

تحلیل تطبیقی انتقال صدای کوبه‌ای در سقف‌های سنتی و مدرن؛

مطالعه موردی بناهای منتخب دانشگاه هنر اسلامی تبریز

محیا پزشکی مدرس

کارشناسی ارشد دانشکده معماری و

شهرسازی

دانشگاه هنر اسلامی تبریز

m.pezeshgi@tabriziau.ac.ir

عباس غفاری*

دانشیار دانشکده معماری و شهرسازی،

دانشگاه هنر اسلامی تبریز

ghaffari@tabriziau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۷/۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۳۰

چکیده

صدای محیطی یکی از مولفه‌های مؤثر در عملکرد آموزشی و تعامل افراد است و کیفیت آن نقش مهمی در آسایش یادگیرندگان و اثربخشی فرآیند یادگیری دارد. تغییر کاربری بناها می‌تواند پارامترهای صوتی و ویژگی‌های آکوستیکی فضا را تحت تأثیر قرار دهد؛ بنابراین، انجام مداخلات مناسب برای بهبود شرایط صوتی ضروری است. صدای کوبه‌ای، که در اثر ضربه بر سطوح ایجاد و در سازه منتشر می‌شود، یکی از منابع اصلی انتقال صداست و می‌تواند اثرات نامطلوبی بر محیط آموزشی داشته باشد. این پژوهش با هدف تحلیل تطبیقی رفتار سقف‌های سنتی و مدرن در مواجهه با صدای کوبه‌ای انجام شد. نمونه‌های مطالعه شامل سقف بناهای دانشگاه هنر اسلامی تبریز بودند که به دلیل تغییر کاربری از مسکونی به آموزشی و نیاز به ارزیابی کیفیت آکوستیکی انتخاب شدند. اندازه‌گیری‌های میدانی با تجهیزات شرکت B&K انجام گرفته است. در این مقاله، سطح فشار صدا (SPL) هر پنج نمونه سقف به‌عنوان پارامتر اصلی مورد بررسی قرار گرفت تا عملکرد سقف‌ها در مواجهه با صدای کوبه‌ای سنجیده شود و مشخص شود کدام نوع سقف بیشترین میزان انتقال صدای کوبه‌ای را دارد و نسبت به سایر نمونه‌ها عملکرد ضعیف‌تری نشان می‌دهد. بررسی نمودارهای SPL در بازه فرکانسی ۴۰۰ تا ۵۰۰۰ هرتز روند افزایشی هر پنج نوع سقف را نشان داد؛ لیکن بیشترین مقدار تراز فشار صدا نسبت به کل نمونه‌ها متعلق به سقف تیرچه بلوک یونولیت بوده است. مداخله پیشنهادی موجب کاهش سطح فشار صدا به میزان بهینه در تمامی نمونه‌ها شده و کارآمدی روش به تأیید رسید.

واژگان کلیدی: صدای کوبه‌ای، صدای سازه برد، سقف‌های سنتی و مدرن، رفتار آکوستیکی

* نویسنده مسئول

۱. مقدمه

عدم وجود آسایش صوتی کافی می‌تواند اثرات روانی و فیزیولوژیکی نامطلوبی بر انسان داشته باشد. بدین منظور اگر شدت صداهای ناهنجار در محیط از حدی مجاز فراتر رود، پیامدهایی مانند خستگی، کاهش تمرکز و افت عملکرد را در پی خواهد داشت [۱]. این امر به ویژه در محیط‌های آموزشی اهمیت دوچندانی دارد، زیرا کیفیت یادگیری و کارایی دانش‌آموزان یا دانشجویان به طور مستقیم به شرایط آکوستیکی کلاس‌ها وابسته است.

صدا به دو شکل هوابرد^۱ و سازه‌برد^۲ منتقل می‌شود.

صدای هوابرد از طریق هوا و صدای سازه‌برد از طریق ارتعاش اجسام جامد پخش می‌شود [۲].

در لغت‌نامه جامع معماری و ساختمان، واژه

«structure-borne sound» به معنای صدای سازه‌برد تعریف شده است؛ صدایی که از طریق ارتعاشات سازه منتقل شده و به نقطه‌ای دیگر در ساختمان می‌رسد [۸]. پارامترهای آکوستیکی کلاس‌ها نقش مهمی در درک گفتار، تمرکز و بازده یادگیری دارند؛ با این حال، خلاهایی از شناخت کافی رفتار صدای کوبه‌ای و روش‌های مؤثر کنترل آن وجود دارد. اندازه‌گیری‌های میدانی، به دلیل انعکاس شرایط واقعی فضا، معتبرترین روش برای ارزیابی کیفیت آکوستیکی به شمار می‌رود. با توجه به اهمیت کاهش مزاحمت‌های صوتی و بهبود شرایط آکوستیکی، شناسایی منابع تولید صدای سازه‌برد و تحلیل روش‌های کنترل آن در همه فضاها ضروری است. حرکت افراد، ارتعاش تجهیزات و تماس با سطوح جامد، از جمله عوامل تولید این نوع صداها

هستند که می‌توانند آسایش کاربران را تحت تأثیر قرار دهند [۳ و ۴].

از جمله مهم‌ترین انواع منبع صدای سازه‌برد، صدای کوبه‌ای است که در ساختمان‌ها به دلیل راه رفتن و یا تعمیرات ساختمانی ایجاد می‌شود. هدف مطالعه حاضر بررسی و تحلیل تطبیقی رفتار سقف‌های سنتی و مدرن به عنوان عناصر اصلی انتقال‌دهنده صدای کوبه‌ای است. نتایج این پژوهش، علاوه بر شناسایی منابع مولد صدای کوبه‌ای و مقایسه رفتار انواع سقف‌های منتخب در مواجهه با انتشار این صدا، می‌تواند به ارائه راهکارهایی برای کاهش صداهای نامطلوب و بهبود کیفیت آکوستیکی فضاها منجر شده و در نهایت گامی مؤثر در ارتقای آسایش صوتی فراهم آورد.

۲. مبانی نظری

مطالعات علمی در حوزه صدا به دوران یونان باستان بازمی‌گردد. تا قرن هجدهم، آکوستیک موسیقی مهم‌ترین زمینه فیزیکی مورد بحث بود و ارتباط نظام‌مند میان صدا و معماری چندان مورد توجه قرار نمی‌گرفت؛ به‌گونه‌ای که دانش موجود بیشتر بر پایه تجربه‌های فردی معماران شکل می‌گرفت.

از آثار مهم مرتبط با صدا در متون علمی ایران و غرب می‌توان به فارابی (موسیقی الکبیر)، بوئتیوس^۳ (قرن ششم)، ارسطو (قرن چهارم قبل از میلاد) فیثاغورث (قرن ششم قبل از میلاد)، گالیله و نیوتن (دوران رنسانس) و کلادنی^۴ و به ویژه هلمهولتز^۵ که در قرن ۱۸ و ۱۹ در حیطه ادراک صدا کار کرده بوند؛ اشاره کرد. به علاوه در قرون وسطی به صدا در محیط‌های بسته توجه بیشتری شده است. همچنین پیش از قرن

بیستم می‌توان به فصل پنجم کتاب شفا اثر ابن سینا که در آن به ویژگی‌های شنیداری و رفتار صوت در فضاهای بسته اشاره شده است [۴] و همچنین کتاب معماری ویتروویوس^۶ که به بررسی کارکرد لوله‌های صوتی در بناها پرداخته، اشاره کرد [۵].

نخستین پژوهش‌های منسجم در زمینه ارتباط صدا و معماری در علم فیزیک با مطالعات سابین، استاد دانشگاه هاروارد، آغاز شد. او در تلاش برای رفع مشکلات صوتی تالار سخنرانی مدرسه فوگ، پایه‌های آکوستیک معماری نوین را بنیان گذاشت. در قرن هجدهم، گسترش دانش ریاضی زمینه‌ساز شکل‌گیری مطالعات جدی درباره انتشار صوت شد. در این دوره، دالامبر^۷ و لاگرانژ^۸ معادلات انتشار موج را ارائه و بسط دادند و فوریه^۹ تحلیل هارمونیک صدا را تشریح کرد. همچنین، پژوهش‌هایی در زمینه انتشار صوت در سیالات (استروم^{۱۰} و کلادن^{۱۱} در ۱۸۲۷) و در جامدات (هاسنفراتز^{۱۲} در ۱۷۹۴ و بیو^{۱۳} در ۱۸۰۸) انجام شد. در همین راستا، ارتعاشات غشایی و صفحه‌ای از جنبه نظری توسط ژرمن^{۱۴} و دیگران مورد بررسی قرار گرفت. افزون بر این، اهم بر این باور بود که سازوکار شنوایی قادر است فرکانس‌های مختلف صوت را از یکدیگر تشخیص دهد.

صدا به عنوان پدیده‌ای بنیادین، وسیله ارتباطی میان انسان‌ها، میان انسان و طبیعت و حتی انسان و ساخته‌های او به شمار می‌رود. در واقع، نخستین ابزار ارتباطی بشر، صدا بوده است [۶]. با این حال، این

پدیده می‌تواند به عنوان عاملی مزاحم و نوعی آلودگی نیز تلقی شود؛ به‌گونه‌ای که آلودگی صوتی ممکن است از طریق گفتار، انتقال در هوا یا حتی ضربه‌های ساده به دیوار پدید آید و برای افراد آزاردهنده باشد.

۱-۲. صدای کوبه‌ای در لغت

در فرهنگ فارسی عمید، واژه «کوبه» از ریشه «کوب» به معنای ضربه و آسیب ناشی از برخورد سنگ، چوب یا هر جسم دیگر به سطحی معین تعریف شده است. بر این اساس، واژگانی همچون «کوبین» به معنای چکش و در نهایت «کوبه» به معنای ابزار ضربه‌زدن (مانند چکش یا کوبه در خانه) در زمره واژگان هم‌خانواده این واژه قرار می‌گیرند [۷].

۲-۲. انواع صدا

صدایی که به گوش می‌رسد یکی از سه مورد نغمه^{۱۵}، نوفه^{۱۶} یا تن خالص^{۱۷} است. نغمه و تن خالص دارای الگوی بسامدی مشخص و قابل تحلیل هستند، در حالی که نوفه فاقد نظم فرکانسی بوده و بیشتر به صورت صداهای نامطبوع و اتفاقی تلقی می‌شود. نوفه نیز شامل نوفه یکنواخت، نوفه متغیر و نوفه ضربه‌ای است؛ نوفه یکنواخت، تغییرات محسوسی ندارد، مانند صدای سیستم تهویه. نوفه متغیر، در یک بازه زمانی تغییرات محسوسی دارد. نوفه ضربه‌ای، نوفه‌ای است که تغییرات تراز آن در کمتر از یک ثانیه باشد [۹]. مثالی از هر سه نوفه در جدول ۱ به وضوح قابل مشاهده است [۹].

جدول ۱. نمونه نوفه‌های یکنواخت، ضربه‌ای، متغیر

مثالی از نوفه یکنواخت	مثالی از نوفه ضربه‌ای	مثالی از نوفه متغیر
		

۲-۳. تراگسیل صدا^{۱۸}

صدا نتیجه ارتعاشاتی است که از طریق یک رسانه منتقل شده و به گوش یا دیگر دستگاه‌های دریافت‌کننده می‌رسد. تراز فشار صدا با واحد دسی‌بل (dB) و فرکانس آن با هرتز (Hz) سنجیده می‌شود و می‌تواند در محیط‌های ساخته‌شده، از جمله سازه‌ها یا فضای هوایی، انتشار یابد [۲].

۲-۴. قیاس صدای سازه‌برد و صدای هوابرد

اگر یک منبع صوتی انرژی خود را صرفاً در هوا منتشر کند، به آن صدای هوابرد گفته می‌شود؛ نمونه‌هایی از این نوع صدا شامل صداهای تولید شده توسط جانداران، ویلن، بلندگو و سازه‌های بادی است. در مقابل، زمانی که انرژی صوتی علاوه بر هوا بر اجسام سخت نیز تأثیر گذاشته و آن‌ها را به نوسان دربرآورد، صدای سازه‌برد شکل می‌گیرد. نمونه‌های این نوع صدا شامل ویلن سل، کنترباس و پیانو هستند که علاوه بر تولید صدای هوابرد، مقداری انرژی را از طریق پایه به سطح تکیه‌گاه منتقل می‌کنند.

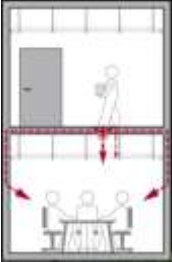
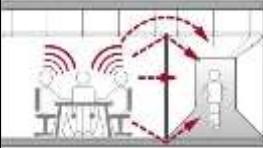


شناسایی تفاوت بین صدای هوابرد و سازه‌برد اهمیت زیادی دارد، زیرا نحوه انتشار انرژی در این دو نوع صدا متفاوت است و هر یک نیازمند راهکاری مربوط برای کنترل و کاهش صداهای آزاردهنده هستند [۹].

تصاویری از انواع صدای سازه‌برد و هوابرد در جدول ۲ جمع‌آوری شده است.

۳. مواد و روش

جهت انجام آزمون‌ها پنج ساختمان مجزا از بناهای دانشگاه هنر اسلامی تبریز با هندسه‌های متفاوت انتخاب شد. هدف از این انتخاب، وجود سقف‌های مختلف در آن‌ها و وجود اتاق‌هایی با ابعاد تقریباً همسان و منطبق در دوطبقه برهم

جدول ۲. نمونه‌های تصویری منابع صدای سازه‌برد و هوابرد

صدای سازه‌برد	صدای هوابرد
	
	

بود تا امکان بررسی میزان عبور صدای ناشی از دستگاه از انواع سقف، وجود داشته باشد. همچنین در تمامی اتاق‌های منتخب، بازشوهایی با ابعاد تقریباً برابر وجود دارد.

۳-۱. تجهیزات پژوهش

جهت انجام این پژوهش از تجهیزات برند Brüel & Kjaer استفاده شده که به تفکیک هر کدام در ذیل توضیح داده می‌شوند:

- دستگاه ضربه‌زن^{۱۹}:

برای انجام آزمون انتقال صدای کوبه‌ای در سقف‌های معمولی و شناور از دستگاه ضربه‌زن استاندارد مطابق شکل ۱ استفاده می‌شود. این دستگاه دارای پنج چکش در یک ردیف است که فاصله میان خطوط مرکزی چکش‌های مجاور آن (100 ± 3) میلی‌متر است. جرم مؤثر هر چکش (500 ± 6) گرم بوده که از ارتفاع (40 ± 3)

میلی متر به طور آزاد سقوط می کند. جهت سقوط چکش ها عمود بر سطح آزمون و با خطای حداکثر (± 0.5) درجه رعایت شده است [۱۰].

دقت و صحت دستگاه ترازسنج توسط کالیبراتور استاندارد بررسی و اصلاح می شود تا خطای احتمالی ناشی از دستگاه و میکروفن به حداقل برسد.



شکل ۱. دستگاه ضربه زن



شکل ۳. دستگاه کالیبراتور

• **ترازسنج صوت مدل B&K2260:**

برای سنجش شدت و فرکانس صوت از دستگاه ترازسنج صوت Brüel&Kjær 2260 ساخت ۱۳۹۶ مطابق شکل ۲ استفاده شد. این دستگاه شامل میکروفن، کابل های ضدصوت و واحد پردازش مرکزی است و قابلیت انجام آنالیز دقیق در باندهای یک سوم اکتاو، ارزیابی اقدامات کاهش نویز و جمع آوری داده های میدانی را دارا است [۳].



شکل ۲. مجموعه دستگاه تراز سنج صوت B&K2260

• **کالیبراتور:**

مطابق شکل ۳ پیش از هر برداشت صوتی،

• **میکروفن ها:**

صداسنج ها دارای میکروفن هایی (شکل ۴) هستند که فشارهای صوتی مختلف در هوا را به سیگنال های الکتریکی متناسب با آن تبدیل می کنند؛ سپس سیگنال ها در داخل دستگاه تقویت شده و از فیلترهای الکترونیکی عبور داده می شوند. این فیلترها همه سیگنال های خارج از باند فرکانس انتخابی را حذف می نمایند.



شکل ۴. میکروفن ها

۳-۲. انتخاب پارامترهای آکوستیکی

در این مطالعه، پارامترهای زیر به‌عنوان شاخص اصلی انتخاب شدند:

- **تراز فشار صدا^{۲۰} (SPL):** به‌عنوان شاخص اصلی بررسی صدا در تراز eq، می‌باشد.
- **نوفه زمینه^{۲۱} (BN):** در دو حالت بازشوهای باز و بسته، جهت ارزیابی صداهای مزاحم محیطی است.
- **تراز معادل صدای وزن‌یافته^{۲۲} (A):** جهت انطباق اندازه‌گیری با واکنش شنوایی انسان بوده و بر حسب دسی بل (dBA) می‌باشد [۴].

۳-۳. مراحل اجرای پژوهش

به‌منظور انجام آزمون‌ها نمونه‌های مورد مطالعه از بین سقف‌های موجود در ساختمان‌های دانشگاه هنر اسلامی تبریز انتخاب شدند. معیار انتخاب شامل دسترسی آسان، یکسان بودن کاربری فضاها (آموزشی) و انطباق ابعاد اتاق‌های فوقانی و تحتانی در هر بنا بود. مراحل انجام این پژوهش به ترتیب شامل: گردآوری اطلاعات (شامل انتخاب بناهای مناسب با هدف آزمون و تهیه و مطالعه نقشه‌ها)، کالیبراسیون دستگاه، اندازه‌گیری نوفه زمینه، اندازه‌گیری سطح فشار ناشی از منبع صدای کوبه‌ای و موقعیت‌یابی دستگاه ضربه‌زن است. هرکدام از این مراحل به ترتیب در ذیل توضیح داده شده است:

الف) گردآوری اطلاعات:

در ابتدا نقشه‌های موجود هر بنا بررسی و محل آزمون مشخص شد. به‌منظور کاهش تأثیر صداهای اضافی، برداشت‌ها در زمان‌هایی که مکان‌ها کم‌تردد و بدون حضور افراد بودند، انجام شد.

ب) کالیبراسیون:

پیش از هر بار اندازه‌گیری، دستگاه ترازسنج صوت ۲۲۶۰ توسط کالیبراتور استاندارد کالیبره شد [۱۱].

ج) اندازه‌گیری نوفه زمینه:

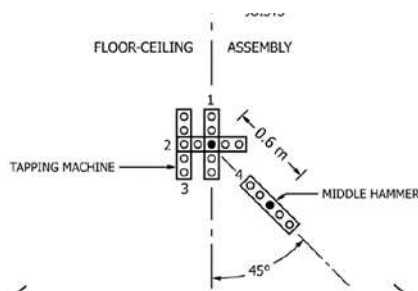
نوفه زمینه در اتاق دریافت، در دو حالت بازشوهای باز و بسته توسط ترازسنج صوتی در تراز LAeq ثبت شدند.

د) اندازه‌گیری سطح فشار صدای کوبه‌ای:

دستگاه ضربه‌زن استاندارد مطابق با دستورالعمل E1007-21 در اتاق منبع قرار گرفت. به مدت ۶۰ ثانیه دستگاه فعال و داده‌ها توسط ترازسنج در اتاق دریافت ثبت شد. این اندازه‌گیری در دو حالت بازشو باز و بسته انجام گرفت. داده‌ها برای ۲۴ فرکانس (از ۶۳ تا ۱۰۰۰۰ هرتز) استخراج و ثبت شد.

ه) موقعیت‌یابی دستگاه ضربه‌زن:

مطابق با استاندارد E1007-21، دستگاه در سه موقعیت مختلف در اتاق منبع قرار داده شد تا با متوسط‌گیری، دقت نتایج افزایش یابد. شکل ۵، نمایانگر نحوه قرارگیری دستگاه ضربه‌زن، در استاندارد مذکور می‌باشد.


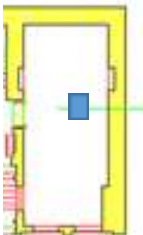




شکل ۵. استاندارد قرارگیری دستگاه ضربه‌زن [۱۰]

آزمون‌ها بر ۵ نوع سقف شامل: سقف طاق ضربی از ساختمان جواهریون، سقف تیر چوبی از ساختمان گنج‌ای‌زاده، سقف طاقی ساختمان قدکی، سقف تیرچه بلوک ساختمان گوهریون و سقف تیرچه بلوک

سفالی ساختمان چند رسانه‌ای دانشگاه هنر اسلامی
تبریز انجام گرفت. مراحل انجام یکی از آزمون‌ها به طور
خلاصه و تصویری در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳. مراحل برداشت صوتی سقف تیر چوبی (ساختمان گنج‌های زاده)

مراحل	عنوان	تصاویر و نقشه‌های برداشت صوتی
۱	پلان زیر زمین نشانه‌گذاری محل آزمون در پلان (اتاق دریافت)	
۲	نشانه‌گذاری محل قرارگیری ترازسنج صوتی ۲۲۶۰ در محل آزمون (اتاق دریافت)	
۳	کالیبره کردن ترازسنج صوتی ۲۲۶۰ در اتاق دریافت	
۴	اندازه‌گیری نوفه زمینه (BN) در دو حالت بازشوهای باز و بسته	

	<p>۵</p> <p>پلان طبقه اول ساختمان گنجهای زاده، نشانه‌گذاری محل آزمون</p>
	<p>۶</p> <p>جاگذاری دستگاه ضربه‌زن استاندارد در اتاق منبع</p>
	<p>۷</p> <p>تصاویر جاگذاری دستگاه در اتاق منبع مطابق استاندارد</p>
	<p>۸</p> <p>برداشت SPL توسط ترازسنج صوتی ۲۲۶۰ در دو حالت بازشوهای باز و بسته</p>

۴. داده‌های پژوهش

داده‌های متعلق به تراز فشار صوت تمام برداشت‌های هرسقف به تفکیک، جمع‌آوری و مطابق جدول ۴ ثبت شد. در جدول مذکور، به اختصار، فرکانس با حرف F،

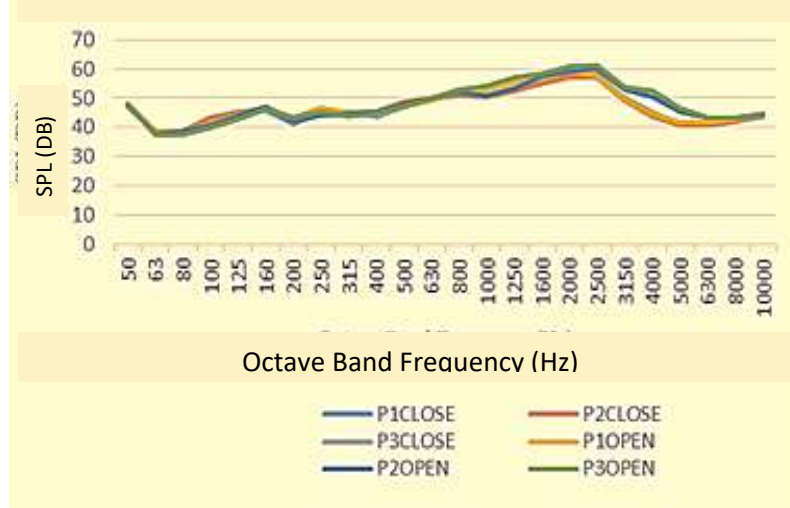
سطح فشار صوتی به ترتیب برای بازشوی باز و بسته در نقاط ۱، ۲ و ۳ به صورت، (P₁ OPEN و P₁ CLOSE)، (P₂ OPEN و P₂ CLOSE) و (P₃ OPEN و P₃ CLOSE) و نوفه زمینه در دو حالت بازشوی باز و بسته به صورت (BN OPEN و BN CLOSE) یادداشت شد.

جدول ۴. داده های صوتی

داده های برداشت صوتی SPL (dB A) سقف طاق ضریبی (ساختمان جواهریون)

F	برداشت نوفه زمینه BN																							
	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000
BN CLOSE	47.8	37.4	35.9	35.5	34.9	35.9	34.2	34.5	34.1	34.3	34	33.6	33.5	33.7	34.2	34.7	36.2	39.1	37	37.8	38.9	40.3	41.9	43
BN OPEN	48.8	45.1	44.3	43.3	42.4	42	41.4	40.1	39.1	39.3	38.7	40.1	44.3	43.4	45.3	47.2	49.9	50	43.8	41.6	40.6	41.1	42.2	43.9
قرار گیری دستگاه در امتداد طول اتاق P1																								
P1 CLOSE	47.7	38.1	38.8	43.5	45	45.7	41	45.2	45.3	43.9	46.9	49.7	51.5	50.8	53.3	55	57.8	58	50	44.9	41.1	40.9	42.1	43.9
P1 OPEN	47.5	37.9	38.9	40.8	44.1	47.2	42.1	44.1	44.4	45.2	47.7	50	51.9	50.8	53.3	57.5	59.2	60.2	53.1	50.6	45.3	43.4	43.3	44.7
قرار گیری دستگاه در امتداد عرضی اتاق P2																								
P2 OPEN	47.5	37.9	38.9	40.8	44.1	47.2	42.1	44.1	44.4	45.2	47.7	50	51.9	50.8	53.3	57.5	59.2	60.2	53.1	50.6	45.3	43.4	43.3	44.7
P2 CLOSE	47.7	38.5	38.7	43.2	45.4	46.4	42.7	46.3	45.1	45.5	58.9	50	50.7	50.3	52.3	55	57.2	57.1	49	43.7	40.9	40.7	41.9	44
قرار گیری دستگاه بزرگ به 45 درجه P3																								
P3 CLOSE	47.6	38.5	38.9	41.3	44.5	46.8	43.4	46.5	45	44.7	47	49.2	52.1	53.1	55.4	56.5	59	57.4	49.7	44.5	41.8	41.8	42.8	44.2
P3 OPEN	47.7	37.1	37.5	39.9	43	46.4	43.1	45.2	43.9	45.1	46.9	50.1	52.8	54.3	57.2	58.3	60.9	61.1	53.9	52.3	49.5	43.3	43.4	44.3

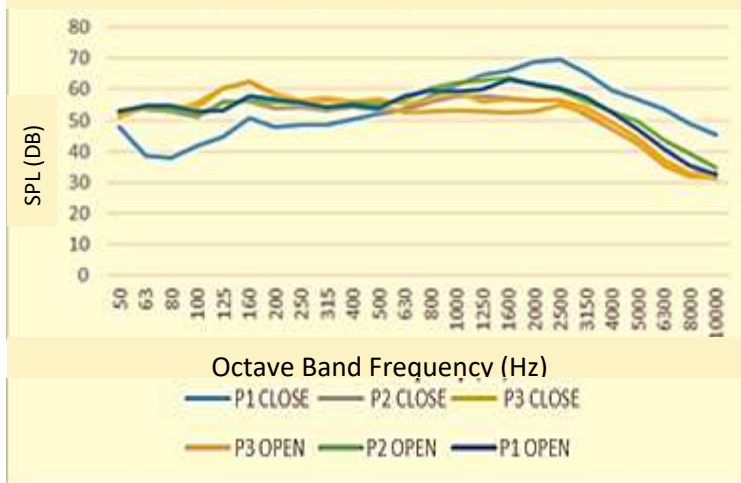
نمودار تراز فشار صدای کوبه ای نقاط p_1, p_2, p_3



داده های برداشت صوتی SPL (dB A) سقف تیر چوبی (ساختمان گنجهای زاده)

F	برداشت نوفه زمینه BN																							
	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000
BN CLOSE	38.5	42.7	39.3	38.6	37.5	33.7	26	23.7	23.3	21.1	20.2	19.5	18.8	19	19.3	19.9	20.4	21.4	22.2	23.1	24.3	25.5	27.1	29
BN OPEN	40.7	48.5	46.2	43.6	41.8	43.1	37.4	37.4	38.2	35.2	37.7	38.1	35.4	33.9	33.6	31.6	30.5	29	30	31.2	31.3	28.6	28	29.2
قرار گیری دستگاه در امتداد طول اتاق P1																								
P1 CLOSE	33.2	23.4	23.2	25.2	29.5	32.2	32	33.9	36.3	34.9	36.8	36.2	38.7	40.9	41.2	41.6	43.4	42.4	36.3	35.4	30.9	28.4	28.1	29.1
P1 OPEN	31.8	23.6	23.3	24.7	29.2	31.3	31.3	34	36.7	35.2	36.9	36.5	40.2	42	44.2	46.7	47.8	45.8	39.7	37.2	34	29.9	28.2	29.1
قرار گیری دستگاه در امتداد عرضی اتاق P2																								
P2 CLOSE	33.4	24.5	23.2	25.7	31.1	32.1	32.8	31.9	35.1	35.3	36.4	36.4	39.6	41	39.5	41.6	43.8	43.2	36.6	33.5	31	28.5	28.2	29.3
P2 OPEN	33	24.4	23.3	25.8	30.3	31.2	32.7	32.6	33.7	36.3	36.8	37.3	40.2	42.5	41.9	44.3	46.2	45.1	38.5	35.7	32.6	29.6	28.4	29.2
قرار گیری دستگاه بزرگ به 45 درجه P3																								
P3 CLOSE	33.5	22.6	22.7	25	30.5	32.2	34.3	34.2	36.6	37.7	39	38.7	38.1	38.3	39.6	41.3	44.1	43.2	37.1	32.5	30.6	28	27.9	29.1
P3 OPEN	32.2	23.1	22.7	25	30.6	31.9	34.3	33.6	36.9	37.6	39	39.2	39.4	39.7	42	44.3	46.1	44.8	39	34.4	31.7	28.3	27.9	29

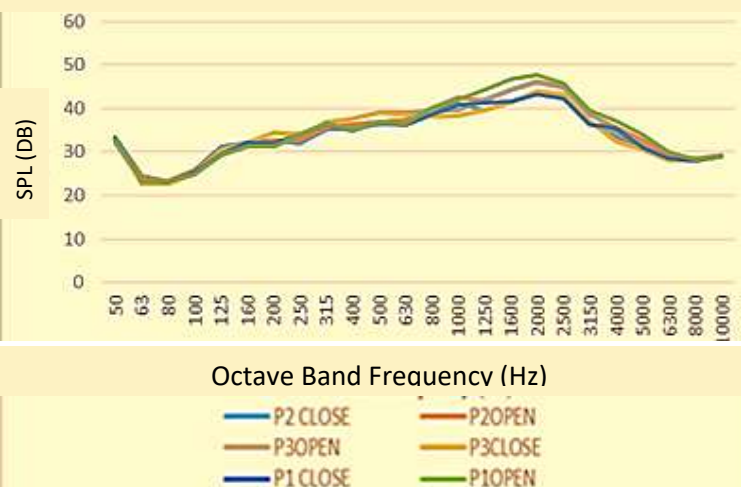
نمودار تراز فشار صدای کوبه ای نقاط p_1, p_2, p_3



داده های برداشت صوتی SPL (dB A) سقف طاقی (ساختمان قدکی)

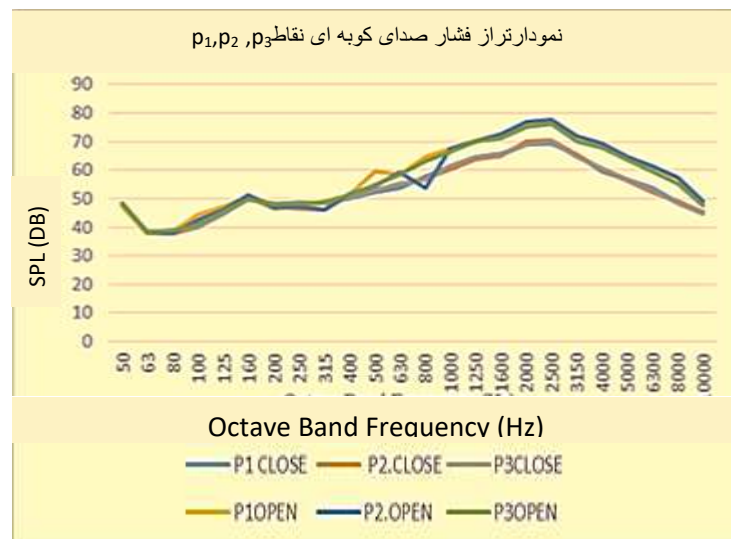
F	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000
برداشت نوبه زمینه BN																								
BN CLOSE	33.1	24	21.5	21	20.3	20.3	18.8	19.7	17.9	17.8	17.7	17.5	17.9	18.4	18.7	19.3	20.2	21.1	21.8	22.8	24.1	25.4	27.4	29
BN OPEN	33	22.4	21.4	21	20.5	21	19	19.3	18.5	18.6	18.5	18.4	18.3	18.7	19.4	20.3	22.2	22.6	22.3	23.2	24.3	25.5	27.5	29
طرز گیری دستگاه برداشتی عرض اتاق P1																								
P1 CLOSE	33.2	23.4	23.2	23.2	29.5	32.2	32	33.9	36.3	34.9	36.8	36.2	38.7	40.9	41.2	41.6	43.4	42.4	36.3	33.4	30.9	28.4	28.1	29.1
P1 OPEN	32.8	23.6	23.3	24.7	29.2	31.3	31.3	34	36.7	35.2	36.9	36.5	40.2	42	44.2	46.7	47.8	45.8	39.7	37.2	34	29.9	28.2	29.1
طرز گیری دستگاه برداشتی عرض اتاق P2																								
P2 CLOSE	33.4	24.5	23.2	23.7	31.1	32.1	32.8	31.9	35.1	35.3	36.4	36.4	39.6	41	39.5	41.6	43.8	43.2	36.6	33.5	31	28.5	28.2	29.3
P2 OPEN	33	24.4	23.3	23.8	30.3	31.2	32.7	32.6	35.7	36.3	36.8	37.3	40.2	42.5	41.9	44.3	46.2	45.1	38.5	35.7	32.6	29.6	28.4	29.2
طرز گیری دستگاه برداشتی بزرگ 45 درجه P3																								
P3 CLOSE	33.5	22.6	22.7	25	30.5	32.2	34.3	34.2	36.6	37.7	39	38.7	38.1	38.3	39.6	41.3	44.1	43.2	37.1	32.5	30.6	28	27.9	29.1
P3 OPEN	32.2	23.1	22.7	25	30.6	31.9	34.3	33.6	36.9	37.6	39	39.2	39.4	39.7	42	44.3	46.1	44.8	39	34.4	31.7	28.3	27.9	29

نمودار تراز فشار صدای کوبه ای نقاط p_1, p_2, p_3



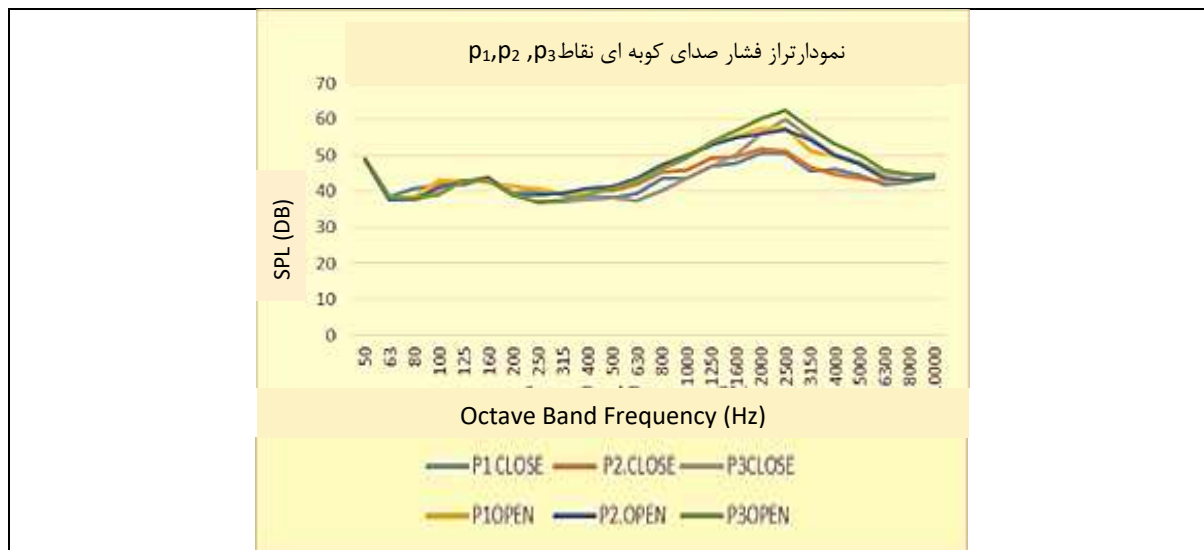
داده های برداشت صوتی SPL (dB A) سقف تیرچه بلوک یونولیت (ساختمان گوهریون)

برداشت نوبه زیننه 8N																								
F	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000
BNCLOSE	47.1	37.4	35.8	35.1	34.3	34.8	33.7	33.7	32.5	32.5	32.6	32.5	32.8	33.4	34.4	35.4	37.6	39	37	38.6	39.5	40.7	42.1	43
BNOPEN	47.7	38.3	36.1	36	34.8	35.2	34	33.8	33.2	33.3	33.5	33.7	35.6	35.4	36.8	37.7	39.6	40.8	38.5	38.6	39.4	40.7	42.1	43.9
قرای گیری دستگاه در راستای طول اتاق P1																								
PIOPEN	47.4	37.9	38.5	44.4	47.3	50.5	46.5	47.1	48.9	51.1	59.6	58.4	64.8	67.6	70.6	72.5	75.9	77.7	71.7	69.2	64.8	61.3	57	48.9
P1CLOSE	47.8	38.6	37.9	41.7	44.8	50.7	47.9	48.6	48.5	50.2	52.3	53.6	57.8	61.2	64.5	65.9	69	69.4	65.2	59.7	56.7	53.6	48.8	45.3
قرای گیری دستگاه در راستای عرضی اتاق P2																								
P2OPEN	48.5	38.3	38	42.5	46.2	51.2	46.8	47.4	46	51.5	54.5	59.1	53.7	67.4	70.1	72.6	76.8	77.8	72	69.5	64.7	61.4	57.3	48.9
P2CLOSE	48.1	38.2	37.8	40	44.6	51.4	47.3	46.6	46.1	51.4	53.1	55.2	57	60.2	64	65.1	70.1	70.5	65.5	60.3	56.2	52.5	48.9	45.2
قرای گیری دستگاه بزایه 45 درجه P3																								
P3OPEN	48.4	38.3	38.8	40.7	45.3	49.9	48.1	48.4	48.7	51.1	54.9	58.4	63.1	66.3	69.9	71.3	75	76.1	70.2	67.9	63.4	59.6	55.3	47.7
P3CLOSE	48.5	38.7	38.6	40	44.9	49.7	48.4	48.5	48.5	50.6	52.9	55.3	56.8	61.4	64.5	65.5	69.1	70	64.8	60.7	56.8	52.9	48.2	44.9



داده های برداشت صوتی SPL ($dB A$) سقف تیرچه بلوک سفالی (ساختمان چند رسانه‌ای)

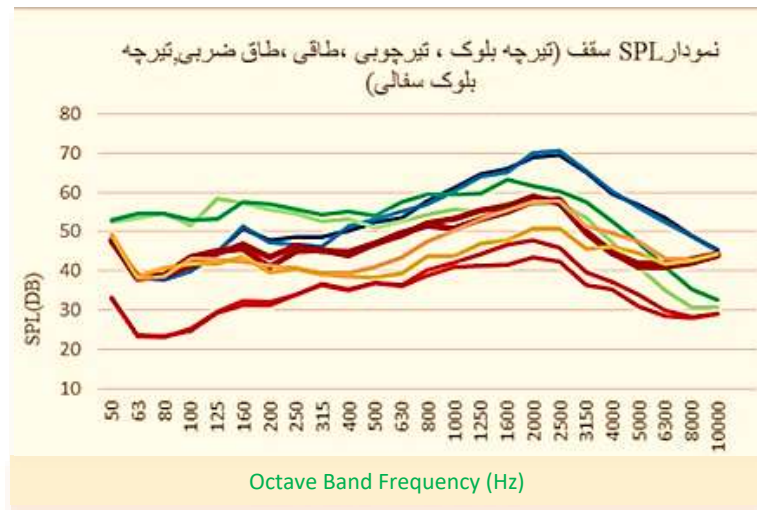
برداشت نوبه زیننه 8N																								
F	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000
BNCLOSE	49	38.1	37	36.6	36.3	36.8	34.6	34.6	33.7	33.3	32.9	32.9	33.2	33.9	34.7	35.7	36.7	37.1	37	37.8	39	40.3	41.9	43.9
BNOPEN	49	37.9	36.5	36.1	35.8	36.4	35.2	34.8	34.7	35.1	35.7	35.9	37	38.6	40.6	42	41.8	41.4	38	38.1	39	40.4	41.9	43.8
قرای گیری دستگاه در راستای طول اتاق P1																								
PIOPEN	49.1	38.1	38.5	43.2	43	42.4	41.3	40.7	39.4	39.5	41.1	43.4	47.5	50.2	53.2	55.4	57.5	57.8	51.2	49.7	47.5	43.3	42.9	44.2
P1CLOSE	49.1	38.6	40.8	41.7	41.9	43.6	39.6	40.4	39	38.5	38.3	39.4	43.7	43.6	47.1	47.8	50.7	50.8	45.5	46.1	44.6	41.9	42.6	44.2
قرای گیری دستگاه در راستای عرضی اتاق P2																								
P2OPEN	48.7	37.7	37.6	41.2	42.9	43.5	38.8	39.2	39.4	40.7	41.4	43.7	47.2	49.8	52.9	55	55.9	57.2	54.4	50.2	47.5	43.6	43	44
P2CLOSE	48.9	37.9	38.5	41.9	42.7	43.8	39	39.2	39.7	40.6	40.4	41.9	45.2	46	49.3	49.5	51.7	51.3	46.6	44.9	43.5	42.8	43	44.7
قرای گیری دستگاه بزایه 45 درجه P3																								
P3OPEN	49	38.6	38	39.1	43.1	43.1	38.9	37.1	37.6	39.1	40.7	42.8	46.2	49.4	53.9	56.8	60.2	62.5	57.3	53.1	50.1	46	44.9	44.4
P3CLOSE	48.8	38.6	37.6	39.6	43.1	43.4	39.4	36.9	37.3	37.8	38.2	37.5	40.3	43.5	47.1	50.1	55.9	59.9	55	50.1	48.1	44.7	44.4	44.4



۵. تحلیل نمودارهای سطح فشار صوت

بررسی و تجمیع نمودارهای تراز فشار صوت (SPL) مطابق شکل ۶ نشان دهنده الگوی نسبتاً ثابت و روند مشابه در تمامی برداشتهاست. نتایج حاصل، بیانگر آن است که در بازه فرکانسی پایین (۵۰ تا ۴۰۰ هرتز)، منحنی‌ها شیب ملایم و تقریباً یکنواختی دارند. از فرکانس ۵۰۰ تا ۴۰۰۰ هرتز، نمودارها روندی صعودی را نشان می‌دهند و پس از ۴۰۰۰ هرتز، کاهش تدریجی SPL در اغلب نمونه‌ها

مشاهده می‌شود. نکته قابل توجه، افزایش چشمگیر تراز فشار صوت در فرکانس ۲۵۰۰ هرتز است که در تمامی نمونه‌ها به وضوح مشاهده می‌شود. بیشترین مقدار SPL مربوط به نمونه سقف تیرچه بلوک یونولیت در فرکانس ۲۵۰۰ هرتز با مقدار ۷۶/۱ دسی‌بل در شرایط بازشوی باز ثبت شده است. تحلیل بازه‌های فرکانسی مختلف از اهمیت بالایی برخوردار است، چرا که می‌تواند مبنایی برای ارائه راهکارهای بهبود شرایط آکوستیکی فضاها فراهم آورد.



شکل ۷. راهنمای نمودار شکل ۶

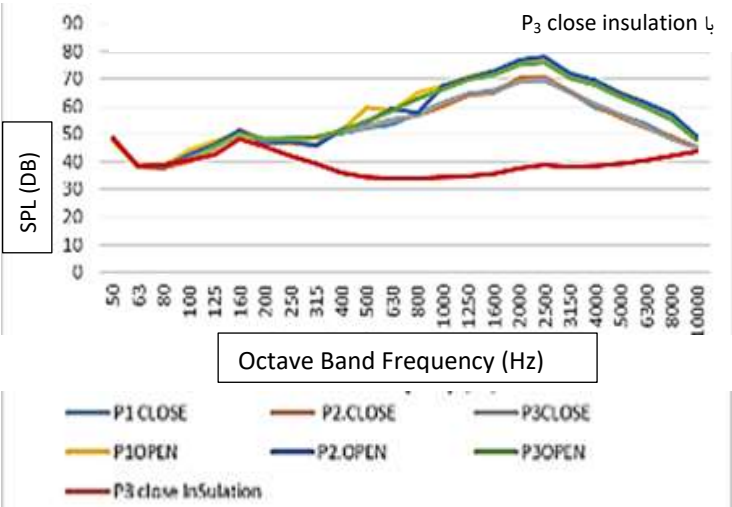

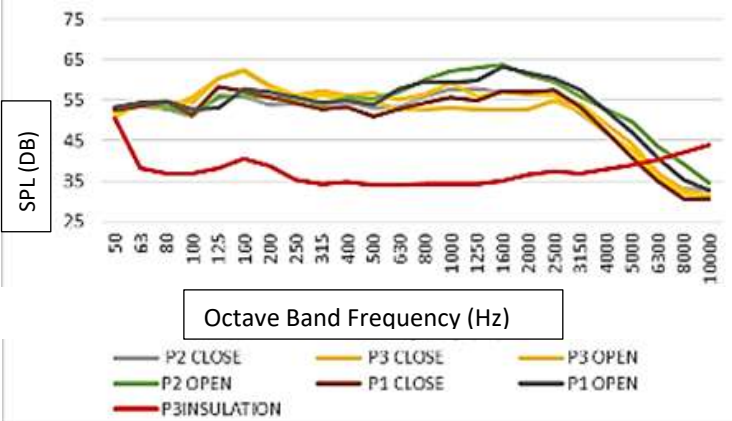

شکل ۶. نمودارهای SPL برداشت صوتی نمونه‌ها (نگارنده)

به‌عنوان گزینه‌ای کارآمد برای کاهش صدای کوبه‌ای مورد تأکید پژوهشگران است [۱۳]. از راهکارهای مقابله با نویز ضربه‌ای در سقف‌های اجرا شده می‌توان به کفپوش نرم، زیرلایه‌های ارتجاعی، نصب سقف ارتجاعی، میراکننده‌های ویسکوالاستیک [۱۴] و ایزولاتور صفحه‌ای [۱۱]، اشاره کرد. در این پژوهش با استفاده از یک صفحه لاستیکی به ضخامت یک سانتی‌متر و متناسب با ابعاد دستگاه ضربه‌زن طوری که تمام چکش‌های زیرین دستگاه را پوشش دهد و زیر دستگاه ضربه‌زن روی هر پنج نوع سقف قرار داده شود، مجدداً آزمون‌ها تکرار شده و داده‌های آزمون به صورت نمودار استخراج شد. با توجه به جدول ۵ که در ذیل آمده، همان‌طور که از نمودارها بر می‌آید میزان سطح فشار صدا در همه سقف‌ها کاهش قابل توجهی داشت که این امر نمایان‌گر مطلوب بودن نوع عایق انتخابی برای هر پنج نمونه سقف منتخب است.

۶. ارائه راهکار جهت بهبود شرایط آکوستیکی

برای عایق‌بندی صدای کوبه‌ای، به‌کارگیری عایق‌های صوتی با ماهیت نرم و ارتجاعی توصیه می‌شود، زیرا این مصالح قادرند انرژی حاصل از ضربه را جذب کرده و میزان انتشار صدای ضربه‌ای را کاهش دهند. به‌طور ویژه، نصب این نوع عایق‌ها در میان تیرهای چوبی پیش از تکمیل فرآیند ساخت سقف، اثرگذاری مطلوب‌تری به همراه دارد. لازم به ذکر است که در نظر گرفتن عایق صوتی ضربه‌ای در مرحله طراحی اهمیت بالایی دارد، چرا که اجرای آن پس از اتمام سازه به‌مراتب دشوارتر و پرهزینه‌تر خواهد بود. پر کردن کامل فضای خالی میان تیرها با مصالح دارای خاصیت جذب صوت، رویکردی مؤثر در بهبود عملکرد آکوستیکی سازه محسوب می‌شود. همچنین، با توجه به ضریب جذب بالای مواد الیافی نرم، انتخاب این گروه از مصالح

جدول ۵. تطبیق نمودار یافته‌های آزمون با نمودار آزمون عایق

تطبیق نمودار SPL برداشتها بدون عایق با نمودار SPL نقطه P3 با عایق لاستیکی	تصویر آزمون با عایق لاستیکی	عنوان
<p>تطبیق نمودار تراز فشار صدای کوبه ای نقاط (P1,P2,P3) با P3 close insulation</p> 		<p>سقف تیرچه بلوک یونولیت ساختمان گوهریون</p>
<p>تطبیق نمودار تراز فشار صدای کوبه ای نقاط (P1,P2,P3) با P3 close insulation</p> 		<p>سقف تیرچوبی گنجه‌ای زاده</p>

<p>تطبيق نمودار تراز فشار صدای کوبه ای نقاط (p₁,p₂,p₃) با p₃ close insulation</p> <p>SPL (DB)</p> <p>Octave Band Frequency (Hz)</p> <p> P2CLOSE P2OPEN P3OPEN P3CLOSE P1CLOSE P1OPEN P3CLOSE InSulation </p>		<p>سقف طاقی (قدکی)</p>
<p>تطبيق نمودار تراز فشار صدای کوبه ای نقاط (p₁,p₂,p₃) با p₃ close insulation</p> <p>SPL (DB)</p> <p>Octave Band Frequency (Hz)</p> <p> P1CLOSE P1OPEN P2CLOSE P2OPEN P3CLOSE P3OPEN P3CLOSE InSulation </p>		<p>سقف طاقی ضربی (ساختمان جواهریون)</p>
<p>تطبيق نمودار تراز فشار صدای کوبه ای نقاط (p₁,p₂,p₃) با p₃ close insulation</p> <p>SPL (DB)</p> <p>Octave Band Frequency (Hz)</p>		<p>سقف تیرچه بلوک سفالی (ساختمان چندرسانه‌ای (</p>

۷. نتیجه گیری

نتایج پژوهش بیانگر آن است که صدای کوبه‌ای در تمامی نمونه‌های مورد بررسی از سطح استانداردهای مطلوب بالاتر بوده و می‌تواند مانعی در ارتقای کیفیت آموزشی باشد. در این میان، سقف تیرچه بلوک یونولیت بیشترین انتقال صدا را نشان داد. اعمال مداخلات پیشنهادی توانست به شکل مؤثری تراز فشار صدا را کاهش دهد و شرایط صوتی را بهبود بخشد. بنابراین، توجه به ویژگی‌های آکوستیکی سقف‌ها و به‌کارگیری راهکارهای کاهش نویز می‌تواند گامی مؤثر در ارتقای

کیفیت فضاهای آموزشی و همچنین دیگر فضاها محسوب شود.

۸. قدردانی

نویسندگان این مقاله مراتب سپاس خود را از دانشگاه هنر اسلامی تبریز برای فراهم کردن دسترسی به نمونه‌های سقف و حمایت‌های فنی در اجرای اندازه‌گیری‌های میدانی اعلام می‌دارند. همچنین از تمامی همکاران و کارشناسان آکوستیک که با ارائه مشاوره و راهنمایی‌های تخصصی، انجام این پژوهش را ممکن ساختند، صمیمانه تشکر می‌کنیم.

۹. منابع

- [1] Gramez, Abdelghani, Djamel Ouis, and Farid Belhamel. "In-situ Investigation of the Acoustical Performance in Collective Social Dwellings." *Applied Acoustics* 180 (2021): 108124.
- [2] مبحث ۱۸ مقررات ملی ساختمان. تهران: دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان، ۱۳۹۶.
- [3] Brüel & Kjær. *Product Data and Technical Documentation*. Nærum, Denmark: Brüel & Kjær Sound & Vibration Measurement A/S, 2020. <https://www.bksv.com>
- [4] Egan, M. *Architectural Acoustics*. New York: McGraw-Hill, 2007.
- [5] Vitruvius. *Ten Books on Architecture*. Translated by M. H. Morgan. New York: Dover Publications, 1960.
- [6] Shishoo, R. *Textile Advances in the Automotive Industry*. Oxford: Elsevier, 2008.
- [7] عمید، فرهنگ فارسی عمید. تهران: انتشارات امیرکبیر، ۱۳۷۵.
- [8] Harris, C. M. *Dictionary of Architecture & Construction*. Translated by M. R. Afzali and M. H. Homayoni. 2006.
- [9] فور ویلی، ۱۹۶۷، آکوستیک در معماری، غلامعلی لیاقتی، دانشگاه شهید بهشتی.
- [10] ASTM E1007-21. *Standard Test Method for Measurement of*. ASTM International, 2021.
- [۱۱] گلمحمدی، رستم. راهنمای اندازه‌گیری و ارزیابی صدا و ارتعاش در محیط کار، تهران: انتشارات دانشجو، وزارت بهداشت، درمان و آموزش پزشکی، معاونت بهداشت، مرکز سلامت محیط و کار، ۱۳۹۵.
- [12] Kuczmarski, M. A. *Acoustic Absorption in Porous Materials*. NASA Technical Publication, 2011
- [13] Jayalath, A., S. Navaratnam, T. Gunawardena, P. Mendis, and L. Aye. "Airborne and Impact Sound Performance of Modern Lightweight Timber Buildings in the Australian Construction Industry." *Case Studies in Construction Materials* 15 (2021): e00632.

[۱۴] کشکولی، ا.، "ارزیابی عملکرد آکوستیکی کف ساختمان تحت بارگذاری ضربه ای ناشی از راه رفتن"، ۱۳۹۵، پایاننامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان.

[15] Cox, T. J., and P. D'Antonio. *Acoustic Absorbers and Diffusers: Theory, Design and Application*. 2nd ed. CRC Press, 2009.

پی نوشت

-
- ¹ Airborne
 - ² Structure borne
 - ³ Boethius
 - ⁴ Chladni
 - ⁵ Helmholtz
 - ⁶ Vitruvius
 - ⁷ D'Alembert
 - ⁸ Lagrange
 - ⁹ Fourier
 - ¹⁰ Sturm
 - ¹¹ Cladon
 - ¹² Hassenfratz
 - ¹³ Biot
 - ¹⁴ German
 - ¹⁵ Tone
 - ¹⁶ Noise
 - ¹⁷ Pure tone
 - ¹⁸ Sound Transmission
 - ¹⁹ Tapping Machine
 - ²⁰ Sound pressure level
 - ²¹ Background Noise
 - ²² A-weighted equivalent sound pressure level (LAeqT)