performance of this material occurs at medium and high-frequency ranges. Studies have shown that a sound absorber with multilayer structure offers a higher adsorption coefficient than a single-layered structure with the same thickness. For this purpose, the structure of the double-layered composite consists of a date palm fiber with a 10mm in thickness where each of the absorbent materials, including rubber or polyurethane foam, is 10mm in thickness, too. Since the present study aimed at investigating the effect of the layout sequence of adsorbents in the double-layered composite including date palm fiber and synthetic adsorbent on the acoustic performance of date palm fiber at low frequencies by modeling technique, the layout sequence of the layers in the studied structures along with their shapes is shown in Table 1 and Fig. 1, respectively.

## 3. RESULTS AND DISCUSSION

Results of the FEM validation with experimental results for date palm fiber with a thickness of 20 mm are presented in Fig. 2. Fig. 3 shows the results of the adsorption coefficient of the studied structures within the frequency range of 63 Hz to 1000 Hz. In this figure, structure A is compared to the structures B, C, D, and E. As seen in Fig. 3 (Diagram A), as the frequency increases, the sound absorption property of the date palm fiber with 20 mm in thickness and the density of 100 Kg/m<sup>3</sup> and the porosity of 0.8976% increase significantly

Table 1. Layout sequence of layers in the studied structures

Structure	Description
A	Date palm fiber with 20mm in thickness and density of 100 Kg/m <sup>3</sup> , and other properties (air flow resistivity: 1785, porosity: 0.8976, tortuosity: 2.8, viscous and thermal characteristic lengths: 189–414)
B	Date palm fiber with 10mm in thickness (bottom layer) and cellular rubber with 10mm in thickness and density of 64 Kg/m <sup>3</sup> , and other properties (air flow resistivity: 123501, porosity: 0.83, tortuosity: 2.64, viscous and thermal characteristic lengths: 23–23)
C	Date palm fiber with 10mm in thickness (top layer) and cellular rubber with 10mm in thickness (bottom layer)
D	Date palm fiber with 10mm thickness (bottom layer) and polyurethane foam with 10mm in thickness and density of 25 Kg/m <sup>3</sup> , and other properties (air flow resistivity: 12901, porosity: 0.98, tortuosity: 1.41, viscous and thermal characteristic lengths: 21–23)
E	Date palm with 10mm in thickness (top layer) and polyurethane foam with 10mm in thickness (bottom layer)

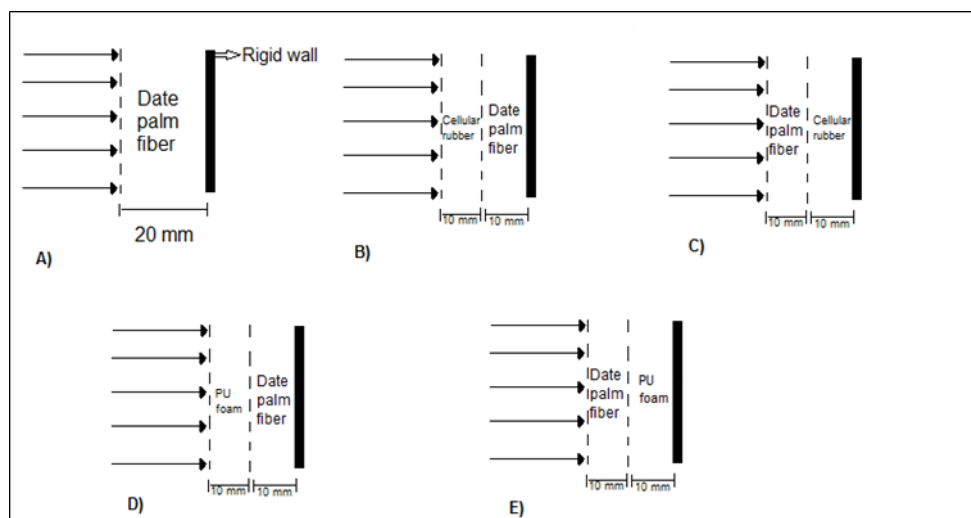


Fig. 1. Studied structures

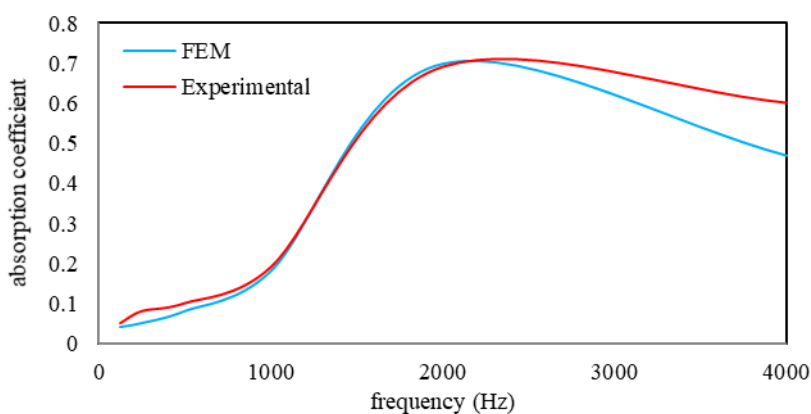


Fig. 2. Comparison between the results of sound absorption performance of experimental method and FEM

and the adsorption coefficient varies up to 0.16. According to diagram B, it was found that as the frequency increases, the sound absorption property of date palm fiber and rubber increases up to 0.6. In structure C, the adsorption rate is 0.14 at 800 Hz, but in reverse, i.e., in structure B, the adsorption rate reaches 0.5 at 800 Hz. As one can see in diagram D, the adsorption coefficient has increased with a relatively lower slope than the diagram B, such that the adsorption coefficient has decreased to 0.3 and less than 0.1 at 800 Hz and 400 Hz, respectively. In structure E, where the layout of its layers is the opposite of structure D, the maximum adsorption coefficient of this structure was 0.18. Therefore, compared to the adsorption coefficient of different double-layered structures, as can be seen in the diagrams, in all cases, as the frequency

increases, the adsorption coefficient has taken an ascending trend. Structure B shows the highest adsorption coefficient at the studied frequencies. An effective acoustic property in improvement of the acoustic performance of structure B compared to structure C is the resistance to airflow. Another factor influencing the sound absorption rate is porosity. In the double-layered structure studied here, when the layer with less porosity, as the first layer, was exposed to the sound with low frequency, the acoustic adsorption performance of double-layered composite enhanced. So, one can conclude that reduced porosity has increased the sound absorption coefficient of the double-layered composite structure. This result was reported in the study by Fouladi et al. on the acoustic performance of natural fibers such as fibers of coconut, corn,

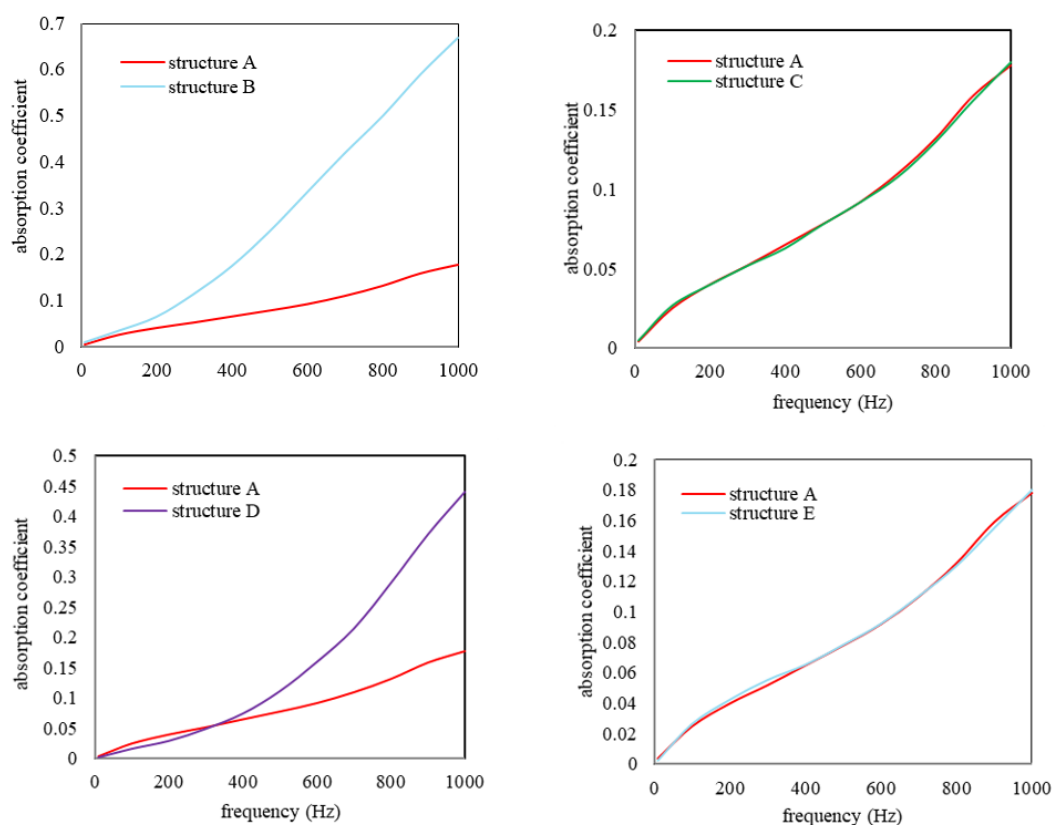


Fig. 3. Sound performance diagrams of the studied structures

sugarcane, and marijuana (8). In this study, when the polyurethane foam in a double-layered composite with natural fiber had higher density than the rubber while exposing to the incident sound wave, better acoustic performance was achieved.

#### 4. CONCLUSIONS

Using the modeling techniques makes it possible to predict the adsorption rate of adsorbing materials with a lower cost and higher speed before manufacturing them. Results showed that by using the multilayer sound-absorbing structures,

better performance can be achieved than single-layer materials. Compared to other structures with different layouts, the application of the double-layered composites of date palm fiber and rubber – rubber, as the first layer exposing to the sound, plays a more effective role in increasing the adsorption coefficient of double-layer structures at low frequencies.

#### 5. ACKNOWLEDGMENT

The authors express their gratitude to the Department of Occupational Health at Tehran University of Medical Sciences.

## نقش توالی قرارگیری مواد جاذب طبیعی و مصنوعی در ساختارهای دو لایه مرکب در بهبود عملکرد آکوستیکی لیف طبیعی با استفاده از روش اجزاء محدود

سپیده کیوانی<sup>۱\*</sup>، محمدرضا منظم اسماعیل پور<sup>۱</sup>، فاطمه فصیح رامندی<sup>۱</sup>، اکبر احمدی آسور<sup>۱،۲</sup>،  
ملیحه کلاهدوزی<sup>۱\*</sup>، زهرا هاشمی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> گروه مهندسی بهداشت حرفه ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران  
<sup>۲</sup> گروه مهندسی بهداشت حرفه ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی سبزوار، خراسان رضوی، ایران  
<sup>۳</sup> گروه مهندسی بهداشت حرفه ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی بهبهان، خوزستان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۵/۱۱، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۳

### چکیده

**مقدمه:** در مطالعات متعددی عملکرد آکوستیکی مواد جاذب طبیعی مورد بررسی قرار گرفته است. برخی از این مواد در محدوده فرکانسی کمتر از ۱۰۰۰ هرتز عملکرد ضعیفی دارند. در مطالعه حاضر، سعی گردید تا نقش توالی قرارگیری ساختارهای دو لایه مرکب متشکل از الیاف طبیعی و مصنوعی در بهبود ضریب جذب صوتی لیف طبیعی در محدوده فرکانس پایین (۶۳ تا ۱۰۰۰ هرتز) به وسیله مدل سازی با روش عددی اجزاء محدود بررسی گردد.

**روش کار:** در این پژوهش، عملکرد آکوستیکی ساختارهای دو لایه متشکل از مواد جاذب طبیعی و مصنوعی با روش عددی اجزاء محدود و مدل Johnson-Champoux-Allard در نرم افزار COMSOL نسخه 5.3a بررسی گردید. مواد جاذب صوتی مورد مطالعه شامل لیف خرما، فوم پلی اورتان و لاستیک بود. همچنین، هر یک از ساختارهای دو لایه مرکب متشکل از ضخامت ۱۰ میلی متری لیف خرما به همراه ضخامت ۱۰ میلی متری از هر یک از مواد جاذب مصنوعی شامل لاستیک یا فوم پلی اورتان بود که با چینش متفاوت مواد جاذب در هر ساختار، در مجموع چهار نوع ساختار دو لایه مرکب بررسی گردید.

**یافته ها:** جایگاه قرارگیری لیف طبیعی می تواند نقش مهمی در عملکرد صوتی ساختارهای دو لایه مرکب مورد بررسی ایفا نماید. به طوریکه در مقایسه ساختارهای دو لایه مورد بررسی با یکدیگر مشخص شد که هنگامیکه در ساختارهای دو لایه مرکب با ضخامت ۲۰ میلی متر، لیف طبیعی به عنوان اولین لایه مواجهه یافته با صوت نرمال بود، روند عملکرد آکوستیکی تقریباً مشابه با ساختار تک لایه متشکل از ماده طبیعی با ضخامت ۲۰ میلی متر دیده شد؛ اما، زمانی که در ساختارهای مرکب، جاذب مصنوعی اولین لایه مواجهه یافته با صوت بود، روند عملکرد جذب صوتی بهبود پیدا کرد. **نتیجه گیری:** بر اساس نتایج بدست آمده، ساختار مرکب دارای لایه فوقانی با چگالی بیشتر و تخلخل کمتر، روند جذب صوتی بهتری نسبت به ساختار تک لایه شامل ماده جاذب طبیعی را نشان داد.

**کلمات کلیدی:** عملکرد آکوستیکی، لیف طبیعی، جاذب مصنوعی، روش اجزاء محدود

\* پست الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبه: [mkolahdouzi89@gmail.com](mailto:mkolahdouzi89@gmail.com)

دارای الیاف طبیعی نیز می‌تواند با همین منطق توضیح داده شود (۱۶). روش‌های عددی، یک جایگزین مناسب علمی جهت بررسی مسائل به جای روش‌های تجربی می‌باشند. برخی از روش‌های عددی مانند  $FEM^3$  و  $BEM^4$  توانایی مدل‌سازی فضاهای آکوستیکی با جزئیات بیش‌تر و نیز توانایی مدل‌سازی رفتارهای پیچیده مانند تداخل و انحراف را دارند و عملکرد آن‌ها در محدوده فرکانس‌های پایین عالی می‌باشد (۱۷). همچنین، در مطالعاتی تاثیر برخی متغیرهای ماده مورد مطالعه بر عملکرد صوتی آن با استفاده از این روش‌های عددی مدل‌سازی گردیده است (۱۸، ۱۹). بنابراین، مدل‌سازی پیش از انجام مطالعات آزمایشگاهی و میدانی، به منظور صرفه جویی در زمان و هزینه پیشنهاد می‌گردد. تاکنون مطالعات مختلفی بر روی مواد جاذب با هدف تعیین ضریب جذب صوتی و ویژگی‌های آکوستیکی آن‌ها چه به صورت تجربی و یا مدل‌سازی‌های نرم‌افزاری صورت گرفته است (۱۳، ۲۰-۲۳). به طوری که نتایج این مطالعات و مطالعات دیگر (۲۴، ۲۵) نشان داد که استفاده از الیاف گیاهی به همراه افزودن لایه هوا بین صفحات جاذب، استفاده ترکیبی از مواد جاذب با جنس‌های مختلف و افزایش ضخامت ماده جاذب می‌تواند در بهبود جذب آکوستیکی مواد و در نتیجه کاهش هر چه بیشتر انرژی صوتی در دامنه‌های فرکانسی مختلف موثر واقع شود. با توجه به اینکه دسترسی به الیاف گیاهی به‌ویژه الیاف خرما در کشور ایران به وفور امکان‌پذیر است، بطوری که بر اساس گزارشات حدود ۲۰ درصد از درختان خرما در سراسر جهان در کشور ایران - بدلیل موقعیت اقلیمی گرم و خشک - وجود دارد، و از آنجایی که بر اساس مطالعات، ضایعات تولیدی درخت خرما می‌توانند به‌جای سوزانده شدن به عنوان ماده جاذب صدا استفاده شوند (۲۶)، این مطلب می‌تواند نوید بخش تحولی عظیم در صنعت جاذب‌های صوتی کشور فراهم آورد. علی‌رغم این‌که برخی الیاف گیاهی نظیر الیاف درخت خرما ضریب جذب مطلوبی در فرکانس‌های میانی و بالا دارند، اما،

سرو صدا به عنوان یک عامل زیان‌آور فیزیکی اثرات منفی بر سلامت انسان دارد (۱، ۲). مواد جاذب صوتی به‌دلیل تبدیل انرژی صوت به گرما و در نتیجه جذب صوت، کاربردهای متعددی در زمینه کنترل صدا دارند. این مواد از نظر ماهیت الیاف به دو دسته الیاف طبیعی (گیاهی، حیوانی) و مصنوعی (الیاف پلیمری، غیر پلیمری) تقسیم می‌شوند. از ویژگی‌های الیاف مصنوعی، پایداری زیاد، عملکرد آکوستیکی خوب، مقاومت در برابر رشد قارچ و کپک (۳، ۴)، انعطاف‌پذیری، الاستیسیته و قابلیت جذب پایین آب می‌باشد؛ به طوری که، نسبت به آب، تنش، گرما و مواد شیمیایی مقاوم‌اند. به‌عنوان نمونه، در میان فوم‌های پلیمری، فوم‌های پلی‌اورتان<sup>۱</sup> به‌دلیل ویژگی‌هایی نظیر سبکی، ارزان بودن و قابلیت ساخت مناسب در مناطق صنعتی بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند (۵). همچنین، الیاف گیاهی مزایایی از جمله چگالی کم و هزینه پایین دارند. همچنین، این الیاف سازگار با محیط زیست‌اند و دسترسی به آن‌ها آسان است (۶). در تقسیم‌بندی دیگر، مواد جاذب صوتی از نظر ساختار ماکروسکوپی به سه دسته ساختار سلولی (۷-۹)، فیبری (۱۰-۱۲) و گرانولی (۱۳-۱۵) تقسیم می‌شوند. مواد جاذب دارای ساختار سلولی، مانند لاستیک<sup>۲</sup>، وزن سبکی دارند و بطور گسترده به‌عنوان جاذب صدا استفاده می‌گردند (۶). علاوه بر ویژگی‌ها و مزایایی که برای فوم پلی‌اورتان و لاستیک ذکر شد؛ یکی دیگر از ویژگی‌های مطلوب این مواد که در کاربرد این مواد به‌عنوان مواد جاذب صوتی تاثیرگذار است، مقاومت در برابر جریان هوا یا امپدانس آکوستیکی مطلوب این مواد می‌باشد. مواد جاذب صوتی می‌توانند به‌صورت مجزا یا در قالب ساختارهای چندلایه استفاده گردند. ساختارهای چند لایه این امکان را فراهم می‌سازند تا ضریب جذب صوتی یک ماده جاذب با کاهش ضخامت و چگالی کامپوزیت، بدون کاهش جذب صدا بهبود یابد. از طرف دیگر، جهت‌گیری پانل‌های جذب صدا در یک سیستم چند لایه، نقش مهمی در عملکرد آکوستیکی مواد دارد. ضرایب جذب صوتی بالاتر برای کامپوزیت‌های

3 Finite Element Method

4 Boundary Element Method

حجمی بر حسب  $N/m^2$  است که معمولاً بصورت  $\beta$  نشان داده می‌شود.

همچنین، در این نرم افزار برای اندازه‌گیری ویژگی‌های جذب مواد جاذب بویژه امپدانس سطحی ویژه و ضریب جذب مدل‌های آکوستیکی متفاوتی نظیر Johnson-Champoux-Allard، Lafarge-Johnson-Pride-Lafarge-Johnson-، Champoux-Allard Delany-، Zwicker-Kosten، Champoux-Allard Bazley-Miki و غیره وجود دارد. هر یک از این مدل‌ها برای محاسبه ویژگی‌های آکوستیکی به پارامترهایی نظیر مقاومت در برابر جریان هوا<sup>۵</sup> ( $\sigma$ )، تخلخل<sup>۶</sup> ( $\phi$ )، ضریب انحنای<sup>۷</sup> ( $\alpha_n$ )، طول مشخصه ویسکوز<sup>۸</sup> ( $\Lambda$ ) و یا طول مشخصه حرارتی<sup>۹</sup> ( $\Lambda'$ ) نیاز دارند که هر یک از این پارامترها به تفصیل در مطالعاتی توصیف شده‌اند (۲۹). در نهایت، ضریب جذب صوت برخورد نرمال از طریق معادله ۲ محاسبه می‌گردد که در آن  $Z_s$  و  $C_0$  به ترتیب نشان‌دهنده امپدانس سطحی و سرعت صوت در هوا می‌باشد (۲۹).

$$\alpha_n = \frac{4Re\left\{\frac{Z_s}{\rho_0 C_0}\right\}}{\left|\frac{Z_s}{\rho_0 C_0}\right|^2 + 2Re\left\{\frac{Z_s}{\rho_0 C_0}\right\} + 1} \quad (2)$$

شرایط مدل‌سازی و صحت‌سنجی آن

در مطالعه حاضر از مدل Johnson-Champoux-Allard (JCA)، که مدل دقیقی در پیش بینی عملکرد آکوستیکی ماده متخلخل صلب می‌باشد و به تمامی پارامترهای مطرح شده در بخش مباحث نظری برای اندازه‌گیری عملکرد جذب صدا در مواد متخلخل نیاز دارد، استفاده شد (۳۰، ۳۱). مواد جاذب صوتی مورد مطالعه در این پژوهش شامل لیف خرما، فوم پلی‌اورتان و لاستیک بود. نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی بر روی لیف نخل خرما نشان داد که بهترین عملکرد صوتی این ماده

5 Air flow resistivity

6 Porosity

7 Tortuosity

8 Viscous characteristic length

9 Thermal characteristic length

متأسفانه در فرکانس‌های پایین عملکرد صوتی مطلوبی ندارند که در این مورد، روش‌هایی نظیر افزایش ضخامت لیف و یا کاهش تخلخل آن برای بهبود ضریب جذب در فرکانس‌های پایین پیشنهاد گردیده است (۲۷، ۲۸). در مطالعه حاضر، نقش توالی قرارگیری ساختارهای دو لایه متشکل از لیاف طبیعی و مصنوعی در بهبود ضریب جذب صوتی لیف درخت خرما در فرکانس پایین (۶۳ تا ۱۰۰۰ هرتز) بوسیله مدل‌سازی با روش عددی اجزاء محدود (FEM) تعیین گردید.

### روش کار

در بررسی عملکرد جذب آکوستیکی مواد جاذب متخلخل علاوه بر روش تجربی، روش‌های مدل‌سازی شامل روش‌های ریاضی، تحلیلی و عددی وجود دارد که در این مطالعه از روش عددی اجزاء محدود به کمک نرم افزار COMSOL Multiphysics نسخه 5.3a استفاده گردید. مراحل انجام پژوهش در قالب سه بخش، که در بخش نخست مباحث نظری حاکم بر عملکرد جذب آکوستیکی، در بخش دوم شرایط مدل‌سازی و صحت‌سنجی آن و در بخش سوم توالی قرارگیری لیاف طبیعی و مصنوعی مورد مطالعه در ساختار دو لایه، ارائه گردیده است.

مباحث نظری حاکم بر عملکرد جذب آکوستیکی

در نرم افزار COMSOL Multiphysics، موج صوتی در یک گستره خاص، با استفاده از فشار آکوستیکی در همان گستره مدل‌سازی می‌شود و با حل معادله هلمهولتز (معادله ۱)، معادله موج و در نتیجه پیشروی موج و رفتار آکوستیکی ساختار جاذب تعیین می‌گردد.

$$Q_s = \nabla \cdot \left( \frac{-\Delta P - q}{\rho_0} \right) - \frac{\omega^2}{\rho_0 C_s^2} \quad (1)$$

که  $P$  فشار صوتی ( $N/m^2$ )،  $\rho_0$  چگالی سیال ( $kg/m^3$ )،

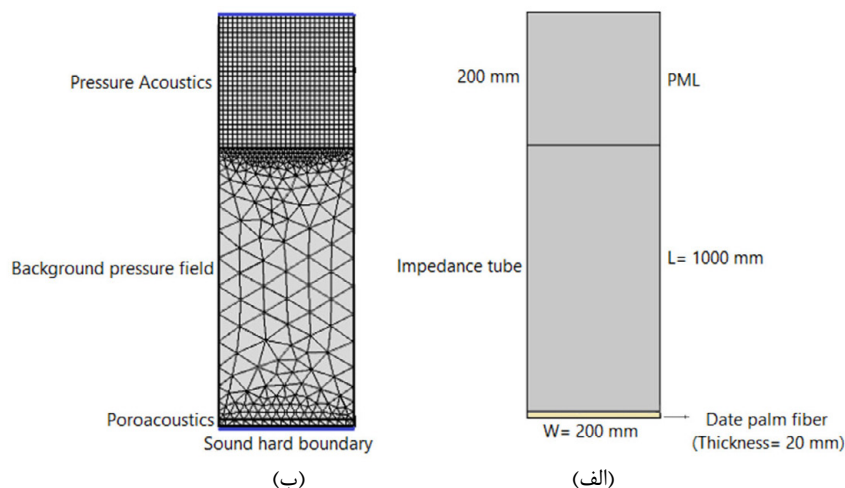
$Q$  منبع دوقطبی اختیاری ( $N/m^3$ )،  $q$  منبع تک قطبی

اختیاری ( $1/s^2$ )،  $\omega$  فرکانس زاویه‌ای ( $\omega = 2\pi f$ )،  $C_s$  سرعت

صوت ( $m/s$ ) می‌باشد. همچنین، ترکیب  $\rho_0 C_s^2$  مدول

جدول ۱. خصوصیات و پارامترهای فیزیکی استخراج شده مواد جاذب بر اساس مدل Johnson-Champoux-Allard

منبع	طول های مشخصه		ضریب انحنا	تخلخل (%)	مقاومت در برابر جریان هوا (Ns/m <sup>4</sup> )	چگالی (Kg/m <sup>3</sup> )	ماده جاذب
	حرارتی (μm)	ویسکوز (μm)					
(28)	۴۱۴	۱۸۹	۲/۸	۰/۸۹۷۶	۱۷۸۵	۱۰۰	لیف خرما
(33)	۲۳	۲۳	۲/۶۴	۰/۸۳	۱۲۳۵۰۱	۶۴	لاستیک
(33)	۳۳	۲۱	۱/۴۱	۰/۹۸	۱۲۹۰۱	۲۵	فوم پلی اورتان



شکل ۱. هندسه مدل سازی در نرم افزار COMSOL Multiphysics 5.3a (الف)، شرایط مرزی و مش بندی شکل بر اساس روش FEM (ب)

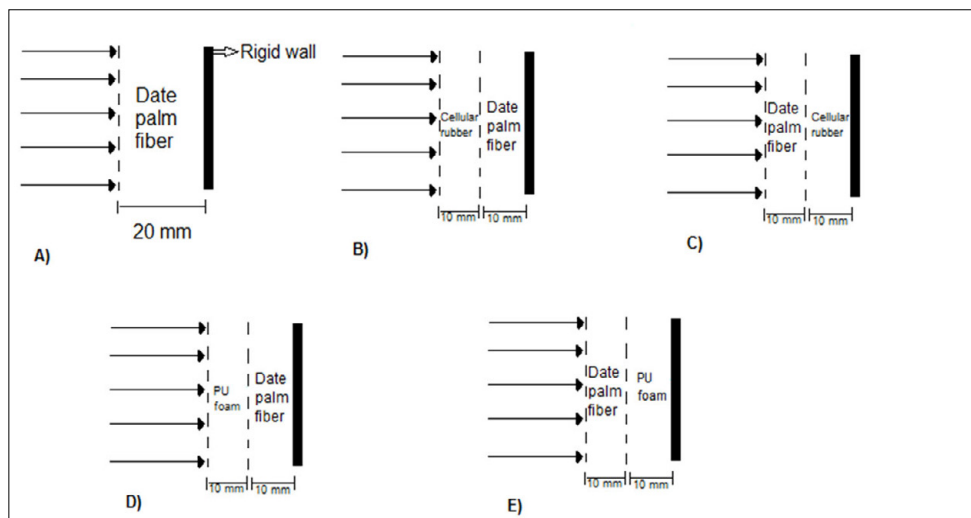
کانال مستطیلی شکل، نشاندهنده لوله امپدانس می باشد (۳۴) که برای تعیین ضریب جذب نرمال (زاویه برخورد موج صوتی برابر با صفر) به روش عددی، مورد نیاز است. بنابراین، هندسه لوله امپدانس به صورت یک مستطیل دو بعدی با طول ۱۰۰۰ میلی متر و عرض ۲۰۰ میلی متر رسم شد (شکل الف-۱). از طرفی نیز، خروجی های بدست آمده از محاسبات ساختار با روش FEM به اندازه مش و اندازه المان های مورد استفاده بستگی دارد. از این رو، بیشینه اندازه اجزا،  $\frac{1}{6}$  حداقل طول موج در نظر گرفته شد؛ که این میزان با توجه به پژوهشی، بهترین اندازه ممکن برای اجزا عنوان شده است (۳۵). در این مطالعه از اجزاء مثلی، برای مش بندی هندسه کلی ساختار جاذب و مستطیل شبیه سازی شده استفاده گردید و دامنه فرکانس مورد مطالعه، یک اکتاو باندی از ۶۳ تا ۱۰۰۰ هرتز بود. همچنین، در این مطالعه، برای مدل سازی ساختار تناوبی موج صوتی در قسمت های مختلف محیط شبیه سازی

در فرکانس های میانی و بالا می باشد (۲۸). بنابراین، در این پژوهش سعی گردید تا ضعف عملکرد جذب صوتی لیف خرما در فرکانس های ۶۳ تا ۱۰۰۰ هرتز به وسیله ساختار دو لایه از طریق کاهش ضخامت لیف خرما و اضافه کردن لایه ای از الیاف مصنوعی با ضخامت مشابه، مورد مطالعه قرار گیرد. چرا که مطالعات نشان داده است که جاذب صوتی دارای ساختار چند لایه نسبت به تک لایه با ضخامت معادل یکسان، ضریب جذب بالاتری را ارائه می دهد (۱۶، ۳۲). برای این منظور ساختار دو لایه مرکب متشکل از ضخامت ۱۰ میلی متری لیف خرما به همراه ضخامت ۱۰ میلی متری از هر یک از مواد جاذب شامل لاستیک یا فوم پلی اورتان می باشد که خصوصیات و پارامترهای فیزیکی آن ها به اقتباس از پژوهش های آزمایشگاهی پیشین (۲۸، ۳۳) در جدول ۱ ارائه شده است. به منظور شبیه سازی لوله امپدانس در محیط نرم افزار COMSOL، بر اساس استاندارد ISO-10534-2 یک



جدول ۲. توالی قرارگیری لایه‌ها در ساختارهای مورد بررسی

ساختار	توصیف
A	لیف خرما به ضخامت ۲۰ میلی‌متر و چگالی $100 \text{ Kg/m}^3$ و سایر خصوصیات ذکر شده در جدول ۱
B	لیف خرما به ضخامت ۱۰ میلی‌متر (لایه زیرین) و لاستیک به ضخامت ۱۰ میلی‌متر و چگالی $64 \text{ Kg/m}^3$ و سایر خصوصیات موجود در جدول ۱ (لایه بالایی)
C	لیف خرما به ضخامت ۱۰ میلی‌متر (لایه بالایی) و لاستیک به ضخامت ۱۰ میلی‌متر (لایه زیرین)
D	لیف خرما به ضخامت ۱۰ میلی‌متر (لایه زیرین) و فوم پلی‌اورتان به ضخامت ۱۰ میلی‌متر و چگالی $25 \text{ Kg/m}^3$ و سایر خصوصیات موجود در جدول ۱ (لایه بالایی)
E	لیف خرما به ضخامت ۱۰ میلی‌متر (لایه بالایی) و فوم پلی‌اورتان به ضخامت ۱۰ میلی‌متر (لایه زیرین)



شکل ۲. ساختارهای بررسی شده

از مطالعه‌ای در مورد عملکرد جذب لیف خرما با ضخامت ۲۰ میلی‌متر و سایر خصوصیات ذکر شده در جدول ۱ که با استفاده از روش آزمایشگاهی انجام شده بود (۲۸) با نتایج حاصل از روش عددی FEM مقایسه گردید تا صحت‌سنجی روش عددی مورد استفاده بررسی شود.

توالی قرارگیری جاذب‌های صوتی مورد مطالعه در ساختار دو لایه

با توجه به این‌که هدف از مطالعه حاضر بررسی تاثیر توالی قرارگیری مواد جاذب در ساختار دو لایه شامل لیف خرما و ماده جاذب مصنوعی در عملکرد آکوستیکی

دو شرایط مرزی شامل Sound Hard Boundary برای دیواره‌ها و پشت ماده جاذب متخلخل و Periodic Condition و سه ناحیه<sup>۱۰</sup> شامل Pressure Acoustics، Background Pressure Field و Poroacoustics در نظر گرفته شد (شکل ب- ۲).

بمنظور اطمینان از صحت نتایج حاصل از مدل‌سازی به روش عددی FEM، لازم است که نتایج حاصل از مدل‌سازی با نتایج آزمایشگاهی یا تحلیلی معتبر و یا نتایج یک مطالعه معتبر مقایسه گردد تا بدین ترتیب اعتبار نتایج بدست آمده از مدل‌سازی سنجیده شود (۳۶). بر این اساس، نتایج حاصل

10 Domain

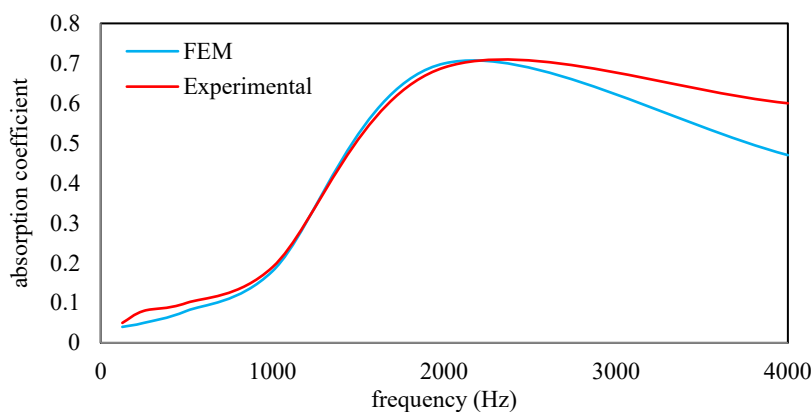
۶۳ تا ۱۰۰۰ هرتز می‌باشد؛ بنابراین، بر اساس نتایج روش FEM صحت خوبی برای مدل‌سازی عملکرد جذب ماده جاذب در فرکانس‌های پایین دارد.

شکل شماره ۴ نتایج مربوط به ضریب جذب ساختارهای مورد بررسی در دامنه فرکانسی ۶۳ تا ۱۰۰۰ هرتز را نشان می‌دهد. در این شکل ساختار A به ترتیب با ساختارهای B، C، D و E مقایسه شده است. همان‌طور که در شکل ۴، در نمودار ساختار A مشاهده می‌شود، خاصیت جذب صوتی لیف خرما به ضخامت ۲۰ میلی‌متر و چگالی  $100 \text{ Kg/m}^3$  و تخلخل ۰/۸۹۷۶ درصد، با افزایش فرکانس به‌طور قابل توجهی افزایش داشته است و ضریب جذب تا میزان ۰/۱۶ متغیر بوده است. به نحوی که در فرکانس ۲۰۰ هرتز، ضریب جذب ۰/۰۴ بوده است و به مرور به دنبال افزایش فرکانس، در فرکانس ۸۰۰ هرتز، میزان ضریب جذب به ۰/۱۳ رسیده است و در حدود ۰/۰۹ افزایش ضریب جذب داشته است. به عبارت دیگر، با افزایش فرکانس، میزان افزایش ضریب جذب بصورت نسبتاً یکنواختی افزایش یافته است. طبق نمودار ساختار B (ساختار دو لایه‌ای شامل لیف خرما به ضخامت ۱۰ میلی‌متر (لایه زیرین) و لاستیک به ضخامت ۱۰ میلی‌متر و چگالی  $64 \text{ Kg/m}^3$  (لایه بالایی)) مشخص شد که خاصیت جذب صوتی لیف خرما و لاستیک به صورت توأم با افزایش فرکانس تا ۰/۶ افزایش یافته است. در ساختار C که در آن لیف خرما به ضخامت ۱۰ میلی‌متر به عنوان لایه بالایی و لاستیک به

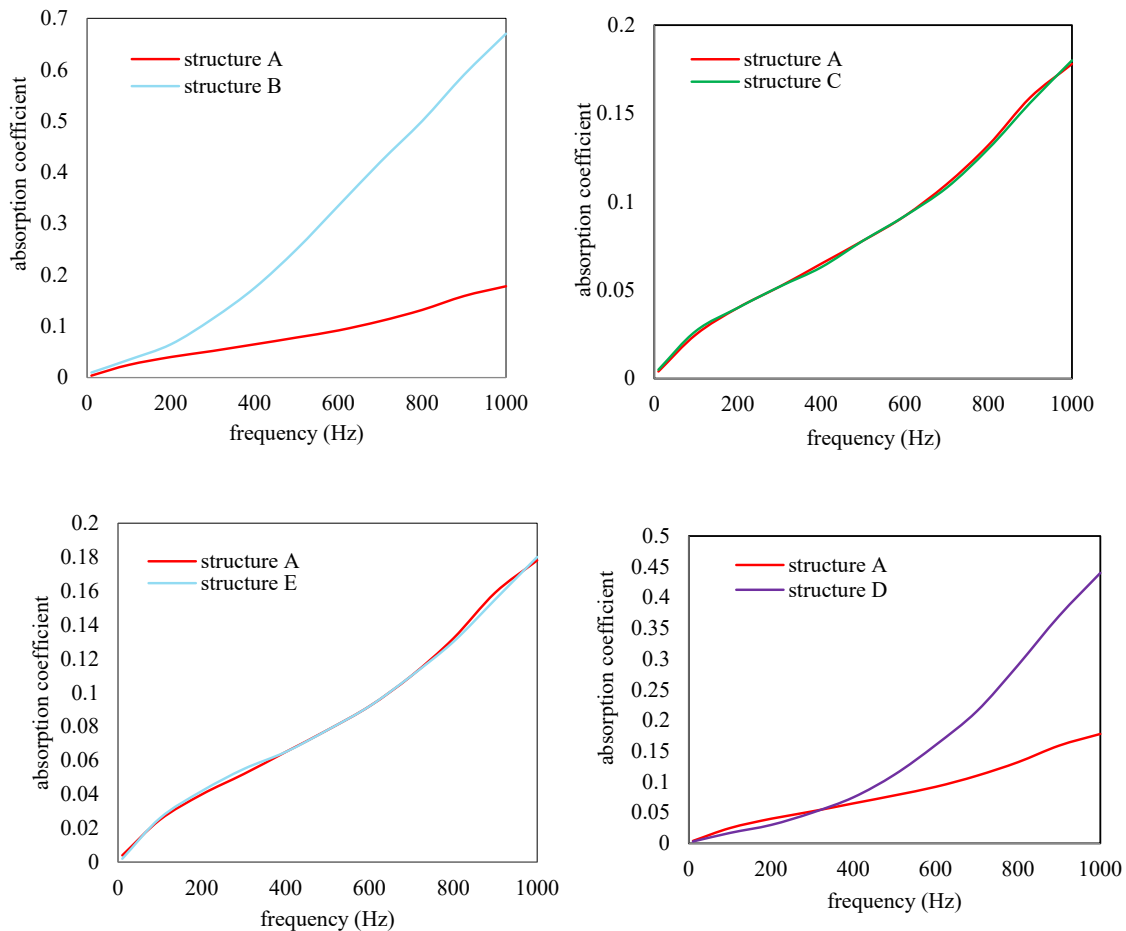
لیف خرما در فرکانس‌های پایین با روش مدل‌سازی بود؛ بنابراین، در این قسمت به توصیف ساختارهای مورد بررسی پرداخته شده است. ساختار A، از لیف خرما به ضخامت ۲۰ میلی‌متر تشکیل شده است. ساختارهای بعدی، بوسیله کاهش ضخامت لیف خرما به ۱۰ میلی‌متر و اضافه کردن جاذب مصنوعی به ضخامت ۱۰ میلی‌متر (لاستیک یا فوم پلی‌اورتان) تشکیل شدند. در تمامی ساختارهای B تا E، ضخامت کلی مواد جاذب دو لایه ای در حد ۲۰ میلی‌متر ثابت نگه داشته شدند. توالی قرارگیری لایه‌ها در ساختارهای مورد بررسی به همراه اشکال آن‌ها به ترتیب در جدول ۲ و شکل ۲ نشان داده شده است.

### یافته‌ها

نتایج مربوط به اعتباربخشی مدل نرم افزاری به روش عددی FEM با نتایج آزمایشگاهی برای لیف خرما با ضخامت ۲۰ میلی‌متر در شکل شماره ۳ ارائه گردیده است. همان‌طور که در شکل ۳ ملاحظه می‌گردد، نتایج حاصل از دو روش در دامنه فرکانسی ۶۳ تا ۲۵۰۰ هرتز اکتاو باند به یکدیگر تشابه زیادی دارند؛ به طوری که در محدوده ۱۵۰۰ تا ۲۴۰۰ هرتز همسانی این نتایج بیشتر می‌باشد. همچنین، از فرکانس ۲۵۰۰ تا ۴۰۰۰ هرتز به تدریج نتایج دو روش از یکدیگر فاصله گرفته و بر اختلاف آن‌ها افزوده شده است. با این وجود، با توجه به این‌که در این مطالعه، هدف، بررسی عملکرد جذب لیف خرما در فرکانس‌های



شکل ۳. مقایسه بین نتایج عملکرد جذب صوتی روش‌های آزمایشگاهی و FEM



شکل ۴. نمودارهای عملکرد صوتی ساختارهای بررسی شده

ساختار E که در واقع چیدمان لایه‌های آن عکس ساختار D می‌باشد، یعنی لیف خرما به ضخامت ۱۰ میلی‌متر (لایه بالایی) و فوم پلی‌اورتان به ضخامت ۱۰ میلی‌متر (لایه زیرین)، میزان کمتری در افزایش ضریب جذب نسبت به ساختار D مشاهده می‌شود و بیشترین میزان ضریب جذب این ساختار ۰/۱۸ بوده است. بنابراین، در مقایسه ضریب جذب ساختارهای دو لایه مختلف، همانطور که در نمودارها ملاحظه می‌گردد، در تمامی موارد با افزایش فرکانس، ضریب جذب صوتی روند صعودی داشته است. نمودارهای ساختارهای C و E تقریباً مشابه و منطبق بر ساختار A می‌باشند. ساختار B بالاترین ضریب جذب را در فرکانس‌های مورد بررسی نشان داده است و ساختار D به‌عنوان دومین ساختار با ضرایب جذب نسبتاً قابل قبول،

ضخامت ۱۰ میلی‌متر به‌عنوان لایه زیرین در نظر گرفته شده است، میزان جذب در فرکانس ۸۰۰ هرتز به ۰/۱۴، اما در حالت معکوس چیدمان قرارگیری لایه‌ها، یعنی در ساختار B، میزان جذب در فرکانس ۸۰۰ هرتز به میزان ۰/۵ رسیده است. ساختار D، که در آن فوم پلی‌اورتان جایگزین لاستیک در ساختار دو لایه شده است، شامل لیف خرما به ضخامت ۱۰ میلی‌متر (لایه زیرین) و فوم پلی‌اورتان به ضخامت ۱۰ میلی‌متر و چگالی  $25 \text{ Kg/m}^3$  (لایه بالایی) می‌باشد. با توجه به نمودار ساختار D مشاهده می‌شود که میزان ضریب جذب با شیب نسبتاً کمتری نسبت به ساختار B افزایش داشته است؛ به نحوی که، میزان ضریب جذب در فرکانس ۸۰۰ و ۴۰۰ هرتز به ترتیب به ۰/۳ و کمتر از ۰/۱ کاهش یافته است. در

از فرکانس ۵۰۰ هرتز به بالا افزایش چشمگیری در ضریب جذب نسبت به ساختار A ارائه داده است.

### بحث

در مطالعه حاضر، میزان عملکرد آکوستیکی ساختارهای دو لایه متشکل از مواد جاذب طبیعی و مصنوعی با روش عددی FEM در نرم افزار COMSOL شبیه سازی شد. در خصوص صحت سنجی روش عددی مورد استفاده برای صدای در محدوده فرکانسی پایین، نتایج این مطالعه نشان داد که در مورد مقایسه نتایج حاصل از روش آزمایشگاهی با نتایج حاصل از روش FEM، این روش صحت خوبی برای مدل سازی عملکرد جذب صوتی ماده جاذب دارد. این نتیجه با مطالعات دیگر همسو می باشد (۳۶-۳۸). در میان مدل های آکوستیکی موجود در پیش بینی عملکرد صوتی ماده متخلخل، مدل JCA تمام پنج پارامتر فیزیکی ماکروسکوپیک ماده شامل ضخامت، چگالی جرمی، مقاومت در برابر جریان هوا، ضریب انحناء، و طول های مشخصه ویسکوز و حرارتی را در بردارد، بنابراین، می تواند خصوصیات آکوستیکی ماده جاذب را بهتر پیش بینی کند.

همچنین، این مدل یکی از مدل هایی است که به خاطر راحتی در محاسبات و صحت مناسب در پیش بینی مواد جاذب متخلخل به طور معمول در پیش بینی عملکرد صوتی این مواد به کار می رود (۳۹).

در این مطالعه، حداکثر میزان جذب صدا در ساختار B به بیش از ۳/۵ برابر نسبت به ساختار A افزایش پیدا کرد. در ساختار C، حداکثر میزان جذب صدا، به میزان ۰/۱۸ مشخص شد که روند منحنی جذب صوتی این ساختار در مقایسه با ساختار A افزایش جزئی داشت و در مقایسه با ساختار B کمتر بود. از این مطلب چنین می توان نتیجه گرفت که هنگامی که لاستیک اولین لایه مواجهه یافته با صدای دارای فرکانس پایین در ساختار دو لایه باشد (ساختار B)، در مقایسه با زمانی که لیف خرما اولین لایه در برخورد این میزان صدا باشد (ساختار C) میزان بیشتری از صدا جذب می شود. همچنین، با مقایسه

عملکرد جذب صوتی ساختارهای E و B در می یابیم که هنگامی که فوم پلی اورتان به عنوان اولین لایه مواجهه با امواج صوتی با فرکانس پایین بود (ساختار B)، میزان جذب صوتی ساختار دو لایه دارای لیف خرما بهتر شده است. این نتایج می تواند به دلیل ویژگی های آکوستیکی و ساختاری بهتر لاستیک نسبت به لیف خرما باشد. یکی از ویژگی های آکوستیکی موثر در بهبود عملکرد آکوستیکی ساختار B نسبت به ساختار C، مقاومت در برابر جریان هوا حاصل شده باشد. مقاومت در برابر جریان هوا یک عامل مهم در میزان جذب صوتی ماده متخلخل می باشد. به طوری که، مقاومت جریان هوا مستقیماً با توانایی ماده در جذب انرژی صوتی مرتبط است. بر این اساس، هنگامی که مقاومت جریان هوا افزایش یابد، در یک ضخامت مشخص و در فرکانس های پایین صوت، ضریب جذب و اتلاف صوت نیز افزایش می یابد (۴۰). در مطالعه حاضر، عملکرد جذب صوتی ساختار فیبر خرما و لاستیک بهتر از ساختار فیبر خرما و فوم پلی اورتان بود. یکی از دلایل این نتیجه مقاومت در برابر جریان هوای بیشتر لاستیک نسبت به فوم پلی اورتان است (جدول ۱).

عامل دیگری که در میزان ضریب جذب صوتی موثر می باشد، تخلخل است. در این مطالعه، هنگامی که در ساختار دو لایه، لایه با میزان تخلخل کمتر به عنوان لایه اول در معرض مواجهه با صوت دارای فرکانس پایین قرار داشت عملکرد جذب صوتی ساختار دو لایه بهتر شد. بنابراین، می توان چنین نتیجه گرفت که کاهش میزان تخلخل سبب افزایش ضریب جذب صوتی ساختار دو لایه مرکب شده است. این نتیجه در مطالعه فولادی و همکاران که در مورد عملکرد آکوستیکی لیاف طبیعی نظیر لیف نارگیل، ذرت، نیشکر و ماری جوانا انجام شده بود گزارش گردید (۲۷).

چگالی ماده متخلخل به صورت جرم واحد حجم بیان می گردد. در مطالعاتی در مورد عملکرد آکوستیکی لیاف طبیعی، گزارش شد که افزایش چگالی این مواد سبب افزایش ضریب جذب صوتی در محدوده فرکانسی بالایی و میانی گردید (۴۱، ۴۲). همچنین، در مطالعه

یافته با صوت نرمال بود (ساختارهای C و E)، روند عملکرد آکوستیکی در فرکانس‌های پایین روند تقریباً مشابهی با ساختار تک لایه فیبر خرما (ساختار A) داشت؛ اما زمانی که جاذب مصنوعی (لاستیک یا فوم) اولین لایه مواجهه یافته با صوت در ساختارهای دو لایه بود، عملکرد آکوستیکی بهبود پیدا کرد. این مطلب نشان می‌دهد که جایگاه قرارگیری جاذب طبیعی (لیف خرما) می‌تواند نقش مهمی در عملکرد صوتی ساختارهای دو لایه ایفا نماید.

علی‌رغم این که افزایش ضخامت لیف خرما می‌تواند جذب آکوستیکی و حداکثر میزان جذب در دامنه‌های فرکانسی پایین بهبود بخشد که در مطالعه ای این مسئله نیز بررسی شده است (۲۸)، اما در این مطالعه سعی گردید تا با کاهش ضخامت لیف خرما (از ۲۰ میلی‌متر به ۱۰ میلی‌متر) و استفاده از ساختارهای دو لایه مرکب دارای لیف خرما به‌عنوان ماده طبیعی و جاذب مصنوعی دیگر با ضخامت مشابه، تاثیر توالی قرارگیری لایه‌ها در ساختار دو لایه بررسی شود و همچنین ضعف کاهش میزان جذب صوتی لیف خرما در فرکانس‌های پایین پوشش یابد. همچنین، در این مطالعه مشخص شد که ساختار B، ساختار مناسب‌تری به‌نظر می‌رسد که در آن لایه با مقاومت جریان هوای بالاتر، و نیز چگالی و تخلخل کمتر به‌عنوان اولین لایه در معرض مواجهه با صدای کم فرکانس قرار داشت. به این ترتیب، جذب صدا در محدوده فرکانسی پایین بدون افزایش ضخامت ساختار دو لایه در مقایسه با ساختار تک لایه A، افزایش یافت و همچنین پایداری و مقاومت لیف خرما نسبت به گرما، مواد شیمیایی و تنش‌های وارده به‌دلیل استفاده از جاذب مصنوعی به‌عنوان لایه بالایی در ساختار بهتر شد.

### نتیجه گیری

استفاده از روش‌های مدل‌سازی قابلیت پیش بینی میزان جذب مواد جاذب را با هزینه اجرای کمتر و سرعت بیشتر قبل از ساخت میسر می‌سازند. در مطالعه حاضر، از روش مدلسازی عددی FEM که صحت خوبی برای مدل‌سازی عملکرد جذب صوتی ماده جاذب داشت

دیگری افزایش چگالی به افزایش ضریب جذب صوتی فوم پلی‌اورتان در محدوده‌های فرکانسی بالاتر منجر گردید (۴۳). همچنین، در مطالعه اخیر، هنگامی که در ساختار دو لایه دارای لیف طبیعی، فوم پلی‌اورتان - دارای چگالی بیشتری نسبت به لاستیک - در معرض مواجهه با موج صوتی برخوردی قرار داشت، منجر به عملکرد صوتی بهتر ساختار گردید. این نتیجه نیز در مطالعه گومز و همکارانش در مورد یک سیستم چند لایه متشکل از دو فوم پلی‌اورتان با چگالی‌های متفاوت دیده شد. به‌طوری‌که آن‌ها دریافتند که هنگامی که فوم با چگالی کمتر در جلوی فوم با چگالی بیشتر قرار گرفت، سیستم چند لایه در جهت عکس این چیدمان بهتر عمل کرده بود (۳۲).

طول‌های مشخصه ویسکوز و حرارتی به‌ترتیب اثرات ویسکوزیته و گرمایی در فرکانس‌های بالا را توصیف می‌کنند (۴۴). از آنجایی که در مطالعه حاضر عملکرد آکوستیکی مواد جاذب تحت صوت دارای محدوده فرکانسی پایین بررسی شدند؛ بنابراین، اثرات این پارامترها بر ضریب جذب ساختارها در نظر گرفته نشدند.

از آنجایی که در نظر گرفتن فاصله هوایی در پشت لایه (ساختار) جاذب به میزان حداکثر ۵۰ میلی‌متر، منجر به افزایش عملکرد جذب صوتی در فرکانس‌های پایین می‌شود؛ بنابراین، این فاصله در هنگام نصب جاذب بر روی دیوار یا سقف، حائز اهمیت می‌باشد. در مطالعه حاضر، در نظر گرفتن فاصله هوایی در پشت ساختارهای مورد بررسی، سبب افزایش حداکثر ضریب جذب صوتی و نیز برطرف کردن مشکل افت نسبی عملکرد جذب در فرکانس‌های پایین گردید. این مطلب نشان می‌دهد که فاصله هوایی در بهبود روند عملکرد جذب ساختارها در فرکانس‌های پایین موثر واقع شده است. این مطلب با مطالعات دیگر نیز همخوانی دارد (۴۵-۴۸).

در مجموع، با توجه به نتایج این مطالعه در مورد ساختارهای دو لایه مرکب مشخص شد که علاوه بر نوع ماده جاذب در برخورد اولیه با صدا، چیدمان لایه‌های جاذب در عملکرد صوتی ساختارهای جاذب موثرند. بطوریکه، زمانی که لیف خرما به‌عنوان اولین لایه مواجهه

- لاستیک به‌عنوان اولین لایه در معرض صدای وارده - نسبت به ساختارهای دیگر با چینش های متفاوت در افزایش میزان ضریب جذب ساختارهای دو لایه در فرکانس‌های پایین نقش موثرتری را ایفا کرد.

### تشکر و قدردانی

نویسندگان از همکاری اساتید بهداشت حرفه‌ای دانشگاه علوم پزشکی تهران به جهت راهنمایی، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

### REFERENCES

1. Abbasi M, Monazzam Esmailpour MR, Akbarzadeh A, Zakerian SA, Ebrahimi MH. Investigation of the effects of wind turbine noise annoyance on the sleep disturbance among workers of Manjil wind farm. *Health and safety at work*. 2015;5(3):51-62.
2. Basner M, Babisch W, Davis A, Brink M, Clark C, Janssen Sea. Auditory and non-auditory effects of noise on health. *The lancet*. 2014;383(9925):1325-32.
3. D'Alessandro F, Baldinelli G, Bianchi F, Sambuco S, Rufini A. Experimental assessment of the water content influence on thermo-acoustic performance of building insulation materials. *Constr Build Mater*. 2018;158:264-74.
4. Putra A, Or KH, Selamat MZ, Nor MJM, Hassan MH, Prasetyo I. Sound absorption of extracted pineapple-leaf fibres. *Appl Acoust*. 2018;136:9-15.
5. Hyuk-Park J, Hyun-Yang S, Rae-Lee H, Bin-Yu C, Yeol-Pak S, Sung-Oh C, et al. Optimization of low frequency sound absorption by cellsize control and multiscale poroacoustics modeling. *J Sound Vib*. 2017;397:17-30.
6. Kalauni K, Pawar SJ. A review on the taxonomy, factors associated with sound absorption and theoretical modeling of porous sound absorbing materials. *J Porous Mater*. 2019;26:1795-819.
7. Egorova VE, Habibova RR, Shafigullin LN. Study of soundabsorbing properties of glass-fibre reinforced

استفاده گردید. همچنین، در این روش، مدل آکوستیکی JCA به‌دلیل در نظر گرفتن پارامترهای مختلف در پیش‌بینی میزان جذب صوتی مد نظر قرار گرفت. در مقایسه ساختارهای جاذب مورد بررسی مشاهده شد که با استفاده از ساختارهای جاذب صوت چند لایه می‌توان به عملکرد بهتری نسبت به مواد تک لایه دست یافت. همچنین، ترتیب چینش لایه‌های جاذب به دلیل ویژگی‌های آکوستیکی لایه‌ها در افزایش ضریب جذب ساختار دو لایه موثر واقع شد. براساس یافته‌های این مطالعه، استفاده از ساختار دو لایه لیف خرما و لاستیک

- materials used in engineering. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*. 2017; 240:1-4.
8. Liu PS, Qing HB, Hou HL. Primary investigation on sound absorption performance of highly porous titanium foams. *Mater Des*. 2015;85:275-81.
9. Tiuc AE, Vermeşan H, Gabor T, Vasile O. Improved sound absorption properties of polyurethane foam mixed with textile waste. *Energy Proc*. 2016;88:559-65.
10. Chen W, Liu S, Tong L, Li S. Design of multi-layered porous fibrous metals for optimal sound absorption in the low frequency range. *Theor Appl Mech Lett*. 2016;6:42-8.
11. Lippitz N, Rosler J, Hinze B. Potential of metal fibre felts as passive absorbers in absorption silencers. *Metals*. 2013;5:150-8.
12. . Peng L, Song B, Wang J, Wang D. Mechanic and acoustic properties of the sound-absorbing material made from natural fiber and polyester. *Adv Mater Sci Eng*. 2015:1-5.
13. Mamtaz H, Fouladi MH, Al-Atabi M, Namasivayam SN. Acoustic absorption of natural fiber composites. *J Eng*. 2016;1:1-10.
14. Seddeq HS, Aly N, Marwa MA, Elshakankery MH. Investigation on sound absorption properties for recycled fibrous materials. *J Ind Text*. 2012;43:56-73.
15. Sun P, Guo Z. Sintering preparation of porous sound-absorbing materials from steel slag. *Trans*

- Nonferrous Met Soc China. 2015;25:2230-40.
16. Dunne R, Desai D, Sadiku R. A Review of the Factors that Influence Sound Absorption and the Available Empirical Models for Fibrous Materials. *Acoust Aust*. 2017;45:453-69.
  17. Smith IM, Griffiths DV, Margetts L. *Programming the finite element method*: 5th Ed. John Wiley; 2013.
  18. Monazzam MR, Hashemi Z. Investigating the effect of shape on acoustic performance of micro perforated absorber at low frequencies. *Int J of Occup Hygiene*. 2019;11(3):164-78.
  19. Monazzam MR, Lam YW. The role of top surface to performance of reactive t-shape noise barriers. *Iranian Occup Health Association*. 2009;1(1):34-40.
  20. Forouharmajd F, Mohammadi Z. The Feasibility of Using Impedance Tube with Two Microphones and Sound Absorption Coefficient Measurement of Iranian-Made Materials Using Transfer Function Method. *J Health Res*. 2016;12(1):119-24 [*Persian*].
  21. Jayakumari VG, Shamsudeen RK, Rajeswari R, Mukundan T. Viscoelastic and acoustic characterization of polyurethane-based acoustic absorber panels for underwater applications. *J Appl Polym Sci*. 2018.
  22. Seddeq HS. Factors Influencing Acoustic Performance of Sound Absorptive Materials. *Aust J Basic & Appl Sci*. 2009;3:4619-7.
  23. Hajizadeh R, Khavanin A, Jonidi Jafari A, Barmar M, Farhang Dehghan S. Investigation of acoustic properties of polymer nanocomposites polymer regarding combined sound absorption and insulation characteristics. *Health and safety at Work*. 2019;9(4):324-8.
  24. Yamashita T, Suzuki K, Adachi H, Nishino S, Tomota Y. Effect of microscopic internal structure on sound absorption properties of polyurethane foam by X-ray computed tomography observations. *Mater Trans*. 2009;50:373-80.
  25. Zulkifli R, Mohd Nor MJ, Ismail AR, Nuawi MZ, MF. MT. Effect of Perforated size and air gap thickness on acoustic properties of coir fibre sound absorption panels. *Eur J Sci Res*. 2009;28(2):242-52.
  26. Gholami M, Ahmadi M, Tavanaie M, Khajeh Mehrizi M. Mechanical properties of date palm fiber reinforced polymer composites: a review. *Basparesh*. 2017;7(1):82-93.
  27. Fouladi MH, Nassir MH, Ghassem M, Shamel M, Peng SY, Wen SY, et al. Utilizing Malaysian natural fibers as sound absorber, Modeling and Measurement Methods for Acoustic Waves and for Acoustic Microdevices, *Intech Open* 2013.
  28. Taban E, Khavanin A, Faridan M, Samaei SE, 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*. 2019.
  29. Santoni A, Bonfiglio P, Fausti P, Marescotti C, Mazzanti V, Mollica F, et al. Improving the sound absorption performance of sustainable thermal insulation materials: Natural hemp fibres. *Appl Acoust*. 2019;150:279-89.
  30. Allard JF, Champoux Y. New empirical equations for sound propagation in rigid frame fibrous materials. *J Acoust Soc Am*. 1992;91(6):3346-3353.
  31. Johnson DL, Koplik J, Dashen R. Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media. *J Fluid Mech*. 1987;176:379-402.
  32. Gomes CVS, Peixoto DHN, Carrasco EVM, Magalhães MC. A novel statistical model for predicting sound absorption in multilayered systems. *6th IBPC Energy Procedia*. 2015;78:1647-52.
  33. Shrivage P, Bonfiglio P, Pompoli F. Hybrid inversion technique for predicting geometrical parameters of porous materials. *Acoustics 08 paris*. 2008.
  34. 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;69:493-9.
  35. Jones PW. PREDICTION of the Acoustic Performance of Small Poroelastic Foam Filled Mufflers: a Case Study. *Acoust Aust*. 2010;38(2):69-75.
  36. Hashemi Z, Monazzam MR, Fahim A. Estimation of Sound Absorption Performance of Complex Perforated Panel Absorbers by Numerical Finite Element Method and Examining the Role of Different Layouts Behind It. *Fluct Noise Lett*. 2019;18(3):1-18.

37. Buitrago BL, Santiuste C, Sanchez-Saez S, E. B, and Navarro C. Modelling of composite sandwich structures with honeycomb core subjected to high-velocity impact. *Compos Struct.* 2010;92:2090-6.
38. Verdier K, R. P, and Elkoun S. Transfer matrix method applied to the parallel assembly of sound absorbing materials. *J Acoust Soc Am.* 2013;134:4648-58.
39. Fouladi MH, Ayub M, Nor MJM. Analysis of coir fiber acoustical characteristics. *Appl Acoust.* 2011;72:35-42.
40. Arenas JP, Rey R, Alba J, Ramis J. Evaluation of Two Alternative Procedures for Measuring Airflow Resistance of Sound Absorbing Materials, ICSV20, Bangkok, Thailand. 2013.
41. Berardi U, Iannace G. Acoustic characterization of natural fibers for sound absorption applications. *Build Environ.* 2015;94:840-52.
42. Koizumi T, Tsujiuchi N, Adachi A. The Development of Sound Absorbing Materials Using Natural Bamboo Fibers. *High Performance Structures and Composites. WIT Trans Built Environ.* 2002; 59: 1-10.
43. Skinner C, Peters J, Vandenbroeck J. Acoustic absorbers: a third way for the management of sound in automobiles. *Huntsman Polyurethanes.* [http://www.huntsman.com/polyurethanes/Media%20Library/global/files/utech2006\\_acoustic\\_materials.pdf](http://www.huntsman.com/polyurethanes/Media%20Library/global/files/utech2006_acoustic_materials.pdf). 2006.
44. Sagartzazua X, Hervellab L, Pagaldaya JM. Review in sound absorbing materials. *R Arch Comput Methods Eng.* 2007;15(3):311-42.
45. Fatima S, Mohanty A. Acoustical and fire-retardant properties of jute composite materials. *Appl Acoust.* 2011;72(2-3):108-14.
46. Kumar RS, Sundaresan S. Acoustic Textiles-Sound Absorption. *Textile Technology. Department of Textile Technology, Kumaraguru College of Technology, Coimbatore/India:* 2017.
47. Yahya M.N, Chin DDVS. A review on the potential of natural fibre for sound absorption application. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng.* 2017;226: 1-10.
48. Ying LZ, Putra A, Nor MJM, Muhammad N, Yaakob MY. Sound absorption of multilayer natural coir and kenaf fibers. In the 23rd Int Cong on Sound Vib ICSV 23, Athens, Greece, 10-14 July 2016.