

ORIGINAL RESEARCH PAPER

## Effect of Production and Application Parameters on Acoustic Performance of Wood Wool Cement Panels

Ali Jafari<sup>1</sup>, Mohammad Reza Monazzam Esmaeelpour<sup>1\*</sup>, Fardin Zandsalimi<sup>2</sup>

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

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

Received: 17 - 2 - 2024

Accepted: 9 - 6 - 2024

### ABSTRACT

**Introduction:** A wood-wool cement panel (WWCP) is wood wool combined with Portland cement mortar. This environmentally friendly acoustic material can be used as a thermal insulator and fire-resistance material with desired mechanical properties. This study aimed to determine the mechanism by which WWCP absorbs sound and the effect of production and application parameters on absorption

**Material and Methods:** The samples were prepared from poplar wood wool and white Portland cement as a binder in two Cement Fiber Ratios (CFR), namely 2:0.7 and 2:0.95, with bulk densities of 400, 500, and 600 kg/m<sup>3</sup> and thicknesses of 2 and 4 cm. Three layers of backing: air, polyurethane foam, and glass wool were examined separately. Acoustic absorption coefficient was measured using an impedance tube based on ISO 10534-2.

**Results:** The highest increase in the average absorption coefficient due to the increase in thickness was observed for the sample with a density of 400 kg/m<sup>3</sup> and CFR = 2: 0.95, equal to 0.3. Increasing the bulk density to 500 kg/m<sup>3</sup> for most samples and in the high-frequency range led to rising absorption efficiency. The optimal backing effect was due to the placement of 4 cm of polyurethane foam behind the sample, which in both thicknesses led to an absorption peak with an absorption coefficient higher than 0.95 at frequencies between 400 and 500 Hz. Selected samples showed that painting WWCPs led to a limited drop in absorption coefficients at high frequencies, comparing the before and after painting results with oil-based paints.

**Conclusion:** Tuning the absorption frequencies of these absorbers can be achieved by altering factors such as the thickness or density. It has been demonstrated that the effects of thickness and bulk density on the sound absorption of WWCP are related to each other. Concerning the CFR values, increasing the density did not significantly affect absorption in the two frequency ranges.

**Keywords:** Wood-wool cement, Porous materials, Acoustic panel, Sound absorption

### HOW TO CITE THIS ARTICLE

Jafari A, Monazzam MR, Zandsalimi F. Effect of production and application parameters on acoustic performance of wood wool cement panels. *J Health Saf Work.* 2024; 14(2): 367-384.

## 1. INTRODUCTION

Porous materials possess a network of interconnected and irregular cavities and channels that can dissipate sound energy, which is why these materials can cause sufficient sound absorption. The search is for more environmentally friendly acoustic materials than mineral and synthetic ones. Wood wool, a natural fiber combined with

a matrix of Portland cement mortar, is an acoustic absorber material named wood-wool cement panel (WWCP). A literature review indicates that little attention has been paid to the effect of WWCP characteristics on sound absorption across a broad spectrum of frequencies. This study aimed to determine the mechanism by which WWCP absorbs sound and the effect of production and application parameters on that absorption.

\* Corresponding Author Email: [esmaelm@sina.tums.ac.ir](mailto:esmaelm@sina.tums.ac.ir)

## 2. MATERIAL AND METHODS

Initially, poplar wood logs were cut into blocks of 50 cm in length and stored for six months to allow the tree sap, primarily composed of sugars, to leach out. With the assistance of a special grater machine, wood wools of a particular length, width, and thickness were produced. In order to prepare the binder mortar, Portland white cement for each sample was mixed with sodium silicate powder as an accelerator and water in amounts of 5% and 40% of cement weight, respectively. For fabricating WWCP samples, the mixed raw materials were molded under pressure by a hydraulic press. Then, samples were de-molded after 24 hours. Samples were made in two thicknesses of 2 and 4 cm, three bulk densities of 400, 500, and 600 kg/m<sup>3</sup>, and two different CFR (2: 0.7 and 2: 0.95) to investigate the effect of the thickness, bulk density and cement

to fiber ratio (CFR) on the acoustic absorption coefficient. Measured sound absorption coefficients were obtained as a function of frequency in two ranges of low (63-500 Hz) and high (630-6300 Hz) frequencies. Acoustic absorption coefficient measurement was done according to ISO 10534-2 standards and using an impedance tube device.

## 3. RESULTS AND DISCUSSION

The effect of thickness and bulk density on the absorption coefficient ultimately depends on each other; that is, to maintain the optimum absorption coefficient, the other must decrease by increasing one. The impact of bulk density on the acoustic absorption of WWCP samples with CFR = 2:0.95 is depicted in Fig. 1. To compare the impact of CFR on the acoustic absorption of WWCP samples in this study, Table 1 lists the Sound Absorption

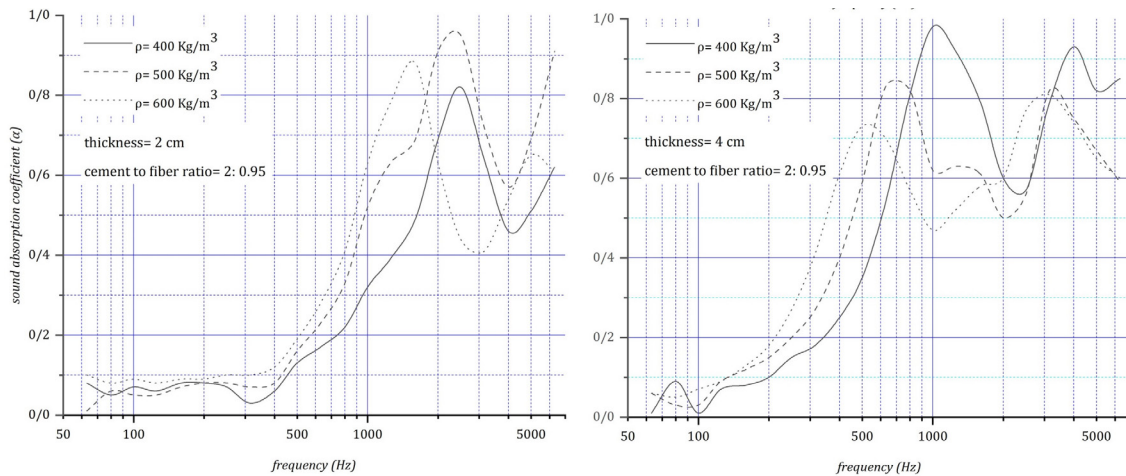


Fig. 1: Effect of bulk density on sound absorption of WWCP samples with CFR = 2: 0.95

Table 1: Effect of CFR on average sound absorption of WWCP samples

Thickness (cm)	Bulk density (Kg/m <sup>3</sup> )	CFR	Average sound absorption coefficient (α)	
			Low frequency 63-500 Hz	high frequency 500-6300 Hz
2	400	2:0.7	0.11	0.4
		2:0.95	0.07	0.48
	500	2:0.7	0.07	0.46
		2:0.95	0.07	0.65
	600	2:0.7	0.09	0.58
		2:0.95	0.1	0.57
4	400	2:0.7	0.15	0.67
		2:0.95	0.13	0.78
	500	2:0.7	0.14	0.77
		2:0.95	0.19	0.67
	600	2:0.7	0.21	0.66
		2:0.95	0.26	0.64

Average (SAA) divided into two frequency ranges. As seen in this table, changing the CFR value from 2:0.7 to 2:0.95 in the low-frequency range did not affect any samples' SAA. Increasing CFR has not led to a significant and consistent change in SAA at high frequencies.

According to the current study's findings (Fig. 2), all three layers placed behind the selected WWCP samples, including 4 cm of air, PU foam, and glass wool, had a relatively similar effect on sound absorption. A layer of the mentioned materials placed behind the selected samples has only displaced peak absorption frequencies towards higher frequencies at frequencies higher than 500 Hz. In contrast, these layers have significantly increased the average absorption coefficient at low frequencies and even produced an absorption peak at these frequencies in both thicknesses.

Graphs showing the absorption coefficients of WWCP samples before and after painting are provided in Fig. 3. As can be seen, painting the samples has led to a drop in sound absorption at frequencies higher than 2000 Hz. In thicker samples, this effect is less pronounced. In this case, the loss of sound absorption may have been caused by a reduction in the surface porosity of the absorbent material. The present study confirms the results of studies involving the painting's effect on other absorbers. In their research, Bozkurt and Demirkale (2020) used colorless plaster layers to increase the sound absorption coefficient of a composite absorber produced from perlite plaster.

Looking at the sound absorption graphs of the studied samples, we can see that the sound absorption pattern in WWCP is more of a narrow band type and more similar to resonant or reactive

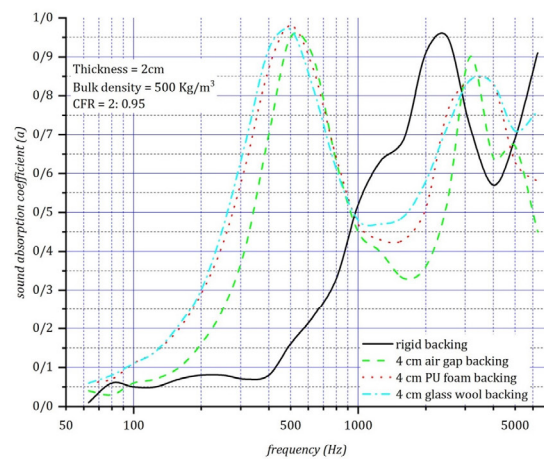
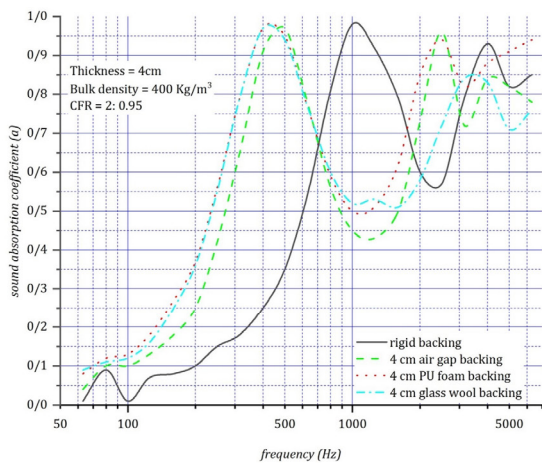


Fig. 2: Effect of backing layer on sound absorption of selected WWCP samples

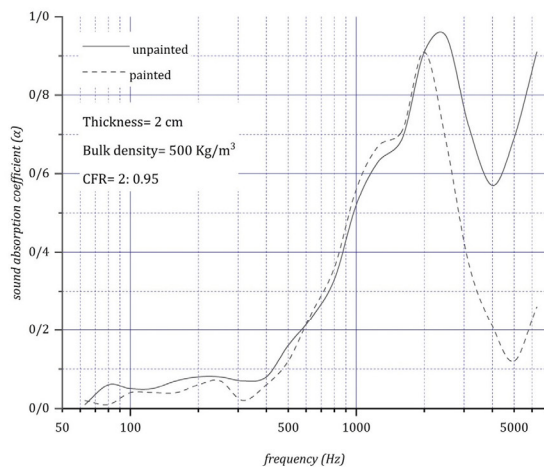
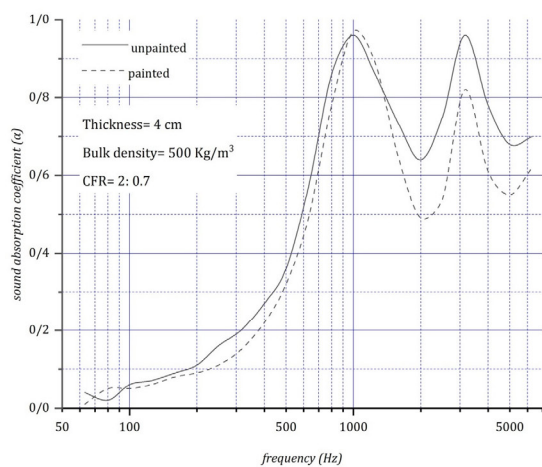


Fig. 3: Sound absorption of selected WWCP samples before and after painting

absorbers. This can likely be attributed to the stiffer nature of WWCP, which results in a resonance frequency that gives rise to the absorption peaks. Although the bandwidth related to the maximum absorption coefficients is limited in such absorbers, it is possible to achieve sound absorption at low frequencies with smaller thicknesses compared to porous absorbers.

#### 4. CONCLUSIONS

WWCP is a porous material, but its absorption pattern is similar to that of reactive absorbers. Consequently, such a material can be tuned to control a specific narrow-band noise if its physical characteristics change correctly. The influence of both thickness and bulk density on the WWCP absorption coefficient depends on each other. So, one increases more than a particular value, and the other must decrease to

prevent falling in the absorption coefficient. It was shown that the weight ratio of cement to fibers in the range of 2:0.7 to 2:0.95 has no significant effect on the sound absorption coefficient of WWCP samples. However, a back layer of air or a soft porous material increases the absorption of low frequencies. Painting the surface of these panels reduces the absorption coefficient at high frequencies. Among the samples investigated, the thickness of 4 cm, bulk density of 500 Kg/m<sup>3</sup>, and CFR= 2: 0.7 offers the highest sound absorption in the frequency range of 63 to 6300 Hz.

#### ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to sincerely thank the respected Research Vice-Chancellor of Tehran University of Medical Sciences for providing the essential support and resources that made this research possible.

## تأثیر مولفه‌های تولید و کاربرد بر کار آبی آکوستیکی پنل‌های رشته چوب - سیمان

علی جعفری<sup>۱</sup>، محمدرضا منظم اسمعیل پور<sup>۱\*</sup>، فردین زندسلیمی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران  
<sup>۲</sup>گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی کردستان، سنندج، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۲۹، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۳/۲۰

## چکیده

**مقدمه:** رشته‌های چوب در ترکیب با ملات سیمان پرتلند، جاذب پنل رشته چوب - سیمان (WWCP) را می‌سازند. این ماده آکوستیکی سازگار با محیط زیست می‌تواند به عنوان عایق حرارتی و نیز مقاوم در برابر حریق با خواص مکانیکی مطلوب استفاده شود. هدف از این مطالعه تعیین نوع مکانیسم جذب صدای WWCP و نیز تعیین تأثیر پارامترهای تولید و کاربرد بر روی فرآیند جذب می‌باشد.

**روش کار:** نمونه‌ها از رشته‌های چوب و سیمان پرتلند، در دو نسبت سیمان به الیاف و سه دانسیته بالک متفاوت و نیز در ضخامت‌های ۲ و ۴ سانتی‌متر تهیه شدند. سه حالت قرارگیری بر روی سطوح، شامل قرارگیری همراه با یک لایه هوا یا فوم پلی‌اورتان و یا پشم شیشه به طور جداگانه مورد اندازه‌گیری قرار گرفتند. تأثیر رنگ‌آمیزی سطحی نیز مورد بررسی قرار گرفت. اندازه‌گیری ضریب جذب صوتی با استفاده از دستگاه لوله امیدانس براساس استاندارد ISO 10534-2 در محدوده فرکانسی ۶۳ تا ۶۳۰۰ هرتز انجام شد.

**یافته‌ها:** یافته‌های این پژوهش نشان داد که افزایش ضخامت نمونه‌ها و نیز افزایش دانسیته بالک تا ۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب برای اکثر نمونه‌ها منجر به افزایش کارایی جذب می‌شود. در حالی که ادامه افزایش دانسیته تا مقدار ۶۰۰ موجب کاهش ضرایب جذب اغلب نمونه‌ها شد. بهینه‌ترین حالت لایه‌گذاری، قرار دادن ۴ سانتی‌متر فوم پلی‌اورتان در پشت نمونه بود که موجب اضافه شدن یک پیک جذبی شد. در بررسی تأثیر رنگ روغنی نشان داده شد که رنگ‌آمیزی در فرکانس‌های بالا منجر به افت ضرایب جذب می‌شود؛ به گونه‌ای که مشخصاً در فرکانس ۵۰۰۰ هرتز حدود ۰/۶ کاهش در مقدار ضریب جذب نمونه با ضخامت ۲ سانتی‌متر اتفاق افتاد.

**نتیجه‌گیری:** مکانسیم جذب صوت WWCP بیشتر به مکانسیم‌های تشدید یا ری‌اکتیو شباهت دارد. با توجه به الگوی جذبی باند باریک در این نوع جاذب، تنظیم بازه‌های فرکانسی جذب حداکثری با تغییر عواملی مانند ضخامت یا دانسیته بالک امکان‌پذیر است.

**کلمات کلیدی:** رشته چوب - سیمان، مواد متخلخل، پنل آکوستیک، جذب صدا



### مقدمه

بر اساس گزارش‌های سازمان جهانی بهداشت (WHO)، آلودگی صوتی به عنوان یکی از عوامل سکتی قلبی و نیز اختلال خواب نقش دارد. در واقع، زندگی روزمره و استراحت افراد می‌تواند تحت تأثیر مواجهه با محیط‌های پر سر و صدا قرار گیرد (۱، ۲). به منظور کنترل سطوح بالای صدا می‌توان از تجهیزات مختلفی همچون صداخفه‌کن‌های فعال و ری‌اکتیو، موانع، محافظه‌های آکوستیکی و جاذب‌های صدا استفاده کرد (۳-۶). به دلیل هزینه کمتر و راحتی در اجرا، استفاده از مواد جاذب به عنوان یکی از روش‌های غیرفعال کنترل صدا و حتی ارتعاش نسبت به روش‌های فعال رواج بیشتری یافته است (۷). از سوی دیگر، جاذب‌های صدا یکی از عناصر مهم در سیستم‌های کنترل صدای صنعتی و آکوستیک معماری برای کاهش انرژی صوتی بازتابشی از طریق اثر ویسکو-گرمایی<sup>۱</sup> می‌باشند (۸).

مواد متخلخل دارای شبکه‌ای از حفره‌ها و کانال‌های بهم پیوسته و نامنظم هستند که می‌توانند منجر به استهلاک انرژی صوتی شوند، از همین رو این مواد می‌توانند به عنوان جاذب صدا عمل کنند (۹). در حال حاضر بخشی از تلاش محققان در راستای جستجوی مواد آکوستیک سازگارتر با محیط زیست نسبت به مواد معدنی و مصنوعی می‌باشد (۱۰). ارزیابی‌های چرخه حیات (Life Cycle Assessment)، نشان داده‌اند که مواد طبیعی در مقایسه با مواد جاذب صوت تجاری رایج همچون پشم شیشه و پشم معدنی، مقدار CO<sub>2</sub> معادل بسیار کمتری تولید می‌کنند (۱۱، ۱۲). به طور خاص، الیاف طبیعی به دلیل برخورداری از دانسیته پائین، پردازش آسان، پایداری بالا، حداقل تأثیرات سلامتی، دسترسی راحت در مقادیر زیاد و قیمت پایین، توجه روزافزونی را برای استفاده به عنوان جاذب صوتی به خود جلب کرده‌اند (۱۳، ۱۴). اگرچه، قابل ذکر است که برخی از این الیاف در حال توسعه هنوز به خواص فیزیکی و مکانیکی قابل قبول جهت کاربرد نرسیده‌اند (۱۵).

استفاده از چوب برای اهداف آکوستیکی از سابقه‌ای طولانی مدت برخوردار است (۱۶، ۱۷). رشته‌های چوب به عنوان نوعی الیاف طبیعی در ترکیب با ماتریکسی از ملات سیمان پرتلند به عنوان یک ماده جاذب صدا به نام پانل رشته چوب - سیمان<sup>۲</sup> (WWCP) شناخته شده است (۱۸). ریبرو و همکاران (۲۰۲۱) تأثیر WWCP را بر پارامترهای زمان بازآوایی و شاخص انتقال کلام در یک کلاس درس نشان دادند. براساس نتایج این پژوهش، اجرای این پنل‌ها بر روی سطوح کلاس، مقادیر شاخص انتقال کلام را افزایش می‌دهد (۱۹). WWCP علاوه بر جذب صدا، خواص مکانیکی مطلوبی داشته و می‌تواند به عنوان عایق حرارتی و ماده مقاوم در برابر حریق مورد استفاده قرار گیرد (۲۰). تاکنون مطالعات بسیاری برای بررسی خواص مکانیکی WWCP و همچنین سازگاری سیمان و چوب انجام شده است (۲۱-۲۳). با این حال، پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهند که بررسی اندکی بر روی تأثیر ویژگی‌های WWCP بر جذب صدای آن خصوصاً در یک طیف فرکانسی گسترده صورت گرفته است (۲۰، ۲۴، ۲۵). باترمن و همکاران (۲۰۱۸) نشان دادند که ضخامت و دانسیته بالک برخی از نمونه‌های تجاری WWCP بر جذب صدا در محدوده فرکانسی ۲۰۰ تا ۲۵۰۰ هرتز تأثیر می‌گذارد. علاوه بر این، ایشان مدل Johnson-Champoux-Allard (JCA) را مناسب‌ترین مدل جهت شبیه‌سازی جذب صدای WWCP یافتند (۲۶). اثر برخی عوامل از جمله ضخامت، چگالی، طول الیاف چوب و نسبت سیمان به الیاف بر خاصیت جذب صدا در نوع دیگری از پنل‌های جاذب چوبی که از ملات منیزیمی به عنوان ماتریکس ساخته می‌شود توسط نا و همکاران در سال ۲۰۱۸ مورد مطالعه قرار گرفت (۲۷). باید توجه داشت که تحقیقات قبلی در این زمینه، جذب صوتی را در محدوده فرکانسی کمتر از ۲۵۰۰ هرتز بررسی کرده است؛ در حالی که بسیاری از سطوح صدای آسیب‌رسان بالاخص در محیط‌های صنعتی و شغلی فرکانس‌های بالاتر از ۲۰۰۰ هرتز را نیز شامل می‌شوند (۲۸، ۲۹) و به

## 2. Wood-wool cement panel

## 1. Visco-thermal

جدول ۱: میانگین ابعاد رشته‌های چوب

طول (سانتی‌متر)	پهنا (میلی‌متر)	ضخامت (میلی‌متر)
۳۵/۶۵ ± ۸/۸۹	۱/۳۵ ± ۰/۳۴	۰/۴۱ ± ۰/۰۳۵

هر نمونه با پودر سیلیکات سدیم به عنوان تسریع‌کننده و آب به ترتیب در نسبت‌های ۵٪ و ۴۰٪ وزن سیمان مخلوط شدند (۳۵).

کامپوزیت‌ها به صورت دستی و با ترکیب رشته‌های چوب و ملات در دو CFR متفاوت یعنی ۲ به ۰/۹۵ و ۲ به ۰/۷ تهیه شدند. جهت انتخاب دو CFR مذکور، ابتدا براساس بررسی مطالعات پیشین و روش‌های ساخت موجود مشخص شد که CFR معمول برای ساخت WWCP حدوداً ۲ به ۱ می‌باشد (۳۵، ۳۶). بر این اساس و همچنین ساخت و اندازه‌گیری چندین نمونه اولیه (پایلوت) نتیجه‌گیری شد که استفاده از مقادیر CFR ۲ به ۰/۹۵ و ۲ به ۰/۷ با مواد اولیه موجود در ایران به ساخت نمونه‌هایی منجر خواهد شد که در عین برخورداری از چسبندگی کافی، ضریب جذب صدای مناسبی داشته باشند. لازم به ذکر است که در صورت بالا رفتن بیش از حد نسبت سیمان، تخلخل نمونه بسیار کاهش خواهد یافت و نمونه از حالت جاذب خارج خواهد شد. در مقابل با افزایش بیش از حد نسبت رشته‌های چوب نیز چسبندگی و استحکام نمونه کاهش خواهد یافت. مقادیر معینی از مخلوط نهایی با دانسیته‌های بالک ۴۰۰، ۵۰۰ و ۶۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و ضخامت‌های ۲ و ۴ سانتی‌متر، با استفاده از قالب‌های لوله‌ای با قطرهای برابر با لوله‌های امپدانس قالب‌گیری شدند. قالب‌ها به مدت ۲۴ ساعت تحت فشار ۱۵۰ تا ۲۰۰ بار تحت نیروی دستگاه پرس سرد هیدرولیکی پرس شدند. این زمان برای تکمیل فرآیند گیرش اولیه سیمان کافی است و پس از آن می‌توان نمونه‌ها را از قالب خارج کرد. سپس، نمونه‌ها برای گیرش نهایی سیمان و رسیدن به حداکثر مقاومت مکانیکی، حدود ۳۰ روز تحت دما و فشار طبیعی نگهداری شدند (۳۷). در طول این فرآیند، میزان رطوبت نمونه‌ها به کمتر از پنج درصد کاهش یافتند.

طور کلی امکان بروز اختلالات شنوایی برای امواج صوتی فرکانس بالا بیشتر است (۳۰، ۳۱).

بر این اساس، یکی از اهداف این مطالعه، تعیین نوع مکانیسم جذب صدای WWCP از طریق الگوی ضریب جذب صوت آن در یک محدوده فرکانسی وسیع از ۶۳ الی ۶۳۰۰ هرتز است. به علاوه، تأثیر پارامترهای مهم تولید و کاربرد از جمله ضخامت، دانسیته بالک، نسبت وزنی سیمان به الیاف<sup>۱</sup> (CFR)، رنگ‌آمیزی و لایه‌گذاری در پشت نمونه (backing) بر روی جذب صدا و نیز امکان تنظیم فرکانس‌های جذب حداکثری در مطالعه حاضر مورد بررسی قرار گرفته است.

## روش کار

### ساخت نمونه‌ها

در ابتدا، الوار چوب صنوبر به طول ۵۰ سانتی‌متر برش خورده و به مدت شش ماه انبار شدند تا صمغ چوب، که عمدتاً از مواد قندی تشکیل شده است، خارج شود. با کمک یک دستگاه رنده مخصوص، رشته‌های چوب با طول، عرض و ضخامت خاص تولید شد (جدول ۱). مهم‌ترین عامل در انتخاب نوع چوب برای پانل‌های سیمانی، سازگاری آن با فرآیند گیرش سیمان<sup>۲</sup> است (۳۲). مطالعات متعدد نشان داده‌اند که چوب صنوبر بهترین سازگاری را با سیمان داشته و می‌تواند خواص مکانیکی بهتری برای پانل نهایی ایجاد کند (۳۳). جهت خروج بیشتر مواد قندی و شیرهای چوب که به شدت هیدراتاسیون سیمان را محدود می‌کنند، خیساندن دو ساعته رشته‌های چوب در محلول آبی کلسیم کلرید با غلظت کم به عنوان یک روش پیش‌تصفیه انجام گرفت (۳۴). برای تهیه ملات همبند، سیمان سفید پرتلند برای

1. Cement to fiber rRatio
2. Cement setting

جدول ۲: مشخصات فیزیکی نمونه‌های WWCP

شماره نمونه	ضخامت (cm)	دانسیتته بالک ( $Kg/m^3$ )	CFR
۱	۲	۴۰۰	۰/۷ : ۲
۲	۲	۴۰۰	۰/۹۵ : ۲
۳	۲	۵۰۰	۰/۷ : ۲
۴	۲	۵۰۰	۰/۹۵ : ۲
۵	۲	۶۰۰	۰/۷ : ۲
۶	۲	۶۰۰	۰/۹۵ : ۲
۷	۴	۴۰۰	۰/۷ : ۲
۸	۴	۴۰۰	۰/۹۵ : ۲
۹	۴	۵۰۰	۰/۷ : ۲
۱۰	۴	۵۰۰	۰/۹۵ : ۲
۱۱	۴	۶۰۰	۰/۷ : ۲
۱۲	۴	۶۰۰	۰/۹۵ : ۲



شکل ۱: فلوچارت ساخت نمونه‌ها و اندازه‌گیری ضریب جذب

سانتی‌متر فوم پلی‌اورتان (PU) با دانسیته ۳۰ کیلوگرم بر مترمکعب و ۴ سانتی‌متر پشم شیشه مورد اندازه‌گیری قرار گرفتند. هر یک از این لایه‌های مذکور به‌طور مجزا به همراه نمونه منتخب در داخل امپدانس تیوب به شکلی جاگذاری شدند که لایه هوا یا مواد نرم‌تر در پشت نمونه یعنی در تماس با پلاگ سخت امپدانس تیوب و نمونه WWCP در سمت بلندگو قرار گیرد.

در راستای بررسی تاثیر رنگ بر روی کارایی جذب صدا، رنگ روغنی با استفاده از دستگاه اسپری روی سطح نمونه‌های منتخب پاشیده شد. با توجه به سطح بسیار متخلخل نمونه‌ها، امکان ایجاد یک لایه رنگ یکنواخت

در جدول ۲، مشخصات دوازده نمونه مورد آزمایش ارائه شده است. در مرحله اول اندازه‌گیری، ضریب جذب صدای این ۱۲ نمونه اندازه‌گیری شد و براساس مقایسه مقادیر به دست آمده، نمونه‌های با جذب بالاتر برای بررسی تاثیر لایه‌گذاری پشتی و رنگ‌آمیزی در مرحله دوم اندازه‌گیری انتخاب شدند (نمونه‌های منتخب). شکل ۱، فرآیند ساخت نمونه‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به ساختار سخت WWCP، راندمان جذب را می‌توان با افزودن لایه‌ای از هوا یا مواد نرم‌تر در پشت نمونه بهبود بخشید. نمونه‌های منتخب جهت بررسی اثر backing بر جذب، در لوله امپدانس به همراه ۴ سانتی‌متر هوا،



نیز، از مقادیر ضریب جذب ۱/۳ اکتاوباند، میانگین حسابی گرفته شد.

### ≡ یافته‌ها

#### ضخامت

شکل ۲، ضرایب جذب را برای نمونه‌هایی با CFR ۲ به ۰/۷ در دو ضخامت ۲ و ۴ سانتی‌متر و سه دانسیته بالک متفاوت نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، افزایش ضخامت، علاوه بر افزایش ضریب جذب در اکثر فرکانس‌های محدوده ۶۳۰ تا ۶۳۰۰ هرتز، منجر به اضافه شدن یک پیک جذبی در دانسیته‌های ۴۰۰ و ۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب شده است. افزایش ضخامت در محدوده فرکانس پایین (۶۳ تا ۵۰۰ هرتز) باعث افزایش ضریب جذب فرکانس‌های میانی و انتهایی این محدوده در هر سه دانسیته شده است. بزرگی این افزایش، در دانسیته ۶۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب بیشتر بوده است، به طوری که در فرکانس ۵۰۰ هرتز، ضریب جذب از ۰/۲ به ۰/۶ افزایش یافت. به طور کلی بالا رفتن جذب صدای ناشی از افزایش ضخامت در فرکانس بالا (۶۳۰-۶۳۰۰ هرتز) بارزتر است. در این محدوده فرکانسی، نمونه‌هایی که بیشترین افزایش میانگین ضریب جذب صوت (به مقدار ۰/۳) را نشان دادند، دارای دانسیته ۴۰۰ و ۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و مقادیر CFR به ترتیب ۰/۹۵ و ۰/۷ بودند.

#### دانسیته بالک

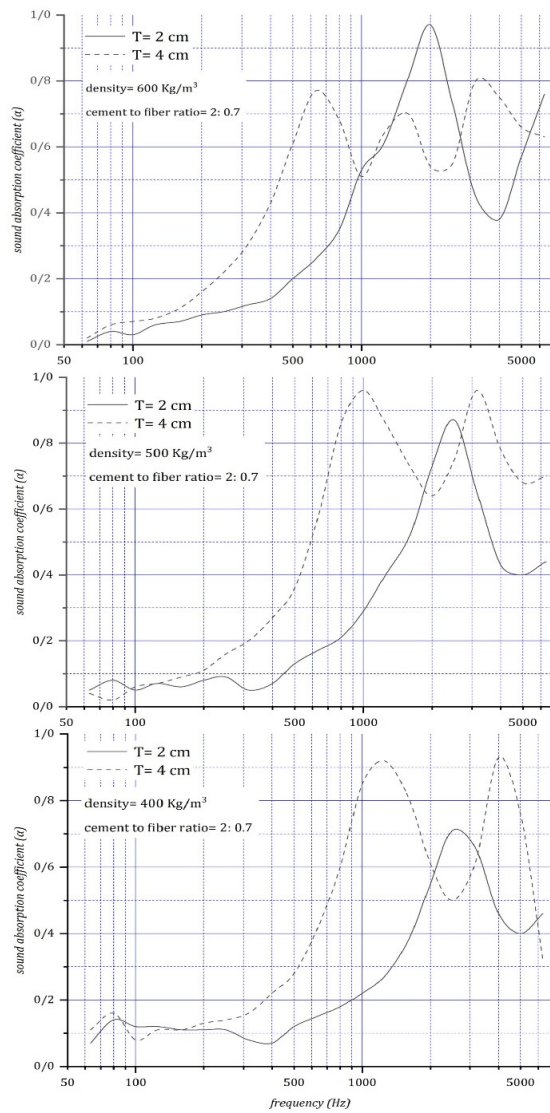
همانطور که پیش از این نشان داده شد تأثیر ضخامت بر جذب صدا به مقدار دانسیته بالک وابسته است. عکس این موضوع نیز صادق است و ضخامت نمونه تعیین می‌کند که دانسیته چقدر می‌تواند بر جذب نمونه تأثیر بگذارد. تأثیر دانسیته بالک بر جذب صوتی نمونه‌های WWCP در شکل ۳ نشان داده شده است. افزایش دانسیته برای ضخامت ۲ سانتی‌متر و در بازه فرکانس پائین، تأثیری بر روی ضریب جذب نداشته است. اما در همین ضخامت و در بازه فرکانسی بالا، افزایش دانسیته بالک تا ۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب کارایی جذب صدا

در نمونه‌های متخلخل وجود ندارد. جهت کنترل فرآیند رنگ‌آمیزی، مدت زمان پاشش رنگ به مدت ۳۰ ثانیه در نظر گرفته شد و همچنین فشار پمپ باد و فاصله نازل از سطح نمونه‌ها (۴۰ سانتی‌متر) تحت کنترل قرار گرفت.

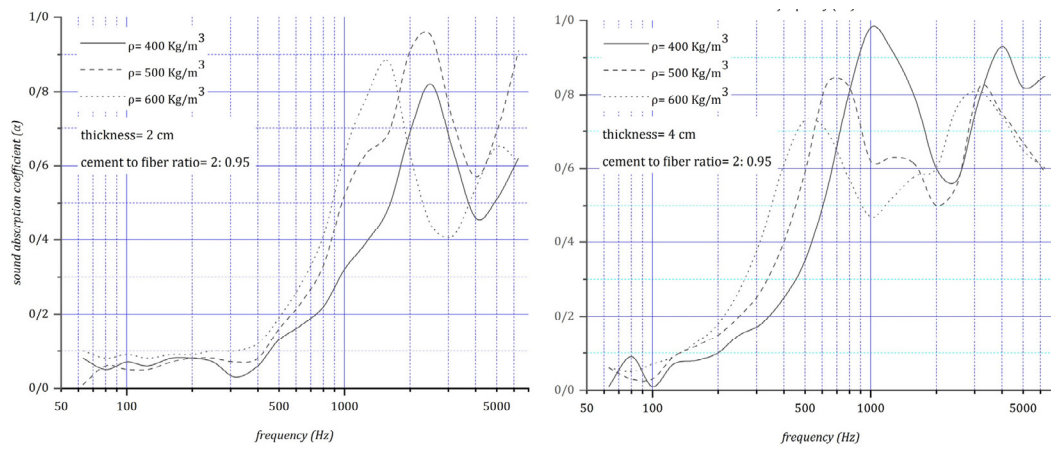
#### اندازه‌گیری ضریب جذب صدا

برای اندازه‌گیری ضرایب جذب صدای نمونه‌ها در محدوده فرکانس ۶۳ تا ۶۳۰۰ هرتز، دو لوله امیدانس (مدل SW422 و SW477، ساخت شرکت BSWA Technology Co., Ltd چین) مطابق استاندارد ISO 10534-2 مورد استفاده قرار گرفت (۳۸). لوله‌ی با قطر بزرگتر (۱۰۰ میلی‌متر) برای اندازه‌گیری فرکانس‌های پایین و لوله کوچکتر (۳۰ میلی‌متر) برای اندازه‌گیری فرکانس‌های بالا استفاده شد. استاندارد ISO 10534-2 الزامات و روش‌های تست را برای اندازه‌گیری ضریب جذب صوتی مواد با استفاده از لوله امیدانس در عناصر ساختمانی مشخص می‌کند. همچنین، دستورالعمل‌هایی در مورد طراحی، کالیبراسیون و استفاده از دستگاه مذکور ارائه می‌دهد. میکروفون‌های مورد استفاده در فرکانس ۱۰۰۰ هرتز و تراز فشار صوت ۱۱۴ دسی‌بل کالیبره شدند. با هدف کاهش خطاهای اندازه‌گیری از جمله احتمال قرارگیری نامناسب نمونه‌ها در دستگاه، اندازه‌گیری‌ها حداقل سه بار برای هر نمونه تکرار شدند. در هر تکرار، نمونه کاملاً از دستگاه خارج و دوباره در داخل نگهدارنده قرار گرفت. همچنین، محیط فیزیکی در اتاق آزمایش، از جمله دما، رطوبت و فشار اتمسفری در طول فرآیند کار مورد پایش و در یک محدوده معین حفظ شد.

تحلیل داده‌ها با نرم‌افزار BSWA VALab4 انجام شد و نتایج نهایی به شکل ضرایب جذب در مقیاس ۱/۳ اکتاوباند به دست آمدند. نمودارهای نهایی جذب صدا بر اساس این داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار Origin64، نسخه ۲۰۲۱ رسم و ارائه شدند. جهت تجزیه و تحلیل دقیق‌تر در فرکانس‌های پایین، مقیاس فرکانسی این نمودارها به صورت لگاریتمی ارائه شده‌اند. برای محاسبه میانگین ضریب جذب در هریک از بازه‌های فرکانسی پائین و بالا



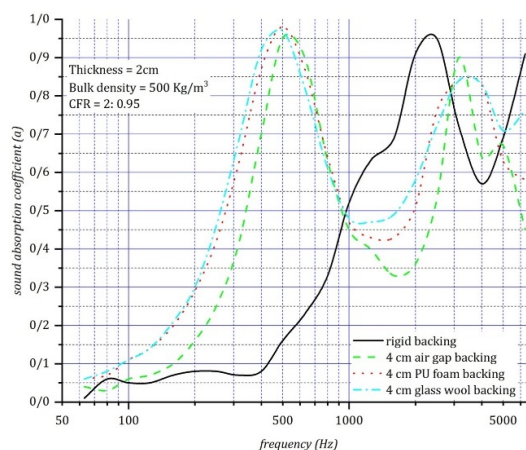
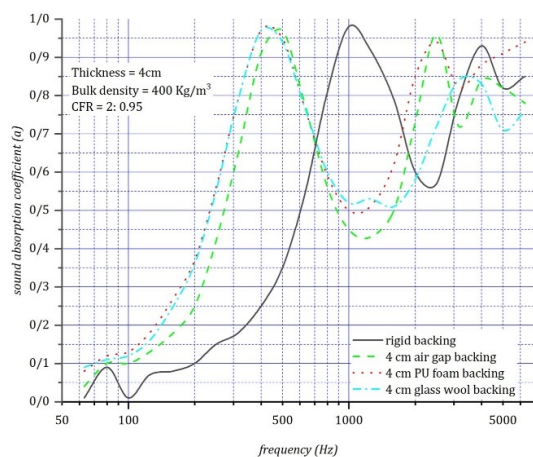
شکل ۲: تاثیر ضخامت بر ضریب جذب نمونه‌های WWCP با CFR ۲: ۰.۷



شکل ۳: تاثیر دانسیته الک بر ضریب جذب نمونه‌های WWCP با CFR ۲: ۰.۹۵

جدول ۳: تأثیر CFR بر روی ضریب جذب میانگین بازه‌های فرکانسی بالا و پایین

ضخامت (cm)	دانسیتیه بالک (Kg/m <sup>3</sup> )	CFR	ضریب جذب میانگین، بازه فرکانسی پایین (۶۳-۵۰۰ Hz)	ضریب جذب میانگین، بازه فرکانسی بالا (۶۳۰-۶۳۰۰ Hz)
۲	۴۰۰	۲:۰/۷	۰.۱۱	۰.۴
		۲:۰/۹۵	۰.۰۷	۰.۴۸
	۵۰۰	۲:۰/۷	۰.۰۷	۰.۴۶
		۲:۰/۹۵	۰.۰۷	۰.۶۵
۴	۴۰۰	۲:۰/۷	۰.۰۹	۰.۵۸
		۲:۰/۹۵	۰.۱	۰.۵۷
	۵۰۰	۲:۰/۷	۰.۱۵	۰.۶۷
		۲:۰/۹۵	۰.۱۳	۰.۷۸
۶۰۰	۴۰۰	۲:۰/۷	۰.۱۴	۰.۷۷
		۲:۰/۹۵	۰.۱۹	۰.۶۷
	۵۰۰	۲:۰/۷	۰.۲۱	۰.۶۶
		۲:۰/۹۵	۰.۲۶	۰.۶۴



شکل ۴: تأثیر قرارگیری نوع لایه پشتی بر ضریب جذب نمونه‌های WWCP

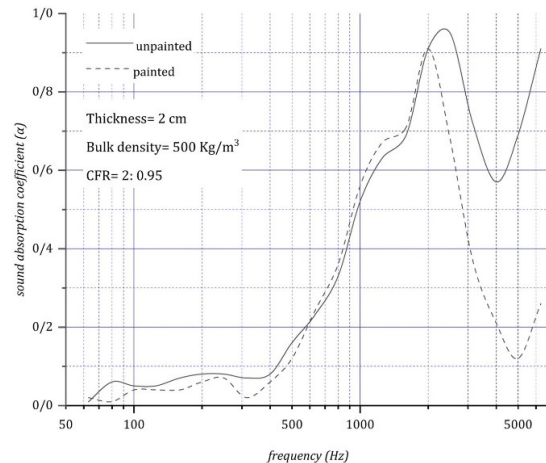
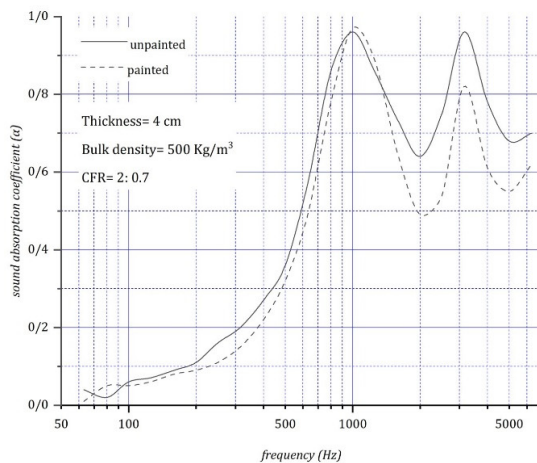
نسبت سیمان به الیاف جهت بررسی تأثیر CFR بر جذب صدای نمونه‌ها، میانگین جذب صدا<sup>۱</sup> (SAA) برای نمونه‌های با CFR متفاوت در جدول شماره ۳ ارائه شده است. مقدار SAA در واقع یک متوسط حسابی از ضرایب جذب صدا در مقایسه فرکانسی یک سوم اکتاوند از ۶۳ تا ۵۰۰ هرتز برای محدوده فرکانس پایین و ۶۳۰ تا ۶۳۰۰ هرتز برای محدوده فرکانس بالا می‌باشد. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود، در محدوده فرکانس پایین، تغییر مقدار CFR از ۲:۰/۷ به ۲:۰/۹۵ تأثیر قابل توجهی بر SAA

#### 1. Sound absorption average

را به مقدار ۰/۲ بهبود بخشیده است. با این وجود در دانسیته ۶۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، کارایی جذب دچار افت شده است. علاوه بر این، در دانسیته ۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، یک پیک جذبی نسبت به دو دانسیته بالک دیگر اضافه شده است. در ضخامت ۴ سانتی‌متر و در بازه فرکانسی ۶۳ تا ۵۰۰ هرتز، افزایش دانسیته از ۴۰۰ تا ۶۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، کارایی جذب را به شکل واضحی افزایش داد. اما در بازه فرکانسی ۶۳۰ الی ۶۳۰۰ هرتز، این افزایش دانسیته تأثیر معکوسی بر کارایی جذب داشته و باعث کاهش محسوس ضرایب جذب این محدوده فرکانسی شده است.

جدول ۴: تاثیر قرارگیری ۳ نوع لایه پشتی بر SAA نمونه‌های منتخب WWCP

ضخامت (cm)	دانسیته بالک (Kg/m <sup>3</sup> )	CFR	سطح پشتی (backing)	ضریب جذب میانگین، بازه فرکانسی پائین	ضریب جذب میانگین، بازه فرکانسی بالا
۲	۵۰۰	۲:۰/۹۵	سطح سخت	۰.۰۷	۰.۶۵
			۴ cm هوا	۰.۲۸	۰.۵۷
			۴ cm فوم PU	۰.۳۸	۰.۶۴
			۴ cm پشم شیشه	۰.۳۹	۰.۶۶
۴	۴۰۰	۲:۰/۹۵	سطح سخت	۰.۱۳	۰.۷۸
			۴ cm هوا	۰.۳۸	۰.۶۹
			۴ cm فوم PU	۰.۴۴	۰.۷۶
			۴ cm پشم شیشه	۰.۴۳	۰.۶۷



شکل ۵: نمودار ضریب جذب نمونه‌های منتخب WWCP قبل و بعد از رنگ آمیزی

بالا تاثیر مشخصی نداشته است. با دقت در نمودار شکل ۴ نیز مشخص است که در هر دو ضخامت، قرارگیری هوا یا مواد دیگر در پشت نمونه‌ها تنها منجر به جابجایی فرکانس‌های پیک به سمت فرکانس‌های بالاتر این بازه شده است. این در حالی است که در بازه فرکانسی پائین، ضریب جذب میانگین افزایش قابل توجهی یافته و در هر دو ضخامت یک پیک جذبی نیز اضافه شده است. این تاثیر برای فوم پلی یورتان و پشم شیشه مشابه و بیشتر از هوا بوده است.

#### رنگ‌آمیزی

جهت بررسی تاثیر رنگ بر روی ضریب جذب WWCP، نمونه‌های منتخب، پس از رنگ‌آمیزی سطحی

هیچ یک از نمونه‌ها نداشته است. در محدوده فرکانس بالا نیز، افزایش CFR منجر به تغییر قابل توجه و یکدست در SAA نمونه‌ها نشده است.

#### لایه پشتی (backing)

برای هر یک از دو نمونه منتخب، ضرائب جذب در سه حالت لایه‌گذاری شامل: ۱. چهار سانتی‌متر فاصله هوایی، ۲. چهار سانتی‌متر فوم پلی یورتان (PU) و ۳. چهار سانتی‌متر پشم شیشه (همگی در پشت نمونه) اندازه‌گیری و با حالت پایه (بدون لایه‌گذاری) مقایسه شدند (شکل ۴). همانطور که در جدول ۴ نیز دیده می‌شود، انواع حالات لایه‌گذاری در پشت نمونه‌های WWCP بر روی ضریب جذب میانگین در بازه فرکانسی

از آنجایی که دانسیته بالک بر مقاومت جریان عبوری از مواد تأثیر می‌گذارد، به عنوان یکی از عوامل اساسی تأثیرگذار بر عملکرد آکوستیکی مواد، به ویژه جاذب‌های متخلخل، در نظر گرفته می‌شود. در مواد دارای مقاومت جریان پائین، اتلاف انرژی صوتی ناچیز خواهد بود، لذا این‌گونه مواد از قابلیت جذب صدای موثری برخوردار نیستند. در مقابل، افزایش بیش از حد مقاومت جریان، منجر به کاهش تخلخل و پیچ و تاب مسیرهای هوایی درونی مواد و در نتیجه ایجاد یک سطح بازتاب‌کننده موج صدا خواهد شد. بنابراین، دانسیته ماده جاذب باید در محدوده‌ای تعیین شود که بالاترین راندمان جذب صدا را ایجاد کند (۴۲). شانگ و همکاران (۲۰۱۳) تأثیر دانسیته حجمی جاذب‌های ساخته شده از الیاف درخت کاپوک را مورد مطالعه قرار دادند. بر اساس این تحقیق، افزایش دانسیته از ۸٫۳ تا ۲۵ کیلوگرم بر مترمکعب مقدار جذب صوت این ماده را افزایش می‌دهد، اما در دانسیته‌های بالاتر از ۲۵ کیلوگرم بر مترمکعب جذب صدا دوباره کاهش خواهد یافت (۴۳). بنابر یافته‌های این مطالعه، افزایش دانسیته در ضخامت‌های بالا (۴ سانتی‌متر)، با مقدار جذب امواج فرکانس پائین رابطه مستقیم و در عین حال با مقدار جذب امواج فرکانس بالا رابطه عکس دارد. احتمالاً این پدیده ناشی از جرم بالای الیاف و سیمان در نمونه‌های متراکم‌تر است که می‌تواند منجر به کاهش تخلخل و افزایش مقاومت جریان ماده شود. همچنین در مطالعه‌ای دیگر که به بررسی عوامل موثر بر جذب صوت جاذب‌های چوب-منیزی می‌پرداخته شد، سه نمونه با دانسیته‌های ۴۵۰، ۵۵۰ و ۶۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب در بازه فرکانسی ۲۰۰ تا ۲۰۰۰ هرتز مورد اندازه‌گیری قرار گرفتند و بر اساس نتایج، ضرایب جذب تا دانسیته ۵۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب در فرکانس‌های بالاتر از ۱۰۰۰ هرتز افزایش یافت و سپس با ادامه افزایش تا ۶۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب ثابت ماند (۲۷).

عموماً دو جرم اصلی در ساخت جاذب‌های الیافی شامل الیاف و یک ماده همبند می‌باشد. رشته‌ها یا الیاف موجب ایجاد یک ساختار متخلخل شده و ماده همبند

با استفاده از رنگ روغنی، مجدداً مورد اندازه‌گیری قرار گرفتند. نمودارهای ضریب جذب صوتی هر یک از این نمونه‌ها قبل و بعد از رنگ‌آمیزی سطحی با یکدیگر مقایسه شدند (شکل ۵). تحلیل نتایج نشان داد که در نمونه دارای ضخامت ۲ سانتی‌متر، رنگ‌آمیزی در فرکانس‌های بالا منجر به افت ضرایب جذب می‌شود؛ به گونه‌ای که ضریب جذب فرکانس ۵۰۰۰ هرتز حدود ۰/۶ کاهش یافت. در نمونه ۴ سانتی‌متری و فرکانس‌های بالا نیز پس رنگ‌آمیزی نمونه، حدود ۰/۱ کاهش ضریب جذب مشاهده شد. این درحالی است که در بازه‌های فرکانسی پائین، رنگ‌آمیزی تأثیری بر جذب هیچ یک از نمونه‌ها نداشت.

### بحث

ضخامت مواد جاذب آکوستیک نقش عمده‌ای در کاهش انرژی صوتی عبوری از آنها دارد (۲، ۳۹). افزایش ضخامت در واقع منجر به طولانی شدن فرآیند اتلاف گرمایی و ویسکوز انرژی صوتی خواهد شد که همین امر می‌تواند اثر مستقیم ضخامت مواد جاذب بر روی افزایش ضریب جذب را توضیح دهد (۴۰). با توجه به آزمایش‌های آکوستیکی روی الیاف خرما و درخت نخل، مشخص شد ضریب جذب صدا با افزایش ضخامت بهبود یافته و پیک جذب به سمت فرکانس‌های پایین‌تر حرکت می‌کند (۴۱). با توجه به نتایج مطالعه حاضر، تأثیر ضخامت بر بهبود جذب صوتی WWCP در دانسیته‌های بالک پایین‌تر بیشتر است. از سوی دیگر، ارتباط خاصی بین مقدار CFR و تأثیر ضخامت ماده بر ضریب جذب آن یافت نشد. گری و همکاران (۲۰۱۴) در تحقیقات خود بر روی WWCP نشان دادند که با افزایش ضخامت از ۲۵ به ۵۰ میلی‌متر، ضرایب جذب در محدوده ۱۲۵ تا ۴۰۰۰ هرتز به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد (۲۰). در مطالعه باترمن و همکاران (۲۰۱۶) نیز، با افزایش ضخامت WWCP از ۱۵ به ۳۵ میلی‌متر، ضریب جذب فرکانس‌های بالا بهبود یافت و یک پیک جذب در ۱۲۰۰ فرکانس هرتز اضافه شد (۲۶).



باعث ایجاد انسجام ساختاری جاذب و چسبندگی الیاف به یکدیگر می‌شود. دستیابی به یک نسبت مناسب از این دو جزء اصلی در جرم کل ماده تحت عنوان نسبت الیاف به ماده همبند یا همان BFR (Binder to Fiber Ratio) شناخته می‌شود و در مطالعات توسعه جاذب‌های طبیعی و یا کامپوزیت‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد (۴۴). برای مثال مهزان و همکاران (۲۰۰۹) جذب صدای کامپوزیت‌هایی از جنس پوسته برنج را مورد مطالعه قرار دادند که در آن از فوم پلی‌اورتان پاششی به عنوان ماده همبند استفاده شده بود. در این مطالعه، شش نمونه با درصد‌های متفاوت (۵ الی ۳۰ درصد) پوسته برنج مورد اندازه‌گیری قرار گرفت و مشخص شد که بهترین مقدار پوسته برنج از نظر جذب صدا برابر با ۲۵٪ وزنی می‌باشد (۴۵). پوترا و همکاران (۲۰۱۳) در بررسی کامپوزیت جاذب صدا با استفاده از الیاف نیشکر، از پلی‌یورتان و پلی‌استر به عنوان همبند استفاده کردند. نتایج این پژوهش نیز تاثیر نسبت الیاف به ماده همبند را تأیید کرد و نشان داد که از بین چهار نسبت متفاوت الیاف به همبند، بهترین جذب صدا (در بازه فرکانسی ۵۰۰ تا ۴۵۰۰ هرتز) در نمونه‌های با نسبت ۶۰:۴۰ رخ می‌دهد (۴۶). در فرآیند تولید WWCP نیز نسبت وزنی سیمان به رشته‌های چوب یا همان CFR یکی از پارامترهای مهم محسوب می‌شود که علاوه بر تاثیر قابل توجه بر خواص مکانیکی پنل‌ها، می‌تواند بر روی جذب آکوستیکی نیز تاثیر بگذارد. در پژوهش باترمن و همکاران بر روی نمونه‌های تجاری WWCP مقدار CFR این نمونه‌ها مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. این نمونه‌های تجاری بر اساس پهنای الیاف چوب در ۳ دسته‌ی ۱، ۱/۵ و ۲ میلی‌متر تقسیم بندی شدند. نتایج نشان دادند که میانگین CFR به ترتیب برای هر دسته برابر با ۲:۰,۹۴، ۲:۱,۰۸ و ۲:۱,۱ می‌باشد. البته در این مطالعه تاثیر CFR بر روی جذب صدای نمونه بررسی نشده است (۲۶). تنها مطالعه‌ای که پیش از این و مشخصاً تاثیر پارامتر مذکور را بر روی جذب آکوستیکی کامپوزیت‌های الیاف چوب بررسی کرده است مطالعه نا و همکاران (۲۰۱۸) می‌باشد که البته از سیمان منیزیمی به

عنوان ملات همبند استفاده شده است. نتایج این پژوهش نشان داد که نمونه‌های با CFR برابر با ۲:۱,۶ و ۲:۱,۳، از کارایی جذب صوت بسیار بالاتری نسبت به نمونه‌ی با CFR پائین‌تر (۲:۱,۱) برخوردار بودند (۲۷). در پژوهش حاضر بر اساس جدول ۳ می‌توان نتیجه گرفت که نقش CFR در تغییر ضرائب جذب میانگین، بیشتر در بازه فرکانسی بالا واضح است و نتایج مربوط به فرکانس‌های پائین‌تر از ۵۰۰ هرتز یکدست و محسوس نیستند. قابل ذکر است که همانند دانسیته بالک، تاثیر CFR بر جذب صوت نمونه‌ها وابسته به ضخامت است. به این صورت که در ضخامت دو سانتی‌متر، افزایش نسبت الیاف از ۰,۷ به ۰,۹۵ منجر به افزایش ضریب جذب میانگین شده است ولی در ضخامت ۴ سانتی‌متر به جز دانسیته ۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، کاهش جذب میانگین نمونه‌ها را به دنبال داشته است.

به هنگام اجرا و قرارگیری یک پنل جاذب صدا بر روی یک سطح خاص، لایه پشتی آن جاذب (که می‌تواند حالت مختلفی داشته باشد) به عنوان یک پارامتر کاربردی، تاثیر قابل توجهی بر راندمان آکوستیکی ماده دارد. عموماً در طول فرآیند توسعه جاذب‌های صوتی مختلف، اثر لایه یا لایه‌های پشتی مورد مطالعه قرار می‌گیرد (۴۷). یکی از رایج‌ترین روش‌های نصب جاذب بر روی سطح نگهدارنده، قرار دادن آن در فاصله چند سانتی‌متری از سطح سخت مذکور است. با استفاده از این روش، یک لایه هوا بین جاذب و سطح سخت نگهدارنده ایجاد می‌شود که در نتیجه نوعی جاذب صدا شبیه به رزوناتور هلمهولتز ایجاد می‌شود. چنین روشی منجر به افزایش جذب ماده در فرکانس‌هایی می‌شود که پیش از این، ضریب جذب پایینی داشتند (فرکانس‌های پایین) (۴۸). با توجه به یافته‌های مطالعه حاضر (شکل ۴)، هر سه لایه قرار گرفته در پشت نمونه‌های منتخب، شامل ۴ سانتی‌متر هوا، ۴ سانتی‌متر فوم PU و ۴ سانتی‌متر پشم شیشه تأثیر نسبتاً مشابهی بر جذب صدا داشته‌اند. در فرکانس‌های بالاتر از ۵۰۰ هرتز، اضافه شدن لایه‌های مذکور در پشت نمونه‌ها تنها منجر به جابجایی فرکانس‌های پیک به سمت



تشدید<sup>۱</sup> طبقه بندی کرد. جذب صوت اغلب ساختارهای متخلخل با افزایش فرکانس بهبود یافته و در فرکانس‌های پایین کارایی قابل قبولی ندارند. در مقابل، ساختارهای تشدیدی مانند پانل‌های هلمهولتز سوراخ‌دار، از جذب صدایی با باند فرکانسی باریک و ساختار سخت‌تری برخوردارند. این‌گونه جاذب‌ها، اگرچه پهنای باند محدودی در جذب صدا دارند، اما می‌توانند امواج فرکانس پایین را با ضخامت بسیار کمتر نسبت به جاذب‌های متخلخل جذب نمایند (۵۴). با مشاهده نمودارهای جذب نمونه‌های مورد مطالعه (شکل‌های ۲ تا ۵) می‌توان دریافت که الگوی جذب صدا در WWCP، بیشتر از نوع باند باریک است و شبیه به ساختارهای تشدیدی یا ری‌اکتیو است. احتمالاً دلیل این پدیده را می‌توان به ایجاد امواج تشدید ناشی از جنس سخت WWCP نسبت داد. پیک‌های جذب نیز در فرکانس‌های مربوط به همین امواج تشدیدی (رزونانسی) ایجاد می‌شوند. در چنین الگوهای جذبی نهایتاً امواج مکانیکی صدا به جای آنکه به گرما تبدیل شوند از طریق میرایی (برهمکنش امواج اولیه و بازتابی با یکدیگر) کاهش یافته و در واقع جزء ری‌اکتانس نقش برجسته‌تری در امپدانس کلی ایفا می‌کند. هر مکانیزم تشدید از یک جرم ارتعاشی در برابر یک فنر تشکیل شده است. جرم مرتعش در یک جاذب هلمهولتز، مقدار هوایی است که در مدخل محفظه‌های داخلی قرار دارد؛ و هوای به دام افتاده در فضاهای خالی جاذب، یک فنر هوا را ایجاد می‌کند. به نظر می‌رسد که در نمونه‌های WWCP نیز می‌توان جرم هوای موجود در ورودی‌های تخلخل سطحی نمونه را به عنوان جرم مرتعش و حجم هوای به دام افتاده درون این تخلخل و تورتوزیته را به عنوان فنر هوایی تصور کرد. قابل ذکر است که با تغییر مقدار جرم مرتعش و سفتی فنر هوا، امکان جابجایی فرکانس تشدید و در نتیجه فرکانس مربوط به پیک جذب وجود دارد. بنابراین می‌توان گفت یکی از ویژگی‌های جاذب‌های WWCP، امکان طراحی جاذب براساس یک بازه فرکانسی خاص که جذب حداکثری در آن بازه رخ دهد می‌باشد.

#### 1. Resonance

فرکانس‌های بالاتر شده است. همانطور که در جدول ۴ هم ارائه شده است، مقدار SAA فرکانس‌های بالا در سه حالت لایه‌گذاری نسبت به حالت پایه، تغییر قابل توجهی نکرده است. اما در فرکانس‌های پایین، اضافه شدن این لایه‌ها در پشت نمونه، میانگین ضریب جذب را به طور قابل توجهی افزایش داده و در هر دو ضخامت یک پیک جذبی ایجاد کرده‌اند. در نتیجه، قرار دادن چنین موادی در پشت WWCP، امکان ایجاد نوعی جاذب رزونانسی را فراهم می‌کند که از ضریب جذب بالایی در فرکانس‌های پایین برخوردار است.

در کاربرد جاذب‌های صوتی مختلف و با نظر به آنکه عموماً این مواد در سطح رویی فضای داخلی یک بنا مورد استفاده قرار می‌گیرند، رنگ آمیزی در راستای ایجاد یک نمای بصری زیبا تأثیر مهمی داشته و از پارامترهای مهم کاربرپذیری جاذب‌ها محسوب می‌شود. لذا آخرین مرحله در روند ساخت WWCP، رنگ آمیزی این پنل‌های می‌باشد. به علت نشت مواد رنگ در داخل تخلخل‌های سطحی، غالباً چندین مرحله رنگ آمیزی اجرا خواهد شد که منجر به کاهش بخشی از تخلخل سطحی ماده جاذب می‌شود. در نتیجه با کاهش این تخلخل، جذب صدا نیز دچار کاهش می‌شود (۴۹، ۵۰). بوزکورت و دمیرکاله (۲۰۲۰) در پژوهش خود جهت بررسی جذب صوت یک جاذب کامپوزیتی تولید شده از پلاستر پرلیتی، جهت افزایش ضریب جذب صدا از لایه‌های پلاستر بدون رنگ استفاده کردند (۵۱). در کتابی که توسط Everest و Pohelmann نوشته شده است نیز نشان داده شده است که رنگ آمیزی سطوح بتنی، مقادیر ضریب جذب صدا را کاهش می‌دهند (۵۲). در پژوهش حاضر نیز با توجه به نمودار شکل ۵، می‌توان دریافت که رنگ آمیزی نمونه‌ها منجر به افت نسبی جذب صدا در فرکانس‌های بالاتر از ۲۰۰۰ هرتز شده است. اگرچه پیش از این تأثیر رنگ بر روی جذب صوت نمونه‌های WWCP بررسی نشده است؛ اما نتایج پژوهش حاضر با مطالعات پیشین بر روی جاذب‌های دیگر هم راستا می‌باشد (۵۳).

جاذب‌های صدا را می‌توان به دو دسته متخلخل و

## نتیجه گیری

مطالعه حاضر با هدف تعیین تأثیر پارامترهای تولید و کاربرد شامل ضخامت، دانسیته بالک، CFR، لایه پستی جذب و رنگ آمیزی بر بهینه سازی جذب صوتی پنل های الیاف چوب - سیمان انجام گرفته است. WWCP ماده های متخلخل است، اما الگوی جذب آکوستیکی آن به جذب های ری اکتیو شباهت دارد. در نتیجه، اگر ویژگی های فیزیکی آن به درستی تعیین شود، می توان چنین ماده ای را برای کنترل یک صدای با باند فرکانسی باریک، طراحی و مورد استفاده قرار داد. تأثیر ضخامت و دانسیته بر ضریب جذب WWCP به یکدیگر وابسته است، به طوری که اگر یکی بیش از مقدار معینی افزایش یابد، دیگری باید کاهش یابد تا از کاهش ضریب جذب جلوگیری شود. نشان داده شد که نسبت وزنی سیمان به الیاف در بازه ۲:۰/۷ تا ۲:۰/۹۵ تأثیر معنی داری بر ضریب جذب صوت نمونه های

WWCP ندارد. از سوی دیگر، وجود یک لایه هوا یا ماده متخلخل نرم در پشت پنل، جذب امواج فرکانس پایین را افزایش می دهد. رنگ آمیزی سطح این پنل ها باعث کاهش ضریب جذب در فرکانس های بالا می شود. در بین نمونه های مورد بررسی، ضخامت ۴ سانتی متر، دانسیته بالک ۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و CFR برابر با ۲:۰/۷ بالاترین جذب صدا را در محدوده فرکانسی ۶۳ تا ۶۳۰۰ هرتز ارائه می دهد.

## تشکر و قدردانی

این مقاله حاصل نتایج پایان نامه نویسنده اول در رشته مهندسی بهداشت حرفه ای در دانشگاه علوم پزشکی تهران است. نویسندگان این مقاله بر خود لازم می دانند مراتب قدردانی و تشکر خود را از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه علوم پزشکی تهران که شرایط لازم برای انجام این تحقیق را فراهم آوردند اعلام نمایند.

## REFERENCES

- Moszynski P. WHO warns noise pollution is a growing hazard to health in Europe. British Medical Journal Publishing Group; 2011.
- Mi H, Liang L-S, Ma H-Y, Zhang Z-H, Qiao J-Y, Zhao C, et al. Optimization design of the sound absorbing structure of double-layer porous metal material with air layer based on genetic algorithm. J Acoust Soc Am. 2023;153(3):1943-54.
- Wang X, Choy YS, Cheng L. Hybrid noise control in a duct using a light micro-perforated plate. J Acoust Soc Am. 2012;132(6):3778-87.
- Pardo-Quiles D, Rodríguez-Rodríguez I, Rodríguez J-V, Campo-Valera M, Juan-Llácer L. Analyzing multiple acoustic diffraction over a wide barrier using equivalent knife-edge geometries and Babinet's principle (L). J Acoust Soc Am. 2023;153(4):1974-.
- Kim D, Saravanan V, Kim H, Yuk T, Lee S. Development of active noise control simulation with virtual controller based on computational aeroacoustics. J Acoust Soc Am. 2023;153(5):2789-.
- Jensen NM, Bacon IC, Sommerfeldt SD. The dependence of sound radiation on position of acoustic source in an enclosure. J Acoust Soc Am. 2023;153(3-supplement):A288-A.
- Attenborough K, Vér IL. Sound-absorbing materials and sound absorbers. Noise and vibration control engineering. 2005;2:215-77.
- Cao L, Fu Q, Si Y, Ding B, Yu J. Porous materials for sound absorption. Compos Commun. 2018;10:25-35.
- Arenas JP, Crocker MJ. Recent trends in porous sound-absorbing materials. Sound Vib. 2010;44(7):12-8.
- McGinnes C, Kleiner M, Xiang N. An environmental and economical solution to sound absorption using straw. J Acoust Soc Am. 2005;118(3):1869-.
- Asdrubali F, Schiavoni S, Horoshenkov K. A review of sustainable materials for acoustic applications. Build Acoust. 2012;19(4):283-311.
- Asdrubali F, editor Survey on the acoustical properties of new sustainable materials for noise control. Proceedings of Euronoise; 2006: European Acoustics Association Tampere.
- Mansur ACM, Zanetti A, Barbieri N, Lima KF. Experimental assessment of the sound absorption coefficient of three natural fibers. J Acoust Soc Am. 2019;146(4):2868.

14. Taiwo EM, Yahya K, Haron Z, editors. Potential of using natural fiber for building acoustic absorber: A review. *Journal of Physics: Conference Series*; 2019: IOP Publishing.
15. Khan T, Hameed Sultan MTB, Ariffin AH. The challenges of natural fiber in manufacturing, material selection, and technology application: A review. *J Reinf Plast Compos*. 2018;37(11):770-9.
16. Bribián IZ, Capilla AV, Usón AA. Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. *Build Environ*. 2011;46(5):1133-40.
17. Chavez Thielemann V. Sound absorption control at low frequencies in the new symphonic concert Hall of VillaPrado Valladolid. *J Acoust Soc Am*. 2008;123(5\_Supplement):3200-.
18. Keus van de Poll M, Carlsson J, Marsh JE, Ljung R, Odelius J, Schlittmeier SJ, et al. Unmasking the effects of masking on performance: The potential of multiple-voice masking in the office environment. *J Acoust Soc Am*. 2015;138(2):807-16.
19. Ribeiro RS, Amlani AM, de Conto J, Schwerz BG, Amarilla RSD, Sant'Ana LH, et al. Acoustical treatment characterization of a classroom with wood-based composites. *Appl Acoust*. 2021;178:107967.
20. de la Grée GD, Yu Q, Brouwers H, editors. Wood-wool cement board: potential and challenges. 5th International Conference on Non-Traditional Cement and Concrete (NTCC2014), 16-19 June 2014, Brno, Czech Republic; 2014: NOV PRESS.
21. Fan M, Ndikontar MK, Zhou X, Ngamveng JN. Cement-bonded composites made from tropical woods: Compatibility of wood and cement. *Constr Build Mater*. 2012;36:135-40.
22. Pereira C, Caldeira Jorge F, Irle M, Ferreira JM. Characterizing the setting of cement when mixed with cork, blue gum, or maritime pine, grown in Portugal I: temperature profiles and compatibility indices. *J Wood Sci*. 2006;52:311-7.
23. Ahmad Z, Wee L, Fauzi M. Mechanical properties of wood-wool cement composite board manufactured using selected Malaysian fast grown timber species. *ASM Sci J*. 2011;5(1):27-35.
24. Jafari A, Monazzam MR, Khavanin A, Lashgari M, Ghoreyshi SA. Sound Absorption of Wood-Wool Cement Absorbers. *J Health Saf Work*. 2023;13(1).
25. Burd A. Acoustic applications of wood wool cement slabs. *Appl Acoust*. 1984;17(6):439-51.
26. Botterman B, de la Grée GD, Hornikx M, Yu Q, Brouwers H. Modelling and optimization of the sound absorption of wood-wool cement boards. *Appl Acoust*. 2018;129:144-54.
27. Na B, Wang H, Ding T, Lu X. Study on factors affecting the sound absorption property of magnesia—bonded wood-wool panel. *Wood Res*. 2018;63:617-24.
28. Chang T-Y, Liu C-S, Huang K-H, Chen R-Y, Lai J-S, Bao B-Y. High-frequency hearing loss, occupational noise exposure and hypertension: a cross-sectional study in male workers. *Environ Health*. 2011;10:1-8.
29. Abrisham SM, Shafiee M, Sanich MA. Evaluation of Hearing Status in Employees of Dental Prosthodontics Laboratories in Yazd. *J Toloobebehdasht*. 2020.
30. Reinhold K, Kalle S, Paju J. Exposure to high or low frequency noise at workplaces: differences between assessment, health complaints and implementation of adequate personal protective equipment. 2014.
31. Pourzarea G, Attarchi M, Valirad F, Mohammadi S. The effect of simultaneous exposure to organic solvents and noise on high frequency hearing loss in tire manufacturing company workers. *Occup Med Quart J*. 2016;8(2):72-80.
32. Wei YM, Guang Zhou Y, Tomita B. Hydration behavior of wood cement-based composite I: evaluation of wood species effects on compatibility and strength with ordinary Portland cement. *J Wood Sci*. 2000;46:296-302.
33. Ashori A, Tabarsa T, Azizi K, Mirzabeygi R. Wood-wool cement board using mixture of eucalypt and poplar. *Ind Crops Prod*. 2011;34(1):1146-9.
34. Aro M, editor Wood strand cement board. 11th International Inorganic Bonded Fiber Composites Conference, Madrid, Spain; 2008.
35. Van Elten G, editor Production of wood wool cement board and wood strand cement board (eltboard) on one plant and applications of the products. 11th International Inorganic-Bonded Fiber Composites Conference; 2006.
36. Johansson E. Woodwool slabs: manufacture, properties and use: Lund University, Lund Centre for Habitat Studies Lund; 1994.
37. Simatupang MH, Geimer RL, editors. Inorganic binder

- for wood composites: feasibility and limitations. Proceedings of Wood Adhesive Symposium, Forest Product Resources Society; 1990.
38. ISO. ISO 10534-2, Acoustics-Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes. Part 2 Transfer-function method; 1996.
  39. Lima KF, Barbieri N, Barbieri R, Grossl VA. Determination of the acoustical properties of sisal and coconut fiber samples based on the flow resistivity experimental assessment. *J Acoust Soc Am*. 2016;140(4):3141-.
  40. Mamtaz H, Fouladi MH, Al-Atabi M, Narayana Namasivayam S. Acoustic absorption of natural fiber composites. *J Eng*. 2016;2016.
  41. Abd ALRahman L, Raja RI, Rahman RA, Ibrahim Z. Comparison of acoustic characteristics of date palm fibre and oil palm fibre. *Res J Appl Sci, Eng Tech*. 2014;7(8):1656-61.
  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. Xiang H-f, Wang D, Liua H-c, Zhao N, Xu J. Investigation on sound absorption properties of kapok fibers. *Chin J Polym Sci*. 2013;31(3):521-9.
  44. Abdi DD, Monazzam M, Taban E, Putra A, Golbabaie F, Khadem M. Sound absorption performance of natural fiber composite from chrome shave and coffee silver skin. *Appl Acoust*. 2021;182:108264.
  45. Mahzan S, Zaidi AA, Ghazali M, Yahya M, Ismail M. Investigation on sound absorption of rice-husk reinforced composite. Proceedings of MUCEET. 2009:19-22.
  46. Putra A, Abdullah Y, Efendy H, Farid WM, Ayob MR, Py MS. Utilizing sugarcane wasted fibers as a sustainable acoustic absorber. *Procedia Eng*. 2013;53:632-8.
  47. Bujoreanu C, Nedeff F, Benchea M, Agop M. Experimental and theoretical considerations on sound absorption performance of waste materials including the effect of backing plates. *Appl Acoust*. 2017;119:88-93.
  48. Pieren R. Sound absorption modeling of thin woven fabrics backed by an air cavity. *Text Res J*. 2012;82(9):864-74.
  49. Long M. Architectural acoustics: Elsevier; 2005.
  50. D'Antonio P. Acoustic absorbers and diffusers: theory, design and application: CRC Press; 2016.
  51. Bozkurt TS, Demirkale SY. The experimental research of sound absorption in plasters produced with perlite aggregate and natural hydraulic lime binder. *Acoust Aust*. 2020;48:375-93.
  52. Everest FA. Master handbook of acoustics 2022.
  53. Mehta M, Johnson J, Rocafort J. Architectural acoustics: principles and design 1999.
  54. Cox T, d'Antonio P. Acoustic absorbers and diffusers: theory, design and application: CRC press; 2016.