

ORIGINAL RESEARCH PAPER

Sound Absorption of Wood-Wool Cement Absorbers

Ali Jafari¹, Mohammad Reza Monazzam^{1*}, Ali Khavanin², Maede Lashgari², Seyed Ali Ghoreyshi³

¹ Department of Occupational Health Engineering, School of Public Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

² Department of Occupational Health Engineering, Faculty of Medical Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

³ Department of Educational Planning Management, Payame Noor University, Tehran, Iran

Received: 2022-08-09

Accepted: 2022-12-20

ABSTRACT

Introduction: Wood-Wool Cement Panels (WWCPs) are environmentally friendly sound absorbers also used as heat, energy, and moisture insulators. WWCPs have suitable mechanical properties due to using Portland cement and wood strands as raw materials. In this study, the acoustic performance of WWCP absorbents will be investigated.

Material and Methods: The mixed raw materials were molded under pressure through a hydraulic press to fabricate the WWCP samples. Samples were demolded after 24 hours. Samples were created with two thicknesses of 2 and 4 cm and three bulk densities of 400, 500, and 600 kg/m³ to examine the impact of thickness and bulk density on the acoustic absorption coefficient. The sound absorption coefficients were determined as a function of frequency for two frequency ranges: low (63-500 Hz) and high (630-6300 Hz).

Results: In the low-frequency range, increasing the thickness from 2 to 4 cm increased the absorption coefficient at 500 Hz by 0.16 and 0.23 for densities of 400 and 500 kg/m³, respectively. Increasing the thickness added an absorption peak and increased the value of these absorption peaks to 0.9 in the high-frequency range. When the bulk density of the 4-cm-thick samples increased from 400 to 600 kg/m³, the low-frequency absorption peak increased by 0.33. In the high-frequency range, the same density change increased the absorption peak by 0.26 for the 2-cm-thick sample.

Conclusion: Increasing the thickness of WWCP improves both its high- and low-frequency acoustic absorption coefficients. In addition, increasing the bulk density to approximately 500 kg/m³ boosts the sound absorption efficiency in both frequency ranges.

Keywords: Sound Absorption, Wood-Wool Sement, Impedance Tube, Acoustic Materials

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Jafari A, Monazzam MR, Khavanin A, Lashgari M, Ghoreyshi SA. Sound Absorption of Wood-Wool Cement Absorbers. *J Health Saf Work.* 2023; 13(1): 29-43.

1. INTRODUCTION

Sound control technologies include various methods, including the application of insulators and absorbents, acoustic chambers, silencers or mufflers, vibration control, and active methods. Moreover, using acoustic absorbents is one of the most prevalent control methods (1). Porous materials contain a network of interconnected and irregular air paths, which results in the dissipation of sound energy when it strikes these materials;

therefore, they are widely used as sound absorbers. Fibrous materials typically have sufficient porosity to enrich acoustic absorption (2). The use of natural fibers in producing sound absorbers has increased in recent years, and researchers are seeking new methods to replace natural fibers with synthetic ones. To this end, wood-wool cement panels (WWCPs) are natural fibrous materials with favorable mechanical, thermal, and acoustic properties. In addition, due to the mineralization of the wood wool by cement, the panels have

* Corresponding Author Email: esmaeelm@sina.tums.ac.ir

superior fire and biodegradation resistance. Despite the widespread use of WWCPs as acoustic panels and the extensive research conducted on their mechanical properties, additional research is required to determine the effect of different structural features on the acoustic properties of these panels. Consequently, the current research aimed to fabricate WWCPs and determine the effect of the basic parameters of this product's production, namely the thickness, and bulk density, on the sound absorption coefficient in two frequency ranges: low (63 to 500 Hz) and high (630 to 6300 Hz).

2. MATERIAL AND METHODS

WWCP samples were prepared with 2- and 4-cm thicknesses and three bulk densities, 400, 500, and 600 kg/m³. For the fabrication process, wood wools of spruce trees from northern Iranian forests and white Portland cement manufactured by the Iranian company Benvid were utilized. A wood wool grater machine was used to convert spruce timber to wood wool. After three months of drying at room temperature, wools were weighed according to the quantity required for each sample and then soaked in tap water to extract sugar and tannin. These wood wool components inhibit cement setting. The mortar was made by mixing cement and water. For each sample, the amount of water was equivalent to 40% of the weight of the cement. A hydraulic press was used to press a mixture of cement mortar and wood wool into tubular molds under 3 tons of pressure. Since the mold diameter was the same as the impedance tubes, there was no need for a

cutting procedure following the demolding of the samples. All samples were then stored for 30 days prior to the final cement setting process. Acoustic absorption coefficient measurements were made in the acoustic laboratory of the Tarbiat Modares University of Tehran in the frequency ranges of 63 to 500 Hz and 630 to 6300 Hz using impedance tubes models BSWA 422 and BSWA 477, respectively, as per the ISO 10534-2 standard.

3. RESULTS AND DISCUSSION

As shown in Fig. 1, for bulk densities of 400 and 500 kg/m³, the thickness of the panels affected the low-frequency sound absorption performance. In densities of 400 and 500 kg/m³, increasing the thickness from 2 to 4 cm increased the peak absorption coefficient by 0.23 and 0.16, respectively. Fig. 2 demonstrates that as the thickness of the panel increases at a high-frequency range, the absorption coefficients rise significantly, and an additional peak value can be observed at greater thickness. The highest increase in absorption coefficient due to thickness change was approximately 0.6, which occurred at 1000 Hz in both bulk densities. As evident from Table 1, in the high-frequency range and for WWCPs with a thickness of 2 cm, an increase in bulk density from 400 to 600 kg/m³ resulted in an increase of 0.18 in the average sound absorption (SAA). At low frequencies, however, there was no significant difference between SAA of different bulk densities. Density had no meaningful effect on low-frequency sound absorption in samples with a thickness of 4 cm, but the SAA at 630 to 6300 Hz increased with an increase in density from 400 to 500

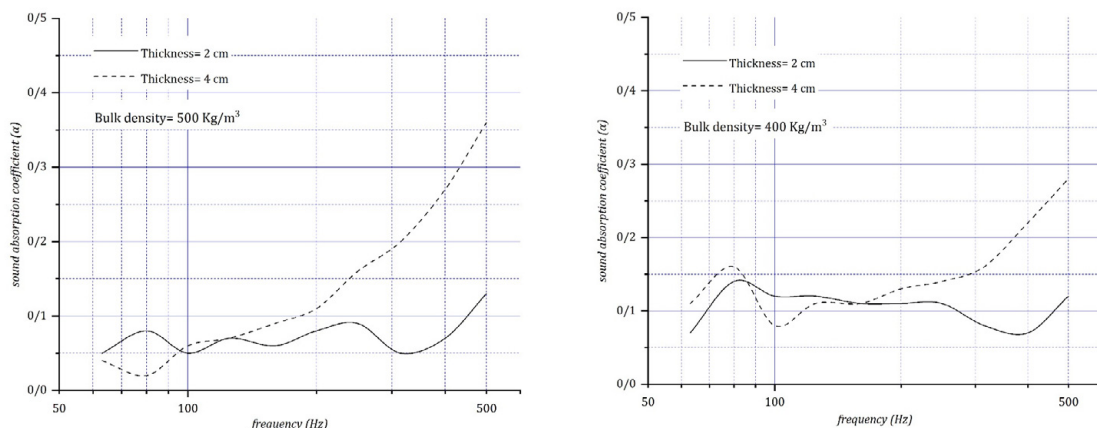


Fig. 1: Effect of thickness on the sound absorption coefficient of WWCPs in the low-frequency range

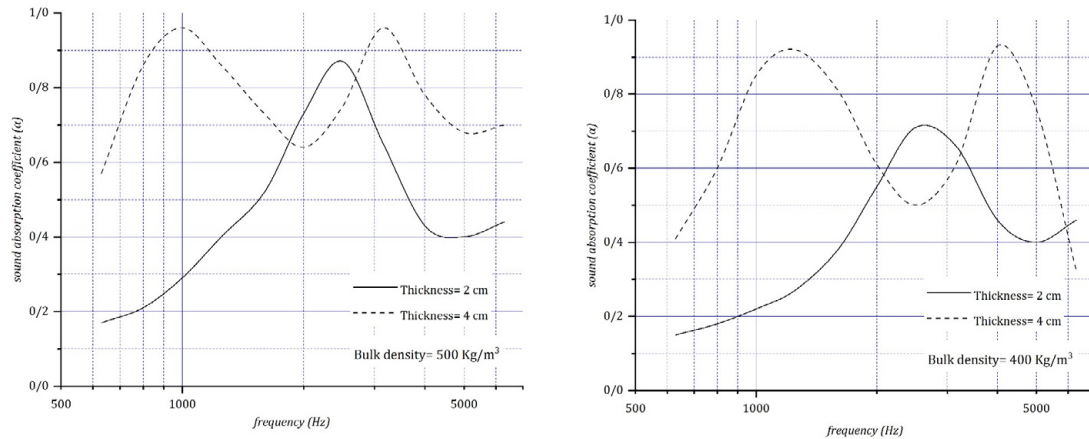


Fig. 2: Effect of thickness on the sound absorption coefficient of WWCPs in the high-frequency range

Table 1: Sound absorption average of different bulk densities at the low and high-frequency range

| Thickness (cm) | Bulk density (kg/m ³) | SAA at the low-frequency range (63-500 hz) | SAA at the high-frequency range (630-6300 hz) |
|----------------|-----------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| 2 | 400 | 0.11 | 0.4 |
| | 500 | 0.07 | 0.46 |
| | 600 | 0.09 | 0.58 |
| 4 | 400 | 0.15 | 0.67 |
| | 500 | 0.14 | 0.77 |
| | 600 | 0.21 | 0.66 |

kg/m³. Intriguingly, as the bulk density increased to 600 kg/m³, the absorption of high-frequency sound declined.

4. CONCLUSIONS

This study indicates that WWCPs possess suitable acoustic absorption. Moreover, they can be localized for mass production in Iran. The results show that increasing the thickness in both low and

high-frequency ranges leads to improved sound absorption. Increasing bulk density to 500 kg/m³ increases sound absorption, particularly at high frequencies. However, it appears not to affect low-frequency acoustic absorption.

5. ACKNOWLEDGMENT

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

جذب صوتی جاذب‌های رشته چوب - سیمان

علی جعفری^۱، محمدرضا منظم اسمعیل پور^{۱*}، علی خوانین^۲، مائده لشگری^۲، سیدعلی قریشی^۳

^۱ گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران

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

^۳ گروه علوم تربیتی، دانشگاه پیام نور تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۱۸، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۲۹

چکیده

مقدمه: جاذب‌های آکوستیکی رشته چوب - سیمان (WWCPs) موادی هستند که در کنار کاربردهای آکوستیکی به‌عنوان عایق‌های گرما، انرژی و رطوبت نیز مصرف دارند. پژوهش پیش رو جهت طراحی، ساخت و تعیین تأثیر پارامترهای اساسی تولید و عرضه این محصول یعنی ضخامت و دانسیته بالک بر روی ضریب جذب صدا در دو بازه فرکانسی پائین و بالا انجام شد.

روش کار: مراحل ساخت نمونه شامل آماده‌سازی و ترکیب مواد اولیه، قالب‌گیری با استفاده از قالب‌های منطبق با قطر لوله‌های امیدانس و نهایتاً خروج از قالب و خشک‌سازی می‌باشد. نمونه‌ها در دو ضخامت ۲ و ۴ سانتی‌متر و سه دانسیته بالک ۴۰۰، ۵۰۰ و ۶۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب ساخته شدند. اندازه‌گیری ضریب جذب آکوستیکی بر اساس استاندارد ISO 10534-2 انجام شد.

یافته‌ها: بر اساس یافته‌های این پژوهش در بازه فرکانسی پائین، افزایش ضخامت از ۲ به ۴ سانتی‌متر، افزایش ضریب جذب به مقدار ۰/۱۶ و ۰/۲۳ در فرکانس ۵۰۰ هرتز را به ترتیب برای دانسیته‌های ۴۰۰ و ۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب به دنبال داشت. در بازه فرکانسی بالا نیز افزایش ضخامت موجب اضافه شدن یک پیک جذبی و بالا رفتن مقدار این پیک‌های جذب تا ۰/۹۲ شد. در نمونه‌های با ضخامت ۴ سانتی‌متر، با افزایش دانسیته بالک از ۴۰۰ به ۶۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، پیک جذب در بازه فرکانسی پائین به مقدار ۰/۴ افزایش یافت. این افزایش دانسیته در ضخامت ۲ سانتی‌متر و بازه فرکانسی بالا نیز پیک جذب را به مقدار ۰/۲۶ افزایش داد.

نتیجه‌گیری: جاذب‌های WWCPs جزو معدود جاذب‌های آکوستیکی هستند که از قابلیت تولید انبوه در کنار زیبایی ظاهری و ویژگی‌های مکانیکی قابل قبول برخوردار هستند. افزایش ضخامت این نوع جاذب، جذب آن‌ها را در هر دو بازه فرکانسی بالا و پائین افزایش می‌دهد. با افزایش دانسیته بالک البته تا حدود ۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب نیز کارایی جذب در هر دو رنج فرکانسی بهبود می‌یابد.

کلمات کلیدی: جذب صدا، رشته چوب-سیمان، لوله امیدانس، مواد آکوستیکی

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبه: esmaeelm@sina.tums.ac.ir

مقدمه

و محققین به دنبال یافتن روش‌های جدید جهت جایگزین نمودن الیاف طبیعی به جای الیاف مصنوعی می‌باشند (۱۰-۱۲). روند رو به رشد استفاده از الیاف طبیعی را می‌توان به دانسیته پائین، فراوانی بالا (۱۳، ۱۴)، سازگاری زیاد با محیط‌زیست (۱۵، ۱۶) و عدم وجود عوارض سلامتی نسبت داد (۱۷، ۱۸). با این‌وجود بسیاری از جاذب‌های الیاف طبیعی مورد توسعه به علت عدم برخورداری از ویژگی‌های مکانیکی و عملیاتی قابل قبول، امکان تولید انبوه را نداشته و از طول عمر کافی برخوردار نیستند. براین اساس نیاز است تا از الیاف طبیعی با امکان تولید بالا در کنار دیگر مواد طبیعی که منجر به ایجاد مقاومت مکانیکی کافی می‌شوند استفاده کرد.

رشته‌های چوب، گروهی از الیاف طبیعی هستند که عموماً از رنده شدن تنه درختانی همچون صنوبر و کاج به دست می‌آیند. چنین الیافی از گذشته تا به امروز در ساخت مواد متنوعی همچون انواع پنل‌ها و صفحات ساختمانی کاربرد داشته‌اند (۱۹). الیاف چوب در ترکیب با انواع سیمان‌ها به‌ویژه سیمان پرتلند، مواد اصلی جاذب‌های رشته چوب - سیمان^۲ (WWCPs) را تشکیل می‌دهند که علاوه بر کاربردهای آکوستیکی به‌عنوان عایق‌های گرم، انرژی و رطوبت نیز مصرف دارند. ریبرو و همکاران (۲۰) تأثیر جاذب‌های WWCPs را بر روی وضعیت آکوستیکی کلاس‌های موجود بررسی کردند و نتایج نشان داد که جاذب‌های WWCPs با ضخامت ۵ سانتی‌متر موجب بهبود فهم کلام و مقادیر شاخص انتقال کلام می‌شوند. ترکیب سیمان به این جاذب‌ها خاصیت ضد حریق، مقاومت در برابر عوامل بیولوژیکی و طول عمر بالایی را بخشیده است. مواد مورد استفاده در ساخت WWCPs علاوه بر ایجاد خصوصیات مکانیکی قابل قبول در محصول نهایی، نسبت به محیط‌زیست سازگار می‌باشند (۹، ۲۱).

علی‌رغم استفاده گسترده از WWCPs به‌عنوان جاذب‌های آکوستیکی و بررسی و تحقیقات قابل توجه بر روی خواص مکانیکی آن‌ها (۲۲-۲۴)، جهت تعیین تأثیر انواع ویژگی‌های ساختاری بر روی خواص آکوستیکی

آلودگی صوتی به‌عنوان یکی از رایج‌ترین ریسک فاکتورهای شغلی در جهان شناخته شده است (۱). شاغلان به‌ناچار در مواجهه با محیط‌های پرسروصدا قرار می‌گیرند و طولانی شدن این مواجهه می‌تواند مشکلاتی همچون کاهش تمرکز (۲) کاهش راندمان کاری (۳) افزایش آسیب‌های مرتبط از جمله اختلال شنوایی، سردرد و بیماری‌های عصبی را به دنبال داشته باشد (۴-۶). بر همین اساس، سروصدای موجود در محیط‌های شغلی و غیر شغلی باید به‌طور مؤثری برطرف شود و یا تا حدود قابل قبولی کاهش یابد.

امروزه روش‌های متنوع و گسترده‌ای جهت کنترل صدا وجود دارد که برخی از آن‌ها عبارت‌اند از استفاده از عایق‌ها و جاذب‌ها، محفظه‌های صوتی، سایلنسرها یا مافلرها، کنترل ارتعاشات و یا روش‌های فعال کنترل امواج آکوستیکی. در این میان استفاده از جاذب‌های صدا یکی از رایج‌ترین روش‌های کنترلی می‌باشد. مواد جاذب صدا علاوه بر کاربرد در آکوستیک معماری و ساختمان، به‌عنوان یک بخش اساسی در دیواره محفظه‌ها یا محصورکننده‌های منبع صدا در صنایع نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند (۷).

به‌طورکلی جذب صدا فرآیندی است که طی آن انرژی آکوستیکی امواج طولی مکانیکی در اثر برخورد و برهمکنش با ماده جاذب و به علت اتلاف انرژی ناشی از اصطکاک سیال^۱ (هوا) مستهلک می‌گردد. با افزایش این تبدیل انرژی، مقدار جذب صدای ماده جاذب نیز افزایش می‌یابد (۸). مواد متخلخل دارای شبکه‌ای از مسیرهای هوایی پیوسته یا ناپیوسته و نامنظمی هستند که منجر به اتلاف انرژی صوتی برخوردی به این مواد خواهند شد و بر این اساس به‌طور گسترده‌ای به‌عنوان جاذب‌های صوتی بکار می‌روند. جاذب‌های ساخته‌شده از الیاف رشته‌ای عموماً دارای تخلخل کافی بوده و جذب آکوستیکی مناسبی را منجر می‌شوند (۹). امروزه استفاده از الیاف طبیعی در ساخت جاذب‌های صوتی در حال افزایش بوده

2. Wood Wool Cement Panels

1. Fluid frictional energy dissipation

مکانیکی و یا تست‌های مقاومت نسبت به رطوبت، حریق و عوامل بیولوژیکی بر روی این نوع جاذب هموار شود. در مطالعه حاضر پس از ساخت این جاذب با استفاده از مواد اولیه تولید ایران (سیمان پرتلند و رشته‌های چوب)، ضریب جذب صوتی در چندین ضخامت و دانسیته بالک و در دو بازه فرکانسی پائین (۶۳ تا ۵۰۰ هرتز) و بالا (۶۳۰ تا ۶۳۰۰ هرتز) مورد اندازه‌گیری و مقایسه قرار گرفت.

روش کار

نمونه‌های WWCPs

جهت بررسی تأثیر ضخامت و دانسیته بالک WWCPs بر روی ضریب جذب صدا، تعداد ۱۲ نمونه اصلی در دو قطر ۳۰ و ۱۰۰ میلی‌متر، دو ضخامت ۲ و ۴ سانتی‌متر و در سه دانسیته بالک ۴۰۰، ۵۰۰ و ۶۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب مورد آزمایش قرار گرفت. نسبت وزنی سیمان به الیاف در تمامی نمونه‌ها مقدار ۲ به ۷ بوده است. جهت ساخت نمونه‌هایی گرد با قطر مدنظر و حذف فرآیند برش نمونه توسط دستگاه‌های برش (CNC)، به‌جای استفاده از قالب‌های اصلی ساخت WWCPs، دو قالب گرد به قطرهای داخلی برابر با قطر لوله‌های امپدانس مورد استفاده در اندازه‌گیری ضریب جذب یعنی ۳۰ و ۱۰۰ میلی‌متر ساخته شد و جهت قالب‌گیری نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفتند. در فرآیند ساخت نمونه‌های WWCPs رشته‌های چوب درخت صنوبر شمال ایران و سیمان سفید پرتلند ساخت شرکت بنوید ایران مورد استفاده قرار گرفت. این رشته‌ها به مدت ۶ ماه جهت خشک شدن انبار شدند. بر اساس روابط (۱) و (۲) می‌توان ابتدا حجم نمونه (V) و سپس مقدار جرم (m) کل مواد اولیه را محاسبه کرد:

$$v = h(\pi d^2/4) \quad \text{رابطه ۱}$$

$$m = \rho \cdot v \quad \text{رابطه ۲}$$

در این روابط، پارامتر ρ دانسیته بالک، h ضخامت و d قطر قالب مدنظر می‌باشد. با مشخص بودن جرم کل مواد

این جاذب‌ها به بررسی و پژوهش‌های بیشتری نیاز است (۱۹، ۲۵، ۲۶). باترمن و همکاران (۲۰۱۸) تأثیر پارامترهای دانسیته، ضخامت و پهنای رشته‌های چوب را بر ضریب جذب صوتی نمونه‌های تجاری WWCPs ساخته‌شده توسط شرکت Knauf Insulation در بازه فرکانسی ۲۰۰ تا ۲۵۰۰ هرتز مورد بررسی قرار دادند. نتایج این مطالعه نشان داد که افزایش ضخامت از ۱۵ به ۳۵ میلی‌متر به همراه افزایش دانسیته از ۳۳۰ به ۴۵۸ کیلوگرم بر مترمکعب منجر به افزایش ضریب جذب در بازه فرکانسی مورد بررسی خواهد شد. همچنین یافته‌های این مطالعه نشان داد که نتایج به‌دست‌آمده توسط مدل Johnson-Champoux-Allard (JCA) با نتایج اندازه‌گیری بیشترین تناسب را دارا می‌باشد (۹). نا و همکاران (۲۰۱۸) نیز در پژوهشی به بررسی تأثیر ویژگی‌های ضخامت، دانسیته حجمی، طول رشته‌های چوب و نسبت وزنی سیمان به چوب بر روی کارایی جذب صدا در جاذب‌های چوب - منیزیم در بازه فرکانسی ۲۰۰ تا ۲۰۰۰ هرتز پرداختند. بر اساس داده‌های به‌دست‌آمده، ضخامت و طول الیاف تأثیر معنی‌داری بر روی کارایی جذب صوت این نوع پنل‌ها دارند (۲۷). در هیچ‌یک از پژوهش‌های حاضر تا سال ۲۰۲۲ به بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر روی ضریب جذب صوتی جاذب‌های چوب - سیمان در بازه‌های فرکانسی بالاتر از ۲۵۰۰ هرتز پرداخته نشده است. همچنین، به‌طور کلی تعداد پژوهش‌هایی که مشخصاً در جهت بررسی خواص آکوستیکی این نوع جاذب‌ها و عوامل مؤثر بر روی آن انجام شده است، در مقایسه با کاربرد گسترده آن بسیار محدود است. به علت عدم وجود نمونه‌های تجاری WWCPs در بازار ایران و نیز تعداد اندک پژوهش‌های متمرکز بر روی خواص آکوستیکی این نوع جاذب‌ها، نیاز است تا چنین جاذب‌هایی تولید و جذب آکوستیکی آن‌ها مورد بررسی قرار گیرد. از سوی دیگر، ساخت این ماده کامپوزیتی با استفاده از فرآیندها و مواد اولیه داخلی و نیز ارائه نتایج مربوط به اندازه‌گیری‌های جذب آکوستیکی موجب خواهد شد تا مسیر انجام مطالعات و بررسی‌های آینده مانند اندازه‌گیری پارامترهای



شکل ۱: قالب ۳۰ میلی‌متری زیر پرس هیدرولیک



شکل ۲: نمونه‌های ۳۰ و ۱۰۰ میلی‌متری WWCP

تحت نیروی ۱۰۰۰ تا ۳۰۰۰ نیوتونی (۱ الی ۳ تن) قرار گیرند که این نیرو توسط یک پرس هیدرولیک ۲۵ تن تأمین شد. شکل ۱، قالب ۳۰ میلی‌متری را درحالی‌که زیر پرس هیدرولیک قرار گرفته است نشان می‌دهد. نمونه‌ها جهت شکل گرفتن و سفت شدن اولیه سیمان، به مدت ۲۴ ساعت در قالب و تحت فشار باقی‌مانده و سپس از قالب خارج شدند. نمونه‌های خارج‌شده از قالب برای کامل شدن فرآیند عمل‌آمدن سیمان و خشک شدن، به مدت ۳۰ روز در دمای اتاق نگهداری شدند تا برای تست‌های آکوستیکی مدنظر آماده شوند. شکل ۲، نمونه ۳۰ و ۱۰۰ میلی‌متری را پس از آماده‌سازی و خشک شدن نهایی نشان می‌دهد.

اولیه و نسبت سیمان به الیاف، جرم سیمان و نیز الیاف به‌طور مجزا محاسبه شدند. سپس الیاف به مقدار محاسبه‌شده برای هر نمونه با استفاده از ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۱ گرم وزن و به مدت ۲ ساعت در آب معمولی با دمای اتاق غوطه‌ور شده تا مواد شیمیایی آن‌ها همچون تانین و مواد قندی چوب از الیاف خارج شوند. وجود چنین ترکیباتی در الیاف چوب، فرآیند عمل‌آوری^۱ سیمان را محدود و آب در دسترس سیمان را کاهش می‌دهد. در مرحله بعد به مقدار ۴۰ درصد وزن سیمان، آب معمولی تهیه و با سیمان ترکیب شد تا ملات نهایی آماده شود. در مرحله قالب‌گیری و رسیدن به دانسیته مدنظر نیاز است تا ترکیب مواد اولیه

1. Cement curing

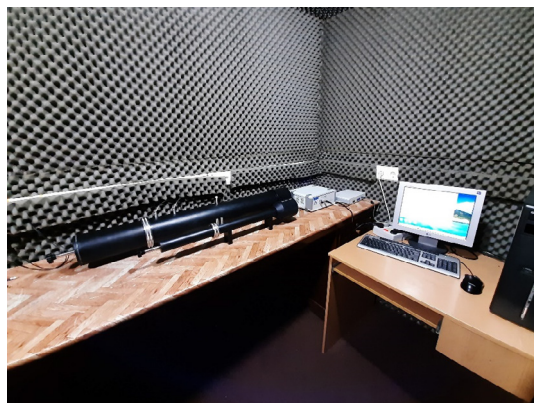
اندازه‌گیری ضریب جذب صدا

ضریب جذب آکوستیکی برای هر نمونه با استفاده از دو لوله امپدانس به قطرهای ۱۰۰ و ۳۰ میلی‌متر، مجهز به دو میکروفون بر اساس ماتریس انتقال و به شکل تابعی از فرکانس، اندازه‌گیری و ثبت شد. لوله امپدانس ۱۰۰ میلی‌متری برای اندازه‌گیری ضریب جذب صدا در بازه فرکانسی پائین و لوله امپدانس ۳۰ میلی‌متری مربوط به اندازه‌گیری در بازه فرکانسی بالا می‌باشند؛ بنابراین برای هر نمونه دو قطر ۳۰ و ۱۰۰ میلی‌متر به ترتیب جهت قرارگیری در لوله امپدانس‌های مطابق با همین ابعاد ساخته شد. شکل ۳، نشان‌دهنده لوله امپدانس‌ها و تجهیزات مربوط به اندازه‌گیری ضریب جذب صدا می‌باشد. جهت کاهش خطاهای اندازه‌گیری مانند عدم قرارگیری صحیح نمونه در داخل دستگاه، برای هر نمونه، اندازه‌گیری سه بار تکرار شد و در هر تکرار،

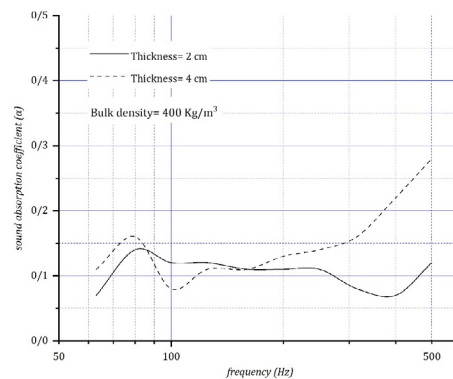
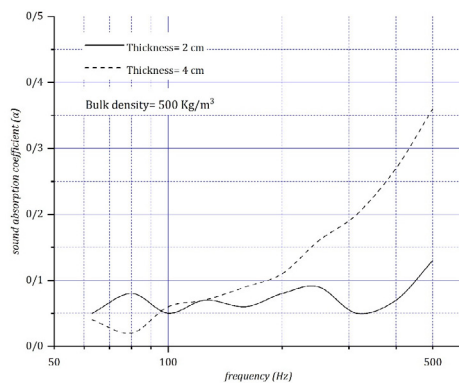
نمونه از دستگاه خارج و دوباره در داخل دستگاه قرار گرفت. مقادیر ضریب جذب گزارش شده برای هر نمونه، میانگین سه تکرار می‌باشند (۱۸). جهت اندازه‌گیری ضریب جذب صوت در فرکانس‌های پایین یعنی ۶۳ تا ۵۰۰ هرتز از لوله امپدانس مدل SW ۴۲۲ (قطر ۱۰۰ میلی‌متر) و در فرکانس‌های بالا یعنی ۶۳۰ تا ۶۳۰۰ هرتز از لوله امپدانس مدل SW ۴۷۷ (قطر ۳۰ میلی‌متر) ساخت شرکت BSWA کشور چین استفاده شد.

اندازه‌گیری خواص فیزیکی

ابعاد نمونه‌ها: قطر و ضخامت نمونه‌های نهایی با استفاده از کولیس دیجیتال ساخت شرکت Insize مدل ۱۵۰-۱۱۱۲ با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. حجم نمونه: با استفاده از قطر و ضخامت اندازه‌گیری



شکل ۳: تجهیزات اندازه‌گیری ضریب جذب صدا (امپدانس تیوب)



شکل ۴: تأثیر ضخامت بر روی ضریب جذب آکوستیکی WWCPs در بازه فرکانسی ۶۳ تا ۵۰۰ هرتز

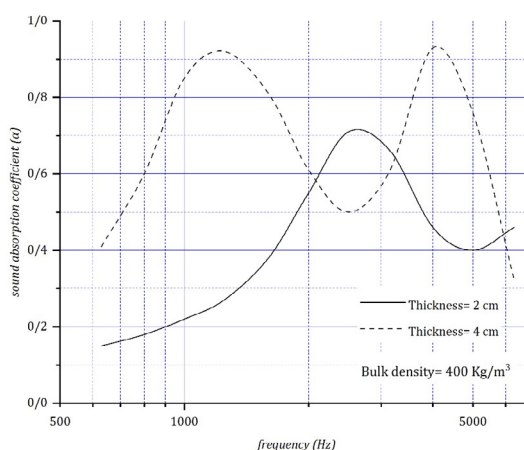
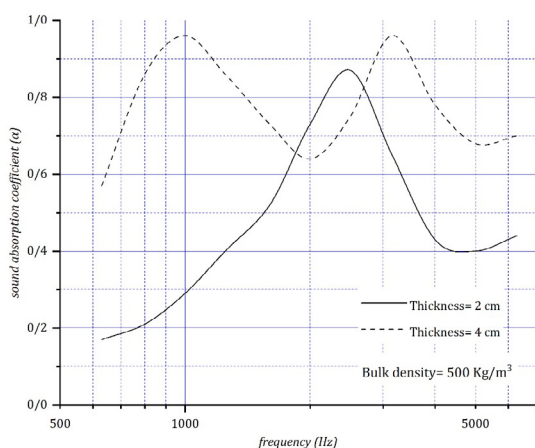
آکوستیکی با استفاده از لوله امیدانس‌های ۲ کاناله و تجهیزات جانبی آن متعلق به آزمایشگاه آکوستیک دانشگاه تربیت مدرس تهران و در محل این آزمایشگاه، بر اساس استاندارد ۲-۱۰۵۳۴ ISO انجام گرفتند. جهت بررسی تکرارپذیری (دقت) اندازه‌گیری‌ها، سه نمونه مشابه با ضخامت ۲ سانتی‌متر و نیز سه نمونه مشابه با ضخامت ۴ سانتی‌متر و همگی با دانسیته یکسان ساخته شده و سپس ضرایب جذب آن‌ها اندازه‌گیری شد. ضرایب جذب نمونه‌های دارای ضخامت یکسان مورد مقایسه قرار گرفت و نشان داد که در نمونه‌های کاملاً مشابه، تفاوتی در

شده، مورد محاسبه قرار گرفت.

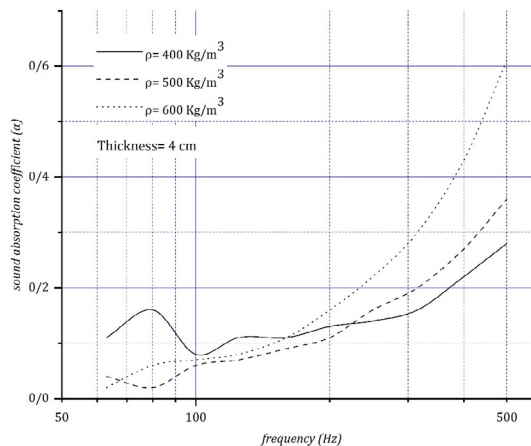
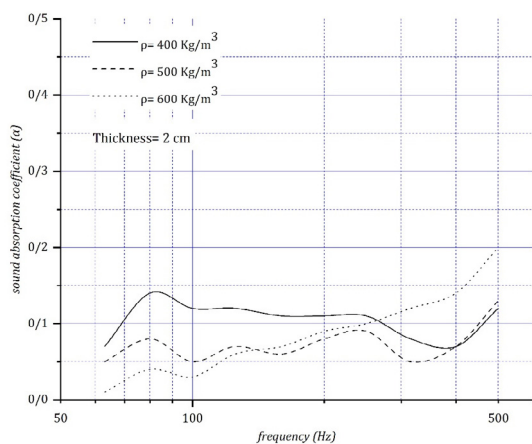
جرم نمونه: مجموع وزن اولیه سیمان و الیاف خشک می‌باشد که با استفاده از ترازو آزمایشگاهی MH مدل ۸۸۶ با دقت ۰/۱ گرم اندازه‌گیری شدند. دانسیته بالک نمونه: با استفاده از جرم و حجم اندازه‌گیری شده نمونه‌ها، محاسبه شد.

تکرارپذیری (دقت) و صحت اندازه‌گیری

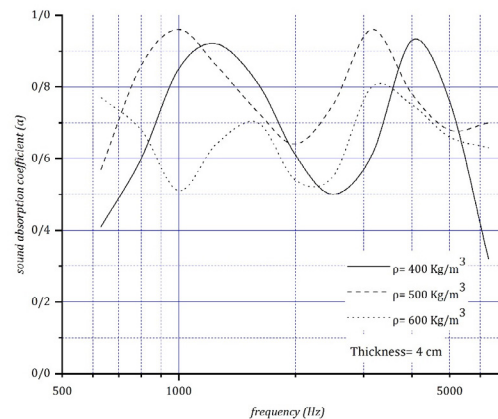
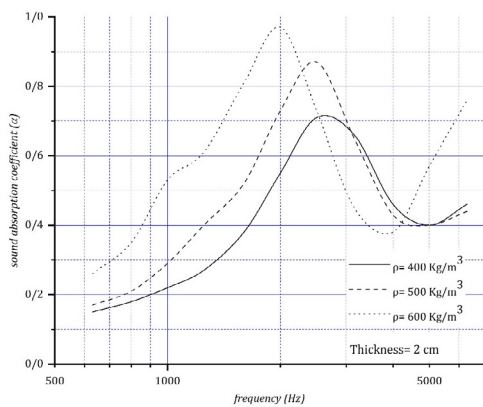
کلید اندازه‌گیری‌ها، کالیبراسیون و الزامات مورد نیاز برای اندازه‌گیری پارامترهای امیدانس و ضریب جذب



شکل ۵: تأثیر ضخامت بر روی ضریب جذب آکوستیکی WWCPs در بازه فرکانسی ۶۳۰ تا ۶۳۰۰ هرتز



شکل ۶: تأثیر دانسیته بالک بر روی ضریب جذب آکوستیکی WWCPs در بازه فرکانسی ۶۳ تا ۵۰۰ هرتز



شکل ۷: تأثیر دانسیته بالک بر روی ضریب جذب آکوستیکی WWCPs در بازه فرکانسی ۶۳۰ تا ۶۳۰۰ هرتز

جدول ۱: مقایسه تأثیر دانسیته بالک بر روی ضریب جذب صوت میانگین در بازه‌های فرکانسی پائین و بالا

| ضخامت (سانتی‌متر) | دانسیته بالک (Kg/m ³) | ضریب جذب صوت میانگین در بازه فرکانسی بالا (۶۳۰-۶۳۰۰ هرتز) | ضریب جذب صوت میانگین در بازه فرکانسی پائین (۶۳-۵۰۰ هرتز) |
|----------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| ۲ | ۴۰۰ | ۰/۴ | ۰/۱۱ |
| | ۵۰۰ | ۰/۴۶ | ۰/۰۷ |
| | ۶۰۰ | ۰/۵۸ | ۰/۰۹ |
| ۴ | ۴۰۰ | ۰/۶۷ | ۰/۱۵ |
| | ۵۰۰ | ۰/۷۷ | ۰/۱۴ |
| | ۶۰۰ | ۰/۶۶ | ۰/۲۱ |

۶۳۰ الی ۶۳۰۰ هرتز می‌باشد. در هر دو دانسیته ۴۰۰ و ۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، افزایش ضخامت از ۲ به ۴ سانتی‌متر موجب افزایش ضریب جذب آکوستیکی در کل بازه فرکانسی مذکور شد. بیشترین مقدار افزایش ضریب جذب ناشی از افزایش ضخامت، در فرکانس ۱۰۰۰ هرتز و برابر با ۶/۰ در هر دو دانسیته می‌باشد.

تأثیر دانسیته بالک بر ضریب جذب صوت

جهت بررسی تأثیر دانسیته بالک بر روی ضریب جذب آکوستیکی WWCPs، سه دانسیته ۴۰۰، ۵۰۰ و ۶۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب در دو ضخامت ۲ و ۴ سانتی‌متر مورد بررسی قرار گرفتند. همان‌طور که شکل ۶ نشان داده شده است، در بازه فرکانسی ۶۳ تا ۵۰۰ هرتز و برای ضخامت ۲ سانتی‌متر، تغییر در دانسیته بالک اثر قابل توجهی بر ضرایب

ضرایب جذب اندازه‌گیری شده وجود ندارد.

یافته‌ها

تأثیر ضخامت بر ضریب جذب صوت

شکل ۴ تأثیر ضخامت بر روی ضریب جذب آکوستیکی جاذب‌ها در بازه فرکانسی پائین (۶۳ تا ۵۰۰ هرتز) و در دو دانسیته مختلف را نشان می‌دهد. در هر دو دانسیته و در فرکانس‌های پایانی بازه یعنی حدود ۳۰۰ تا ۵۰۰ هرتز، مقدار ضریب جذب آکوستیکی با افزایش ضخامت از ۲ به ۴ سانتی‌متر افزایش پیدا کرد. این افزایش در فرکانس ۵۰۰ هرتز، برای دانسیته ۴۰۰ و ۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب به ترتیب برابر با ۰/۶۱ و ۰/۳۲ می‌باشد.

شکل ۵ نشان‌دهنده تأثیر ضخامت بر روی ضریب جذب آکوستیکی WWCPs در بازه فرکانسی بالا یعنی

بحث

در بازه فرکانسی پائین، افزایش ضخامت WWCPs از ۲ به ۴ سانتی‌متر در هر دو دانسیته ۴۰۰ و ۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب منجر به افزایش ضریب جذب آکوستیکی در فرکانس‌های ۳۰۰ الی ۵۰۰ هرتز شد (شکل ۴). با این وجود در فرکانس‌های پایین‌تر از ۳۰۰ هرتز تغییر قابل توجهی مشاهده نشد. با توجه به شکل ۵، در بازه فرکانسی ۶۳۰ تا ۶۳۰۰ هرتز نیز به دنبال افزایش ضخامت، ضریب جذب آکوستیکی در کل بازه افزایش زیادی را در هر دو دانسیته نشان داد. علاوه بر این، در ضخامت پائین‌تر یعنی ۲ سانتی‌متر، تنها یک پیک جذب صوت در فرکانس ۲۵۰۰ هرتز برای هر دو دانسیته اتفاق افتاد. در حالیکه با افزایش ضخامت به ۴ سانتی‌متر، دو پیک جذبی در نمودار قابل مشاهده است. این پیک‌های جذب برای دانسیته ۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب در فرکانس‌های ۱۲۵۰ و ۴۰۰۰ هرتز و برای دانسیته ۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب در فرکانس‌های ۱۰۰۰ و ۳۱۵۰ هرتز قرار دارند.

بنابراین می‌توان گفت که افزایش ضخامت، خصوصاً در دانسیته‌های مورد آزمایش این پژوهش، موجب بهبود عملکرد جذب آکوستیکی WWCPs در هر دو بازه فرکانسی پائین و بالا خواهد شد. در اغلب جاذب‌های آکوستیکی افزایش ضخامت به علت افزایش تخلخل و اتلاف انرژی صوتی موجب بهبود ضریب جذب صدا خصوصاً در فرکانس‌های بالا می‌شود (۲۸). یافته‌های پژوهش حاضر نیز با نتایج مطالعات پیشین همسو می‌باشد. در مطالعه باترمن و همکاران، افزایش ۲ سانتی‌متری در ضخامت جاذب چوب-سیمان، ضریب جذب صدای متوسط در بازه فرکانسی ۲۰۰ الی ۲۵۰۰ هرتز را به میزان ۰/۱۳ افزایش داد (۹). پژوهش نا و همکاران نشان داد که افزایش ضخامت جاذب‌های رشته چوب-منیزیم از ۱۵ به ۲۵ میلی‌متر موجب بهبود کارایی جذب صدا در فرکانس‌های ۲۰۰ الی ۲۰۰۰ هرتز می‌شود (۲۷). برد در پژوهش خود به بررسی جذب آکوستیکی اسلب‌های رشته چوب-سیمان در ضخامت‌های ۲۵ الی ۱۲۵ میلی‌متر پرداخت. نتایج این پژوهش نشان داد که با

جذب صدا نداشته است؛ اما در ضخامت ۴ سانتی‌متر، افزایش دانسیته بالک موجب افزایش ضریب جذب صدا خصوصاً در فرکانس‌های ۲۵۰ الی ۵۰۰ هرتز شده است. همچنین در این ضخامت، با افزایش دانسیته بالک از ۴۰۰ به ۶۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، پیک جذب صوت در فرکانس ۵۰۰ هرتز به مقدار ۰/۳۳ افزایش یافته است.

در بازه فرکانسی بالا یعنی ۶۳۰ الی ۶۳۰۰ هرتز و در نمونه‌های با ضخامت ۲ سانتی‌متر، افزایش دانسیته بالک، تغییر در مقدار ضریب جذب صوت حداکثری و نیز فرکانس مربوط به این ضریب جذب را به دنبال داشته است. به طوری که با افزایش دانسیته بالک از ۴۰۰ به ۶۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، ضریب جذب صوت حداکثری از ۰/۷۱ در فرکانس ۲۵۰۰ هرتز به ۰/۹۷ در فرکانس ۲۰۰۰ هرتز رسیده است (شکل ۷). به دنبال این افزایش دانسیته بالک، جذب صوت در اغلب فرکانس‌های بازه ۶۳۰ الی ۶۳۰۰ هرتز نیز افزایش یافته است.

با توجه به شکل ۷ می‌توان دریافت که در WWCPs با ضخامت ۴ سانتی‌متر، افزایش دانسیته بالک از ۴۰۰ به ۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب موجب افزایش ضریب جذب در اکثر فرکانس‌های بازه فرکانسی بالا و نیز تغییر پیک‌های جذب به سمت فرکانس‌های پائین می‌شود. در صورتیکه با افزایش دانسیته بالک به ۶۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، ضریب جذب صوت در این بازه فرکانسی کاهش یافته است. نتایج مربوط به تأثیر دانسیته بالک بر روی ضریب جذب صوت میانگین WWCPs در جدول ۱ ارائه شده است. این نتایج نشان می‌دهد که افزایش دانسیته بالک در ضخامت ۲ سانتی‌متر و بازه فرکانسی پائین تأثیر خاصی بر روی ضریب جذب صوت میانگین نخواهد داشت؛ اما در همین ضخامت و بازه فرکانسی بالا، افزایش دانسیته موجب افزایش جذب صوت میانگین به مقدار ۰/۱۸ شده است. در ضخامت ۴ سانتی‌متر، ضریب جذب میانگین در بازه فرکانسی پائین، از ۰/۱۵ برای دانسیته بالک ۴۰۰ به ۰/۲۱ برای دانسیته بالک ۶۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب رسیده است. همین مقادیر در بازه فرکانسی ۶۳۰ تا ۶۳۰۰ هرتز، به ترتیب ۰/۶۷ و ۰/۶۶ می‌باشد.

استفاده از آن‌ها را خصوصاً در محیط‌هایی با ابعاد کوچک کاهش می‌دهد.

دانسیتته بالک مشخصه‌ای می‌باشد که برای مواد متخلخل چند فاز همچون بسیاری از جاذب‌های صدا و نیز جاذب مورد مطالعه در این پژوهش تعریف می‌شود و عبارت است از نسبت جرم فاز جامد ماده بر حجمی که اشغال می‌کند و بخشی از این حجم می‌تواند توسط هوا یا سیال دیگر اشغال شده باشد (۳۵). با توجه به آنکه دانسیته بالک به‌طور مستقیم بر روی مقاومت جریان^۲ ماده تأثیر دارد، می‌توان آن را به‌عنوان یکی از پارامترهای اساسی مؤثر بر کارایی‌های آکوستیکی مواد و خصوصاً جاذب‌های متخلخل در نظر گرفت. در مواد با مقاومت جریان پائین، اتلاف انرژی صوتی بسیار پائین خواهد بود و در نتیجه جذب مؤثری در ماده اتفاق نمی‌افتد. از سوی دیگر افزایش بیش‌ازحد این مقاومت، کاهش تخلخل و راه‌های هوایی ماده را به دنبال خواهد داشت که در این صورت یک سطح بازتاب‌کننده صدا به وجود خواهد آمد؛ بنابراین نیاز است تا مقدار دانسیته بالک ماده جاذب در محدوده‌ای که بالاترین کارایی جذب صوتی ایجاد می‌شود، مشخص شود (۳۶). در همین راستا شانگ و همکاران (۲۰۱۳) دانسیته‌های بالک مختلف از جاذب‌های ساخته‌شده از الیاف گیاه کاپوک را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش با افزایش دانسیته از ۸/۳ به ۲۵ کیلوگرم بر مترمکعب ضریب جذب صدا بهبود یافته، اما با ادامه افزایش دانسیته بالک، کارایی جذب صوتی کم شد (۳۷). در مطالعه لیم و همکاران (۲۰۱۸) بر روی جذب صدای الیاف گیاه کناف، افزایش دانسیته بالک نمونه‌ها از ۳۰ تا ۱۶۰ کیلوگرم بر مترمکعب جذب صدا را به‌طور قابل توجهی در سرتاسر رنج فرکانسی ۵۰۰ تا ۴۵۰۰ هرتز افزایش داد (۳۸). می‌توان گفت که در بررسی خواص مؤثر بر روی جذب صدای جاذب‌های متخلخل، تعیین یک بازه بهینه برای دانسیته بالک به‌عنوان یکی از نتایج مهم در توسعه جاذب‌های جدید شناخته می‌شود (۳۹، ۴۰).

2. Flow resistivity

افزایش ضخامت این نوع جاذب‌ها از ۵۰ به ۱۰۰ میلی‌متر، ضریب جذب خصوصاً در فرکانس‌های کمتر از ۵۰۰ هرتز افزایش خواهد یافت (۲۵).

در اغلب جاذب‌های صوتی با ساختار متخلخل، پیک‌های جذبی در فرکانس‌های بالا (بیش از ۵۰۰ هرتز) ایجاد می‌شوند. با توجه به این‌که در این نوع جاذب‌ها مکانیسم اصلی جذب صوتی اتلاف انرژی ناشی از اصطکاک سیال می‌باشد، این اتلاف در فرکانس‌های بالا و در اثر افزایش سرعت ذره‌ای^۱ امواج صوتی افزایش یافته و به حداکثر خود می‌رسد (۸).

در واقع ضخامت مواد جاذب نقش عمده‌ای در کاهش انرژی صوتی برخوردی به آن‌ها ایفا می‌کند. Xie و همکاران دریافته‌اند که با افزایش ضخامت جاذب، ضریب جذب صدا خصوصاً در فرکانس‌های بالا افزایش پیدا می‌کند (۲۹). افزایش جذب صوت می‌تواند ناشی از فرآیند استهلاکی طولانی‌تر در رسانایی حرارتی و ویسکوز میان هوا و مواد جاذب در کامپوزیت باشد که با افزایش ضخامت کامپوزیت موجب افزایش میزان جذب صوت خواهد شد (۳۰). آزمون‌های انجام شده بر روی موادی از قبیل کاه شالی، ضایعات نساجی، پشم شیشه، لاستیک خردشده، نمد الیاف و مواد پلی‌استر، همگی نشان داده‌اند که افزایش ضخامت مواد جاذب باعث بیشتر شدن جذب صوت خواهد شد (۳۱-۳۳). آزمون‌های آکوستیکی انجام شده روی الیاف نخل خرما و الیاف نخل روغنی نشان داده است که با افزایش ضخامت لایه، ضریب جذب صوت نیز افزایش می‌یابد و این در حالی است که پیک ضریب جذب صوت به سمت بسامدهای پایین‌تر می‌رود (۳۴)؛ بنابراین، همچنانکه مشاهده می‌شود، افزایش ضخامت مواد جاذب صوت، بدون در نظر گرفتن نوع جاذب (الیافی یا متخلخل)، اثر یکسانی بر میزان جذب صوت دارد. در عین حال باید توجه داشت که با وجود تأثیر واضح این پارامتر، بالا بردن ضخامت مواد تا حدود خاصی قابل قبول بوده و افزایش بیش‌ازحد آن علاوه بر تحمیل هزینه‌های تولید بسیار بالا و افزایش وزن جاذب، امکان عملیاتی

1. Particle velocity

۴۰۰۰ هرتز شده است (۴۱).

نتیجه گیری

پژوهش حاضر جهت ساخت جاذب‌های کاربردی WWCPs و بررسی تأثیر ضخامت و دانسیته بالک بر این نوع جاذب‌ها با هدف یافتن مقدار بهینه برای این ویژگی‌ها در بازه‌های فرکانسی پائین و بالا انجام شد. نتایج اندازه‌گیری‌ها نشان داد که در دانسیته‌های پائین و بالا و در هر دو بازه فرکانسی، افزایش ضخامت منجر به بهبود جذب صدا می‌شود. در بررسی تأثیر دانسیته بالک و در فرکانس‌های پائین، تنها در ضخامت ۴ سانتی‌متر با افزایش دانسیته، جذب صدا بهبود می‌یابد. در صورتی که در WWCPs با ضخامت ۲ سانتی‌متر افزایش دانسیته بر کارایی جذب اغلب فرکانس‌های بازه پائین بی‌تأثیر است. در فرکانس‌های بالا نیز در ضخامت ۲ سانتی‌متر با افزایش دانسیته بالک تا ۶۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، ضریب جذب میانگین نیز افزایش می‌یابد. در ضخامت ۴ سانتی‌متر افزایش ضریب جذب میانگین تا دانسیته ۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب دیده می‌شود ولی در دانسیته ۶۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب نسبت به دانسیته ۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب کاهش یافته است. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که در بازه ضخامت و دانسیته بالک مورد آزمایش در این مطالعه، ضخامت ۴ سانتی‌متر و دانسیته ۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، بالاترین کارایی جذب آکوستیکی را برای WWCPs نشان می‌دهند.

پارامترهایی همچون نسبت وزنی سیمان به چوب و یا رنگ‌آمیزی سطحی جاذب‌های WWCPs متغیرهای دیگری هستند که نیاز است تا تأثیر آن‌ها بر روی خواص آکوستیکی در پژوهش‌های آینده مورد بررسی قرار گیرند. از سوی دیگر بررسی‌های موفولوژیکی بافت چنین جاذب‌هایی در کنار مدل‌های تجربی که بیشترین تطابق را با نتایج اندازه‌گیری دارند جهت پیش‌بینی امیدانس و ضرایب جذب با صرف هزینه و زمان کمتر باید در توسعه‌های آتی مدنظر قرار گیرند.

همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است؛ در WWCPs با ضخامت ۲ سانتی‌متر، افزایش دانسیته بالک از ۴۰۰ به ۶۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب تأثیر واضحی بر روی ضریب جذب در بازه فرکانسی پائین ندارد و در جدول ۱ نیز اختلاف میان ضرایب جذب میانگین برای نمونه‌های مذکور بسیار ناچیز می‌باشد. با این وجود در ضخامت ۴ سانتی‌متر، افزایش دانسیته بالک، ضریب جذب صوت را در نیمه دوم بازه فرکانس ۶۳ الی ۵۰۰ هرتز بهبود بخشیده است. داده‌های جدول ۱ نیز نشان می‌دهد که ضریب جذب متوسط فرکانس‌های پائین برای نمونه‌های ۴ سانتی‌متری، از مقدار ۰/۵۱ برای دانسیته بالک ۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب به ۰/۱۲ برای دانسیته بالک ۶۰۰ مترمکعب رسیده است. در فرکانس‌های بالا یعنی بازه ۶۳۰ الی ۶۳۰۰ هرتز و در هر دو ضخامت ۲ و ۴ سانتی‌متر، افزایش دانسیته منجر به بهبود ضریب جذب شده است و تنها در ضخامت ۴ سانتی‌متر و با افزایش دانسیته از ۵۰۰ به ۶۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، جذب صوت کاهش یافته است (شکل ۷). چنین کاهشی احتمالاً به علت بسته شدن بیش از حد تخلخل موجود در جاذب و کاهش فضاهای خالی می‌باشد. این یافته مطابق با پژوهش‌های پیشین بر روی جاذب‌های متخلخل بوده است. در مطالعات مربوط به بررسی جاذب‌های آکوستیکی، تأثیر دانسیته بر روی کارایی جذب مورد آزمایش قرار گرفته است و در اغلب آن‌ها، افزایش دانسیته تا یک حد خاص، منجر به بهبود ضریب جذب صوت شده است و ادامه افزایش دانسیته بیش از یک مقدار خاص، منجر به کاهش جذب آکوستیکی ماده شده است (۹، ۲۸). در بخشی از مطالعه براردی و همکاران، افزایش دانسیته جاذب ساخته‌شده از الیاف کف در ضخامت ۶ سانتی‌متر موجب افزایش ضریب جذب صوت در رنج فرکانس ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ هرتز شد (۱۶). کوپزومی و همکاران نیز جاذب‌های ساخته‌شده از الیاف طبیعی بامبو را مورد بررسی قرار دادند. نتایج به‌دست‌آمده از اندازه‌گیری لوله امیدانس بر روی سه نمونه با دانسیته ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب نشان داد که افزایش دانسیته منجر به افزایش ضریب جذب صدا در کل بازه فرکانسی ۱۲۵ الی

تشریح و قدردانی

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

مقاله بر خود لازم می‌دانند 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

1. Job RS. The influence of subjective reactions to noise on health effects of the noise. *Environ Int.* 1996;22(1):93-104.
2. Alayrac M, Marquis-Favre C, Viollon S. Total annoyance from an industrial noise source with a main spectral component combined with a background noise. *J Acoust Soc Am.* 2011;130(1):189-99.
3. Kaarlela-Tuomaala A, Helenius R, Keskinen E, Hongisto V. Effects of acoustic environment on work in private office rooms and open-plan offices—longitudinal study during relocation. *Ergonomics.* 2009;52(11):1423-44.
4. Zare S, Nassiri P, Monazzam MR, Pournakht A, Azam K, Golmohammadi T. Evaluation of the effects of occupational noise exposure on serum aldosterone and potassium among industrial workers. *Noise Health.* 2016;18(80):1.
5. Fouladi DB, Nassiri P, Monazzam EM, Farahani S, Hassanzadeh G, Hoseini M. Industrial noise exposure and salivary cortisol in blue collar industrial workers. *Noise Health.* 2012;14(59):184.
6. Basner M, Babisch W, Davis A, Brink M, Clark C, Janssen S, et al. Auditory and non-auditory effects of noise on health. *lancet.* 2014;383(9925):1325-32.
7. Bell LH, Bell DH. *Industrial noise control: Fundamentals and applications*: CRC Press; 2017.
8. Barron RF. *Industrial noise control and acoustics*: CRC Press; 2002.
9. 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.
10. Maderuelo-Sanz R, Nadal-Gisbert AV, Crespo-Amorós JE, Parres-García F. A novel sound absorber with recycled fibers coming from end of life tires (ELTs). *Appl Acoust.* 2012;73(4):402-8.
11. Sakamoto S, Takauchi Y, Yanagimoto K, Watanabe S. Study for Sound Absorbing Materials of Biomass Tubule etc (Measured Result for Rice Straw, Rice Husks, and Buckwheat Husks). *Journal of Environment and Engineering.* 2011;6(2):352-64.
12. Ekici B, Kentli A, Küçük H. Improving sound absorption property of polyurethane foams by adding tea-leaf fibers. *Archives of Acoustics.* 2012;37:515-20.
13. Zabel RA, Morrell JJ. *Wood microbiology: decay and its prevention*: Academic press; 2012.
14. Sjöström E. *Wood chemistry: fundamentals and applications*: Gulf professional publishing; 1993.
15. Asdrubali F, D'Alessandro F, Schiavoni S. A review of unconventional sustainable building insulation materials. *Sustainable Materials and Technologies.* 2015;4:1-17.
16. Berardi U, Iannace G. Acoustic characterization of natural fibers for sound absorption applications. *Build Environ.* 2015;94:840-52.
17. Berardi U, Iannace G. Predicting the sound absorption of natural materials: Best-fit inverse laws for the acoustic impedance and the propagation constant. *Appl Acoust.* 2017;115:131-8.
18. Samaei SE, Mahabadi HA, Mousavi SM, Khavanin A, Faridan M. Optimization and sound absorption modeling of Yucca Gloriosa natural fiber composites. *Iran Occupational Health.* 2021;18(1):1-17.
19. 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.
20. 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.
21. Johansson E. *Woodwool slabs: manufacture, properties and use*: Lund University, Lund Centre for Habitat Studies Lund; 1994.

22. Ahmad Z, Wee L, Fauzi M. Mechanical properties of wood-wool cement composite board manufactured using selected Malaysian fast grown timber species. *ASM Science Journal*. 2011;5(1):27-35.
23. Mrema AL. Cement bonded wood wool boards from podocarpus spp. for low cost housing. *J Civ Eng Res Pract*. 2006;3:51-64.
24. 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.
25. Burd A. Acoustic applications of wood wool cement slabs. *Appl Acoust*. 1984;17(6):439-51.
26. Karlinasari L, Hermawan D, Maddu A, Bagus M, Lucky IK, Nugroho N, et al. Acoustical properties of particleboards made from betung bamboo (*Dendrocalamus asper*) as building construction material. *bioresources*. 2012;7(4):5700-9.
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. Samsudin EM, Ismail LH, Kadir AA. A review on physical factors influencing absorption performance of fibrous sound absorption material from natural fibers. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2016;11(6):3703-11.
29. Xie ZK, Ikeda T, Okuda Y, Nakajima H. Characteristics of sound absorption in lotus-type porous magnesium. *Jpn J Appl Phys*. 2004;43(10R):7315.
30. Mamtaz H, Fouladi MH, Al-Atabi M, Narayana Namasivayam S. Acoustic absorption of natural fiber composites. *Journal of Engineering*. 2016;2016.
31. Tiuc AE, Vasile O, Vermesan H. Acoustic Performance of Composite Materials Made from Textile Waste. *Romanian Journal of Acoustics & Vibration*. 2015;12(2).
32. Asdrubali F, D'Alessandro F, Schiavoni S. Sound absorbing properties of materials made of rubber crumbs. *J Acoust Soc Am*. 2008;123(5):3037.
33. Nick A, Becker U, Thoma W. Improved Acoustic Behavior of Interior Parts of Renewable Resources in the Automotive Industry. *J Polym Environ*. 2002;10(3).
34. Al-Rahman L, Raja IR, Roslan AR, Zawawi I. Comparison of acoustic characteristics of date palm fibre and oil palm fibre. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*. 2014;7(8):1656-61.
35. Buckman HO, Brady NC. The nature and properties of soils: Macmillan; 1922.
36. 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.
37. Xiang H-f, Wang D, Liua H-c, Zhao N, Xu J. Investigation on sound absorption properties of kapok fibers. *Chinese Journal of Polymer Science*. 2013;31(3):521-9.
38. Lim Z, Putra A, Nor MJM, Yaakob M. Sound absorption performance of natural kenaf fibres. *Appl Acoust*. 2018;130:107-14.
39. Zhu W, Nandikolla V, George B. Effect of bulk density on the acoustic performance of thermally bonded nonwovens. *J Eng Fiber Fabr*. 2015;10(3):155892501501000316.
40. Sengupta S, Basu G, Datta M, Debnath S, Nath D. Noise control material using jute (*Corchorus olitorius*): Effect of bulk density and thickness. *The Journal of The Textile Institute*. 2021;112(1):56-63.
41. Koizumi T, Tsujiuchi N, Adachi A. The development of sound absorbing materials using natural bamboo fibers. *WIT Transactions on The Built Environment*. 2002;59:157-66.