

ORIGINAL RESEARCH PAPER

## Acoustic properties of 3D printed bio-degradable micro-perforated panels made of Corkwood Fiber-Reinforced composites

Ehsan Rezaieyan<sup>1</sup>, Ebrahim Taban<sup>2,3</sup>, Seyyed Bagher Mortazavi<sup>1,\*</sup>, Ali Khavanin<sup>1</sup>, Hasan asilian<sup>1</sup>, Elham Mahmoudi<sup>1</sup>

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

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

<sup>3</sup> Social Determinants of Health Research Center, Mashhad University of Medical Sciences, Mashhad, Iran

Received: 2021-09-06

Accepted: 2022-02-15

### ABSTRACT

**Introduction:** Micro perforated panel (MPP) absorbents promise the next generation of sound absorbers as they have significant advantages over other porous adsorbents. In this study, we will investigate the acoustic performance of MPP absorbents made of biodegradable polylactic acid composite reinforced with natural corkwood fibers (PLA/Corkwood) by 3D printing technology.

**Material and Methods:** First, the effective dimensional characteristics of the parameters were determined, then, all of the samples were fabricated by the Zortrax M200 3D-Printer using the FDM method. The normal incidence sound absorption coefficient of the samples was measured using an acoustic impedance tube according to ISO 10534-2 in the frequency range of 64 to 1600 Hz. Then the effect of four geometric parameters, including hole diameter, panel thickness, perforation ratio, and air gap depth, on the absorption coefficient was studied.

**Results:** The findings show that the SL-MPP 12 absorbent has the highest average sound absorption coefficient (SACA) with a value of 0.28, so that at a frequency of 804 Hz it has the highest sound absorption equal to 0.91. The parametric study found that as the hole diameter increased, the values of peak adsorption and average absorption coefficient were decreased. Increasing the MPP thickness causes the absorption peak to move towards the lower frequency range. Decreasing the perforation ratio increases the peak absorption values and the average sound absorption, and the frequency with the highest absorption also moves towards the higher frequency range. The resonant frequency also depends on the depth of the air gap behind the screen. Changes in air gap depth from 30 mm to 70 mm reduced the resonant frequency by more than 35%.

**Conclusion:** Using 3D printing technology, sustainable MPP can be fabricated with more quality and in less time than traditional methods such as mixing and heat pressing.

**Keywords:** Microperforated panel, Sound absorption coefficient, 3D printing, Corkwood fiber reinforced composite

### HOW TO CITE THIS ARTICLE

Rezaieyan E, Taban E, Mortazavi SB, Khavanin A, asilian H, Mahmoudi E. Acoustic properties of 3D printed bio-degradable micro-perforated panels made of Corkwood Fiber-Reinforced composites. *J Health Saf Work*. 2022; 12(2): 367-383.

## 1. INTRODUCTION

Today, various solutions have been proposed to eliminate annoying noise in the environment.

\* Corresponding Author Email: [mortazav@modares.ac.ir](mailto:mortazav@modares.ac.ir)

Copyright © 2022 The Authors.

Published by Tehran University of Medical Sciences

The use of absorbents is one of the control engineering methods in the path of sound waves. Micro perforated panel Absorbent (MPPA) is more environmentally friendly and has a simpler

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



Fig. 1. Zortrax 3D printer (model M200)

structure than conventional porous materials and is, therefore, a better option for using in harsh conditions such as high temperatures and pressures. They are also fiber-free and can be easily used in clean environments such as hospitals, restaurants, clean rooms, and clean industries such as the electronics industry and food manufacturing companies. Although MPPA is a very good alternative to conventional porous materials, their sound absorption performance is usually not quite sufficient for practical applications, especially in confined spaces. One way to improve the absorption coefficient is through the use of natural composites. Recently, the production of acoustic panels from natural fibers has become popular, as these fibers are environmentally friendly, lightweight, abundant, and have high economic efficiency. Numerous studies have shown that the natural fibers in acoustic panels significantly improve the sound absorption performance, which is due to the creation of porosity in the panel. Today, there are various solutions for fabricating sound-absorbing composites with natural fibers, one of which is 3D printing of natural fiber-reinforced composites (NFRC). Today, natural fiber (NFRC) with 3D printing technology has attracted a lot of attention from acoustic researchers.

## 2. MATERIAL AND METHODS

Polylactic acid composite reinforced with natural corkwood fibers (PLA/Corkwood) is a PLA-based cork fiber-reinforced lightweight filament that is filled with approximately 30% cork fibers by weight, which means that a large volume of this filament is filled with lightweight

cork fibers, so the parts are made very similar to corkwood and have properties such as lightweight and high impact resistance. In order to print the samples, a 3D printing machine made by the Polish company Zortrax, model M200 (Fig. 1), was used. All samples with a diameter of 10 cm and an infill density of 100% were printed and transferred to the acoustic laboratory of Tarbiat Modares University to measure the sound absorption coefficient in the frequency range of 633 to 1600 Hz, using a two-microphone impedance tube model SW420-470 made by the company BSWA TECH to be studied.

## 3. RESULTS AND DISCUSSION

As shown in Table 1, at an air gap depth of 50 mm, the SL-MPP 12 absorbent has the highest average sound absorption coefficient (SACA). The sound absorption curves are similar in most MPP samples. In most samples, their peak sound absorption coefficient is in the frequency range of 630 to 1250 Hz. As the hole diameter increases from 0.6 to 1 mm, the peak absorption and SACA values decrease, and the frequency with the highest absorption moves towards the higher frequency range. In other words, if the panel thickness ( $t$ ) is constant, increasing the diameter of the holes will cause the SACA peak to occur at high frequencies and the bandwidth will be reduced. Also, when increasing the thickness from 0.6 to 1 mm, in addition to decreasing the values of absorption peak and SACA, the frequency with the highest absorption moves towards the lower frequency range. In the study by Sakagami et al., increasing the MPP thickness shifts the absorption peak to the lower frequencies and

Table 1. Summary of structural and acoustic characteristics of fabricated samples

Sample name	Airgap depth (mm)	Thickness (mm)	Hole diameter (mm)	Hole spacing (mm)	Perforation ratio (%)	SACA	Abs. peak	
							F (Hz)	value
SL-MPP 6	50	0.8	0.6	6	0.79	0.25	756	0.73
SL-MPP 8	50	0.8	0.8	6	1.40	0.22	834	0.65
SL-MPP 10	50	0.8	1	6	2.17	0.17	922	0.50
SL-MPP 1	50	0.6	0.8	6	1.40	0.19	906	0.57
SL-MPP 15	50	1	0.8	6	1.40	0.25	778	0.73
SL-MPP 7	50	0.8	0.8	2	12.56	0.06	1600	0.19
SL-MPP 9	50	0.8	0.8	10	0.50	0.27	610	0.85
SL-MPP 12	30	0.9	0.7	8	0.6	0.25	804	0.91
	50	0.9	0.7	8	0.6	0.28	650	0.88
	70	0.9	0.7	8	0.6	0.31	524	0.84

sharply reduces the absorption coefficient values. According to previous studies, in samples with the same thickness, decreasing the perforation ratio or increasing the hole spacing (assuming the diameter of the cavities is constant) increases the peak adsorption and SACA values and also the frequency with the highest adsorption towards the higher frequency range. In this study, in order to determine the effect of the air gap cavity behind the MPP on the sound absorption coefficient, distances of 30, 50, and 70 mm were selected. The findings show that as the depth of the air gap increased all sound absorption peaks shifted to lower frequencies.

#### 4. CONCLUSIONS

This study has shown that as noise problems expand, we can use new technologies such as 3D printing to solve these problems. Using 3D printing technology, sustainable MPP can be fabricated with more quality and in less time than traditional methods such as mixing and heat pressing.

#### 5. ACKNOWLEDGMENT

This article is a part of the first author's master's thesis in occupational health engineering at Tarbiat Modares University. The authors are thankful to Tarbiat Modares University for providing the necessary laboratory facilities for this work.

## خواص آکوستیکی صفحات میکرو متخلخل زیست تخریب پذیر ساخته شده از کامپوزیت های تقویت شده با الیاف چوب پنبه به روش چاپ ۳ بعدی

احسان رضائیان<sup>۱</sup>، ابراهیم تابان<sup>۲،۳</sup>، سید باقر مرتضوی<sup>۳\*</sup>، علی خوانین<sup>۱</sup>، حسن اصیلیان مهابادی<sup>۱</sup>، الهام محمودی<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده علوم پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران  
<sup>۲</sup> گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی مشهد، مشهد، ایران  
<sup>۳</sup> مرکز تحقیقات عوامل اجتماعی مؤثر بر سلامت، دانشگاه علوم پزشکی مشهد، مشهد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۱۵، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۲۶

### مکیده

**مقدمه:** جاذب‌های پانل میکرو متخلخل (MPP) نویدبخش نسل بعدی جاذب‌های صوتی هستند چراکه از مزایای قابل توجهی نسبت به سایر جاذب‌های متخلخل برخوردارند. در این پژوهش به بررسی عملکرد صوتی جاذب‌های میکرو متخلخل ساخته شده از کامپوزیت زیست تخریب پذیر پلی لاکتیک اسید تقویت شده با الیاف طبیعی چوب پنبه (PLA/Corkwood) توسط فناوری چاپ ۳ بعدی خواهیم پرداخت.

**روش کار:** ابتدا مشخصات ابعادی پارامترهای مؤثر در عملکرد صوتی جاذب MPP تعیین شد و سپس کلیه نمونه‌ها به وسیله دستگاه پرینتر سه بعدی Zortrax M200 و به روش مدل سازی تهنشینی لایه‌های مذاب (FDM) ساخته شدند. ضریب جذب برخورد نرمال نمونه‌ها با استفاده از لوله امپدانس آکوستیکی مطابق استاندارد ISO 10534-2 در محدوده فرکانسی ۶۴ تا ۱۶۰۰ هرتز اندازه گیری شد. در ادامه اثر ۴ پارامتر هندسی شامل قطر حفرات، ضخامت صفحه، میزان تخلخل و اندازه فاصله هوایی بر روی ضریب جذب مورد مطالعه قرار گرفت.

**یافته‌ها:** بر اساس یافته‌های این پژوهش، بیشترین مقدار متوسط ضریب جذب صوتی (SACA) مربوط به جاذب SL-MPP 12 با مقدار ۰/۲۸ است به طوری که در فرکانس ۸۰۴ هرتز بالاترین جذب صوتی معادل ۰/۹۱ را دارد. یافته‌های مطالعه پارامتری نشان داد، با افزایش قطر حفرات مقادیر پیک جذب و متوسط ضریب جذب کاهش می‌یابد. افزایش ضخامت صفحه MPP باعث می‌شود پیک جذب به سمت محدوده فرکانس‌های پایین‌تر حرکت کند. کاهش میزان تخلخل باعث افزایش مقادیر پیک جذب و میانگین جذب صوتی می‌شود و فرکانس دارای بیشترین جذب نیز به سمت محدوده فرکانس‌های بالاتر حرکت می‌کند. همچنین فرکانس تشدید صوتی به عمق فاصله هوایی پشت صفحه بستگی دارد. تغییر در عمق فاصله هوایی از ۳۰ میلی‌متر به ۷۰ میلی‌متر فرکانس تشدید را بیش از ۳۵ درصد کاهش داد.

**نتیجه گیری:** ساخت جاذب‌های آکوستیکی پایدار با بهره‌گیری از فناوری چاپ ۳ بعدی این امکان را به ما می‌دهد تا این گونه جاذب‌ها با کیفیت و سرعت بیشتر نسبت به ساخت با روش‌های سنتی مانند روش میکس و پرس حرارتی تولید شوند.

**کلمات کلیدی:** صفحات میکرو متخلخل، ضریب جذب صوت، چاپ ۳ بعدی، کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف چوب پنبه

\* پست الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبه: [mortazav@modares.ac.ir](mailto:mortazav@modares.ac.ir)

مقاومت در برابر باد و رطوبت برخوردارند و فاقد فیبرهای مضر برای سلامتی هستند (۱۲،۱۳).

اگرچه جاذب MPP جایگزین بسیار مناسبی برای مواد متخلخل مرسوم است، اما قابلیت جذب صدا در آن‌ها معمولاً برای کاربردهای عملی، خصوصاً در فضاهای محدود کاملاً کافی نیست. پانل‌های تک لایه مرسوم پهنای فرکانسی جذب باریکی دارند؛ بنابراین کاربرد بالقوه این جاذب‌ها بخصوص در اصوات با پهنای گسترده‌تر محدود است. از طرفی ساختار پایه این پانل‌ها که شامل یک صفحه تخت و متخلخل با یک حفره هوایی یکنواخت در پشت صفحه تعریف شده است، در حقیقت مشابه یک هلم هولتز است و در نتیجه نمودار منحنی ضریب جذب آن تنها شامل یک پیک منفرد است که دامنه فرکانسی باریکی را شامل می‌شود (۱۴). یکی از راهکارهای بهبود ضریب جذب پانل‌های آکوستیکی، ساخت آن‌ها با استفاده از کامپوزیت‌های طبیعی است (۱۵،۱۶). مطالعات زیادی نشان داده‌اند که الیاف طبیعی موجود در پانل‌های آکوستیکی به‌طور قابل توجهی باعث بهبود عملکرد جذب صوت می‌شوند که این امر به دلیل ایجاد شبکه‌ای از تخلخل‌ها در پانل است (۱۷-۱۹). اخیراً، ساخت پانل‌های آکوستیکی از الیاف طبیعی رواج یافته است. چراکه این الیاف دوستدار محیط زیست‌اند، سبک‌وزن‌اند، فراوان‌اند و کارایی اقتصادی بالایی نیز دارند (۲۰،۲۱). جاذب‌های پانل میکرو متخلخل (MPP) معمولاً از پلاستیک یا فلز ساخته می‌شوند (۹). مطالعات گوناگون از موادی مختلفی مانند فولاد ضدزنگ (۲۲)، رزین اپوکسی و سیلیکون (۲۳)، پلکسی گلاس، پلی کربنات (۲۴)، سیلیکون (۱۳)، پلی وینیل کلراید (PVC) و یو پی وی سی (U-PVC) (۱۴،۲۵) استفاده کرده‌اند. جاذب‌های MPP ساخته شده از مواد طبیعی را MPP های زیست تخریب پذیر (BMPP) می‌نامند. با افزایش تخلخل نمونه‌ها، ضریب جذب صوتی نمونه‌ها نیز افزایش می‌یابد چراکه ساختار تخلخل‌ها می‌تواند امواج صوتی را "به دام اندازد"، و امکان انعکاسات داخلی موج را فراهم می‌کند و در نتیجه باعث افت انرژی صوتی و جذب صوت می‌گردد (۲۶،۲۷).

امروزه به‌منظور حذف صدای آزاردهنده در محیط، راهکارهای مختلفی ارائه شده است. به‌کارگیری جاذب‌ها یکی از روش‌های مهندسی کنترل در مسیر انتشار امواج صوتی است (۱-۴). مواد جاذب صوت به‌طور گسترده‌ای در معماری داخلی بناها، حمل‌ونقل و مهندسی هوافضا بکار می‌رود. سابقاً، مواد متخلخل از قبیل مواد الیافی به‌منظور جذب صوت بکار می‌رفت (۵-۸)؛ این در حالی است که برای اثربخشی مناسب آن‌ها و جذب بالای صوت نیاز است تا ضخامت‌های زیادی از این مواد بر سر راه امواج صوتی قرار گیرد. مواد جاذب صوتی مرسوم مانند الیاف و فوم، در گذشت زمان تخریب می‌شوند و تجدید ناپذیر هستند. ذرات کوچک جدا شده از سطح آن‌ها از طریق مجاری تهویه به داخل بناها منتقل و موجب آلوده شدن داخل ساختمان می‌گردند؛ همچنین در درازمدت مشکلات سلامتی متعددی برای ساکنین به همراه دارند (۹). در مقایسه با جاذب‌های قدیمی، پانل میکرو متخلخل (MPP) منحصربه‌فرد هستند چراکه بادوام و قابل بازیابی‌اند، سفت و محکم‌اند، غیرقابل احتراق‌اند، فاقد الیاف‌اند و همچنین از نظر زیبایی‌شناختی مناسب‌اند. از آنجاکه می‌توان جاذب‌ها MPP را از هر نوع ماده جامد و سخت در رنگ‌ها و جنس‌های مختلف تولید نمود، خواص نوری آن ارزش زیبایی زیادی دارد و لذا باعث جذابیت بصری در فضاهای داخلی بناها نیز می‌شود (۱۰)؛ پانل‌های میکرو متخلخل (MPPs)، در مقایسه با مواد جاذب مرسوم، بیشتر دوست دار محیط زیست‌اند و ساختار ساده‌تری دارند و لذا گزینه مناسب‌تری برای به‌کارگیری در شرایط سخت مانند دما و فشار بالا می‌باشند. همچنین از آنجاکه فاقد الیاف‌اند به‌راحتی در محیط‌های تمیز مانند بیمارستان‌ها، رستوران‌ها، اتاق‌های پاک و صنایع حساس مانند صنایع الکترونیک قابل استفاده‌اند (۱۱). جاذب‌های پانل میکرو متخلخل (MPP) نویدبخش نسل بعدی جاذب‌های صوتی هستند چراکه از مزایای قابل توجهی همچون وزن سبک، قیمت ارزان، طراحی و ساخت آسان،

## 1 Micro-perforated panels

کامپوزیت‌های جاذب صوتی با الیاف طبیعی وجود دارد که یکی از جدیدترین آن‌ها، فناوری پرینت ۳ بعدی کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف طبیعی<sup>۱</sup> (NFRC) است. استفاده از فناوری چاپ ۳ بعدی با قابلیت ساخت سریعی که دارند کمک می‌کنند تا به سرعت از ایده و مفهوم به محصولات آکوستیکی مورد نظر برسیم و پتانسیل زیادی برای گسترش این فناوری در حوزه آکوستیک وجود دارد (۳۷). کامپوزیت‌هایی که با چاپ ۳ بعدی تولید می‌شوند دارای خلل و فرج‌های بسیار ریزی در خطوط چاپ هستند که این مسئله از نظر آکوستیکی باعث جذب بیشتر صوت می‌شود. خروجی‌های این روش می‌تواند جایگزین روش‌های مرسوم ساخت که از الیاف طبیعی و چسب استفاده می‌کردند باشد.

بر اساس جستجوها، تاکنون مطالعه‌ای در زمینه ساخت و بررسی مشخصات صوتی پانل‌های MPP ساخته شده از کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف طبیعی (NFRC) با استفاده از فناوری پرینت ۳ بعدی صورت نگرفته است. ما در این پژوهش به دنبال ساخت و بررسی عملکرد صوتی جاذب‌های میکرو متخلخل ساخته شده از کامپوزیت زیست‌تخریب‌پذیر PLA/Corkwood هستیم.

### روش کار

در این پژوهش به منظور ساخت جاذب‌های MPP از ماده فیلامنت کامپوزیتی PLA/WOOD استفاده شد. پس از انتخاب جنس فیلامنت و تعیین مشخصات ابعادی پارامترهای مؤثر در عملکرد صوتی جاذب MPP، کلیه نمونه‌ها به وسیله دستگاه پرینتر سه بعدی Zortrax M200 و به روش ته‌نشینی لایه‌های مذاب (FDM<sup>۲</sup>) ساخته شدند. دستگاه پرینتر سه بعدی Zortrax M200 دارای نازلی به قطر ۰/۴ میکرون است و لایه‌ها را با رزولوشن ۹۰ تا ۳۹۰ میکرون چاپ می‌کند. روش FDM متداول‌ترین روش چاپ سه بعدی است که از فیلامان‌های پلیمری استفاده می‌کنند. در روش FDM، یک فیلامان

علاوه بر این‌ها، طراحی و ساخت هندسی یک جاذب پانل میکرو متخلخل (MPPA) با ابعاد زیر میلی‌متری، به منظور دستیابی به خواص صوتی ایده‌آل و درعین حال بهینه کردن هزینه‌ها کار چالش‌برانگیزی است. مطالعات مختلف به منظور افزایش کارایی اقتصادی MPPAها از روش‌های گوناگونی استفاده کرده‌اند؛ مثلاً روش‌های سوراخ‌کاری مکانیکی (۲۸)، روش نفوذ دهی (infiltration) (۲۹)، ساخت سرامیکی (۳۰)، فرآیندهای غشایی (۳۱)، استفاده از سامانه‌های میکرو الکترومکانیکی (MEMS) (۳۲) و سوراخ‌کاری با استفاده از فناوری لیزر در این زمینه استفاده شده است. این روش‌ها عمدتاً پرهزینه‌اند و کمتر در دسترس‌اند. بدیهی است یک جاذب MPP که با ابعاد بسیار ریز ساخته شده است، هرچند اثربخشی صوتی بالایی دارد اما به علت هزینه ساخت گران توجیه اقتصادی برای به‌کارگیری در مقیاس‌های بزرگ را ندارد. ما در این پژوهش برای کاهش هزینه ساخت MPPها از فناوری چاپ ۳ بعدی با ماده زیست‌تخریب‌پذیر و ارزان پلیمر پلی لاکتیک اسید (polylactic acid) تقویت‌شده با الیاف چوب‌پنبه (Cork wood fiber) (PLA/Corkwood) استفاده خواهیم کرد. در حال حاضر فناوری چاپ ۳ بعدی به‌عنوان یک روش نوین در تولید پانل‌های آکوستیکی با خواص مکانیکی و صوتی بهبودیافته بکار می‌رود. Liu و همکارانش با استفاده از یک پلیمر شفاف با نام تجاری VisiJet-SL یک جاذب صفحه متخلخل توسط چاپ سه بعدی تولید کردند (۳۳). در مطالعه‌ای دیگر، Yang و همکاران با بهره‌گیری از فناوری چاپ ۳ بعدی SLS، یک جاذب MPP چندلایه با کارایی صوتی بالا ساختند (۳۴). همچنین Gao و همکارانش یک جاذب صوتی میکرو مارپیچی (MicroHelix) را با استفاده از ماده پلی لاکتیک اسید (PLA) و دستگاه چاپ ۳ بعدی تولید کردند (۳۵). در مطالعه‌ای دیگر Liu یک نوع جاذب متخلخل پلی کربناتی توسط چاپ ۳ بعدی ساختند و خواص آکوستیک آن را مورد مطالعه قرار دادند (۳۶).

امروزه راهکارهای مختلفی به منظور ساخت

- 1 Natural fiber-reinforced composite
- 2 Fused Deposition Modeling



شکل ۱. دستگاه پرینت سه بعد مدل M200 ساخت شرکت Zortrax لهستان (۴۲)

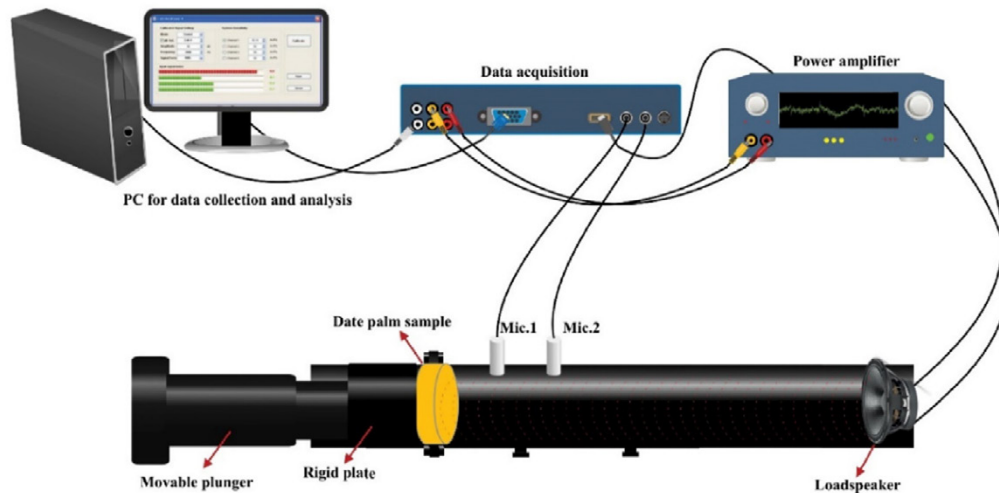
تجاری EasyCork™ ساخت کمپانی FormFutura® هلند استفاده شد. EasyCork™ نوعی از فیلامنت ها کامپوزیتی PLA/WOOD محسوب می‌شود که حاوی ۳۰٪ الیاف طبیعی چوب‌پنبه (Cork) و ۷۰٪ پلیمر زیست‌تخریب‌پذیر پلی لاکتیک اسید (PLA) است. EasyCork™ یک فیلامنت سبک‌وزن تقویت‌شده با الیاف Cork بر پایه PLA است که بر اساس وزنی با حدوداً ۳۰٪ الیاف چوب‌پنبه پر شده است و این بدان معنا است که حجم زیادی از این فیلامنت به‌وسیله الیاف سبک‌وزن چوب‌پنبه پر شده است بنابراین قطعات ساخته‌شده از آن شباهت زیادی به چوب‌پنبه دارند و از خواص آن مانند وزن سبک و مقاومت ضربه بالا برخوردارند. به‌منظور چاپ نمونه‌ها از دستگاه پرینت سه بعدی ساخت شرکت Zortrax لهستان مدل M200 (شکل ۱) استفاده شد.

یکی از ویژگی‌های چاپ ۳ بعدی، امکان تعیین تراکم داخلی (Infill Density) قطعه است؛ این ویژگی در حوزه آکوستیک می‌تواند بسیار مؤثر واقع شود چراکه امکان تولید جاذب‌های صوتی سبک، مستحکم و دارای شبکه‌ای از حفرات داخلی (porosity) را فراهم می‌کند. با این‌وجود در نمونه‌های MPP که در مطالعه حاضر ساخته‌شده به علت محدودیت‌های موجود از جمله ضخامت زیرمیلیمتری نمونه‌ها، از این ویژگی مهم صرف‌نظر شد و

پیوسته از پلیمرهای گرمانرم برای ساخت لایه‌های نمونه استفاده می‌شود. فیلامان در نازل گرم می‌شود و به حالت نیمه مایع تبدیل می‌شود؛ سپس لایه‌لایه بر روی یکدیگر قرار می‌گیرند. گرمانرم بودن پلیمر مورد‌استفاده در این روش، باعث می‌شود تا ماده در داخل نازل گرم و تبدیل به مذاب شود و بعد از خروج از نازل، در دمای محیط به جامد تبدیل شود. ضخامت لایه، پهنا و جهت‌گیری فیلامان‌ها و تراکم لایه‌ها (درصد تخلخل بین لایه‌ها) اصلی‌ترین پارامترهای فرآیند FDM است که خواص مکانیکی قطعات چاپ‌شده را تعیین می‌کند. هزینه پایین، سرعت بالا و سادگی فرآیند مهم‌ترین مزایای FDM هستند (۳۸).

ماده پلی لاکتیک اسید (PLA) یک ماده طبیعی است که از مواد خام مانند برنج، ذرت و چغندر قند و یک پلی‌استر آلیفاتیک ترموپلاستیک محسوب می‌شود. PLA در مقایسه با سایر پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر از سازگاری و تجدید پذیری بالاتری برخوردار است (۳۹). PLA به‌عنوان یک ماتریس پلیمری در کامپوزیت‌ها، از خاصیت منحصربه‌فرد غیر سمی بودن برخوردار است (۴۰). این پلیمر همچنین یکی از بهترین پلیمرهای دوستدار محیط‌زیست است چراکه به‌سرعت در بستر خاک تخریب می‌شود و برای تولید آن نیز انرژی کمتری نیاز است (۴۱). به‌منظور ساخت MPP ها از فیلامنت با نام





شکل ۲. تصویر شماتیک دستگاه لوله امپدانس دو میکروفون دار ساخت کمپانی BSWA (۴۳)

هرتز) بکار می‌روند. در این پژوهش ضرایب جذب صوتی در دامنه فرکانسی پایین و متوسط (۶۳ تا ۱۶۰۰ هرتز) از طریق لوله با قطر داخلی بزرگ (۱۰۰ میلی‌متر) با ترکیب نمودن مقادیر حاصل از نرم‌افزار به دست می‌آید.

به منظور تعیین ابعاد پارامترهای هندسی نمونه‌های MPP، مقادیر بهینه هریک از پارامترهای قطر حفرات و فاصله بین حفرات بر اساس نتایج حاصل از تحقیقات پیشین (۴۶-۱۱,۲۲,۲۵,۴۴) تعیین گردید. در همین راستا تعداد نمونه‌ها بر این اساس به گونه‌ای انتخاب شد که ضمن کاهش هزینه‌ها و به حداقل رساندن تعداد آن‌ها، بتوان تأثیر هر یک از پارامترها را در ۳ نمونه که مشخصات کاملاً مشابهی دارند مقایسه کرد.

این نکته شایان ذکر است که در یک پانل دایره‌ای شکل به قطر ۱۰۰ میلی‌متر با تغییر هریک از دو پارامتر قطر حفرات و فاصله بین آن‌ها، مقدار میزان تخلخل نیز تغییر می‌کند؛ چراکه این شاخص تابعی از دو پارامتر قطر حفرات و فاصله بین آن‌ها است. به عبارتی امکان‌پذیر نیست که در دو پانل MPP هم‌شکل و با قطر مشابه و دارای حفرات دایره‌ای با قطر مشابه، فاصله بین حفرات تغییر نماید درعین حال که میزان تخلخل آن‌ها ثابت بماند.

تراکم داخلی نمونه به‌عنوان یک متغیر تعیین نگردید. در این مطالعه کلیه، نمونه‌ها با قطر ۱۰ سانتی‌متر و تراکم چاپ ۱۰۰ درصد ساخته شد و به آزمایشگاه آکوستیک دانشگاه تربیت مدرس منتقل گردید تا برای اندازه‌گیری ضریب جذب صوت در دامنه فرکانسی (۶۳-۱۶۰۰) توسط لوله امپدانس مطالعه شوند.

اندازه‌گیری ضریب جذب برخورد نرمال نمونه‌ها با استفاده از لوله امپدانس آکوستیکی مطابق استاندارد ISO ۱۰۵۳۴-۲ صورت گرفت. تصویر ۲ شکل شماتیک نحوه اندازه‌گیری ضریب جذب نمونه‌ها با استفاده از دستگاه لوله امپدانس دو میکروفون مدل SW۴۲۰-۴۷۰ ساخت شرکت BSWA TECH کشور چین موجود در آزمایشگاه آکوستیک گروه بهداشت حرفه‌ای دانشگاه تربیت مدرس را نمایش می‌دهد. به منظور پردازش داده‌ها از نرم‌افزار BSWA VA-Lab۴ Basic استفاده شد. قبل از هر بار اندازه‌گیری، میکروفون‌ها با کالیبراتور CA۱۱۵ در فرکانس ۱kHz و تراز فشار ۱۱۴ dB کالیبره گردید. این دستگاه از ۲ لوله با قطر داخلی کوچک (۳۰ میلی‌متر) و بزرگ (۱۰۰ میلی‌متر) تشکیل شده است که به ترتیب برای فرکانس‌های بالا (محدوده ۱۰۰۰ تا ۶۳۰۰ هرتز) و فرکانس‌های پایین (محدوده ۶۳ تا ۱۶۰۰



نمونه‌ها، فاصله هوایی ثابت (۵۰ میلی‌متر) اعمال گردید تا بتوان تأثیر پارامترهای دیگر را تعیین نمود. نمونه‌ها با ضخامت‌ها، قطر تخلخل‌ها و فاصله سوراخ‌های مختلف به‌طور دقیق و صحیح در داخل لوله بزرگ بر روی سطح صلب قرار گرفتند. برای هر نمونه، پس از قرارگیری صحیح آن و اطمینان از فیت شدن لوله‌های نمونه با دیواره لوله، فاصله هوایی موردنظر از طریق جابجا کردن پلانگر اعمال گردید. با هدف افزایش دقت نتایج پژوهش، تکرارپذیری آزمایش‌ها به این صورت انجام گرفت که از هر نمونه ۳ عدد ساخته شد و اندازه‌گیری‌های جذب صوت برای هر آزمایش ۳ بار تکرار گردید و میانگین نتایج گزارش شد. به‌منظور به حداقل رساندن بروز خطاها به علت عدم قرارگیری صحیح نمونه در داخل لوله، برای هر بار اندازه‌گیری، یک‌بار نمونه از لوله خارج شد و مجدداً جایگذاری شد. ابعاد نمونه‌ها (شامل قطر و ضخامت نمونه، قطر و فاصله مرکز تا مرکز حفرات هر MPP) توسط کولیس دیجیتال ساخت شرکت INSIZE مدل ۱۵۰A-۱۱۱۴ با دقت اسمی ۰/۰۳ میکرون اندازه‌گیری گردید. کلیه اندازه‌گیری‌ها در شرایط دمایی کنترل‌شده با دمای °C (20±2)، رطوبت نسبی % (10±45) و فشار 1.01325×105 Pa انجام شد. پس از تعیین ضرایب جذب، نمودار جذب صوتی هر یک از جاذب‌ها در دامنه فرکانسی ۱۶۰۰-۶۳ هرتز با استفاده از نرم‌افزار OriginPro نسخه ۲۰۲۱ رسم گردید.

### یافته‌ها

بر اساس آنچه در بخش قبل اشاره شد، جاذب‌های MPP در ابعاد مختلف از جنس کامپوزیت PLA/Corkwood توسط فناوری چاپ سه‌بعدی ساخته شدند (شکل ۳). پارامترهای ساختاری، متوسط ضریب جذب صوتی (SACA) کلیه نمونه‌ها در جدول ۱ آورده شده است. ضرایب جذب صوتی MPP ها در دامنه فرکانسی ۱۶۰۰-۶۳ هرتز اندازه‌گیری گردید. همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، در فاصله هوایی ۵۰ میلی‌متر بیشترین مقدار متوسط ضریب جذب

میزان تخلخل<sup>۱</sup> یا نسبت مساحت باز ( $\sigma$ ) در یک پانل متخلخل عبارت از مساحت مؤثر سوراخ‌ها به ازای مساحت واحد پانل است. در یک پانل میکرو متخلخل، میزان تخلخل را برحسب درصد با استفاده از طریق معادله ۱ تعیین می‌کنند:

$$\sigma = \frac{\text{کل مساحت سوراخ‌ها}}{\text{کل مساحت پانل}} \times 100 \quad (1)$$

در صورتی که سوراخ‌های دایره‌ای شکل به‌صورت منظم و با فواصل یکسان از یکدیگر قرار گرفته باشند داریم (معادله ۲):

$$\sigma = \pi \left( \frac{r}{s} \right)^2 \times 100 \quad (2)$$

عبارت  $r$  شعاع سوراخ‌ها و  $s$  فاصله مرکز به مرکز سوراخ‌های مجاور است (۴۷).

به‌منظور تعیین اثر فاصله هوایی بر روی ضریب جذب صوتی، ۳ فاصله هوایی شامل ۳۰، ۵۰ و ۷۰ میلی‌متر برای نمونه ۱۲ MPP اعمال گردید و ضرایب جذب به‌دست‌آمده با یکدیگر مقایسه شدند. نمونه ۱۲ MPP بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، بهترین عملکرد جذب صوتی را در بین نمونه‌ها داشت و لذا این نمونه برای تعیین اثر فاصله هوایی انتخاب گردید. شایان‌ذکر است به‌منظور انتخاب فواصل هوایی مختلف جهت مقایسه، ابتدا فواصل ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰ الی ۷۰ میلی‌متر مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج نشان داد در حالتی که فاصله هوایی ۱۰ میلی‌متر بود، اختلاف نمودار ضریب جذب با حالت فاصله ۲۰ میلی‌متر بسیار ناچیز و قابل صرف‌نظر بود؛ از طرف دیگر اختلاف بین نمودارهای ضریب جذب صوت در سه فاصله ۳۰، ۵۰ و ۷۰ به‌مراتب مشهودتر از فواصل ۲۰، ۴۰ و ۶۰ بود لذا در این پژوهش فواصل ۳۰، ۵۰ و ۷۰ جهت تعیین اثر عمق فاصله هوایی انتخاب شدند. در خصوص سایر

- 1 Porosity
- 2 Open area ratio



شکل ۳. تصویر نمونه‌های MPP ساخته‌شده از کامپوزیت PLA/Corkwood

جدول ۱. خلاصه مشخصات ساختاری و آکوستیکی نمونه‌های ساخته‌شده

نام نمونه		فاصله هوایی (mm)	ضخامت (mm)	قطر حفرات (mm)	فاصله حفرات (mm)	میزان تخلخل (%)	متوسط ضریب جذب صوتی †	حداکثر جذب صوتی
مقدار	فرکانس					(%)		
۰/۷۳	۷۵۶	۵۰	۰/۸	۰/۶	۶	۰/۷۹	۰/۲۵	۷۵۶
۰/۶۵	۸۳۴	۵۰	۰/۸	۰/۸	۶	۱/۴۰	۰/۲۲	۸۳۴
۰/۵۰	۹۲۲	۵۰	۰/۸	۱	۶	۲/۱۷	۰/۱۷	۹۲۲
۰/۵۷	۹۰۶	۵۰	۰/۶	۰/۸	۶	۱/۴۰	۰/۱۹	۹۰۶
۰/۷۳	۷۷۸	۵۰	۱	۰/۸	۶	۱/۴۰	۰/۲۵	۷۷۸
۰/۱۹	۱۶۰۰	۵۰	۰/۸	۰/۸	۲	۱۲/۵۶	۰/۰۶	۱۶۰۰
۰/۸۵	۶۱۰	۵۰	۰/۸	۰/۸	۱۰	۰/۵۰	۰/۲۷	۶۱۰
۰/۹۱	۸۰۴	۳۰	۰/۹	۰/۷	۸	۰/۶	۰/۲۵	۸۰۴
۰/۸۸	۶۵۰	۵۰	۰/۹	۰/۷	۸	۰/۶	۰/۲۸	۶۵۰
۰/۸۴	۵۲۴	۷۰	۰/۹	۰/۷	۸	۰/۶	۰/۳۱	۵۲۴

† میانگین حسابی ۱۵ فرکانس مرکزی از ۶۳ تا ۱۶۰۰ هرتز

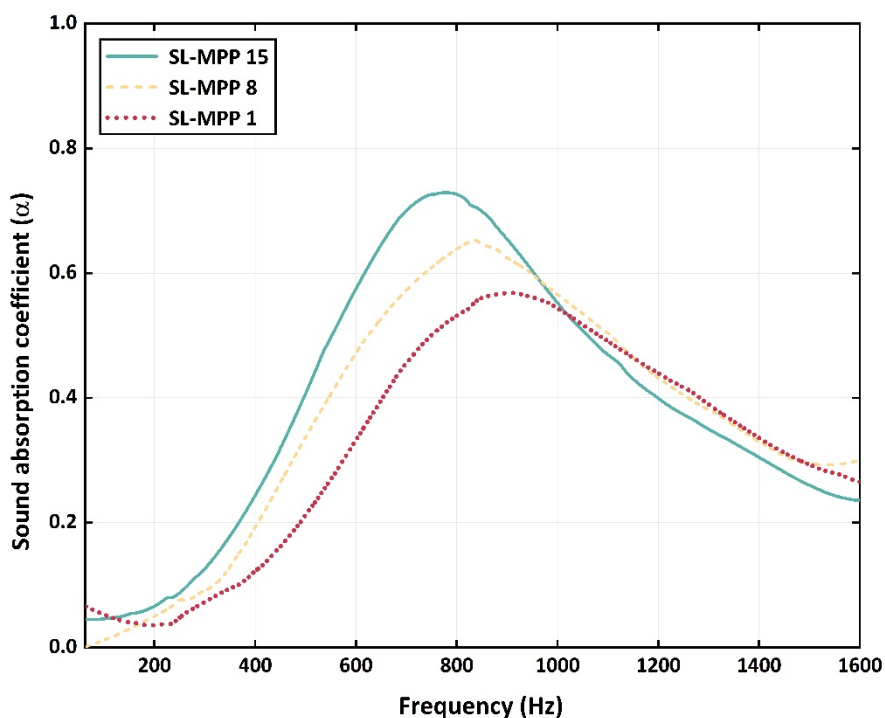
یک پارامترهای هندسی MPP بر روی عملکرد جذب صوتی آن، با ثابت نگه‌داشتن ۲ پارامتر، پارامتر سوم متغیر فرض شد و اثر افزایش یا کاهش آن مورد مطالعه قرار گرفت. نمودارهای ۴ تا ۷، نتایج مربوطه را نشان می‌دهد.

### بحث

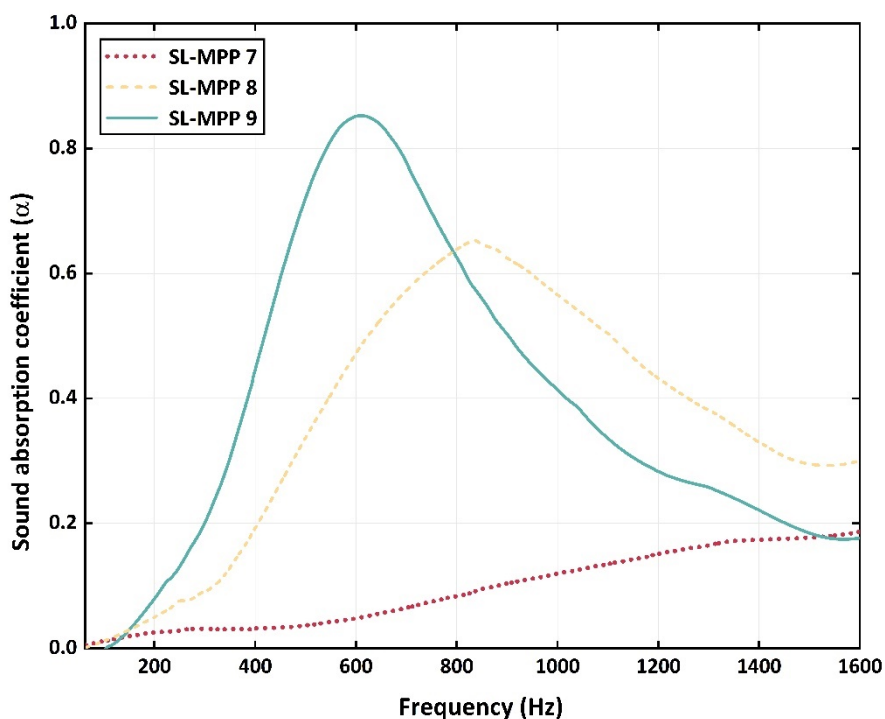
بر اساس شکل شماره ۴، با افزایش ضخامت از ۰/۶ به ۱ میلی‌متر علاوه بر کاهش مقادیر پیک جذب و SACA، فرکانس دارای بیشترین جذب به سمت محدوده فرکانس‌های پایین‌تر حرکت می‌کند. در مطالعه

صوتی (SACA) مربوط به جاذب SL-MPP ۱۲ است. منحنی‌های ضریب جذب صدا در اغلب نمونه‌های MPP، شکل مشابهی دارند. در اغلب نمونه‌ها، پیک ضریب جذب صدا آن‌ها در محدوده فرکانسی ۶۳۰ تا ۱۲۵۰ هرتز قرار دارد. لازم به ذکر است، جاذب (Airgap) SL-MPP ۱۲ (۵۰ mm) در فرکانس ۸۰۴ هرتز بالاترین جذب صوتی معادل ۰/۹۱ را دارد.

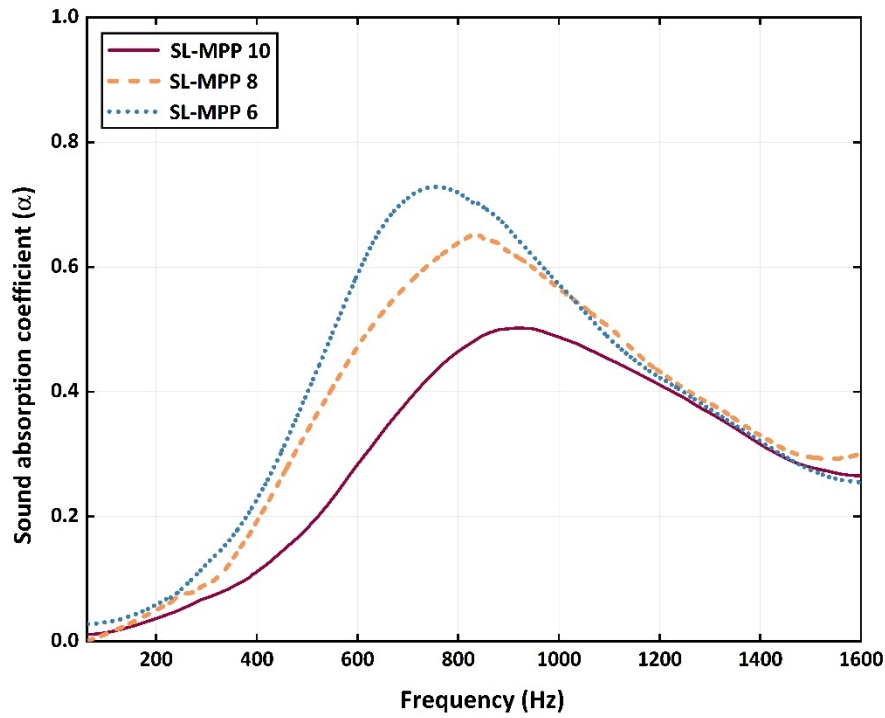
پارامترهای هندسی شامل قطر حفرات، ضخامت صفحه، میزان تخلخل و اندازه فاصله هوایی در این پژوهش مورد مطالعه قرار گرفتند. به‌منظور تعیین اثر هر



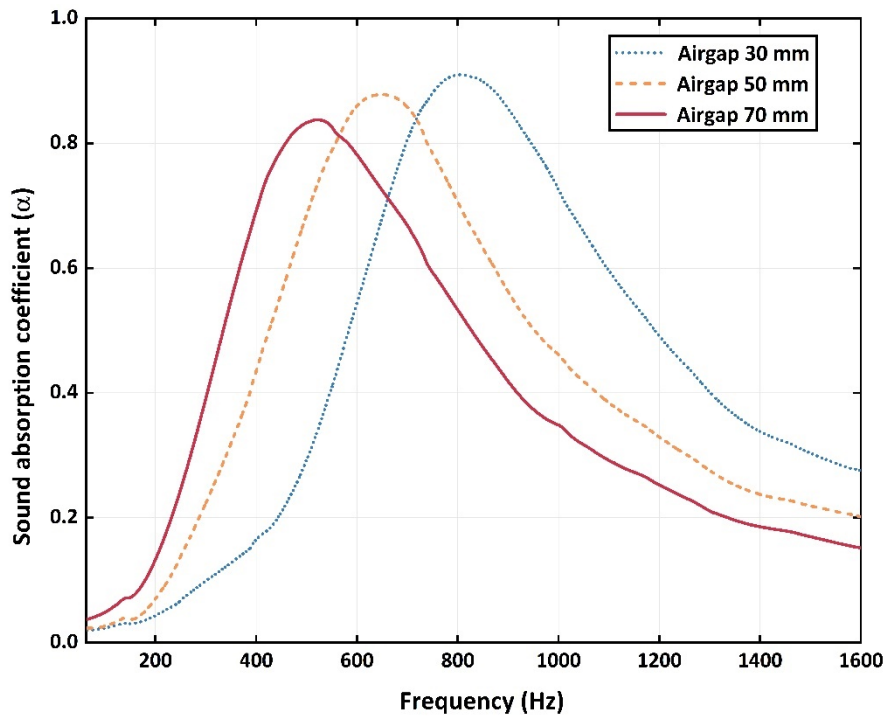
شکل ۴. تعیین اثر ضخامت صفحه SL-MPP بر عملکرد جذب صوتی آن (با ثابت نگه داشتن مقادیر پارامترهای قطر حفرات، فاصله بین حفرات و میزان تخلخل)



شکل ۵. تعیین اثر فاصله بین حفرات SL-MPP بر عملکرد جذب صوتی آن (با ثابت نگه داشتن مقادیر پارامترهای ضخامت صفحه و قطر حفرات)



شکل ۶. تعیین اثر قطر حفرات SL-MPP بر عملکرد جذب صوتی آن (با ثابت نگه‌داشتن مقادیر پارامترهای ضخامت صفحه و فاصله بین حفرات)



شکل ۷. تعیین اثر فاصله هوایی پشت صفحه SL-MPP بر عملکرد جذب صوتی آن (با ثابت نگه‌داشتن مقادیر پارامترهای ضخامت صفحه، قطر حفرات، فاصله بین حفرات و میزان تخلخل)

نمونه‌های با ضخامت یکسان کاهش میزان تخلخل یا به عبارتی افزایش فاصله بین حفرات (با فرض ثابت بودن قطر حفرات) باعث افزایش مقادیر پیک جذب و SACA می‌شود و همچنین فرکانس دارای بیشترین جذب نیز به سمت محدوده فرکانس‌های بالاتر حرکت می‌کند. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، در نمونه ۷ MPP-SL به دلیل میزان تخلخل بسیار بالا (۱۲/۵۶ درصد) مقادیر جذب صوتی بسیار کم و قابل صرف‌نظر است. به همین علت آنچه با افزایش میزان تخلخل در MPP ها رخ می‌دهد در یک محدوده معینی تعریف می‌شود؛ به عبارتی افزایش میزان تخلخل تا حدی باعث افزایش فرکانس تشدید می‌شود و از یک مقدار به بعد موجب افت شدید جذب صوتی می‌گردد؛ این مسئله در نمودار ۷ MPP-SL به خوبی قابل مشاهده است. سایر مطالعات نشان می‌دهد افزایش میزان تخلخل صفحه MPP، باعث ایجاد فرکانس تشدید بالاتر برای ضریب جذب صوتی پیک می‌شود؛ به این خاطر که افزایش میزان تخلخل منجر به کاهش جرم کلی آکوستیکی همه حفرات می‌شود و بنابراین فرکانس تشدید که در آن پیک ضریب جذب صدا اتفاق می‌افتد را افزایش می‌دهد (۵۱).

در این مطالعه به منظور تعیین اثر فاصله هوایی پشت صفحه MPP بر روی ضریب جذب صوتی، فواصل ۳۰، ۵۰ و ۷۰ میلی‌متری انتخاب شدند. نمودارهای شکل ۷ نشان می‌دهد با افزایش عمق فاصله هوایی همه پیک‌های جذب صوت به فرکانس‌های پایین‌تر منتقل شدند. حفرات روی صفحه به‌عنوان جرم‌های آکوستیکی و هوای درون فاصله هوایی همچون فنر آکوستیکی عمل می‌کند، بنابراین یک سیستم جرم و فنر به وجود می‌آید. هرچه ضخامت فاصله هوایی افزایش یابد، سختی فنر (فاصله هوایی) کاهش می‌یابد، در نتیجه فرکانس دارای بیشترین جذب به سمت فرکانس‌های پایین‌تر حرکت می‌کند. زمانی که فرکانس صدا به فرکانس تشدید برسد، سختی فنر (فاصله هوایی) جرم آکوستیکی حفرات را از بین می‌برد که منجر به ایجاد پیک در جذب می‌شود (۱۷). مطالعات نشان می‌دهد، گستره حداکثر جذب صوتی با افزایش عمق فاصله هوایی،

Sakagami و همکاران افزایش ضخامت پانل MPP باعث انتقال پیک جذب به فرکانس‌های پایینی و کاهش شدید مقادیر ضریب جذب می‌شود. Sakagami چنین توجیه می‌کند که به سبب افزایش ضخامت صفحه، رزیستانس آکوستیکی MPP خیلی افزایش می‌یابد و در نتیجه پیک جذب به فرکانس‌های پایینی منتقل می‌شود (۴۸). به‌طور کلی، MPP های ضخیم‌تر در اصوات فرکانس پایین و MPP های نازک‌تر در اصوات با فرکانس بالا عملکرد بهتری دارند (۴۹). با مقایسه پهنای فرکانسی جذب در هر نمودار SAC، مشاهده می‌شود کاهش ضخامت صفحه باعث افزایش پهنای باند جذب می‌گردد. اگر یک سوراخ و حفره هوایی پشت آن را به‌عنوان یک رزوناتور هلم هولتز (HR) فرض کنیم آنگاه افزایش ضخامت صفحه MPP به‌مثابه افزایش طول گلوبی در HR است که این امر می‌تواند فرکانس تشدید هلم هولتز را کاهش داده و در نتیجه نمودار SAC به سمت فرکانس‌های پایین‌تر جابجا شود (۱۱). پژوهشی که توسط Mechnik صورت گرفت نشان داد با ثابت نگه‌داشتن پارامترهای  $d$  و  $b$ ، افزایش ضخامت پانل MPP موجب کاهش فرکانس تشدید می‌شود (۵۰).

بر اساس شکل شماره ۶، با افزایش قطر حفرات از ۰/۶ تا ۱ میلی‌متر، مقادیر پیک جذب و SACA کاهش می‌یابد و فرکانس دارای بیشترین جذب به سمت محدوده فرکانس‌های بالاتر حرکت می‌کند. به عبارتی در صورتی که ضخامت صفحه ( $t$ ) ثابت باشد، افزایش اندازه حفرات باعث ایجاد پیک SAC در فرکانس‌های بالایی و کاهش پهنای باند می‌شود. در مطالعه Qian و همکاران، با افزایش قطر حفرات از ۲۷ میکرون به ۸۰ میکرون، پیک جذب افزایش و گستره فرکانسی جذب کاهش می‌یابد؛ دلیل افزایش مقدار پیک جذب رزیستانس آکوستیکی بسیار بالا و جرم آکوستیکی کمتر ناشی از حفرات کوچک است. از طرفی حفرات بزرگ‌تر باعث افزایش در جرم آکوستیکی می‌گردد که باعث می‌شود گستره فرکانسی جذب در نمونه‌های با قطر حفرات بزرگ‌تر، کاهش یابد (۱۳).

مطابق با آنچه در مطالعات پیشین آمده است، در

با استفاده از فناوری پرینت ۳ بعدی صورت نگرفته است. در این پژوهش جاذب‌های MPP به کمک چاپ ۳ بعدی با ماده PLA/Corkwood صورت گرفت. ماده موردنظر حاوی ۳۰٪ الیاف چوب‌پنبه بوده و قادر است از طریق حفرات درونی باعث میرایی صوت و بهبود خواص جذبی جاذب‌های MPP مرسوم گردد. همچنین این مطالعه نشان داد می‌توان به کمک فناوری نوین چاپ ۳ بعدی، ساخت جاذب‌های الیاف طبیعی را تسریع کرد (۳۸،۵۲-۵۶). یافته‌ها نشان می‌دهد فرکانس تشدید صوتی به عمق فاصله هوایی پشت صفحه بستگی دارد. با تغییر فاصله هوایی می‌توان محل قرارگیری فرکانس تشدید را تعیین نمود. تغییر در عمق فاصله هوایی از ۳۰ میلی‌متر به ۷۰ میلی‌متر، فرکانس تشدید را بیش از ۳۵ درصد کاهش داد. به‌منظور ارتقاء پژوهش‌های بعدی در این زمینه، پیشنهاد می‌گردد در مطالعات آتی اثر تراکم داخلی (Infill Density) در جاذب‌های MPP تولیدشده توسط پرینتر ۳ بعدی مورد مطالعه قرار گیرد. به‌منظور ارائه تصویری دقیق از عملکرد این محصول در بازارهای تجاری و در مقایسه با سایر محصولات مشابه پیشنهاد می‌گردد به کمک تکنیک‌های اقتصاد مهندسی ارزیابی دقیقی از سودآوری محصول و ارزشیابی اقتصادی به‌منظور تعیین نرخ هزینه-اثربخشی (dB/\$) در طی چرخه عمر محصول در کاربردهای صنعتی و معماری صورت پذیرد. همچنین توصیه می‌گردد در مطالعات آتی جاذب‌های هیبریدی شامل MPP و ماده متخلخل طراحی و ساخته شود. در این مطالعه نیز همانند هر پژوهش دیگری محدودیت‌هایی وجود دارد که بایستی در تحقیقات آتی برطرف گردند؛ نظر به اینکه فناوری چاپ ۳ بعدی در کشور ما با محدودیت‌های جدی از قبیل عدم وجود دستگاه‌های مدرن، عدم دسترسی سریع به مواد مختلف روبرو است؛ لذا پرینت ۳ بعدی قطعات عمدتاً با هزینه بالا و کیفیت پایین صورت می‌گیرد. همچنین در این پژوهش با توجه به اینکه ماده فیلامانی PLA/Corkwood یک ماده وارداتی است، فرآیند درخواست و تهیه آن زمان‌بر و پرهزینه بود.

افزایش می‌یابد و همچنین حداکثر ضریب جذب صوتی نیز به فرکانس‌های پایین منتقل می‌شود. علت این امر این است که هر دو انتهای حفرات باز است و حفرات به‌عنوان جرم آکوستیکی عمل می‌کنند درحالی‌که سیال موجود در فاصله هوایی به‌عنوان یک فنر آکوستیکی عمل می‌کند. این یک تشدید جرم و فنر ایجاد می‌کند. ضریب جذب صوتی حداکثر زمانی که سختی سیال درون فاصله هوایی جرم حفرات را خنثی کند رخ می‌دهد. افزایش عمق فاصله هوایی، سختی فاصله هوایی را کاهش می‌دهد و در نتیجه پیک جذب را به سمت فرکانس‌های پایینی منتقل می‌نماید و همچنین گستره فرکانسی ضریب پیک جذب صوتی را پهن‌تر می‌کند (۵۱).

نوع بالای فیلامنت‌های مورد استفاده در چاپ ۳ بعدی این امکان را فراهم می‌کند تا بتوان جاذب‌های آکوستیکی را با خواص مکانیکی و خواص زیبایی ظاهری و خواص شیمیایی بسیار مختلفی تولید نمود. علاوه بر کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف (FRCs) می‌توان از کامپوزیت‌های تقویت‌شده با ذرات (PRCs)<sup>۱</sup>، نانوکامپوزت‌های پلیمری<sup>۲</sup>، فیلامنت‌های سرامیکی<sup>۳</sup>، فیلامنت‌های فلزی<sup>۴</sup>، فیلامنت‌های الیاف شیشه‌ای<sup>۵</sup> نیز استفاده نمود. به‌کارگیری هر یک از این مواد در کنار سایر خواص چاپ ۳ بعدی قادر خواهد بود جاذب‌های صوتی متنوعی برای طی گسترده‌ای از کاربردها تولید نماید لذا پیشنهاد می‌گردد در مطالعات آتی جاذب‌های صوتی ساخته‌شده از جنس‌های مختلف با درصد ترکیب‌های مختلف (نسبت جزء تقویت‌کننده به پلیمر بایندر) مورد مطالعه قرار گیرد.

### نتیجه‌گیری

بر اساس جستجوها، تاکنون مطالعه‌ای در زمینه ساخت و بررسی مشخصات صوتی پانل‌های MPP ساخته‌شده از کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف طبیعی (NFRC)

- 1 Particle Reinforced Composites
- 2 Polymer Nanocomposites
- 3 Polymer ceramic composites
- 4 Metal Filament
- 5 Glass Fiber Filament

بر خود لازم می‌دانند مراتب قدردانی و تشکر خود را از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه تربیت مدرس که شرایط لازم برای انجام این تحقیق را فراهم آوردند اعلام نمایند.

## REFERENCES

1. Liu J, Herrin DW. Enhancing micro-perforated panel attenuation by partitioning the adjoining cavity. *Applied Acoustics*. 2010;71(2):120–7.
2. Pirani M, Monazzam MR, Pourjandaghi SQ. Correlation Between the Acoustic and Cell Morphology of Polyurethane/Silica Nanocomposite Foams: Effect of Various Proportions of Silica at Low Frequency Region . *Journal of Health and Safety at Work*. 2021;11(1):1–12. [Persian]
3. 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;11(4):544–55. [Persian]
4. Babmiri M, Derakhshan J, Motamedzade M, Golmohammadi R, Farhadyan M, Karimi M, et al. The Influences of Individual Sensitivity, Sound Frequency, and Sound Pressure Level on Cognitive Performances of Students. *International Journal of Occupational Hygiene*. 2018;10(1):39-45. [Persian]
5. Yang Y, Li B, Chen Z, Sui N, Chen Z, Xu T, et al. Sound insulation of multi-layer glass-fiber felts: Role of morphology. *Textile Research Journal*. 2017;87(3):261–9.
6. Yang M, Sheng P. Sound Absorption Structures: From Porous Media to Acoustic Metamaterials. *Annu Rev Mater Res*. 2017;47(1):83–114.
7. Oliva D, Hongisto V. Sound absorption of porous materials - Accuracy of prediction methods. *Applied Acoustics*. 2013;74(12):1473–9.
8. Voronina N. Acoustic properties of fibrous materials. *Applied Acoustics*. 1994;42(2):165–74.
9. Liu J, Hua X, Herrin DW. Estimation of effective parameters for microperforated panel absorbers and applications. *Applied Acoustics*. 2014;75(1):86–93.
10. Kang J, Brocklesby MW. Feasibility of applying micro-perforated absorbers in acoustic window systems. *Applied Acoustics*. 2005;66(6):669–89.

## تشکر و قدردانی

این مقاله حاصل بخشی از نتایج پایان‌نامه کارشناسی ارشد نویسنده اول در رشته مهندسی بهداشت حرفه‌ای در دانشگاه تربیت مدرس است. نویسندگان این مقاله

11. Xie S, Wang D, Feng Z, Yang S. Sound absorption performance of microperforated honeycomb metasurface panels with a combination of multiple orifice diameters. *Applied Acoustics*. 2020;158:107046.
12. Maa D. Practical absorption limits of MPP absorbers. *ACTA ACUSTICA-PEKING-*. 2006;31(6):481.
13. Qian YJ, Kong DY, Liu SM, Sun SM, Zhao Z. Investigation on micro-perforated panel absorber with ultra-micro perforations. *Applied Acoustics*. 2013;74(7):931–5.
14. 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. *Applied Acoustics*. 2019;146:409-19.
15. Mehrzad S, Taban E, Soltani P, Samaei SE, Khavanin A. Sugarcane bagasse waste fibers as novel thermal insulation and sound-absorbing materials for application in sustainable buildings. *Building and Environment*. 2022;211:108753.
16. Ehsan Samaei S, Berardi U, Taban E, Soltani P, Mohammad Mousavi S. Natural fibro-granular composite as a novel sustainable sound-absorbing material. *Applied Acoustics*. 2021;181:108157.
17. Chin DDVS, Yahya MN bin, Che Din N bin, Ong P. Acoustic properties of biodegradable composite micro-perforated panel (BC-MPP) made from kenaf fibre and polylactic acid (PLA). *Applied Acoustics*. 2018;138:179–87.
18. Bansod P v, 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.
19. Fouladi MH, Nor MJM, Ayub M, Leman ZA. Utilization of coir fiber in multilayer acoustic absorption panel. *Applied Acoustics*. 2010;71(3):241–9.
20. Berardi U, Iannace G. Acoustic characterization of natural fibers for sound absorption applications. *Building and Environment*. 2015;94:840–52.



21. Taban E, Valipour F, Abdi DD, Amininasab S. Mathematical and experimental investigation of sound absorption behavior of sustainable kenaf fiber at low frequency. *Int J Environ Sci Technol*. 2021;18(9):2765-80.
22. Lu CH, Chen W, Zhu YW, Du SZ, Liu ZE. Comparison Analysis and Optimization of Composite Micro-perforated Absorbers in Sound Absorption Bandwidth. *Acoustics Australia*. 2018;46(3):305-15.
23. Qian YJ, Cui K, Liu SM, Li ZB, Kong DY, Sun SM. Numerical study of the acoustic properties of micro-perforated panels with tapered hole. *Noise Control Eng J*. 2014;62(3):152-9.
24. Asdrubali F, Pispola G. Properties of transparent sound-absorbing panels for use in noise barriers. *J Acoust Soc Am*. 2007;121(1):214-21.
25. Mosa AI, Putra A, Ramlan R, Esraa AA. Wideband sound absorption of a double-layer microperforated panel with inhomogeneous perforation. *Applied Acoustics*. 2020;161:107167.
26. Ingard KU. Notes on sound absorption technology (Book). Poughkeepsie, NY: Noise Control Foundation, 1994.
27. Chin Vui Sheng DD, Yahya MN bin, Che Din N bin. Sound Absorption of Microperforated Panel Made from Coconut Fiber and Polylactic Acid Composite. *Journal of Natural Fibers*. 2020;1-11.
28. Peças P, Carvalho H, Salman H, Leite M. Natural Fibre Composites and Their Applications: A Review. *Journal of Composites Science*. 2018;2(4):66.
29. Ingard U. On the Theory and Design of Acoustic Resonators. *J Acoust Soc Am*. 1953;25(6):1037-61.
30. Sakagami K, Morimoto M, Yairi M. A note on the effect of vibration of a microperforated panel on its sound absorption characteristics. *Acoust Sci Technol*. 2005;26(2):204-7.
31. Sakagami K, Morimoto M, Koike W. A numerical study of double-leaf microperforated panel absorbers. *Applied Acoustics*. 2006;67(7):609-19.
32. Sakagami K, Matsutani K, Morimoto M. Sound absorption of a double-leaf micro-perforated panel with an air-back cavity and a rigid-back wall: Detailed analysis with a Helmholtz-Kirchhoff integral formulation. *Applied Acoustics*. 2010;71(5):411-7.
33. Liu Z, Zhan J, Fard M, Davy JL. Acoustic measurement of a 3D printed micro-perforated panel combined with a porous material. *Measurement: Measurement (Lond)*. 2017;104:233-6.
34. Yang, Bai, Zhu, Kiran, An, Chua, et al. 3D Printing of Polymeric Multi-Layer Micro-Perforated Panels for Tunable Wideband Sound Absorption. *Polymers*. 2020;12(2):360.
35. Gao N, Hou H. Sound absorption characteristic of micro-helix metamaterial by 3D printing. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*. 2018;8(2):63-7.
36. Liu Z, Zhan J, Fard M, Davy JL. Acoustic properties of a porous polycarbonate material produced by additive manufacturing. *Materials Letters*. 2016;181:296-9.
37. Yuan S, Chua CK, Zhou K. 3D-Printed Mechanical Metamaterials with High Energy Absorption. *Advanced Materials Technologies*. 2019;4(3):1800419.
38. Ngo TD, Kashani A, Imbalzano G, Nguyen KTQ, Hui D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. Vol. 143, *Compos B Eng*. Elsevier Ltd; 2018. p. 172-96.
39. Abd Alsaheb RA, Aladdin A, Othman NZ, Abd Malek R, Leng OM, Aziz R, et al. Recent applications of polylactic acid in pharmaceutical and medical industries. *J Chem Pharm Res*. 2015;7:51-63.
40. Sekar V, Fouladi MH, Namasivayam SN, Sivanesan S. Additive Manufacturing: A Novel Method for Developing an Acoustic Panel Made of Natural Fiber-Reinforced Composites with Enhanced Mechanical and Acoustical Properties. *Journal of Engineering*. 2019;2019.
41. Gironi F, Piemonte V. Bioplastics and petroleum-based plastics: strengths and weaknesses. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 2011;33(21):1949-59.
42. ZORTRAX.COM. Zortrax M200. Available from: <https://zortrax.com/3d-printers/m200/>
43. Taban E, Amininasab S, Soltani P, Berardi U, Abdi DD, Samaei SE. Use of date palm waste fibers as sound absorption material. *Journal of Building Engineering*. 2021;41:102752.
44. Cobo P, Simón F. Multiple-layer microperforated panels as sound absorbers in buildings: A review. Vol. 9, *Buildings*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI); 2019. p. 53.
45. Ning J, Geng Q, Arunkumar MP, Li Y. Wide absorption bandwidth of a light composite absorber based on micro-perforated sandwich panel. *Applied Acoustics*. 2021;174:107735.

46. Wang C, Liu X. Investigation of the acoustic properties of corrugated micro-perforated panel backed by a rigid wall. *Mech Syst Signal Process*. 2020;140:106699.
47. Cox T, D'Antonio P. *Acoustic Absorbers and Diffusers: Theory, Design and Application*. 3rd ed. CRC Press; 2017.
48. Sakagami K, Morimoto M, Yairi M, Minemura A. A pilot study on improving the absorptivity of a thick microperforated panel absorber. *Applied Acoustics*. 2008;69(2):179–82.
49. Wong Y-S, Sekar V, Eh Noum SY, Sivanesan S. Effect of Thickness and Perforation Size on the Acoustic Absorption Performance of a Micro-Perforated Panel. Chun KS, Leng CH, Myan FWY, King PS, Zaman N, editors. *MATEC Web of Conferences*. 2021;335:03016.
50. MECHANIK A, HAMBURG ABT, WELTIN D, GLEINE D. Investigation of the potential of micro perforated panel absorber in aircraft noise reduction.
51. Liu Z, Zhan J, Fard M, Davy JL. Acoustic properties of multilayer sound absorbers with a 3D printed micro-perforated panel. *Applied Acoustics*. 2017;121:25–32.
52. Wong K v, Hernandez A. A review of additive manufacturing. *International scholarly research notices*. 2012.
53. Johnston W, Sharma B. Additive manufacturing of fibrous sound absorbers. *Additive Manufacturing*. 2021;41:101984.
54. Akiwate DC, Date MD, Venkatesham B, Suryakumar S. Acoustic properties of additive manufactured narrow tube periodic structures. *Applied Acoustics*. 2018;136:123–31.
55. Goh GD, Yap YL, Agarwala S, Yeong WY. Recent progress in additive manufacturing of fiber reinforced polymer composite. *Advanced Materials Technologies*. 2019;4(1):1800271.
56. Akiwate DC, Date MD, Venkatesham B, Suryakumar S. Acoustic characterization of additive manufactured perforated panel backed by honeycomb structure with circular and non-circular perforations. *Applied Acoustics*. 2019;155:271–9.