

Performance of sound absorption coefficient and sound transmission loss index in lightweight polymeric gypsum fiberboards with writing waste paper fibers

Arghavan Doost^{1*}, Ali Bayatkashkouli², Saeedreza Farrokh Payam³

1- Corresponding author, Department of Wood and Paper Industries, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol Iran. Email: argavan.doost@uoz.ac.ir

2- Department of Wood and Paper Industries, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol, Iran

3- Department of Wood and Paper Industries, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol, Iran

Received: July 2025

Accepted: September 2025

Abstract

Problem definition and objectives: One of the important challenges in improving the quality of gypsum panels is to improve their acoustic properties by lightening them, such as using waste paper fibers, and optimizing the sound absorption and transmission loss of these types of lightened panels can be evaluated. In this study, the acoustic performance of gypsum board panels reinforced with recycled writing waste paper fibers and enhanced with selected polymer additives was investigated. The main aim was to improve sound absorption and sound insulation in these panels.

Methodology: For this purpose, three types of samples were prepared: gypsum board, fiber-reinforced gypsum board (gypsum fiberboard), and fiber-reinforced gypsum board with additives such as polyvinyl alcohol, modified hydrated lime, and cement (polymeric gypsum fiberboard). Sound absorption tests were conducted according to ISO 10534-2 and ASTM E1050 standards using the transfer function method and impedance tube to measure the sound absorption coefficient. Sound insulation was tested based on ASTM E2611-09 to measure the sound transmission loss index. To cover the full frequency spectrum in acoustic testing, 10 cm diameter samples were used for low-frequency ranges (63–500 Hz), and 3 cm diameter samples for higher frequency ranges (630–6300 Hz).

Results: The sound absorption results showed that the polymeric gypsum fiberboard had the best performance up to 4000 Hz compared to the other panels. The fiber-reinforced gypsum panel also outperformed the gypsum board. Both gypsum fiberboard types were slightly better than gypsum board and were classified in the low sound absorption category (Grade E). However, all three samples showed poor performance in low frequencies (around 250 Hz) and mid-range frequencies (500–1000 Hz), while they performed better at high frequencies (2000–4000 Hz), particularly the polymer or fiber-reinforced panels. The highest sound absorption coefficient was achieved by the polymeric gypsum fiberboard, reaching approximately 0.58 at 3150 Hz, followed by the gypsum fiberboard (0.46 at 4000 Hz) and gypsum board (0.44 at 4000 Hz). The matrix formed by the combination of additives, gypsum, and fibers in the polymeric gypsum fiberboard created porosity, improving sound absorption. In terms of sound transmission loss index, both the gypsum fiberboard and polymeric gypsum fiberboard performed better at base frequencies compared to the gypsum board. Interestingly, the gypsum fiberboard outperformed the polymeric gypsum fiberboard in sound insulation. The sound transmission loss index of the polymeric gypsum fiberboard up to 4000 Hz was lower than the gypsum fiberboard but higher than the

gypsum board, with sound transmission reduction reaching up to 28 dB. The sound transmission loss index response of the gypsum board peaked at approximately 33 dB in the 4000–6000 Hz range. The gypsum fiberboard exhibited a more uniform sound transmission loss across all frequency ranges, providing sound insulation up to approximately 37 dB. The polymeric gypsum fiberboard showed moderate performance compared to the other two types.

Conclusion: Generally, all samples demonstrated weak performance below 1000 Hz, with sound insulation below 10 dB, while their best performance was in the mid-frequency range (2000–6000 Hz). Their effectiveness declined above 6000 Hz. Sound insulation graphs indicated that both the gypsum fiberboard and polymeric gypsum fiberboard had a positive effect on the sound transmission loss index. According to the Noise preference measurement charts (based on standard 8834-1) for indoor noise measurement, the gypsum board was rated at 15, while the gypsum fiberboard and polymeric gypsum fiberboard were rated at 20. The porous texture of the polymeric gypsum fiberboard enhanced sound absorption, and the flexible structure of the fiber-reinforced gypsum panel contributed to improved sound insulation. Thus, gypsum fiberboard or polymeric gypsum fiberboard, along with layers of other materials, has the potential for acoustic applications. Gypsum boards reinforced with fibers and polymer additives are used in the production of lightweight, durable, fast-setting, and environmentally friendly building materials and are mainly used in partition walls, false ceilings, wall coverings, and high-rise construction projects.

Keywords: Polymeric gypsum panel, Gypsum board reinforced with fibers, Acoustic properties, Frequency range.

ارزیابی عملکرد ضریب جذب صوت و شاخص افت انتقال صدا در گج‌برگ‌های پلیمری سبک‌سازی شده با الیاف کاغذ باطله اداری

ارغوان دوست^۱، علی بیات کشکولی^۲، سعیدرضا فرخ پیام^۳

۱- نویسنده مسئول، گروه صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: arqavan.doost@uoz.ac.ir

۲- گروه صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران

۳- گروه صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران

تاریخ دریافت: مرداد ۱۴۰۴

تاریخ پذیرش: شهریور ۱۴۰۴

چکیده

بیان مساله و اهداف: یکی از چالش‌های مهم در بهبود کیفیت گج‌برگ‌ها، ارتقای خواص آکوستیکی آن‌ها با سبک‌سازی مانند استفاده از الیاف کاغذ باطله است و بهینه‌سازی جذب و افت انتقال صوت این نوع پانل‌های سبک‌سازی شده را می‌توان مورد ارزیابی قرار داد. در این پژوهش، عملکرد آکوستیکی پانل‌های تخته‌گچی مسلح شده با الیاف کاغذ باطله اداری و تقویت شده با افزودنی‌های پلیمری منتخب، مورد بررسی قرار گرفت. هدف اصلی، بهبود جذب صوت و افت انتقال صوت در این پانل‌ها بود.

مواد و روشها: برای این منظور، سه نمونه شامل تخته‌گج، تخته‌گج الیاف (گج‌برگ)، و تخته‌گج الیاف با مواد مختلف پلی‌وینیل‌الکل، آهک هیدراته اصلاح شده، سیمان (گج‌برگ پلیمری) تهیه گردید. آزمون‌های جذب صوت بر اساس استانداردهای ISO 10534-2 و ASTM E1050 با استفاده از روش تابع انتقال و دستگاه امیدانسی تیوب جهت اندازه‌گیری ضریب جذب صوت و آزمون افت انتقال صدا بر اساس استاندارد ASTM E 2611-09 جهت اندازه‌گیری شاخص افت انتقال صدا انجام شد. برای پوشش کامل طیف فرکانسی مورد نظر در آزمون‌های آکوستیکی، از نمونه‌های با قطر ۱۰ سانتی‌متر در محدوده فرکانسی پایین (۶۳ تا ۵۰۰ هرتز) و نمونه‌های با قطر ۳ سانتی‌متر در محدوده فرکانسی بالاتر (۶۳۰ تا ۶۳۰۰ هرتز) به منظور ارزیابی رفتار آکوستیکی استفاده شد.

نتایج: نتایج آزمون جذب صوت نشان داد که بهترین عملکرد جذب صوت تا ۴۰۰۰ هرتز را گج‌برگ پلیمری نسبت به نمونه‌های گج‌برگ و تخته‌گج دارد و گج‌برگ بهتر از تخته‌گج بود. گج‌برگ و گج‌برگ پلیمری بصورت جزئی بهتر از تخته‌گج است و در گروه با جذب صوت پایین با درجه E قرار دارند. اما هر سه تیمار در فرکانس‌های پایین (در محدوده ۲۵۰ هرتز) و متوسط (در محدوده ۵۰۰ تا ۱۰۰ هرتز) بسیار ضعیف و در فرکانس بالا (در محدوده ۲۰۰۰ تا ۴۰۰۰ هرتز) عملکرد مناسبی بویژه در گج‌برگ‌ها داشته است. بیشترین مقدار جذب صوت مربوط به گج‌برگ با مواد افزودنی است که ضریب جذب آن به حدود ۰/۵۸ در فرکانس ۳۱۵۰ هرتز می‌رسد و بیشترین مقدار ضریب جذب صوت گج‌برگ ۰/۴۶ در فرکانس ۴۰۰۰ هرتز و بیشترین ضریب جذب صوت تخته‌گج ۰/۴۴ در فرکانس ۴۰۰۰ است. ماتریکس تشکیل شده از ترکیب مواد افزودنی با گج و الیاف در نمونه گج‌برگ پلیمری دارای تخلخل می‌باشد و جذب صوت را بهبود می‌بخشد. شاخص افت انتقال صدای گج‌برگ و گج‌برگ پلیمری در فرکانس‌های مینا بهتر از تخته‌گج و همچنین افت انتقال صدای گج‌برگ بهتر از گج‌برگ پلیمری است. محدوده افت انتقال صدای گج‌برگ پلیمری در فرکانس‌های تا ۴۰۰۰ هرتز کمتر از گج‌برگ و بیشتر از گج می‌باشد و کاهش انتقال صدا تا ۲۸ دسی‌بل افزایش می‌یابد. پاسخ فرکانسی افت انتقال صدای تخته‌گج در محدوده ۴۰۰۰-۶۰۰۰ هرتز به حداکثر حدود ۳۳ دسی‌بل می‌رسد. شاخص افت انتقال صدای گج‌برگ عملکرد یکنواخت‌تری نسبت به تخته‌های دیگر دارد و در تمام محدوده فرکانسی تا حدود ۳۷ دسی‌بل افت انتقال صوتی ایجاد می‌کند. عملکرد گج‌برگ پلیمری نسبت به دو تخته دیگر از نظر شاخص افت انتقال صدا متوسط است.

نتیجه گیری: به طور کلی، همه نمونه‌ها در فرکانس‌های پایین (زیر ۱۰۰۰ هرتز) از نظر شاخص افت انتقال صدا عملکرد ضعیفی دارند و مقدار آن کمتر از ۱۰ دسی‌بل است. بهترین عملکرد نمونه‌ها در فرکانس‌های متوسط (۲۰۰۰ تا ۶۰۰۰ هرتز) مشاهده می‌شود و در فرکانس‌های بالاتر از ۶۰۰۰ هرتز کاهش می‌یابد. نمودارهای شاخص افت انتقال صدا نشان می‌دهد که گچ‌برگ و گچ‌برگ پلیمری تاثیر مثبتی بر کاهش افت انتقال صدا دارند. براساس استاندارد ۱-۸۸۳۴ و نمودارهای ارزیابی نویز در فضای داخلی، تخته‌گچ در درجه ۱۵ و گچ‌برگ و گچ‌برگ پلیمری در درجه ۲۰ قرار می‌گیرند. بافت متخلخل گچ‌برگ پلیمری باعث جذب بیشتر صوت و بافت انعطاف‌پذیر گچ‌برگ به دلیل وجود الیاف، موجب افزایش افت انتقال صوت می‌شود. بنابراین، گچ‌برگ یا گچ‌برگ پلیمری در ترکیب با سایر لایه‌های مصالح، قابلیت کاربرد آکوستیکی مناسبی دارند. تخته‌گچ‌های تقویت‌شده با الیاف و افزودنی‌های پلیمری در تولید مصالح ساختمانی سبک، مقاوم، سریع‌الاجرا و دوستدار محیط زیست کاربرد دارند و عمدتاً در دیوارهای جداکننده، سقف‌های کاذب، پوشش‌های دیواری و پروژه‌های بلندمرتبه‌سازی استفاده می‌شوند.

واژه های کلیدی: پانل گچی پلیمری، صفحات گچی تقویت شده با الیاف، خواص آکوستیکی، محدوده فرکانسی.

مقدمه

فرآورده‌های صوتی (آکوستیکی) به طور عموم از مواد پلاستیکی، معدنی و شیمیایی مانند آزیست و پشم معدنی ساخته می‌شوند که مشکلاتی مانند کمبود ماده اولیه، هزینه بالا، کیفیت پایین و سرطان‌زا بودن را دارند و در این صورت ساخت این فرآورده‌ها مشکل‌زا می‌باشد. مواد کامپوزیت الیاف طبیعی به دلیل انواع کیفیت‌های مطلوب، از جمله هزینه ارزان، زیست تخریب‌پذیری و منابع تجدیدپذیر، به عنوان مصالح ساختمانی کاربردی بوده‌اند [۱]. ساختار متخلخل الیاف گیاهی، مزایای متعددی همچون فراوانی نسبی، تجدیدپذیری بالا، قابلیت تجزیه زیستی در خاک و ایمنی زیست‌محیطی را فراهم می‌کند که آن‌ها را از الیاف مصنوعی نظیر پشم شیشه متمایز می‌سازد. افزون بر این، الیاف گیاهی به‌واسطه ساختار متخلخل خود قادرند طیف وسیعی از فرکانس‌های صوتی را جذب کرده و از این‌رو به‌عنوان گزینه‌ای موثر در کاربردهای عایق کاری صوتی مطرح می‌شوند [۲]. امروزه تمایل روزافزونی به استفاده از مصالح ساختمانی عایق در برابر صدا و حرارت وجود دارد، با این حال، کامپوزیت‌ها در حال تحول به سوی محصولاتی با کارایی بالاتر و هزینه کمتر هستند [۳]. بهبود عملکرد آکوستیک پانل‌ها برای پایداری محیط‌های آکوستیک داخلی ضروری است و گچ

می‌تواند عایق مهمی برای پوشش‌های ساختمانی ایجاد کند.

گچ به صورت‌های متنوع در ساختمان‌سازی استفاده می‌شود. بتن یا بلوک گچی با دانسیته‌ی کمتر یا بیشتر از ۰/۹۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب [۴] حتی به صورت پاششی در محل (در عرشه‌های سقفی یا قالب‌ها) در نظر گرفته می‌شود. بلوک‌های گچی، صفحات روکش‌دار گچی، صفحات گچی مسلح‌شده با الیاف، اندودکاری با گچ الیاف‌دار و سقف‌پوش‌های گچی در ساختمان‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد، افزودنی‌هایی مانند آهک ساختمانی (هیدروکسید کلسیم) را می‌توان به‌عنوان ماده‌ی اتصال-دهنده همراه با گچ مورد استفاده قرار داد. تخته‌گچ یا همان گچ‌برگ که با درصدی از الیاف طبیعی یا مصنوعی ساخته می‌شود در استاندارد به صفحات گچی الیاف‌دار تعریف می‌شوند. صفحات روکش‌دار و بدون روکش گچی الیاف‌دار با دانسیته‌های متنوع وجود دارد که دانسیته‌ی گچ‌برگ‌های سبک‌سازی شده در محدوده‌ی ۰/۶ تا ۰/۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب و دانسیته‌ی متوسط بین ۰/۸ تا ۱/۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب و دانسیته‌ی زیاد بین ۱/۱ تا ۱/۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب قرار دارند [۵]. این صفحات به‌عنوان مصالح پوششی، در ساخت دیوارهای جداکننده معمولی، دیوارهای کاذب، سقف‌های خشک، پوشش ستون‌ها و تیرهای سازه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین، در برخی موارد به‌عنوان پوشش کف نیز کاربرد دارند. در این میان، استفاده از افزودنی‌ها و مواد معدنی نظیر سیمان و پرلیت، به همراه یا بدون الیاف

به منظور جلوگیری از افت کیفیت و حفظ معیارهای استاندارد مکانیکی و فیزیکی ضروری است. بطور کلی این محصولات به عنوان یک لایه جداکننده استفاده می‌شود. جداکننده‌ها در اثر کوبش به کفپوش‌ها یا بوسیله امواج صدای هوابرد (صدایی که در هوا منتشر می‌شود) در برخورد به دیواره‌ها به ارتعاش در می‌آیند و می‌تواند باعث ایجاد آلودگی صوتی شوند. گچ‌برگ‌ها به عنوان جداکننده سقف و یا دیوارپوش استفاده می‌شوند و انتقال صدای اولیه هوابرد به فضای مورد نظر از طریق آن‌ها را کاهش انتقال صدای هوابرد می‌گویند. هنگامی که موج صوتی هوابرد به یک جداکننده مانند گچ‌برگ برخورد می‌کند، کاهش انتقال صدای هوابرد آن شامل موج بازتابی، موج جذب شده و موج انتقالی کاهش یافته است [۶]. بنابراین در این تحقیق دو نوع خصوصیات آکوستیکی گچ-برگ به عنوان جداکننده شامل موج جذب شده و انتقالی کاهش یافته بررسی می‌شود. جداکننده‌هایی از مواد متراکم و سنگین مانند بتن، شیشه چندلایه یا صفحات گچی ضخیم که از انتقال امواج صوتی از یک فضا به فضای دیگر ممانعت می‌کند. هدف اصلی این مواد، بازتاب یا مسدودسازی کامل امواج صوتی است و عملکرد آن‌ها با شاخص کاهش صدای انتقال یافته (شاخص افت انتقال صدا) سنجیده می‌شود. در مقابل، جذب صدا به خاصیتی از مواد اشاره دارد که انرژی صوتی را هنگام برخورد جذب کرده و از بازتاب آن در فضای داخلی جلوگیری می‌کنند. این مواد معمولاً متخلخل و سبک بوده و در فضاهایی مانند سالن‌های کنفرانس، کلاس‌های درس و استودیوهای ضبط برای کاهش پژواک و طنین استفاده می‌شوند. شاخص عملکرد آن‌ها ضریب جذب صوت است. بنابراین، تفاوت اصلی این دو مفهوم در هدف عملکرد آن‌هاست، افت انتقال صدا برای جلوگیری از انتقال صدا بین فضاها استفاده می‌شود، در حالی که جذب صدا برای بهبود کیفیت آکوستیکی داخل فضا به کار می‌رود [۷]. ضریب جذب صوت گچ فیبری برای فرکانس‌های ۱۲۵، ۲۵۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ و ۴۰۰۰ هرتز به ترتیب برابر با ۰/۳۵، ۰/۳۰، ۰/۲۰، ۰/۱۵، ۰/۱۰ و ۰/۰۴ می‌باشد [۸]. شاخص افت انتقال صدا اختلاف سطح فشار صوت در دو طرف یک جزء ساختمانی، بر حسب دسی‌بل است. اجزای

ساختمان شامل دیوار گچی ساده، دیوار آجری فشاری، پنجره دو جداره استاندارد و درب چوبی به ترتیب دارای افت انتقال صدا ۳۰ تا ۳۵، ۴۵ تا ۵۰، ۳۲ تا ۳۸ و ۲۸ تا ۳۴ دسی‌بل می‌باشد [۸]. استفاده از تخته‌گچ ایف‌دار در بهبود افت انتقال صدای دیوار ساخته شده از چندسازه ساختمانی با لایه‌های چوبی متقاطع موثر است و اثر نوع مواد بکار رفته برای عایق کردن در این سازه دیوار از اثر افزایش ضخامت اجزای عایق دیوار بیشتر است. مواد متنوع و ساختار تشکیل دهنده دیوار مانع صوت بر روی شاخص افت انتقال صدا تاثیر گذار می‌باشد [۹]. چندسازه لیگنوسلولزی عایقی سبز با کاه گندم، برنج و کلزا به ضخامت ۳ سانتی‌متر با اتصال دهنده هوموپلیمر وینیل-استات ساخته شد. پانل‌های ساخته شده از مواد طبیعی شاخص افت انتقال بالاتری را نسبت به پلی‌استایرن نشان دادند. شاخص افت انتقال پانل گندم حدود ۱۷ دسی‌بل محاسبه شد که نسبت به دو پانل دیگر بهتر بود [۱۰].

گچ‌برگ‌های پلیمری می‌توانند علاوه بر خاصیت استحکام و مقاومت به رطوبت، عایق صدا نیز باشند. گچ-برگ در نقاط مختلف کشور تولید می‌شوند، ولی گچ‌برگ‌های پلیمری و یا گچ‌پلیمری در حال معرفی است و احتمال گسترش تولید آن به صورت شرکت‌های دانش بنیان و یا غیره وجود دارد. این نوع محصولات تا حدودی ضد رطوبت و مورد نیاز بازار مصالح ساختمانی می‌باشند. در حال حاضر گچ‌برگ‌های پلیمری در حال رقابت با گچ-برگ‌های معمولی هستند و دارای بازار رقابت انحصاری همانند تخته فیبر و تخته خرده چوب می‌باشند. ارتقای کیفیت این محصولات پیش‌نیاز رقابت اقتصادی به شمار می‌رود و دستیابی به فناوری‌های مرتبط همراه با بومی‌سازی آن‌ها می‌تواند موجب افزایش درآمد بیشتر گردد. ترکیبات تشکیل دهنده گچ پلیمری شامل موادی مانند پرلیت، آهک هیدراته، اسید سیتریک، اسید استئاریک یا اسیدهای چرب دیگر، پلی‌وینیل‌الکل و یا پلیمرهای مناسب دیگر می‌باشد [۱۱، ۱۲]. از طرف دیگر جهت سبک‌سازی آن الیاف طبیعی و مصنوعی متفاوتی همانند الیاف لیگنوسلولزی، کرک، پشم و الیاف پلیمری مانند الیاف اکریلیک، پلی پروپیلنی و غیره به آن اضافه می‌شود. برج‌ها یا سازه‌های بلندمرتبه و انبوه نیاز به استفاده از مصالح سبک‌سازی شده دارد. الیاف کاغذ باطله بویژه از نوعی که در چندمین مرحله بازیافتی قرار

1 Backing partition

اداری به گچ ساخته شده و تخته گچ الیاف پلیمری یا گچ برگ پلیمری با افزودن الیاف و مواد پلیمری شامل سیمان، پلی‌وینیل‌الکل و آهک اصلاح شده با اسید سیتریک یا آهک پوشش‌دار به گچ ساخته شد. افزودنی‌ها به میزان ۵ درصد وزنی گچ به مخلوط اضافه شدند. ویژگی‌های سه نوع نخته در جدول ۱ آمده است.

گچ برگ پلیمری مورد استفاده در این تحقیق براساس نتایج گزارش پژوهشی ویژگی‌های اپتیمالی از نظر آزمون-های مقاومت فشاری، خمشی و جذب آب داشته، انتخاب شده است [۱۳]. روش تهیه الیاف از کاغذ باطله اداری و خصوصیات آن در این گزارش ذکر شده است. الیاف کاغذ باطله اداری به مقداری به گچ اضافه شد که دانسیته گچ-برگ در محدوده ۰/۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب مطابق با استاندارد ملی ایران به شماره‌ی ۲۷۸۶ در محدوده کم قرار گیرد [۵]. نسبت آب به گچ برای تولید دوغاب در تمام نمونه‌ها ۰/۶ در نظر گرفته شد [۱۲].

دارد، ماده اولیه ارزان قیمت و در دسترس برای سبک-سازی گچ‌برگ‌ها می‌باشد. همچنین این نوع محصولات می‌توانند عایق صوت خوبی باشند که در این صورت یکی از مشکلات بزرگ انبوه‌سازی و نوسازی یعنی آلودگی و انتقال صوت کاهش می‌یابد.

از اینرو ساخت محصولی مانند تخته گچ که دارای خاصیت جذب و دفع صدای حداکثری باشد می‌تواند قابلیت کاربرد مطلوبی در ساختمان‌سازی داشته باشد. هدف این تحقیق ساخت گچ‌برگی است که دارای ضریب جذب صوت و شاخص افت انتقال صدای حداکثری است.

مواد و روش‌ها

سه نوع تخته گچ در این تحقیق جهت بررسی خصوصیات آکوستیکی استفاده شده است. تخته گچ شاهد فقط از گچ (امید سمنان) ساخته شده و تخته گچ الیاف یا گچ‌برگ با اضافه کردن الیاف بازیافت شده کاغذ باطله

جدول ۱. ویژگی‌های دانسیته، pH دوغاب و زمان گیرش سه نوع تخته

ویژگی‌ها		
دانسیته (gr/cm ³)	Ph دوغاب	زمان گیرش (دقیقه)
۱	۱۱/۶	۲۵
۰/۶۷	۱۰/۸	۱۶
۰/۷۲	۱۲	۱۴۵

آزمون جذب صوت به روش تابع انتقال با بهره‌گیری از دستگاه امپدانس تیوب‌آدر آزمایشگاه آکوستیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر انجام شد. این روش مطابق با استانداردهای ISO 10534-2 [۱۵] و ASTM E1050 [۱۶] بوده و از دو میکروفون برای اندازه‌گیری فشار صوت در دو نقطه متفاوت داخل لوله استفاده می‌شود. در این آزمون، نمونه در انتهای بسته لوله امپدانس قرار داده شد و سیگنال صوتی به صورت نویز سفید از منبع صوتی به درون لوله فرستاده شد. دو میکروفون در فواصل مشخص از یکدیگر فشار صوتی را اندازه‌گیری کرده و داده‌ها به یک تحلیل‌گر دو کاناله منتقل شدند تا ضریب جذب صوت به صورت تابعی از فرکانس محاسبه شود.

برای ارزیابی میزان مانع شدن گچ‌برگ‌ها در برابر انتقال صدا، از روش آزمون افت انتقال صوت بر اساس

دوغاب تهیه شده برای نمونه‌ها تا زمان تکمیل فرآیند گیرایش در قالب‌ها باقی می‌ماند و پس از آن تخته گچ از قالب خارج می‌شود. تخته‌ها ابتدا در هوای آزاد و سپس در خشک‌کن در دمای ۴۰±۲ درجه سانتی‌گراد براساس استاندارد شماره‌ی ۲-۱۴۴۷۸ تا زمانی که به جرم ثابت برسد، خشک شدند [۱۴]. پس از خشک کردن، نمونه‌های برای انجام آزمون‌های آکوستیک ضریب جذب صوت و شاخص افت انتقال صدا برش زده شدند. دو نوع نمونه دایره‌ای برای هر کدام از آزمون‌های آکوستیک آماده‌سازی شدند. دو نمونه آزمون‌های آکوستیک شامل نمونه بزرگتر با قطر ۱۰ سانتی‌متر برای محدوده فرکانس ۶۳ تا ۵۰۰ هرتز و نمونه کوچکتر با قطر ۳ سانتی‌متر برای محدوده فرکانس ۶۳۰ تا ۶۳۰۰ هرتز است که تماماً دارای ضخامت یک سانتی متر بودند. تصاویر نمونه‌های بزرگ و کوچک در شکل ۱ مشاهده می‌شود.

² Impedance Tube

تجهیزات حذف شوند. محاسبات نهایی شاخص افت انتقال صوت بر حسب فرکانس، بر اساس داده‌های به‌دست‌آمده و معادلات استاندارد انجام گرفت. تمامی آزمون‌ها در سه تکرار مستقل انجام گرفتند تا از دقت و تکرارپذیری داده‌ها اطمینان حاصل شود. همچنین، طبق این استانداردها، حداقل باید هر تست نمونه سه بار تکرار شود تا خطا به حداقل مقدار ممکن برسد. شکل ۱ نمونه‌های بزرگ ۱۰ سانتی‌متری و کوچک ۳ سانتی‌متری جهت اندازه‌گیری جذب و افت انتقال صوت به ترتیب برای فرکانس‌های ۶۳ تا ۵۰۰ و ۶۳۰ تا ۶۳۰۰ هرتز و دستگاه اندازه‌گیری ضریب جذب و افت انتقال صدا و چگونگی قرار گرفتن نمونه‌های کوچک و بزرگ در لوله امیدانس را نشان می‌دهد.

استاندارد ASTM E2611-09 [۱۷] استفاده شد. در این روش، نمونه‌های بزرگ و کوچک مورد آزمون در بین دو لوله صلب استوانه‌ای قرار داده شد که به‌صورت آکوستیکی و مکانیکی از یکدیگر ایزوله بودند. با تولید نویز سفید در لوله اول، فشار صوتی در چهار نقطه مشخص توسط میکروفون‌ها اندازه‌گیری و ثبت گردید. دستگاه مورد استفاده در این آزمون نیز امیدانس تیوب بود که دارای قابلیت نصب چهار میکروفون در موقعیت‌های استاندارد برای محاسبه شاخص افت انتقال صوت در بازه فرکانسی ۶۳ تا ۶۳۰۰ هرتز همانند دو محدوده قبلی (۶۳ تا ۵۰۰ هرتز) و (۶۳۰ تا ۶۳۰۰ هرتز) بود. پس از انجام نمونه‌برداری اولیه، یک بار دیگر نمونه‌برداری در حالتی انجام شد که لوله باز بود تا اثرات سیستمی و نویز



شکل ۱. نمونه‌های کوچک و بزرگ و دستگاه امیدانس تیوب و نحوه قرار دادن نمونه‌ی آزمونی کوچک و بزرگ در لوله امیدانس

استاندارد ISO 11654 در این فرکانس‌ها به ترتیب برابر با ۰/۸، ۱، ۱، ۱ و ۰/۹ می‌باشد. ضریب جذب صوت کاهش یافته مواد با کاهش ۰/۰۵ ضریب جذب صوت مینا در فرکانس‌های مینا تا مرتبه ای که جمع مقدار اختلاف‌های نامطلوب ضریب جذب عملی و مینا به کمتر از ۰/۱۰ برسد، محاسبه تکرار می‌شود.

شاخص افت انتقال صدا یا کاهش انتقال صدا براساس استاندارد ۱-۸۸۳۴ دارای معیارهایی مانند شاخص افت انتقال صدای اندازه‌گیری شده (عملی) مواد و مقدار مینا برای صدابندی هوابرد (شاخص افت انتقال صدای مینا) در بندهای یک سوم هنگامی و یک هنگامی می‌باشد [۲۰]. مقدار مینا افت انتقال صدا در فرکانس‌های مینا (۱۲۵، ۲۵۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰) را یک هنگامی و اگر برای تعداد فرکانس‌های بیشتر یا ۱۶ فرکانس (تقریباً ۳ فرکانس در هر محدوده فرکانس مینا) باشد را یک سوم هنگامی تعریف می‌شود. البته براساس استاندارد ۱-۸۸۳۴ دو نوع کاربرد فضای طراحی به عنوان بیناب شماره ۱ یا

استاندارد ۸۱۸۴ یا استاندارد معادل آن ISO 11654 مربوط به جذب کننده‌های صدا مصالح ساختمانی مانند صفحات و پانل‌های جذب صدا است. گروه‌بندی استاندارد ضریب جذب صوت طبق ISO 11654 شامل، جذب صوت حداکثر (A)، خیلی زیاد (B)، زیاد (C)، نرمال (D)، کم (E) و صوت برگشتی یا بدون طبقه‌بندی یا جذب است که به ترتیب در فرکانس‌های ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ هرتز دارای حداقل ضریب جذب صوت ۰/۹، ۰/۸، ۰/۶، ۰/۳، ۰/۱۵ و کمتر از ۰/۱۵ می‌باشند. البته در محدوده کمتر از فرکانس‌های ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ هرتز مقدار جزئی کمتر از این محدوده ضریب جذب صوت است [۱۸، ۱۹]. این گروه‌ها براساس سه معیار ضریب جذب صوت اندازه‌گیری شده مواد (ضریب جذب صوت عملی یا واقعی)، ضریب جذب صوت کاهش یافته (وزن یافته) مواد و ضریب جذب صوت مینا می‌باشد. این معیارها در محدوده فرکانس‌های مینا (۲۵۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ و ۴۰۰۰) ثبت و محاسبه می‌شوند. ضریب جذب صوت مینا براساس

بندی می‌شوند. جدول ۲ گروه‌بندی استاندارد ضریب جذب صوت و عملکرد جذب صوت تیمارهای تحقیق را نشان می‌دهد. عملکرد هر سه تیمار در محدوده گروه‌های استاندارد بسیار ضعیف می‌باشد ولی در فرکانس‌های ۲۰۰۰ تا ۴۰۰۰ هرتز عملکرد گچ‌برگ پلیمری مناسب است. بطور کلی گچ‌برگ و گچ‌برگ پلیمری بصورت جزئی بهتر از تخته‌گچ است و در گروه با جذب صوت پایین با درجه E قرار دارند. اما هر سه تیمار در فرکانس‌های پایین (در محدوده ۲۵۰ هرتز) و متوسط (در محدوده ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ هرتز) بسیار ضعیف و در فرکانس بالا (در محدوده ۲۰۰۰ تا ۴۰۰۰ هرتز) عملکرد مناسبی بویژه در گچ‌برگ-ها داشته است.

نویز صورتی وزن یافته (نویز داخلی) برای فعالیت‌های روزمره (گفتگو، موسیقی، رادیو، تلویزیون) و مانند آن و بیناب شماره ۲ یا نویز ترافیک شهری وزن یافته (نویز خارجی) برای ترافیک شهری و مانند آن تعریف شده است که نویز داخلی برای تخته گچ مورد استفاده قرار می‌گیرد. قابل ذکر است بررسی تکمیلی تصاویر میکروسکوپ الکترونیکی روبشی (SEM) انجام شد. این فرایند برای مطالعه نمونه‌های نارسانا، مانند گچ، ضروری است تا امکان تصویربرداری با کیفیت بالا فراهم گردد.

نتایج و بحث

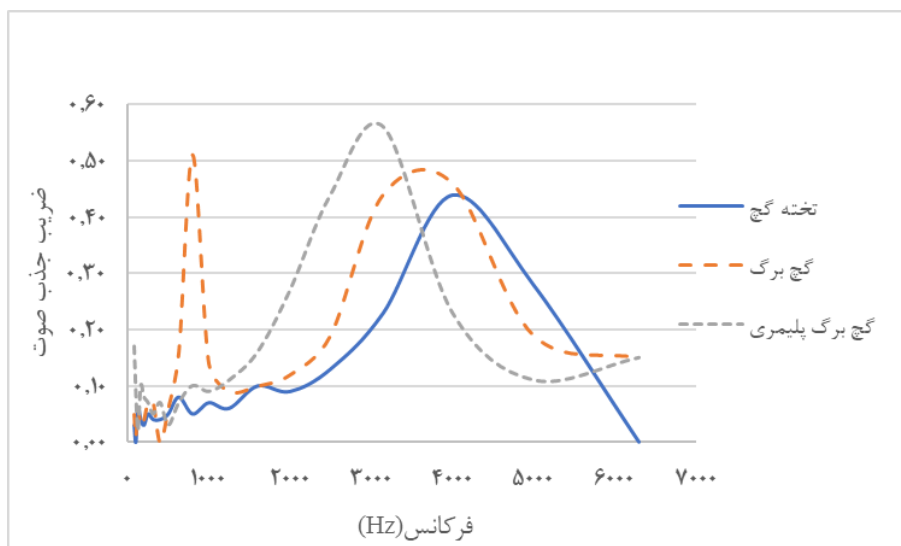
مواد مختلف از نظر ضریب جذب صوت در فرکانس-های مینا براساس ضریب جذب صوت کاهش یافته گروه-

جدول ۲. مقدار ضریب جذب صوت اندازه‌گیری شده تیمارها در فرکانس‌های مینا و ضریب جذب صوت کاهش یافته برای گروه‌های درجه‌بندی آکوستیک (مقدار ضریب جذب صوت و ضریب جذب صوت کاهش یافته هرکدام از گروه‌ها براساس استاندارد ISO 11654 ذکر شده است).

نوع ضریب جذب صوت	فرکانس (Hz)				
	۴۰۰۰	۲۰۰۰	۱۰۰۰	۵۰۰	۲۵۰
مینا	۰/۹	۱	۱	۱	۰/۸
حداکثر جذب صوت (A)	≥ ۰/۸	≥ ۰/۹	≥ ۰/۹	≥ ۰/۹	≥ ۰/۷
جذب خیلی زیاد صوت (B)	۰/۰-۸۰/۸۵	≥ ۰/۷	≥ ۰/۸	≥ ۰/۸	≥ ۰/۶
جذب زیاد صوت (C)	۰/۰-۶۰/۷۵	≥ ۰/۵	≥ ۰/۶	≥ ۰/۶	≥ ۰/۴
جذب نرمال صوت (D)	۰/۰-۳۰/۵۵	≥ ۰/۲	≥ ۰/۳	≥ ۰/۳	≥ ۰/۱
جذب پایین صوت (E)	۰/۰-۱۵/۲۵	≥ ۰	≥ ۰/۱۵	≥ ۰/۱۵	≥ ۰
برگشتی (بدون درجه)	≤ ۰/۱۰	۰	≤ ۰/۱۵	≤ ۰/۱۵	۰
تخته‌گچ	≤ ۰/۱۰	۰/۴۴	۰/۰۹	۰/۰۷	۰/۰۵
ضریب جذب واقعی صوت (عملی)	۰/۰-۱۵/۲۵	۰/۴۶	۰/۱۲	۰/۱۴	۰/۰۶
گچ‌برگ	۰/۰-۱۵/۲۵	۰/۲۳	۰/۲۷	۰/۰۹	۰/۰۳
گچ‌برگ پلیمری	۰/۰-۱۵/۲۵	۰/۲۳	۰/۲۷	۰/۰۹	۰/۰۳

دارد و سپس گچ‌برگ و تخته‌گچ قرار دارد. تخته‌گچ بیشترین جذب صوت را در محدوده فرکانسی بیشتر از ۴۰۰۰ هرتز دارد و سپس گچ‌برگ قرار دارد و گچ‌برگ پلیمری کمترین میزان جذب صوت را در این بازه فرکانسی دارد (شکل ۲).

بطور کلی نمودارهای جذب صوت هر سه تخته در فرکانس‌های اندازه‌گیری شده نشان دهنده عملکرد بسیار مناسب گچ‌برگ پلیمری نسبت به گچ‌برگ و تخته‌گچ است و همچنین گچ‌برگ عملکرد بهتری نسبت به تخته‌گچ داشته است (شکل ۲). گچ‌برگ با مواد افزودنی بهترین عملکرد جذب صوت را در بازه فرکانسی تا ۴۰۰۰ هرتز



شکل ۲. ضریب جذب صوت اندازه گیری شده (عملی). افزایش جذب صوت تا ۵۱٪ در محدوده فرکانس‌های ۸۰۰ هرتز و سپس کاهش ناگهانی برای تخته‌گج الیاف وجود دارد. این پیک افزایشی در فرکانس ۱۲۵ هرتز به میزان ۳٪ در گزارش‌های دیگر برای این نوع تخته با ضخامت ۱۲٫۵ میلی‌متر نیز گزارش شده است [۲۱].

انتقال صدای مبنا در بندهای یک سوم هنگامی و یک هنگامی براساس استاندارد ۱-۸۸۳۴ در جدول ۳ ذکر شده است. شاخص افت انتقال صدای گج‌برگ و گج‌برگ پلیمری در فرکانس‌های مبنا بهتر از تخته‌گج و همچنین افت انتقال صدای گج‌برگ بهتر از گج‌برگ پلیمری است (جدول ۳). نمودارهای برسنج ترجیبهی نويز براساس استاندارد ۱-۸۸۳۴ برای اندازه‌گیری نويز در فضای داخلی مورد استفاده قرار می‌گیرد و نمودار تخته‌گج در درجه ۱۵ و گج‌برگ و گج‌برگ پلیمری در درجه ۲۰ قرار می‌گیرند. بنابراین به همراه سایر مصالح به مقدار نويز مجاز مورد نیاز خواهند رسید.

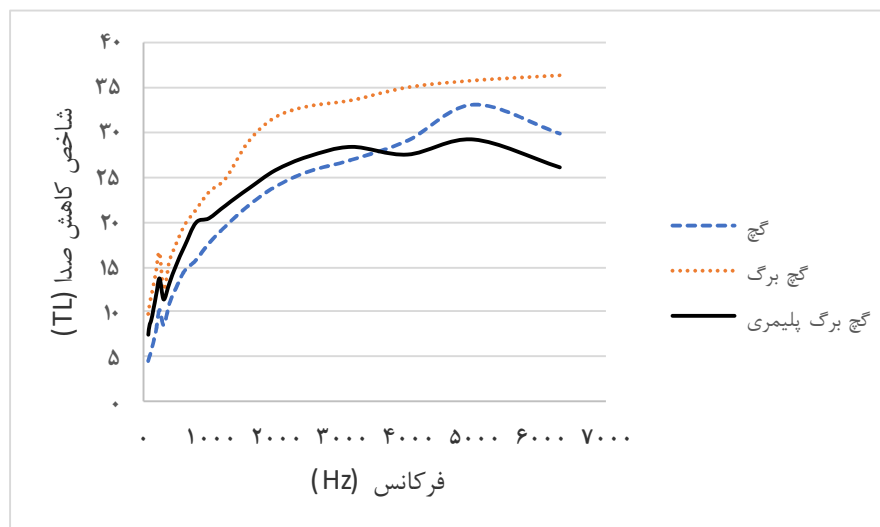
نمودارهای شاخص کاهش صدا یا افت انتقال صدا برای نمونه‌های تخته‌گج، گج‌برگ و گج‌برگ پلیمری (گج، الیاف و مواد افزودنی) در شکل ۳ مشاهده می‌شود. این نمودارها نشان می‌دهد که گج‌برگ و گج‌برگ پلیمری اثر مثبتی در شاخص افت انتقال صدا داشته‌اند.

ضریب جذب صوت از فرکانس ۱۲۵ تا ۲۰۰۰ هرتز تخته‌گج الیاف و مواد افزودنی و حتی گج الیاف با ضخامت ۱ سانتی‌متر در این تحقیق بسیار بهتر از چوب راش، بلوط و کاج اسکات و چوب‌های اصلاح حرارتی شده آن‌ها با ضخامت ۲،۳ سانتی‌متر است [۲۲]. حتی از ضریب جذب صدا تخته‌گج الیاف نارگیل و کاغذ باطله که برای فرکانس‌های ۲۵۰ تا ۸۰۰۰ هرتز بین ۳٪ تا ۴٪ متغیر است [۲۳]، بهتر می‌باشد. مقادیر ضریب جذب صدا براساس استاندارد مقررات ملی مسکن در بسامد یک هنگامی ۱۲۵، ۲۵۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ و ۴۰۰۰ برای صفحات گچی به ضخامت ۱۳ میلی‌متر برابر ۰/۰۸، ۰/۱۱، ۰/۰۵، ۰/۰۳، ۰/۰۳ و ۰/۰۳ است. بصورتیکه در جدول ۲ و شکل ۲ مشخص است، عملکرد صفحات گچی این تحقیق بسیار بهتر می‌باشد.

نتایج آزمون شاخص افت انتقال صدا که عملکرد گج-برگ بهتر از دو نمونه دیگر است. شاخص افت انتقال صدای اندازه‌گیری شده (عملی) نمونه‌ها، شاخص افت

جدول ۳. شاخص افت انتقال صدای اندازه‌گیری شده تخته‌گچ، گچ‌برگ و گچ‌برگ پلیمری و شاخص افت انتقال صدای مبنا براساس استاندارد ۱-۸۸۳۴.

فرکانس (Hz)	شاخص افت انتقال صدای مبنا (dB)			شاخص افت انتقال صدای واقعی نمونه‌ها (dB)	
	یک سوم هنگامی	یک هنگامی	تخته‌گچ	گچ‌برگ	گچ‌برگ پلیمری
۱۰۰	۳۳		۵	۱۰/۹	۸/۵
۱۲۵	۳۶	۳۶	۵/۷	۱۱/۸	۹
۱۶۰	۳۹		۶/۷	۱۳	۱۰/۲
۲۰۰	۴۲		۸	۱۴/۶	۱۱/۷
۲۵۰	۴۵	۴۵	۱۰/۲	۱۶/۷	۱۳/۷
۳۱۵	۴۸		۸/۵	۱۲/۵	۱۱/۳
۴۰۰	۵۱		۱۰/۹	۱۵/۷	۱۳/۱
۵۰۰	۵۲	۵۲	۱۲/۷	۱۷/۶	۱۵/۱
۶۳۰	۵۳		۱۴/۶	۱۹/۷	۱۷/۳
۸۰۰	۵۴		۱۵/۷	۲۱/۴	۱۹/۹
۱۰۰۰	۵۵	۵۵	۱۷/۶	۲۳/۴	۲۰/۴
۱۲۵۰	۵۶		۱۹/۵	۲۴/۹	۲۱/۸
۱۶۰۰	۵۶		۲۱/۸	۲۹	۲۳/۷
۲۰۰۰	۵۶	۵۶	۲۳/۹	۳۱/۶	۲۵/۷
۲۵۰۰	۵۶		۲۵/۶	۳۲/۸	۲۷/۳
۳۱۵۰	۵۶		۲۶/۹	۳۳/۵	۲۸/۳



شکل ۳. نمودارهای افت انتقال صدا نمونه‌ها

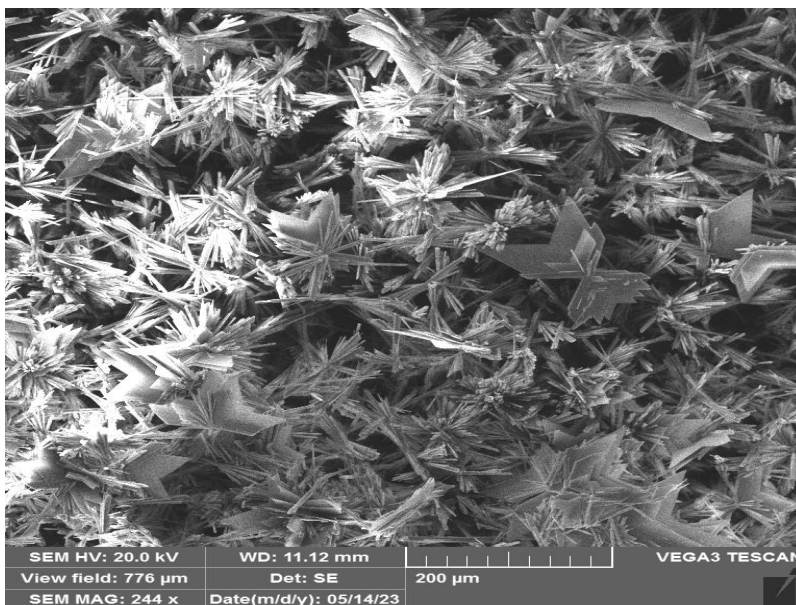
پاسخ فرکانسی یا کاهش انتقال صدای تخته‌گچ کم و شاخص افت انتقال صدای گچ‌برگ عملکرد یکنواخت‌تری نسبت به تخته‌های دیگر دارد و عملکرد گچ‌برگ پلیمری نسبت به دو تخته دیگر از نظر شاخص افت انتقال صدا متوسط است. بطور کلی همه نمونه‌ها در فرکانس‌های پایین یعنی در فرکانس‌های زیر ۱۰۰۰ هرتز از نظر ضریب

الیاف باعث افزایش شاخص کاهش صدا در گچ‌برگ نسبت به تخته‌گچ شده است و گچ‌برگ پلیمری دارای شاخص کاهش صدای متوسط بین تخته‌گچ و گچ‌برگ است. افزایش و کاهش جزئی شاخص کاهش صدا در فرکانس ۲۵۰ هرتز برای هر سه تیمار بویژه برای گچ‌برگ مشاهده می‌شود.

رسیدن به مقدار مجاز استاندارد لازم است و یا از پانل های گچی می توان همراه با سایر مصالح استفاده نمود. گزارش های دیگر نیز نشان می دهد که پانل گچی الیاف دار همراه با چند سازه لایه های چوبی متقاطع در افت انتقال صدا موثر است [۹]. همچنین گزارش شده که در آینده مواد اکوستیک چندمنظوره برای عایق بندی ساختمان ها بکار می رود و عمدتاً فضای خالی بین لایه ها ایجاد و از مصالح سبک سازی شده استفاده می شود [۲۱]. بنابراین این تحقیق نیز نشان می دهد برای آماده سازی یک فضای مناسب آکوستیکی نیاز به استفاده از چند لایه در ساخت جداکننده های آکوستیک است.

شکل های ۴ تا ۶ تصاویر میکروسکوپی نمونه های تخته گچ، گچ برگ و گچ برگ پلیمری را نشان می دهد.

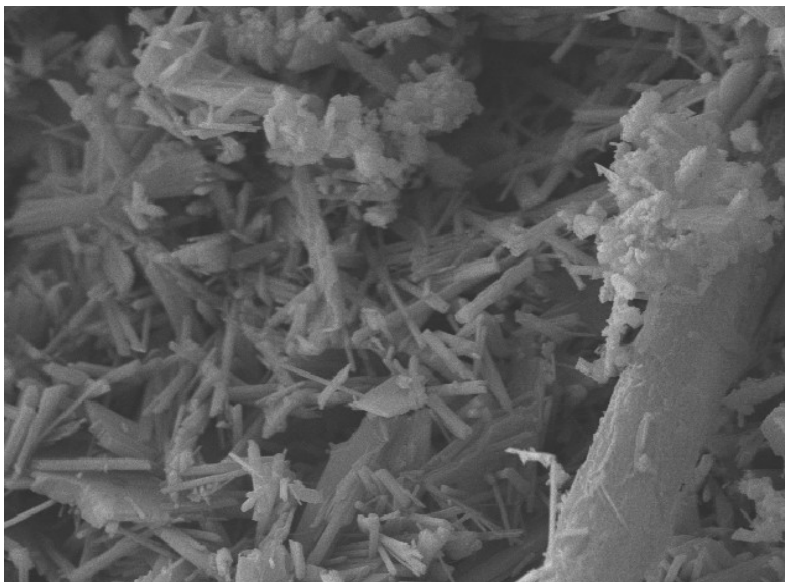
افت انتقال صدا عملکرد ضعیف زیر ۱۰ دسی بل دارند و بهترین عملکرد آن ها در فرکانس های متوسط محدوده ۶۰۰۰-۲۰۰۰ هرتز مشاهده می شود و در فرکانس های بالاتر از ۶۰۰۰ هرتز عملکرد کاهشی دارند. افت انتقال صدای چندسازه عایق سبز از گندم با ضخامت ۳ سانتی متر ۱۷ دسی بل است [۱۰] که تقریباً عملکرد مشابه گچ برگ ۱ سانتی متری در فرکانس ۵۰۰ هرتز در این تحقیق دارد. بنابراین افت انتقال صوت نمونه های این تحقیق عملکرد مناسبی داشته اند. بطور کلی، صدابندی هوارد براساس استاندارد مقررات ملی مسکن دیوار با یک لایه تخته گچی به ضخامت ۱/۲۵ سانتی متر و نگهدارنده ۵ سانتی متری و الیاف معدنی ۴ سانتی متری در وسط، برابر ۴۵ دسی بل است. از اینرو چندین لایه عایق برای



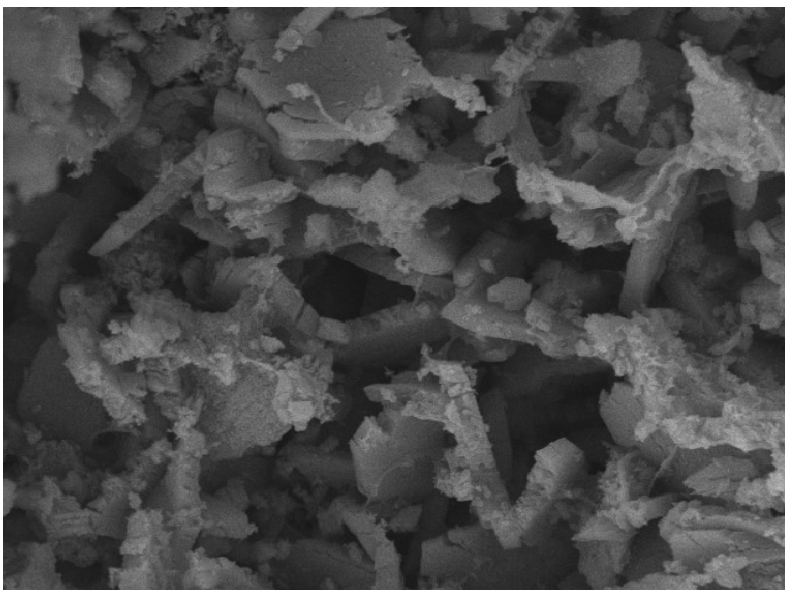
شکل ۴. تصویر میکروسکوپ الکترونی تخته گچ با آرایش منظم کریستال های گچ

پلیمری دارای ماتریکس متخلخل است و تخلخل ایجاد شده بخاطر حباب های واکنش بین آهک و اسید سیتریک است. حفره های ماتریس و تخلخل ایجاد شده در شکل ۶ مشخص است.

تخته گچ دارای بافت بسیار همگن می باشد و الیاف کاغذ باطله اداری در گچ برگ به عنوان تقویت کننده عمل می کند و انعطاف ماتریکس بوجود آمده را تقویت می کند، ولی مسلح شدن گچ با الیاف متخلخل بافت همگن گچ-برگ را زیاد تغییر نمی دهد (شکل ۴ و ۵). اما گچ برگ



شکل ۵. تصویر میکروسکوپ الکترونی گچ‌برگ با بافت همگن دارای پیوند بین الیاف کاغذ باطله اداری و کریستال‌های گچ



شکل ۶. گچ‌برگ پلیمری با بافت متخلخل از الیاف و مواد پلیمری دارای سیمان، آهک اصلاح شده با اسید سیتریک و پلی‌وینیل‌الکل

انتقال صوت شود. مصالح صفحه‌ای سبک ساخته شده از الیاف و ساختار متخلخل آن توانایی جذب صوت را در طیف گسترده‌ای از فرکانس‌های طبیعی دارند [۲]. ناهمواری سطح الیاف و دانسیته پایین خاصیت آکوستیکی تخته‌گچ سبک‌سازی شده با الیاف را تقویت می‌نماید. الیاف کاغذ باطله متخلخل می‌باشد و با افزودن مواد پلیمری سطح ناصافی پیدا می‌کنند. این خصوصیات جذب صوت را افزایش می‌دهد. گزارش‌های دیگر نیز نشان می‌دهد که ناهمواری سطح کرک باعث بیشترین مقدار

ذرات سیمان و پلی‌وینیل‌الکل در کنار الیاف تجمع نموده و با آهک اصلاح شده با اسید سیتریک پوشیده شده‌اند. واکنش آهک و اسید سیتریک باعث ترکیب کلسیم سیترات است و گاز دی‌اکسید کربن آزاد شده از تجزیه کلسیم سیترات باعث ماتریکس لانه زنبوری شکل ۶ شده است. بافت تشکیل دهنده ماده آکوستیکی در جذب و افت انتقال صدا بسیار موثر است. بافت متخلخل گچ‌برگ پلیمری باعث جذب بیشتر صوت و بافت انعطاف-پذیر گچ‌برگ بخاطر الیاف می‌تواند باعث افزایش افت

برگ و تخته‌گچ دارد [۱۳]. از اینرو لایه‌هایی از مصالح متنوع و سازگار باهمدیگر در ساخت فضای مورد نیاز استفاده می‌شود تا به به مقدار نویز صدای مجاز داخلی و حتی خارجی مورد نیاز در فضای طراحی شده رسید.

نتیجه‌گیری کلی

ضریب جذب صوت و شاخص افت انتقال صدا دو ویژگی اصلی آکوستیکی مصالح مرتبط با امواج صدای هوا برد هستند. تخته‌گچ به‌عنوان دیوارپوش یا جداکننده کاذب کاربرد دارد و به همین دلیل اندازه‌گیری این خصوصیات ضروری است. انواع تخته‌گچ با دانسیته‌های مختلف تولید می‌شوند و با توجه به گرایش ساختمان‌سازی به سبک‌سازی و بهبود آکوستیک، گچ‌برگ با دانسیته حدود ۰/۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب برای کاربردهای آکوستیکی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج ضریب جذب صوت و شاخص افت انتقال صدا نشان داد که سبک‌سازی و افزودن الیاف و مواد پلیمری می‌تواند خصوصیات آکوستیکی تخته‌گچ را به دلیل ایجاد بافت و ساختار متفاوت تغییر دهد. ناهمواری سطح الیاف و دانسیته پایین سبب تقویت جذب صوت در تخته‌گچ سبک‌سازی شده می‌شود. الیاف کاغذ باطله به دلیل تخلخل ذاتی و همچنین ناصاف شدن سطح در اثر افزودن مواد پلیمری، نقش مهمی در افزایش جذب ایفا می‌کنند. این ناهمواری‌ها در سطح ماتریکس و پیوند بین الیاف و گچ، پراکندگی امواج صوتی و افزایش تخلخل داخلی را به دنبال داشته و در نتیجه باعث افزایش جذب و کاهش افت انتقال صدا نسبت به تخته‌گچ ساده شده است. بررسی نمودارها نشان داد که الیاف و افزودنی‌های پلیمری به‌ویژه تا فرکانس ۴۰۰۰ هرتز تأثیر چشمگیری بر افزایش ضریب جذب و شاخص افت انتقال صدا دارند. گچ‌برگ پلیمری بیشترین ضریب جذب صوت و گچ‌برگ معمولی بیشترین افت انتقال صوتی را ایجاد کرده است، در حالی که تخته‌گچ ساده کمترین کارایی آکوستیکی را داشته است. تصاویر میکروسکوپی نیز اثر خلل‌و‌فرج ناشی از واکنش‌های حباب‌دار افزودنی‌های پلیمری و انعطاف‌پذیری ماتریکس را در بهبود عملکرد آکوستیکی نشان دادند. نمودار جذب صوت نرمال از فرکانس‌های پایین تا ۳۰۰۰ هرتز روند افزایشی و سپس تا ۶۰۰۰ هرتز روند کاهشی دارد. نمودار

ضریب جذب صدا ۰/۳۵ در ۵۵۰۰ هرتز می‌شود [۲۴]. همچنین ضریب جذب صوت تخته خرده چوب به دلیل تخلخل مناسب است. تخته خرده چوب باگاس با ضخامت ۱۲ میلیمتر و دانسیته ۰/۳ تا ۰/۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب در فرکانس ۵۰۰ هرتز دارای ضریب جذب صوت بیشتر از ۰/۴ می‌باشد [۲۵] و تخته خرده چوب ساخته شده از مخلوط صنوبر و کاه گندم با دانسیته ۰/۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب در فرکانس ۵۰۰ هرتز دارای ضریب جذب صوت ۰/۲ می‌باشد [۲۶] از اینرو تفسیر تصویر میکروسکوپی شکل ۶ با دیگر تصاویر نشان‌دهنده علت عملکرد آکوستیکی جذب صوت مناسب این نوع گچ‌برگ پلیمری و شکل ۵ نشان‌دهنده عملکرد افت انتقال انرژی صدای گچ مسلح شده با الیاف است. استفاده از الیاف کاغذ و مواد افزودنی در ترکیب گچ، باعث بهبود چشمگیری عملکرد جذب صوتی و افت انتقال صدا شده است. تحقیقات دیگر نیز نشان می‌دهد که ضریب جذب صوت و شاخص افت انتقال صدای تخته‌گچ و تخته‌گچ ۲ درصد الیاف آناناس با ضخامت ۱۵ میلیمتر در فرکانس ۵۰۰ هرتز به ترتیب برابر ۰/۱۸ و ۳۰ دسی‌بل است که در مقایسه با نتایج این تحقیق عملکرد بهتری را نشان می‌دهد [۲۷] ولی در هر صورت افزودن الیاف به ماتریکس گچ اثر مثبتی در خصوصیات آکوستیکی دارد. حضور منافذ در ترکیب، همراه با تخلخل ذاتی مواد افزودنی و الیاف، موجب شده است که امواج صوتی بیشتر در ساختار ماده جذب شوند. در نهایت، این ترکیب همراه با لایه‌هایی از مصالح آکوستیکی دیگر می‌تواند گزینه مناسبی برای کاربردهای آکوستیکی باشد، به‌ویژه در محیط‌هایی که نیاز به کاهش بازتاب و جذب بالای صدا دارند. از اینرو مصالح آکوستیکی چندلایه از صفحات متنوع می‌باشد ولی در سال‌های اخیر، مصالحی استفاده می‌نمایند که آسیب‌های محیط زیستی کمتری برای طبیعت و انسان داشته باشد و اکثر مصالح آکوستیکی این مشکل را دارند [۱] و دوست‌دار محیط زیست بودن یکی از مزایای صفحات گچی الیاف‌دار است. از طرف دیگر در دیوار سازه‌ها، خصوصیات آکوستیکی فقط یکی از معیارهای استاندارد عضوهای بکار رفته در لایه‌های دیوار است و معیارهای مهم دیگری مانند ویژگی‌های مقاومتی و ضد آب بودن در نظر گرفته می‌شود. گچ‌برگ پلیمری سبک‌سازی شده از نظر مقاومت فشاری، خمشی و جذب آب خصوصیات ایتیمالی نسبت به گچ-

- [8] Ohadi Hamedani, A., and Hassani Bagherani, A. A. 2021. Porous Sound-Absorbing Materials – Part II: Sound Absorption Mechanisms and Modeling, *Scientific Journal of Acoustics and Vibration*. 10(20), pp. 3-23. (In Persian).
- [9] Perivoitos, P., Heidemann, L., Weinhold, J., and Zeitler, B., 2025. Improving Sound Insulation in Cross-Laminated Timber (CLT) Wall Assemblies: A Systematic Investigation. *DAS|DAGA 2025 Copenhagen*, pp. 340-343.
- [10] Edalat, H.R., Najafi Amiri, A., Tabarsa, T. and Madhooshi, M. 2020. Investigation on the influence of raw material type on properties of ligno-cellulosic green insulation composite. *Journal of Wood and Forest Science and Technology Research*, 27(3), pp. 73-91. (In Persian).
- [11] Najim, T.S., Al-Zubaidy, A.A., and Yassin, S. A., 2011. Physical and mechanical properties of polymer-gypsum composite. In: *Proceedings of First Polymers/Composites Symposium*, May 5-6 Al-Mustansiria University, Baghdad, Iraq, pp. 1-13.
- [12] Gomes, C.E.M., Sousa, A.K.D., Araujo, M.E.S.O., Ferreira, S.B., and Fontanini, P., 2019. Mechanical and Microstructural Properties of Redispersible Polymer-Gypsum Composites. *Materials Research*, 22(3), e20180119.
- [13] Doost, A., Bayat Kashkoli, A., and Farrokh-Payam, S., R., 2025. Improving the Performance of Polymer-Based Gypsum Board Using Waste Office Paper Fibers: Analysis of Physical and Mechanical Properties, *Journal of Forest and Wood Products*, 77(4), pp. 377-390. (In Persian).
- [14] I.N.S.O, (14478-2), 2013. Gypsum - Gypsum board with fibrous reinforcement definitions requirements and test methods, Part 2, Gypsum fiber board. Iranian National Standardization Organization. ICS, 91.100.10. (In Persian).
- [15] ISO (10534-2. 1998. Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes, Part 1: Transfer-function method. ISO 10534-2. International Standardization Organization, 11-15.
- [16] A.S.T.M-E1050-10: 2010. Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, Two Microphones and a Digital Frequency Analysis System. ASTM international.
- [17] A.S.T.M-E2611-09. 2009. Measurement of Normal Incidence Sound Transmission of Acoustical Materials Based on the Transfer Matrix Method. ASTM international.
- [18] ISIRI (8184). 2005. Acoustics – Sound absorbers for use in buildings – Rating of sound absorption. Institute of Standards and Industrial Research of Iran.
- [19] I.S.O. (11654). Acoustics - Sound absorbers for use in buildings - Rating of sound absorption. International Standardization Organization.
- [20] I.N.S.O, (8834-1), 2018. Acoustics - Rating of sound insulation in buildings and of building elements - Part 1: Airborne sound insulation. Iranian

هر سه تخته مشابه این روند است و گچ‌برگ با مواد افزودنی در محدوده ۳۰۰۰-۴۰۰۰ هرتز بیشترین جذب را نشان می‌دهد. بر اساس استاندارد ISO 11654 ، تخته‌های گچی در بازه ۱۲۵-۲۰۰۰ هرتز در گروه E (جذب ضعیف) قرار می‌گیرند، اما به طور کلی مناسب ارزیابی شده‌اند. افت انتقال صدای گچ‌برگ بهتر از دو نمونه دیگر بوده و تا ۳۷ دسی‌بل در بسامد بالا افزایش یافته است، در حالی که مواد پلیمری نقش اندکی در بهبود این شاخص دارند و فقط الیاف مؤثرتر هستند. در فرکانس ۵۰۰ هرتز، گچ‌برگ بهترین عملکرد آکوستیکی را دارد. از اینرو سبک سازی و استفاده از مواد افزودنی پلیمری و دوستدار محیط زیست، تخته‌گچ را مناسب کاربرد آکوستیکی در سازه‌ها می‌کند.

سپاسگزاری

این اثر تحت حمایت مادی بنیاد ملی علم ایران (INSF) برگرفته از طرح شماره "۴۰۳۹۹۵۴" انجام شده است.

منابع

- [1] Pecas, P., Carvalho, H., Salman, H., and Leite, M., 2018. Natural fibre composites and their applications: a review. *Journal of Composites Science*, 2(4), 66. doi.org/10.3390/jcs2040066.
- [2] Elwaleed, A. K., Nikabdullah, N., Nor, M. J. M., Tahir, M. F. M., Nuawi, M. Z., and Abakr, Y. A., 2014. Experimental study on the effect of compression on the sound absorption of date palm fibers. *World Applied Sciences Journal*, 31(ARSEM), pp. 40-44.
- [3] Cornaro, C., and Buratti, C., 2020. Energy efficiency in buildings and innovative materials for building construction. *Applied Sciences*, 10(8), 2866.
- [4] I.N.S.O, (5032), 2014. Gypsum - Gypsum Concrete-Specifications, Iranian National Standardization Organization, ICS, 91.100.10, ICS, 91.100.10. (In Persian).
- [5] I.N.S.O, (2786), 2013. Gypsum - Gypsum Blocks Definitions, Requirements and Test Methods. Iranian National Standardization Organization. ICS, 91.100.10. (In Persian).
- [6] Construction industry - Law and legislation - Iran. 2017. Architectural acoustics – Soundproofing - Architectural acoustics Standards. Road, Housing and Urban Development Research Center. ISBN: 978-600-113-167-7. (In Persian).
- [7] Cavanaugh, W. J., Tocci, G. C., and Wilkes, J. A., 2009. Architectural acoustics: Principles and practice. John Wiley & Sons.

- tiles with enhanced stability and acoustic and thermal resistance. *Journal of Building Engineering*, 41, 102433.
- [25] Dusthoseini K., and Elyasi, A., 2012. Study on the possibility of using bagasse in manufacture of sound-proof Particleboard. *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*, (3)1, PP. 43-52. (In Persian).
- [26] Poudinehpour M., Ebrahimi Gh., Tajvidi M., Charmahali M. and Ramtin A., 2006. The effects of two kinds of agricultural wastes (wheat and barely straws) on nrc% of aspen particleboards. *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, (21)2, PP. 61-69. (In Persian).
- [27] Taiwo, E. M., Yahya, K. B., Haron, Z., Dare, G. M., and Sunday, A., 2023. Acoustic characterization of composites made of gypsum and pineapple leaf fibres. *American Journal of IR 4.0 and Beyond*, 2(2), 30-38. DOI:10.54536/ajirb.v2i2.1802.
- National Standardization Organization. ICS, 91.120.20. (In Persian).
- [21] Arjunan, A., Baroutaji, A., Robinson, J., Vance, A., and Arafat, A., 2024. Acoustic metamaterials for sound absorption and insulation in buildings. *Building and Environment*, 251, 111250.
- [22] Mania, P., Flach, A., and Pilarska, M.. 2023. Sound wave absorption coefficient and sound velocity in thermally modified wood. *Applied sciences*, 13, 8136. doi.10.3390/app13148136.
- [23] Ismail, F. Z., Rahmat, M. N., Mohd Yussof, F. N., and Mohammad Noor, M. A. F., 2014. April. Sustainable absorption panels from agricultural waste. *Research Innovation Business Unit, Innovation and design exposition (Conference 2014)*. 15,1-8.
<https://doi.org/10.1051/mateconf/20141501035>.
- [24] Guna, V., Yadav, C., Maithri, B. R., Ilangoan, M., Touchaleaume, F., Saulnier, B., ... and Reddy, N. 2021. Wool and coir fiber reinforced gypsum ceiling