

بهینه‌سازی عملکرد آکوستیکی جذب‌کننده‌های صوتی با تأکید بر تناسبات و ارتفاع فضا

(مطالعه موردی: هنرستان زهرا مردانی آذر شهرستان تبریز)*

مهندس زهرا سخندان سرخابی*، دکتر فرشاد نصرالهی**، دکتر عباس غفاری***

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۳/۲۲ تاریخ پذیرش نهایی: ۱۳۹۷/۰۶/۱۹

چکیده

پژوهش حاضر درصدد است تا با استفاده از تناسبات ارتفاعی فضا، بازدهی صفحات جذب‌کننده صوت را افزایش داده و حالت بهینه برای میزان مشخصی از جذب‌کننده‌ها را فراهم سازد. متغیرهای مورد مطالعه، ارتفاع صفحات جذب‌کننده، وضعیت و مکان نصب بوده و هدف اصلی، یافتن رابطه‌ای بین ارتفاع فضا، فاصله منبع از کف و ارتفاع صفحات جذب‌کننده است. پژوهش به روش تجربی و با برداشت میدانی از وضعیت موجود آکوستیکی هنرستان مردانی آذر تبریز و روش شبیه‌سازی به‌وسیله نرم‌افزار EASE4.4 انجام شده است. به‌عنوان نتیجه می‌توان گفت سقف مناسب‌ترین و کف نامناسب‌ترین مکان برای جذب صوت بوده و صفحات جذب‌کننده بایستی با فاصله برابر با ارتفاع صفحه از سقف و با زاویه ۹۰ درجه نسبت به آن نصب شوند. در صورتی که دو برابر مجموع ارتفاع صفحه جذب‌کننده و فاصله منبع از کف برابر با ارتفاع کل فضا باشد، حداکثر میزان جذب صوت در فضا حادث خواهد شد.

واژه‌های کلیدی

جذب‌کننده صفحه‌ای، تناسبات، تراز شدت صوت، ارتفاع فضا، نرم‌افزار EASE4.4.

* مقاله حاضر مستخرج از رساله دکتری با عنوان «واکاوای عملکرد حرارتی فضای داخلی مدارس تبریز با تأکید بر هم‌نشینی هندسی و آکوستیکی پوسته فضا و کاواک» به راهنمایی آقای دکتر فرشاد نصرالهی و آقای دکتر عباس غفاری می‌باشد.
** دانشجوی دکتری رشته معماری، دانشگاه هنر اصفهان، استان اصفهان، شهر اصفهان (مسئول مکاتبات).

Email: Zahra.sokhandan@gmail.com

*** استادیار گروه معماری، دانشگاه هنر اصفهان، استان اصفهان، شهر اصفهان.

Email: f.nasrollahi@udk-berlin.de

**** استادیار گروه معماری، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، استان آذربایجان شرقی، شهر تبریز.

Email: abbas_ghaffari@yahoo.com

مقدمه

ویژگی‌های مشابه است. در این راستا، سؤال اصلی پژوهش این است که چگونه می‌توان با میزان مشخصی از یک ماده جذب‌کننده و تقسیم آن بر مبنای شاخص‌های ارتفاعی و مکانی به حداکثر جذب انرژی صوتی دست یافت. هدف اصلی از پژوهش یافتن رابطه‌ای ساده و کارا برای به دست آوردن بیشترین میزان جذب صوت از میزان مشخصی از یک ماده جذب‌کننده است که به صورت صفحات معلق از سقف آویزان‌اند. شاخص‌های مورد بررسی تراز شدت صوت، ضریب خطای شنیداری (ALC)، ضریب انتشار صوتی (StI) است.

تراز شدت صوت، به معنای شدت صدایی است که در محیط پخش صوت ایجاد می‌شود و می‌توان آن را با بلندی صدا معادل دانست. ضریب خطای شنیداری بیانگر درصد همخوان‌هایی در فضا است که قابل فهم در گفتار نیستند به صورت ساده‌تر این ضریب، درصد امکان رخداد خطای شنیداری را در موقعیت‌های مختلف مکانی محیط پخش صوت محاسبه می‌کند، ضریب انتشار صوتی، شاخصی برای عبور صدای مستقیم می‌باشد و بیانگر مسافتی است که صوت به صورت مستقیم می‌تواند طی کند (سعادت، ۱۳۹۱). چنانچه سه شاخصه تعریف شده در یک محیط آکوستیکی در بازه استاندارد قرار بگیرند. میزان تراز نوفه و وضوح گفتار در حد آسایش انسانی خواهند بود. بنابراین در پژوهش حاضر وضعیت نمونه موردی از نظر سه شاخصه تعریف شده بررسی خواهد شد.

پیشینه پژوهش

تاکنون پارامترهای متنوعی از هندسه فضایی جهت بهینه‌سازی جذب صوت بررسی شده‌اند که مواردی مانند ضخامت صفحه‌ها، تغییر زاویه‌ها، چند جدارگی و ایجاد ستون‌های آزاد از آن جمله‌اند. چنانچه دیوارهای فضا به صورت چند جداره با فاصله‌های ساخته شوند تأثیر قابل توجهی را در کاهش میزان صوت به واسطه جذب آن خواهند داشت، به صورتی که هر چه فاصله بین جداره‌ها بیشتر باشد، میزان جذب و کاهش صوت بیشتر است (Cook et al., 1979). چرخش ۹۰ درجه در مسیر حرکت امواج صوتی عاملی است که تراز نوفه را ۵ دسی‌بل کاهش می‌دهد (Cox, 2006; Pfretzschner et al., 2009) فرورفتگی‌ها و برآمدگی‌های کم عمق عامل دیگری است که در افزایش جذب‌کنندگی فضا مؤثر است. عباس غفاری در رساله دکتری خود که با استفاده از نرم‌افزار آکوستیکی EASE انجام شده است ثابت کرد که با فرورفتگی‌ها و برآمدگی‌های در حدود ۱/۴ تا ۱/۸۵ در فضا، میزان زمان واکنش ۵۰٪ کاهش می‌یابد (غفاری، ۱۳۹۲). اگر ضخامت جذب‌کننده‌های صوتی کاربردی در فضا از یک چهارم طول موج صوتی بیشتر شود در جذب‌کنندگی فضا

یکی از اصلی‌ترین مشکلات در فضاهای عمومی معاصر، آلودگی صوتی است که به صورت نوفه در فضا نمود یافته و اختلالاتی مانند احساس آشفستگی و عدم آسایش فضایی را در سیستم روانی انسان نسبت به یک فضا ایجاد می‌کند، همچنین با تأثیرگذاری در سیستم شنوایی و کاهش سطح تمرکز، آسیب‌های فیزیکی قابل توجهی را در انسان به وجود می‌آورد (گل محمدی، ۱۳۸۷). نوفه عامل متقابل در برابر سنجه آرامش و سکوت در فضاهای داخلی است (فیضی و همکاران، ۱۳۹۶) و اصلی‌ترین راهکار برای کاهش میزان نوفه در فضا استفاده از مصالح جذب‌کننده صوتی می‌باشد که مستلزم صرف هزینه بسیاری است (سخندان و همکاران، ۱۳۹۶). با توجه به قوانین فیزیک، صوت می‌تواند در فضاهای توخالی که فرکانس‌های طبیعی‌شان با فرکانس صوت دارای تطابق است، موجب به وجود آمدن طنین گردد. هوای موجود در فضاهای توخالی صرف‌نظر از حجم آن همانند یک فنر عمل می‌کند و در فرکانس مربوطه با نوسان حرکت می‌کند، زیرا یک ساختار طنین‌انداز، انرژی را از امواج صوتی جذب می‌کند، که این عمل به واسطه نیرویی که موجب تحریک و یا به اصطلاح به هیجان درآوردن آن می‌شود، اتفاق می‌افتد. شایان ذکر است که ابزار و وسایل به وجود آورنده طنین می‌توانند انرژی صوت را جذب کنند (هاشمی و داداش‌زاده، ۱۳۸۹). اصولاً هنگامی انرژی صوتی جذب می‌شود که تبدیل به نوع دیگری از انرژی گردد که این انرژی معمولاً انرژی گرمایشی است و مقدار بسیار کمی از آن به انرژی جنبشی تبدیل می‌گردد (قیابکلو، ۱۳۹۳). بر اثر اصطکاک مولکول‌های هوا با سایر مواد در اثر تحریک توسط انرژی صوتی و مقاومت مواد در برابر حرکت و تغییر شکل، انرژی صوتی به انرژی گرمایشی تبدیل می‌شود (Fahy, 2003) بنابراین هندسه جذب‌کننده‌ها یکی از مواردی است که در میزان جذب صوت مؤثر بوده و با ایجاد تغییر در وضعیت انعکاس امواج صوتی و هدر رفت انرژی صوت در میزان جذب‌کنندگی صوت در فضا دخالت می‌کند. پژوهش حاضر به دنبال یافتن تناسب‌ات ارتفاعی فضا به گونه‌ای است که در فرایند جذب صوت دخالت کرده و آن را تقویت کند. برای انجام این پژوهش با انتخاب یک نمونه موردی با مشکلات آکوستیکی قابل توجه، مطالعات میدانی در نمونه موردی انجام شده و تراز نوفه زمینه به وسیله دستگاه B&K اندازه‌گیری می‌شود. نتایج حاصل از برداشت میدانی به عنوان داده‌های اولیه به نرم‌افزار EASE داده شده و وضعیت موجود بررسی می‌گردد. سپس با ارائه پیشنهاداتی در تناسب‌ات ارتفاعی فضا نسبت به صفحات جذب‌کننده صوت تلاش می‌شود تا سطح نوفه در فضا کاهش یابد. قدم‌نهایی پژوهش یافتن رابطه‌ای برای تعمیم‌پذیر سازی فرایند پژوهش برای فضاهایی با

در یک زمان مشخص) اندازه‌گیری شده و داده‌های به‌دست‌آمده در نرم‌افزار EASE4.4 بارگذاری و وضعیت موجود نمونه موردی از نظر شاخص‌های تراز شدت صوت، ضریب انتشار صوتی، ضریب خطای شنیداری بررسی شده و شاخص‌هایی که از حد استاندارد خارج شده‌اند شناسایی گشته‌اند. در ادامه مدل‌هایی برای رساندن شاخص‌های نامطلوب به حد استاندارد ارائه شده و هر یک از مدل‌ها در نرم‌افزار EASE4.4 آزمون‌سازی شدند. پس از شناسایی مدل بهینه، با تغییر در عامل مؤثر، وضعیت بهینه عامل شناسایی شده در مدل با شبیه‌سازی‌های مکرر بررسی شده و بهترین وضعیت آکوستیکی مدل ارائه می‌گردد.

عوامل مورد بررسی در ارائه مدل‌های پیشنهادی، ارتفاع فضا، فاصله منبع از کف، مساحت جذب‌کننده به‌عنوان عواملی که در پژوهش ثابت در نظر گرفته شده و عوامل متغیر ابعاد صفحات نصب شده و موقعیت نصب آنهاست.

نرم‌افزار تحلیل آکوستیکی EASE4.4 به‌عنوان نرم‌افزاری که قابلیت بررسی شاخص‌های متنوع آکوستیکی مانند Total SPL و Direct SPL-C-L-ALC-StI-RT و غیره را داراست نرم‌افزار اصلی شبیه‌سازی پژوهش محسوب می‌شود. یکی از قابلیت‌های منحصر به فرد این نرم‌افزار امکان ساخت متریا ل و بلندگوها با توجه به وضعیت واقعی فضاست که نتایج حاصل از این نرم‌افزار را واقعی‌تر می‌سازد.

در این پژوهش با توجه به استخراج نتایج عددی حاصل از نرم‌افزار شبیه‌سازی، پژوهش از منظر ماهیت داده‌ها از نوع کمی بوده و روش تحقیق از منظر روش، شبیه‌سازی و تجربی است که بر روی یک نمونه موردی (هنرستان زهرا مردانی آذر شهرستان تبریز) انجام شده‌است.

مبانی نظری

مکانیزم جذب صوت

یکی از فرض‌های اساسی در قوانین انتشار امواج آکوستیکی، این است که تغییرات فشار که توأم با انبساط و تراکم موج‌های صوتی است به‌صورت بی‌دررو صورت می‌گیرد. پس مستلزم این است که دما تغییر کند. بنابراین وقتی سیال در حال ارتعاش است گرما از قسمت متراکم که دمای آن بیشتر است به قسمت منبسط مجاور که دمای آن کمتر است جاری می‌گردد و در اثر این انتقال گرما، فشار سیال به تعادل می‌رسد و این پدیده به تدریج دامنه موج‌ها را در حین انتشار در محیط کاهش می‌دهد و پدیده جذب صوت به وقوع می‌پیوندد (کینزلر و فرای، ۱۳۸۲). بایستی توجه کرد که تغییر در میزان جذب‌کنندگی تغییرات قابل توجهی را در میزان RT^* (زمان واکنش) و SPL^* (تراز فشار صوتی) به وجود می‌آورد که این تغییر در RT محسوس‌تر

مؤثر خواهد بود (Fuches et al., 2013). کاربرد ستون‌های آزاد در فضا با تشدید سایه‌های صوتی، موجبات کاهش شدت صوت به‌واسطه جذب آن را افزایش می‌دهند (غفاری، ۱۳۹۲). نحوه تقسیم‌بندی و چیدمان صفحات جذب‌کننده بر روی دیوارها در پژوهش‌های متعدد مورد بررسی قرار گرفته و مشخص شده‌است که تخمین وضعیت کاهش تراز شدت صوت در فضا وابسته به ضریب جذب صفحات، ابعاد و محل نصب آنهاست (Dragonetti et al., 2016). اجرای صفحات جذب‌کننده با ایجاد فاصله هوایی اندک از دیوار و با اعمال سوراخ‌هایی بر روی آن با افزایش میزان نوسان‌ها بر کاهش تراز شدت صوت مؤثر بوده و بازدهی آکوستیکی فضا را افزایش می‌دهد (Falsafi & Ohadi, 2017). چیدمان شبکه‌ای و یک‌درمیان خطی صفحات جذب‌کننده بر روی دیوار، راهکارهای دیگری هستند که بر میزان جذب انرژی‌های صوتی مؤثر بوده و آن را افزایش می‌دهند (Cho et al., 2018). وضعیت قرارگیری صفحات جذب‌کننده در دیوار نسبت به موقعیت منبع در پژوهش دیگری به‌صورت تجربی انجام شده و زمان واکنش مقایسه شده است و آنچه قابل توجه است. عدم امکان تخمین وضعیت مشخصی برای موقعیت نصب صفحات جذب‌کننده بر روی دیوار به‌صورت صفحات کوچک پراکنده، پانل‌ها و حتی صفحاتی با ارتفاع کل فضا است (Cho & Toi, 2015). استفاده از صفحات معلق از سقف به‌صورت صفحات پخش‌کننده، منعکس‌کننده و جذب‌کننده صوتی در فضاها از متداول‌ترین رویکردهای کنترل کیفیت صوت در فضاهای بسته است که برای دست‌یابی به وضعیت جذب صوت، اصلی‌ترین عامل، فاصله بین صفحات می‌باشد (Marbjerg et al., 2018). برای دست‌یابی به بیشترین میزان جذب صوت بهتر است فاصله بین صفحات معلق از سقف از ارتفاع آنها بیشتر بوده و به‌صورت موازی در فضا نصب شوند. استفاده از صفحات معلق از سقف با رعایت ضریب تراکم ۵/۰ می‌تواند بدون ایجاد سپر جذب‌کنندگی، میزان قابل توجهی از تراز شدت صوت موجود در فضا را کاهش دهند (اگان، ۱۳۹۶). حال پژوهش حاضر درصدد است تا میزان جذب‌کنندگی صفحات معلق در فضا را وابسته به ارتفاع و محل نصب آنها بررسی کرده و با استفاده از خصوصیات هندسی، رابطه‌ای بین ارتفاع صفحات معلق و حداکثر جذب‌کنندگی فضایی برقرار سازد.

روش پژوهش

پژوهش حاضر، پژوهشی ترکیبی به روش‌های تجربی و شبیه‌سازی می‌باشد. ابتدا، مطالعات میدانی بر روی نمونه موردی به روش تجربی با استفاده از دستگاه B&K انجام شده و میزان تراز نوفه موجود در نمونه موردی در بحرانی‌ترین وضعیت آکوستیکی (کارکرد کل دستگاه‌ها

است (Chourmouziadou & Kang, 2008).

پلان هنرستان مذکور و بارگذاری آن در نرم افزار EASE هر یک از دستگاه‌های چرخ خیاطی به عنوان یک منبع تولید صوت در نرم افزار در نظر گرفته شده و تراز شدت صوت در هر یک از فرکانس‌ها با توجه به برداشت‌های میدانی به آنها اختصاص داده شد. با مراجعه به نمایندگی‌های فروش گچ سفید، رنگ روغنی و سنگ به کار برده شده در فضا جدول‌های ضریب جذب مصالح استخراج شده و در نرم افزار بارگذاری شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی وضع موجود پس از تنظیمات فوق به صورت زیر است:

تراز شدت صوت

تراز شدت صوت در فضای هنرستان در ۴ فرکانس ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۴۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ هرتز در نرم‌افزار EASE مورد تحلیل قرار گرفته است (شکل ۲).

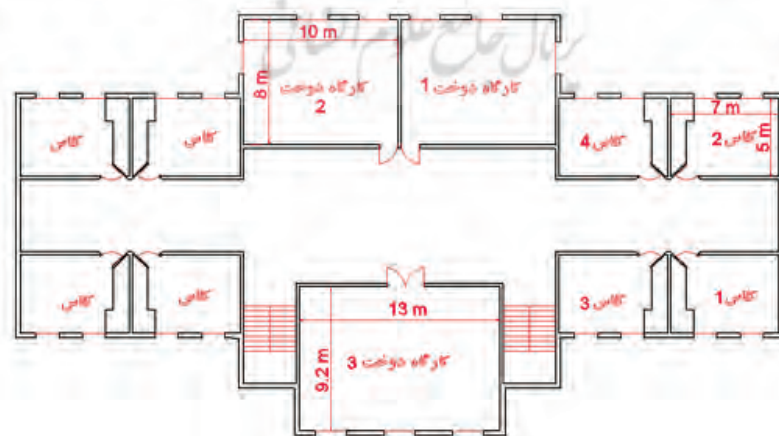
با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام شده، تراز نوفه زمینه در کلاس‌ها بسیار بیشتر از حد استاندارد بوده و نیاز به اجرای تمهیدات جدی جهت کاهش سطح تراز نوفه زمینه در کارگاه‌ها و بالأخص کلاس‌ها می‌باشد. پخشایش صوتی در فضای کلاس‌ها همگون بوده و چنانچه بتوان سطح تراز شدت صوتی فضای کارگاه‌ها را کاهش داد، امکان رسیدن به تراز نوفه زمینه استاندارد در کلاس‌ها وجود دارد (شکل ۲ و جدول ۱). شایان ذکر است که با افزایش فرکانس بر میزان تراز نوفه افزوده می‌شود، بنابراین لزوم ارائه تمهیداتی جهت کنترل تراز شدت صوت در فرکانس‌های زیر احساس می‌گردد.

مطالعه موردی و مشکلات آکوستیکی

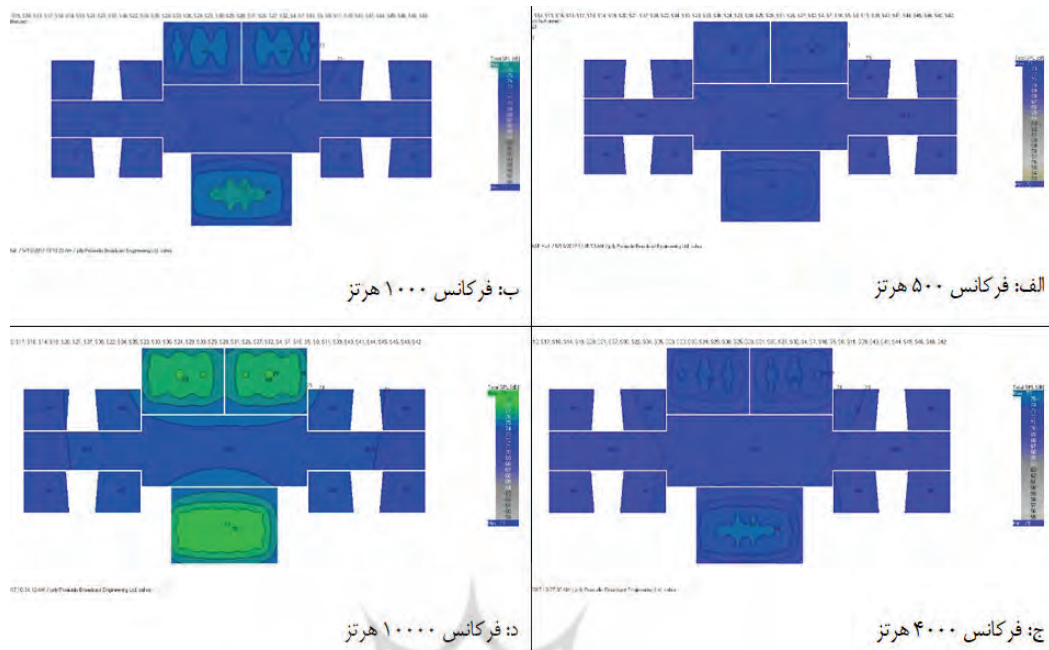
مطالعه موردی پژوهش حاضر یکی از مدارس خیر ساز به نام هنرستان زهرا مردانی آذر در ناحیه ۵ آموزش و پرورش شهرستان تبریز می‌باشد. یکی از مشکلات اصلی طراحی معماری در این هنرستان، مکان‌یابی کارگاه‌های دوخت در مرکز و نقطه ثقل مجموعه است که آلودگی صوتی قابل توجهی را برای فضاهای آموزشی مجاور پدید می‌آورد. با توجه به قرارگیری کارگاه‌های دوخت در مجاورت دسترسی‌های عمودی مجموعه، نوفه به کلاس‌های طبقات بالاتر نیز رسیده و آلودگی صوتی قابل توجهی را ایجاد کرده است (شکل ۱).

بررسی وضعیت آکوستیکی موجود

در کل تعداد ۳۶ عدد چرخ خیاطی روزانه در کارگاه‌های دوخت مورد استفاده قرار می‌گیرند بنابراین نوفه قابل توجهی را در فضاهای مجاور ایجاد می‌کنند. مصالح سقف و دیوارها گچ با روکش رنگ روغنی می‌باشد و کف فضا از سنگ آذرشیز قرمز پوشانده شده است. جهت بررسی وضعیت موجود ابتدا مطالعات میدانی از وضعیت تراز نوفه با استفاده از دستگاه B&K انجام شده و پس از وارد کردن داده‌های اولیه در نرم‌افزار EASE و شبیه‌سازی فضای موجود در آن، شاخص‌های زمان واکنش، تراز شدت صوتی، ضریب انتشار صوتی و ضریب خطای شنیداری بررسی شده است پس از شبیه‌سازی فضایی



شکل ۱. پلان فضایی هنرستان زهرا مردانی آذر و موقعیت کارگاه‌های دوخت



شکل ۲. وضعیت موجود تراز شدت صوت در فرکانس‌های مورد مطالعه.

جدول ۱. نتایج شبیه‌سازی تراز شدت صوت و تراز نوفه زمینه در وضعیت موجود.

فرکانس	بازه تراز شدت صوت مجموعه	تراز نوفه کلاس‌ها	تراز نوفه مجاز کلاس‌ها
۵۰۰ هرتز	۷۰-۷۳ دسی‌بل	۷۰ تا ۷۱ دسی‌بل	۳۵-۴۰ دسی‌بل (Crocker, 1997)
۱۰۰۰ هرتز	۷۲-۷۶ دسی‌بل	۷۲-۷۳ دسی‌بل	۳۵-۴۰ دسی‌بل
۴۰۰۰ هرتز	۷۰-۷۵ دسی‌بل	۷۰ تا ۷۱ دسی‌بل	۳۵-۴۰ دسی‌بل
۱۰۰۰۰ هرتز	۷۳-۷۹ دسی‌بل	۷۳-۷۴ دسی‌بل	۳۵-۴۰ دسی‌بل

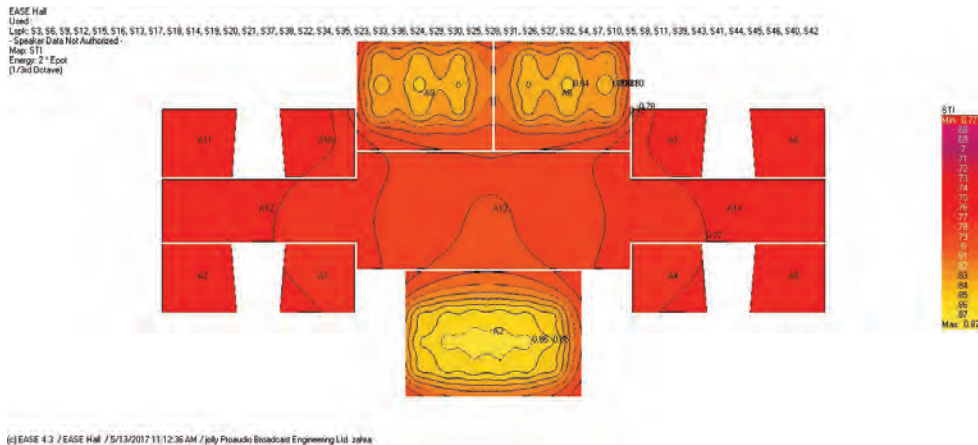
شده در نمونه موردی در بازه ۲ تا ۳ درصد می‌باشد، بنابراین ضریب خطای شنیداری در نمونه موردی در وضعیت مطلوب است (شکل ۴). وضعیت موجود و شناسایی آسیب‌های آکوستیکی با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام شده از وضعیت موجود نمونه موردی در نرم‌افزار EASE می‌توان گفت میزان StI و ALC در بازه مطلوبی قرار گرفته و در صورت رساندن وضعیت آکوستیکی مجموعه به تراز نوفه زمینه بین ۳۵ تا ۴۰ دسی‌بل در کلاس‌ها و تراز شدت صوت ۵۰ تا ۵۵ دسی‌بل در کارگاه‌های دوخت، وضعیت آکوستیکی استاندارد در فضا حاکم خواهد شد.

ضریب انتشار صوتی (StI)

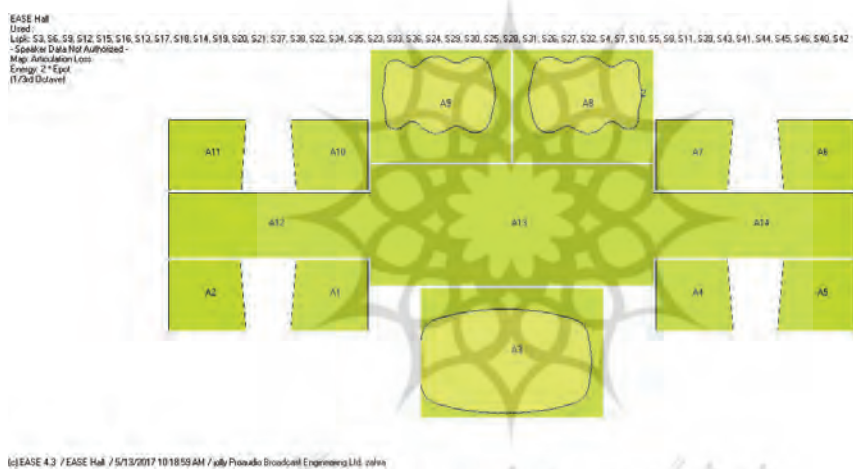
StI بیش از ۰/۴ حد استاندارد ضریب انتشار صوتی و اعداد بزرگ‌تر از ۰/۷ حد عالی این ضریب محسوب می‌گردد (Crocker, 1997). طبق شبیه‌سازی‌های انجام شده، میزان StI در مجموعه در بازه ۰/۷۷ تا ۰/۸۷ واحد متغیر است، بنابراین فضا از نظر انتشار صوت در وضعیت مطلوبی قرار گرفته‌است. (شکل ۳)

ضریب خطای شنیداری (ALC)

با توجه به اینکه بازه صفر تا ۱۷ درصد، وضعیت ایده‌آل خطای شنیداری را تعریف می‌کند (Crocker, 1997) و شاخص اندازه‌گیری



شکل ۳ ضریب انتشار صوتی در وضعیت موجود



شکل ۴ ضریب خطای شنیداری وضعیت موجود

به صورت یکپارچه و با مساحت تقریبی ۲۰ مترمربع در موقعیت‌های مختلف در کارگاه‌های دوخت شبیه‌سازی می‌شوند تا وضعیت بهینه نصب جذب‌کننده‌ها در کارگاه‌ها مشخص گردد. شبیه‌سازی در سه مرحله، با قرار گرفتن جذب‌کننده در دیوارها، سقف‌ها و کف‌ها انجام شده و محل مناسب قرارگیری آنها مشخص می‌گردد، شایان ذکر است که جذب‌کننده‌ی صفحه‌ای از نوع چوبی است و شبیه‌سازی در فرکانس میانه ۱۰۰۰ هرتز جهت انطباق دانشی با فرکانس‌های بم و زیر انجام شده‌است. بر مبنای نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های مکان‌یابی جذب‌کننده‌های صفحه‌ای مشخص گردید که سقف بهترین مکان برای نصب جذب‌کننده‌های صفحه‌ای است و همچنین گسترش تراز نوفه زمینه با دسی‌بل حداکثر در صورت استفاده از جذب‌کننده‌ها در سقف در

پیشنهاد برای کاهش نوفه زمینه
 با توجه به زیاد بودن تراز نوفه زمینه در فرکانس‌های بم و زیر و همچنین بیشتر شدن تراز شدت صوتی با افزایش فرکانس، استفاده از جذب‌کننده‌های الیافی برای جذب فرکانس‌های زیر و جذب‌کننده‌های صفحه‌ای برای جذب فرکانس‌های بم و زیر مناسب است (Antonio, 2009). در پژوهش حاضر جذب‌کننده‌های صفحه‌ای به جهت جذب هم‌زمان فرکانس‌های بم و زیر به‌عنوان جذب‌کننده قالب در فضا انتخاب‌شده و شبیه‌سازی شده‌اند.

یافتن مکان بهینه برای جذب‌کننده‌ها
 در این مرحله از پژوهش، در نرم‌افزار EASE، جذب‌کننده صفحه‌ای

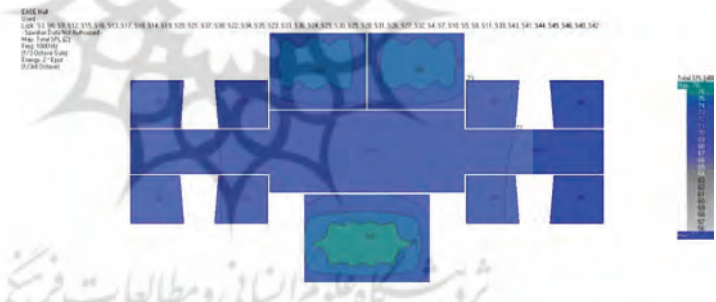
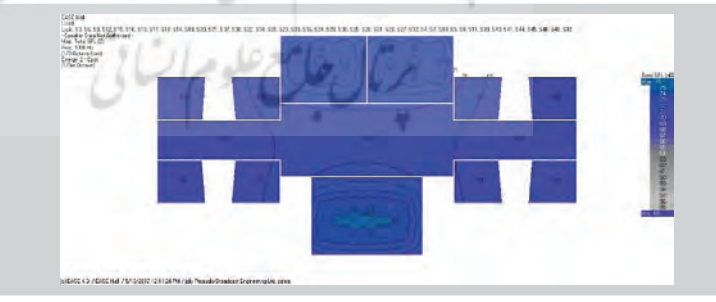
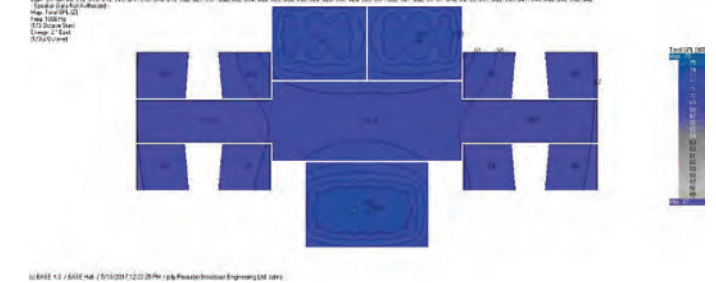
حداقل مقدار حادث می‌گردد (جدول ۲).

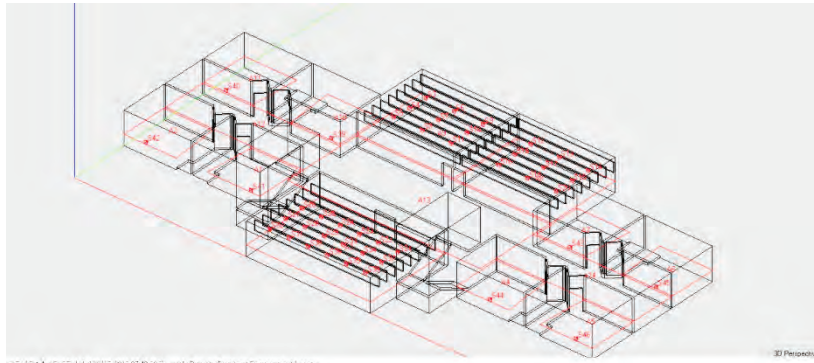
با جابجا کردن صفحه جذب‌کننده معلق، میزان جذب صوت در فضا تغییر می‌کند. به این صورت که اگر نتایج جذب صوتی حاصل از صفحات چسبیده به سقف، حالت پایه در نظر گرفته شود با افزایش فاصله صفحه از سقف بر میزان جذب در فضا افزوده شود تا در ارتفاعی مشخص و با نزدیک شدن صفحه‌ها به موقعیت میانی فضا مجدداً از میزان جذب کاسته شده و روند کاهشی ادامه می‌یابد. پس از شبیه‌سازی‌های متعدد در موقعیت‌های ارتفاعی متنوع از صفحات جذب‌کننده، این نتیجه حاصل می‌گردد که نقطه عطف تبدیل روال افزایشی جذب به کاهش به موقعیت و ارتفاع منبع پخش‌کننده صوت وابسته است. چنانچه در شکل ۶ دیده می‌شود در صورتی که فاصله صفحه تا سقف با ارتفاع صفحه یکسان باشد، ضریب جذب بیشتری در فضا حاصل خواهد شد (قسمت افقی، فاصله صفحات از سقف و قسمت عمودی تغییرات تراز شدت صوت کل مجموعه می‌باشد).

صفحات جذب‌کننده و انعکاس‌های پی‌درپی

با توجه به اینکه یکی از راهکارهای اصلی در افزایش جذب صوت وابسته به تناسبات صفحه‌ها، افزایش میزان انعکاس در فضاست بنابراین صفحات جذب‌کننده از سقف کارگاه به‌عنوان پربازده‌ترین جز آکوستیکی آن آویزان می‌شوند (شکل ۵) تا علاوه بر خاصیت جذب‌کنندگی صفحات، میزان جذب صوت به‌واسطه اصطکاک حاصل از انعکاس‌های پی‌درپی افزایش یابد. در گام اول این صفحات معلق به سقف می‌چسبند و در گام بعدی جهت ایجاد فضایی برای به تله انداختن صوت با فاصله از سقف و به حالت معلق قرار می‌گیرند. پس از انجام شبیه‌سازی در دو حالت چسبیده به سقف و معلق با فاصله از سقف نتایج زیر حاصل می‌شود (جدول ۳).

جدول ۲. نتایج بررسی محل‌های نصب جذب‌کننده‌ها

مکان	تصاویر	تراز نوفه زمینه
جذب‌کننده در کف		کل: ۷۲-۷۶ دسی‌بل کلاس‌ها: ۷۱-۷۲ دسی‌بل کارگاه‌ها: ۷۳-۷۶ دسی‌بل
جذب‌کننده در دیوارها		کل: ۶۹-۷۵ دسی‌بل کلاس‌ها: ۶۹-۷۱ دسی‌بل کارگاه‌ها: ۷۱-۷۵ دسی‌بل
جذب‌کننده در سقف		کل: ۶۷-۷۵ دسی‌بل کلاس‌ها: ۶۷-۷۰ دسی‌بل کارگاه‌ها: ۷۰ تا ۷۵ دسی‌بل



شکل ۵. وضعیت قرارگیری صفحات جذب‌کننده در سقف کارگاه‌ها.

جدول ۳. نتایج جذب‌کننده‌های عمودی سقفی.

مکان	تصویر	تراز نوفه زمينه
جذب‌کننده با ارتفاع ۰.۵ متر و چسبیده به سقف		کل: ۵۷ - ۷۴ دسی‌بل کارگاه‌ها: ۶۹-۷۴ دسی‌بل کلاس‌ها: ۵۷-۶۹ دسی‌بل
جذب‌کننده با ارتفاع ۰.۵ متر و با فاصله ۰.۱ از سقف		کل: ۵۳ - ۷۰ دسی‌بل کارگاه‌ها: ۶۵-۷۰ دسی‌بل کلاس‌ها: ۵۳-۶۵ دسی‌بل

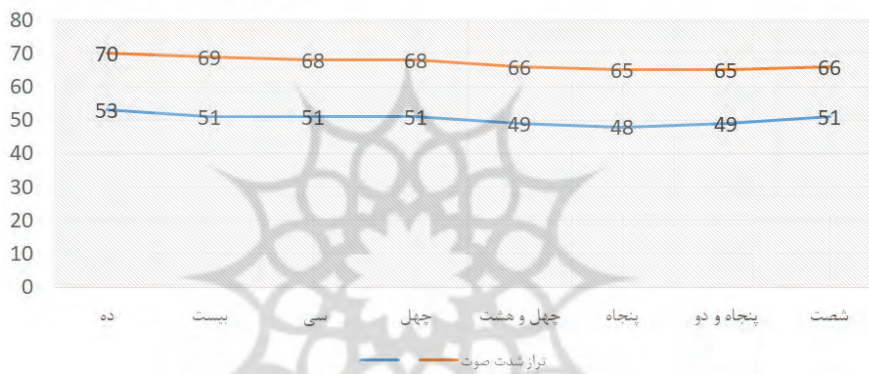
بیشترین بازدهی صفحات جذب‌کننده در موقعیت واقعی کارگاه‌های دوخت با در نظر گرفتن ارتفاع ۱۰۰ سانتیمتر برای منابع پخش‌کننده صوت و استفاده از صفحاتی با ارتفاع ۵۰ سانتیمتر و با فاصله ۵۰ سانتیمتر از سقف به وقوع می‌پیوندد (شکل ۶ و ۷).

بهینه‌وضعیت استفاده از صفحات معلق با فاصله از سقف با ارتفاع ۵۰ سانتیمتر، تراز نوفه در حدود ۴۸ تا ۶۵ دسی‌بل را ایجاد می‌کند. تراز نوفه در کارگاه‌های دوخت ۵۸ تا ۶۵ دسی‌بل و در کلاس‌های درس وابسته به میزان فاصله کلاس‌ها از کارگاه‌ها ۴۸ تا ۵۸ دسی‌بل خواهد بود (شکل ۷). با توجه به اینکه در وضعیت بهینه نصب

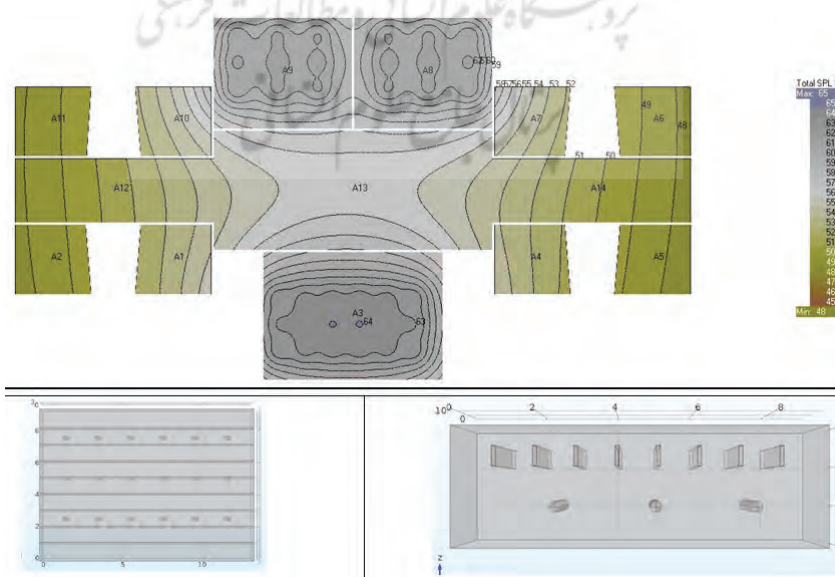
صفحات جذب‌کننده، فاصله قابل توجهی با حد استاندارد نوفه زمینه در کلاس‌ها دیده می‌شود، جابجایی افقی جزئی صفحات جذب‌کننده به صورت یک الگوی آشفته‌گی مورد شبیه‌سازی قرار گرفته و نتایج آن ارائه می‌گردد (شکل ۸).

با ایجاد جابجایی جزئی افقی در صفحات معلق از سقف، الگوی هاله‌های آکوستیکی دچار آشفته‌گی شده و تراز شدت صوت در کارگاه‌ها در بازه ۴۱ تا ۵۷ دسی‌بل و تراز نوفه کلاس‌ها به ۳۶ تا ۴۷ دسی‌بل می‌رسد (شکل ۸). در ادامه روند شبیه‌سازی برای افزایش تولید امواج ساکن در داخل فضا و میرایی انرژی صوتی هر یک از

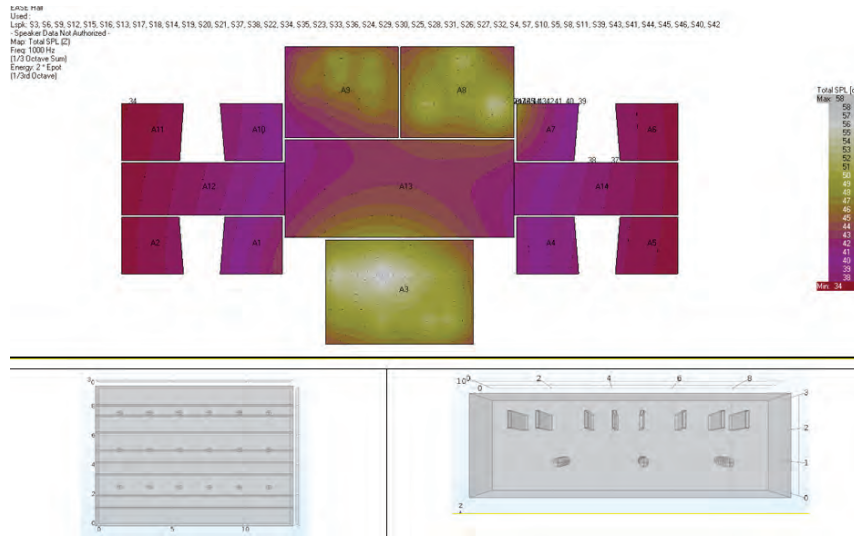
تغییرات تراز شدت صوت(دسی‌بل)



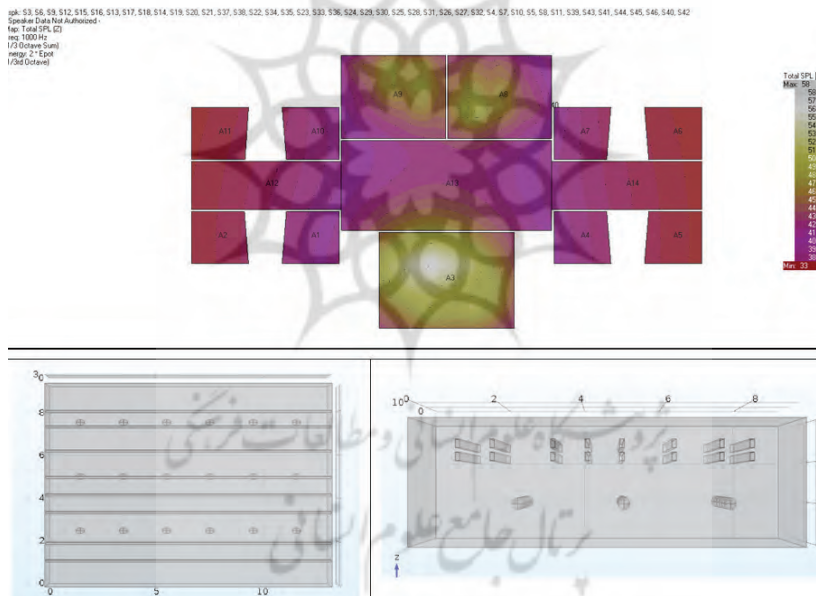
شکل ۶. تغییرات تراز شدت صوت در اثر تغییر در فاصله صفحات جذب‌کننده از سقف



شکل ۷. وضعیت بهینه جذب‌کننده از نظر ارتفاعی



شکل ۸. جابجایی جزئی افقی در صفحات جذب‌کننده و تغییرات تراز شدت صوت



شکل ۹. تقسیم صفحات جذب‌کننده به سه قسمت، حذف قسمت میانی و تغییرات تراز شدت صوت

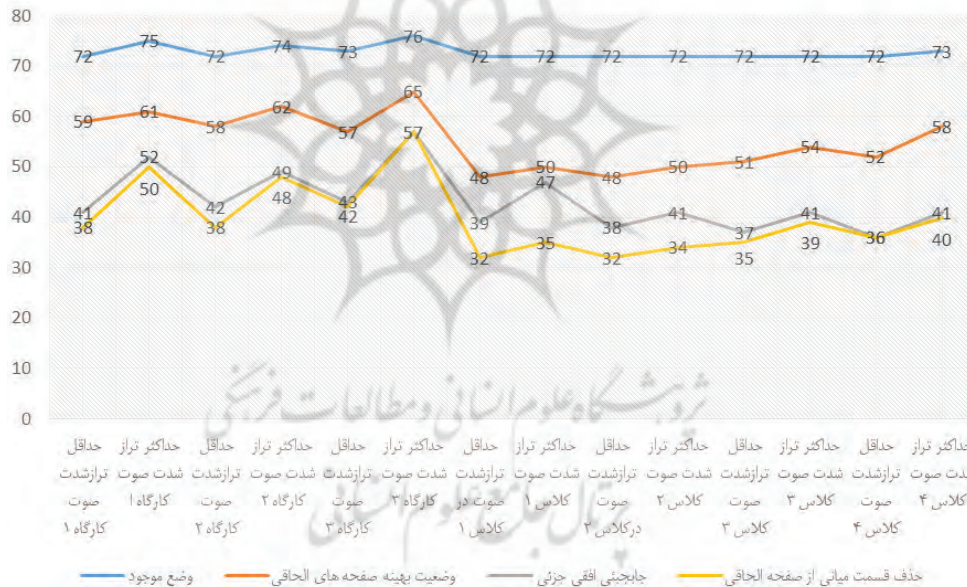
با انجام چهار مرحله تمهیدات آکوستیکی در مجموعه، وضعیت آسایش آکوستیکی حاصل از نوفه زمینه برای کلاس‌های درس و تراز شدت صوت برای کارگاه‌ها حاصل می‌گردد. بر مبنای جدول ۴ و شکل ۱۰ می‌توان گفت استفاده از موقعیت بهینه ارتفاعی صفحات جذب‌کننده و جابجایی افقی جزئی، تراز شدت صوت و نوفه زمینه به میزان قابل توجهی افت کرده و برای رساندن شاخص به حد استاندارد از تقسیم ارتفاعی جذب‌کننده می‌توان بهره برد (جدول ۴

صفحات از نظر ارتفاعی به سه قسمت تقسیم شده و قسمت میانی حذف گشته و شبیه‌سازی تکرار می‌گردد. تراز شدت صوت در کارگاه‌ها در این حالت در بازه ۳۳ تا ۵۷ دسی‌بل و تراز نوفه کلاس‌ها به ۳۲ تا ۴۰ دسی‌بل خواهد رسید. (شکل ۹) جهت مقایسه تطبیقی حالت‌های مختلف تراز شدت صوت کارگاه‌ها و تراز نوفه زمینه کلاس‌های درس (کلاس‌های ۱ تا ۴) به تفکیک در جدول ۴ ارائه می‌گردد.

جدول ۴. مقایسه تطبیقی وضعیت تراز شدت صوت و تراز نوفه زمینه با تمهیدات مختلف آکوستیکی پژوهش

کارگاه ۱	کارگاه ۲	کارگاه ۳	کلاس ۱	کلاس ۲	کلاس ۳	کلاس ۴	
۷۵ تا ۷۲	۷۴ تا ۷۲	۷۶ تا ۷۳	۷۲	۷۲	۷۲	۷۳ تا ۷۲	وضع موجود
دسی‌بل	دسی‌بل	دسی‌بل	دسی‌بل	دسی‌بل	دسی‌بل	دسی‌بل	
۶۱ تا ۵۹	۶۲ تا ۵۸	۶۵ تا ۵۷	۵۰ تا ۴۸	۵۰ تا ۴۸	۵۴ تا ۵۱	۵۸ تا ۵۲	وضعیت‌های بهینه صفحه‌های الحاقی
دسی‌بل	دسی‌بل	دسی‌بل	دسی‌بل	دسی‌بل	دسی‌بل	دسی‌بل	
۵۲ تا ۴۱	۴۹ تا ۴۲	۵۷ تا ۴۳	۴۷ تا ۳۹	۴۱ تا ۳۸	۴۱ تا ۳۷	۴۱ تا ۳۶	جابجایی افقی جزئی در صفحه‌های الحاقی با الگوی آشفستگی
دسی‌بل	دسی‌بل	دسی‌بل	دسی‌بل	دسی‌بل	دسی‌بل	دسی‌بل	
۵۰ تا ۳۸	۴۸ تا ۳۸	۵۷ تا ۴۲	۳۵ تا ۳۲	۳۴ تا ۳۲	۳۹ تا ۳۵	۴۰ تا ۳۶	حذف قسمت میانی از صفحه الحاقی
دسی‌بل	دسی‌بل	دسی‌بل	دسی‌بل	دسی‌بل	دسی‌بل	دسی‌بل	

تغییرات تراز شدت صوت



شکل ۱۰. مقایسه تطبیقی وضعیت تراز شدت صوت و تراز نوفه زمینه با تمهیدات مختلف آکوستیکی پژوهش

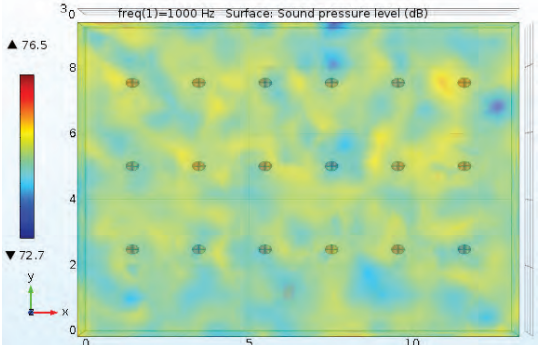
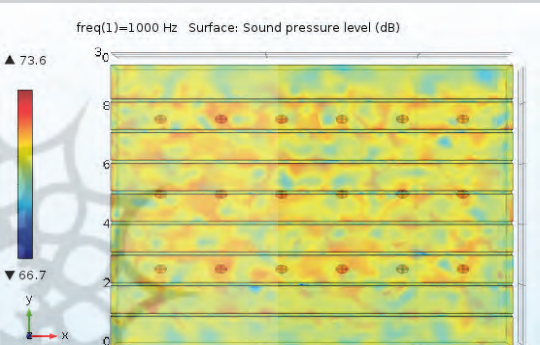
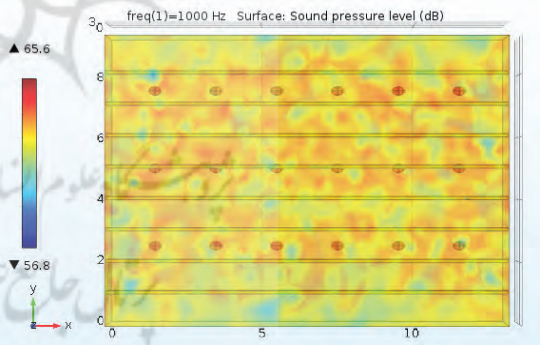
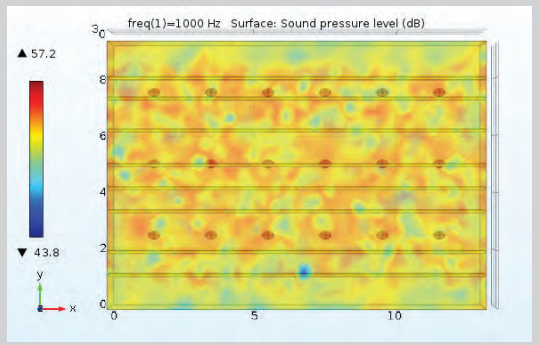
می‌توان گفت بین ارتفاع منبع صوتی، ارتفاع صفحه جذب‌کننده و فاصله آن از سقف رابطه معناداری وجود دارد. این رابطه دارای حالت افزایشی یا کاهشی مطلق نبوده و از وضعیت ثابتی تبعیت نمی‌کند. برای بهینه و بیشینه‌سازی بازدهی جذب صوت با صفحات معلق جذب‌کننده ابتدا باید برای منبع صوتی به میزان ارتفاع منبع، سایه صوتی (فضای انتشار صوت) در نظر گرفت و برای هر عامل جذب‌کننده به اندازه ارتفاع آن، فضای تله را ایجاد کرد. بنابراین بهینه حالت جذب

و شکل ۱۰). برای اعتبار سنجی نتایج حاصل از نرم‌افزار EASE4.4 شبیه‌سازی بحرانی‌ترین کارگاه در نرم‌افزار COMSOL5.2 انجام شده و مشخص می‌گردد که نتایج در دو نرم‌افزار تشابه قابل قبولی را دارند (جدول ۵).

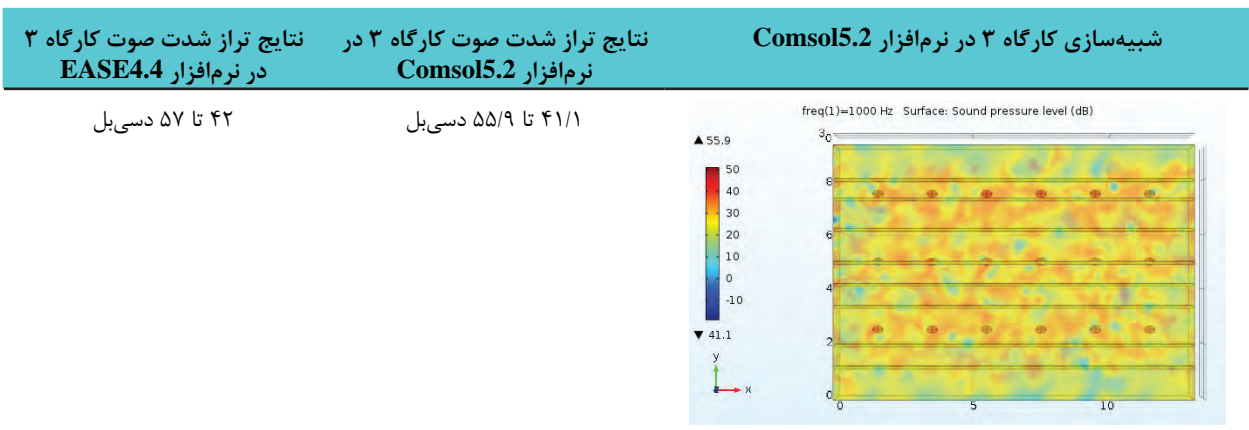
استخراج یک رابطه ساده

با توجه به شبیه‌سازی‌های متعدد انجام گرفته در پژوهش حاضر

جدول ۵. مقایسه تطبیقی نتایج شبیه‌سازی کارگاه شماره ۳ در نرم‌افزار COMSOL و EASE جهت صحت سنجی نتایج

نتایج تراز شدت صوت کارگاه ۳ در نرم‌افزار EASE4.4	نتایج تراز شدت صوت کارگاه ۳ در نرم‌افزار Comsol5.2	شبیه‌سازی کارگاه ۳ در نرم‌افزار Comsol5.2
۷۳ تا ۷۶ دسی‌بل	۷۲/۷ تا ۷۶/۵ دسی‌بل	
۶۶ تا ۷۴ دسی‌بل	۶۶/۷ تا ۷۳/۶ دسی‌بل	
۵۷ تا ۶۵ دسی‌بل	۵۶/۸ تا ۶۵/۶ دسی‌بل	
۴۳ تا ۵۷ دسی‌بل	۴۳/۸ تا ۵۷/۲ دسی‌بل	

ادامه جدول ۵. مقایسه تطبیقی نتایج شبیه‌سازی کارگاه شماره ۳ در نرم‌افزار COMSOL و EASE جهت صحت سنجی نتایج



جدول ۶. رابطه استخراجی

تعاریف	رابطه‌ها	فرمول استخراجی
N = ارتفاع تله صوتی در قسمت فوقانی صفحات	M = ارتفاع صفحه الحاقی	$M=N$
T = ارتفاع منبع	L = فاصله بین منبع تا صفحه‌های الحاقی	$2T+2M=H$

مشخصی افزایش و سپس کاهش می‌یابد که در این پژوهش آستانه افزایشی و کاهشی به صورت یک رابطه ارائه شد. پس از شبیه‌سازی‌های متعدد مشخص گردید که میزان جذب صوت در اثر صفحات عمودی جذب‌کننده معلق از سقف با ارتفاع منبع صوتی و ارتفاع خود صفحات رابطه معناداری دارد، به صورتی که، چنانچه ارتفاع کل فضا با مجموع دو برابر ارتفاع منبع و دو برابر ارتفاع صفحات جذب‌کننده برابر باشد بیشترین میزان جذب در فضا رخ خواهد داد. جهت دستیابی به حد استاندارد شاخص آکوستیکی تراز شدت صوت و تراز نوفه زمینه می‌توان از جابجایی افقی جزئی در صفحات معلق از سقف و تقسیم ارتفاعی و مجوف سازی صفحات استفاده کرد.

وابسته به ارتفاع صفحه جذب‌کننده در صورتی است که مجموع دو برابر ارتفاع منبع صوتی و دو برابر ارتفاع جذب‌کننده برابر با ارتفاع فضا باشد (جدول ۶).

۱- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر تأثیر ارتفاع جذب‌کننده‌ها و محل و نحوه نصب آن‌ها در بازدهی جذب انرژی صوتی بررسی شد و پس از مطالعات میدانی وضع موجود و شبیه‌سازی آن در نرم‌افزار EASE مشکلات آکوستیکی فضا که صرفاً ناشی از افزایش سطح تراز نوفه در فضا بود، استخراج گردید. با بررسی محل و نحوه نصب جذب‌کننده‌ها، موقعیت‌های مکانی مناسب برای بیشینه‌سازی میزان جذب در فضا نسبت به ارتفاع صفحات جذب‌کننده استخراج شده و مشخص گردید که علاوه بر نوع جذب‌کننده کاربردی، بهترین محل برای نصب انواع جذب‌کننده‌ها سقف می‌باشد. نصب عمودی جذب‌کننده‌ها در سقف دارای بازده بیشتری نسبت به نصب افقی است و بازدهی صفحات عمودی جذب‌کننده در سقف با گرفتن فاصله از سقف در بازه‌ی

۱- پی‌نوشت‌ها

- 1 Articulation loss of consonants
- 2 Sound transmission index
- 3 Reverberation Time
- 4 Sound Pressure Level

فهرست مراجع

12. Chourmouziadou, K., & Kang, J. (2008). Acoustic evolution of ancient Greek and Roman theatres. *Applied Acoustics*, 69 (6), 514-529.
13. Cox, T. J. & Antonio, P.D. (2009). *Acoustic Absorber and Diffuser, Theory, Design & Application*. Teylor and francis press.
14. Cook, J. R., & Bank, F. V. (1979). *Acoustic absorber and method for absorbing sound*. U.S. Patent No. 4, 152, 474. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
15. Crocker, M. J. (1997). *Encyclopedia of acoustics*. John Wiley.
16. Dragonetti, R. Opdam, R. Napolitano, M. Romano, R & Vorlander, M.(2016). VorlanderEffects of the wave front on the acoustic reflection coefficient.*Acta Acustica United with Acoustica*, 102 (4), 675-687.
17. Fahy, F. (2003). *Sound Absorption and Sound Absorbers*. In F. Fahy (Ed.), *Foundations of Engineering Acoustics* (pp. 140-180). London: Academic Press.
18. Falsafi, I., & Ohadi, A. (2017). Design guide of single layer micro perforated panel absorber with uniform air gap. *Applied Acoustics*, 126, 48-57.
19. Fuchs, H. V., & Lamprecht, J. (2013). Covered broadband absorbers improving functional acoustics in communication rooms. *Applied Acoustics*, 74(1), 18-27.
20. Marbjerg, G., Brunskog, J., & Jeong, C.H. (2018). The difficulties of simulating the acoustics of an empty rectangular room with an absorbing ceiling. *Applied Acoustics*, 141, 35-45.
21. Pfretzschner, J., Cobo, P., Simón, F., Cuesta, M., & Fernández, A. (2006). Microperforated insertion units: An alternative strategy to design microperforated panels. *Applied Acoustics*, 67 (1), 62-73.
1. اگان، دیوید. (۱۳۹۶). آکوستیک در معماری. (مسعود حسینی، مترجم). تهران: انتشارات یزدا.
۲. سفندان، زهرا؛ نصراللهی، فرشاد؛ و غفاری، عباس. (۱۳۹۶). بهینه سازی هندسه فضاهای معماری برای دستیابی به عملکرد حرارتی با استفاده از اثر ترموآکوستیک. هویت شهر، ۱۱(۳۱)، ۸۲-۷۳.
۳. سعادت، ناھید. (۱۳۹۱). بررسی اثر شکل های مختلف گوشه بندی در مکان های مذهبی بر وضوح گفتار. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده صدا و سیمای جمهوری اسلامی ایران، تهران.
۴. غفاری، عباس. (۱۳۹۲). بهبود شرایط آکوستیک در مساجد با نگرش تحلیلی وضوح گفتار در مساجد دوره قاجار تبریز با رویکرد تاثیر آجر و تزئینات آجری بر زمان واخنش. پایان نامه دکتری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران.
۵. فیضی، محسن؛ حسینی، سیدباقر. مجیدی؛ وحید و احمدی، جواد. (۱۳۹۶). ارزیابی مولفه های موثر بر ارتقا کیفیت فضای معماری در کتابخانه های عمومی. هویت شهر، ۱۱(۳۱)، ۵۴-۴۳.
۶. قیابکلو، زهرا. (۱۳۹۳). مبانی فیزیک ساختمان ۱، آکوستیک. تهران: انتشارات جهاد دانشگاهی.
۷. کینز، لارنس بی. و فرای، آستین آر. (۱۳۸۲). مبانی آکوستیک. (ضیالالدین اسماعیل بیگی و مهدی برکشلی، مترجمان). تهران: انتشارات امیرکبیر.
۸. گل محمدی، رضا. (۱۳۸۷). مهندسی صدا و ارتعاش. همدان: انتشارات دانشجوی همدان.
۹. هاشمی، ابوالفضل؛ و داداش زاده، زینب. (۱۳۸۹). آکوستیک و کنترل صدا. تهران: انتشارات یزدا.
10. Cho, W.-H., Ih, J.-G., Katsumata, T., & Toi, T. (2018). Best practice for positioning sound absorbers at room surface. *Applied Acoustics*, 129, 306-315.
11. Cho, W.-H., Ih, J.-G., & Toi, T. (2015). Positioning actuators in efficient locations for rendering the desired sound field using inverse approach. *Journal of Sound and Vibration*, 358, 1-19.

Optimization of Acoustical Function of Sound Absorbers with Emphasis on Geometry and Height of Spaces (Case Study: Zahra Mardani Azar Collage)

*Zahra Sokhandan Sorkhabi**, Ph.D. Candidate, Architecture Department, Art University of Isfahan, Isfahan, Iran.

Farshad Nasrollahi, Ph.D. Assistant Professor, Architecture Department, Art University of Isfahan, Isfahan, Iran.

Abbas Ghaffari, Ph.D. Assistant Professor, Architecture Department, Islamic Art university of Tabriz, Tabriz, Iran.

Abstract

In this paper, efficiency of Absorber Panels improved with the geometry of spaces and the most optimal mode of them is identified. The studied variables are position and location of installing the Absorber Panels, Geometry and Height of them, the space around the Absorber panels with an emphasis on the upper part of panels, position of Sound sources and their heights and the geometry and height of a place. The research has been done in experimental method through the observation and measurement about the Acoustical Statue of Zahra Mardani Azar Collage in Tabriz and Simulation method with EASE software. The primitive result of measurement and Simulation compared and analyzed. In the process of researching, simulating repeated over and over again to recognize the best location of Absorber panels in whole spaces of collage. The purpose is decreasing of noise and sound intensity level in Classrooms and maintaining the high intensity level of workshops with them. The problem in Zahra Mardani Azar collage in Tabriz is the high noise level around the workshops that make Acoustical pollution in the eight classrooms which are neighborhood with workshops. Because of the high cost of Absorbers panels, it is so important to use them in most the suitable place and optimal mount, so 20 square meters of Wood Absorber panels were chosen and located in different positions in one of the workshops and found out the best place for installing them. In the following absorber panel divided and installed in different position of optimal place. The most important challenge in this study is the possibility of generalization of results in all of schools with a similar plan, conditions and problems. So in the process of research, the relation between variables Studied, analyzed and documented. The purpose was finding a formula for achieving the best sound absorbing in all spaces of an educational place with different condition. Acoustical factors like Sti (sound transmission index), ALC (Alcons), SPL (Sound pressure level) and noise analyzed in the case study, so SPL and noise level have been introduced as problems. Limitation in changing the geometries of schools make solving the Acoustical pollution hard in common ways, so finding a way to control the noise level in school with low cost is the challenge in this research.

As a result, ceilings and Upper condition are the best location for installing the Absorber panels and floors are worst. Absorbers need some free spaces on their heads that is the proper places for sound reflections and trapping the sound there. Height of sound source is a very important factor to achieve the best efficiency in absorbing inside the places. Free spaces on sound sources are as important as free spaces on the absorber panels. In process of simulation, it has been found that height of free spaces and sound sources should be equal and height of absorbers and free space on it too. If double height of absorber and sound source make height of space, the best absorbing in space will happen.

Keywords: Membrane Absorbers, Proportions, noise level, SPL, Height of space, EASE4.4

* Corresponding Author: Email: zahra.sokhandan@gmail.com