

مقایسه روش‌های نسبت موج ایستا و تابع انتقال در تعیین ضریب جذب صوتی مصالح

رستم گل محمدی^۱، محمد علیایی^{۲*}، محسن علی‌آبادی^۳، رضا شهیدی^۴، مصطفی عروقی موفق^۳

^۱ استاد، قطب علمی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت و مرکز تحقیقات علوم بهداشتی، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران

^۲ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران

^۳ استادیار، قطب علمی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، مرکز تحقیقات بهداشت و ایمنی شغلی، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران

^۴ کارشناس ارشد، شرکت مهندسی پویا آوا سینا، مرکز رشد فناوری سلامت، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران

* نویسنده مسئول: محمد علیایی، گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران.

ایمیل: m.oliaei@edu.umsha.ac.ir

چکیده

سابقه و هدف: تعیین ضریب جذب صوتی برای انتخاب مصالح جاذب صدا یکی از نیازهای اساسی در زمینه کنترل آلودگی صدای داخل بناها می‌باشد. در این ارتباط، مطالعه حاضر با هدف مقایسه نتایج اندازه‌گیری ضریب جذب صوتی مصالح متداول مورد استفاده در راستای کنترل صدا با دو روش نسبت موج ایستا (SWR: Standing Wave Ratio) و تابع انتقال (FTM: Transfer Function Method) و تدوین مدل ارتباط نتایج این دو روش انجام شد.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۹/۲۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۱۲/۱۹

تمامی حقوق نشر برای دانشگاه علوم پزشکی همدان محفوظ است.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش ۴۶ نمونه از مصالح آکوستیک مورد آزمایش قرار گرفت. جهت اندازه‌گیری ضریب جذب مصالح از لوله امیدانس ساخته‌شده به روش نسبت موج ایستا مطابق با استاندارد ISO 10534-1 مدل ۹۴۱۰ شرکت آوا سینا و لوله امیدانس به روش تابع انتقال مدل SW 260 شرکت BSWA مطابق با استاندارد ISO 10534-2 در محدوده فرکانسی ۱۲۵ تا ۲۰۰۰ هرتز استفاده شد.

یافته‌ها: نتایج به‌دست‌آمده از مدل رگرسیون نشان دادند که بیشترین همبستگی بین ضرایب جذب اندازه‌گیری‌شده با استفاده از دو روش در فرکانس ۵۰۰ هرتز وجود دارد ($r^2=0/936$ ، $t=0/968$). کمترین ضریب همبستگی نیز در فرکانس ۱۲۵ هرتز به‌دست آمد ($r^2=0/136$ ، $t=0/368$). شایان ذکر است که ضریب تبیین بین نتایج NRC (Noise Reduction Coefficient) دو روش معادل ۰/۸۲۹ به‌دست آمد.

نتیجه‌گیری: مقایسه روش نسبت موج ایستا با روش پایه تابع انتقال و اعتبارسنجی آن نشان داد که دو روش در فرکانس‌های ۲۵۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ هرتز همخوانی دارند و با استفاده از مدل رگرسیونی تصحیح نتایج می‌توان با اطمینان از روش نسبت موج ایستا برای تعیین ضریب جذب مصالح آکوستیکی با صحت قابل قبول استفاده نمود.

واژگان کلیدی: تابع انتقال؛ ضریب جذب صوت؛ لوله امیدانس؛ مصالح آکوستیکی؛ نسبت موج ایستا

مقدمه

مصالح جاذب صوت شامل: تایل و پانل آکوستیک است که می‌تواند در صنعت، محیط‌های اداری و یا مسکونی به کار رود. هنگامی که امواج صدا به سطوح داخل بنا برخورد می‌کنند، سه فرایند بازتابش از روی سطح، جذب صدا توسط سطوح و انتقال صدا از دیوارها، سقف و کف اتفاق می‌افتد. ضریب جذب صوتی مصالح متفاوت است. در دانش مهندسی صدا، اندازه‌گیری و تعیین ضریب جذب صوتی مصالح برای کاربرد آن‌ها بسیار مهم می‌باشد. ضریب جذب صوتی (α) عبارت است از: مقدار انرژی جذب‌شده تقسیم بر انرژی برخوردی به سطح مصالح که با توجه به ویژگی‌های سطوح و

صدا در داخل بناهای شهری و صنعتی به‌عنوان یکی از موارد مهم ناراحتی و شکایات افراد محسوب می‌شود. آلودگی صدا در اماکن شغلی و صنعتی یکی از فراگیرترین عوامل زیان‌آور شناخته شده است که می‌تواند موجب عوارض روانی-عصبی و فیزیولوژیکی و نیز کاهش بهره‌وری گردد [۱،۲]. یکی از دلایل مهم آلودگی صدای داخل بناها، تشدید ناشی از بازتابش مکرر صدا از سطوح داخلی آن‌ها است. استفاده از روش جذب صوتی یکی از مؤثرترین راه‌حل‌های علمی برای کنترل بازتابش صوتی می‌باشد. یکی از روش‌های متداول کنترل صدای ناشی از بازتابش سطوح، به‌کارگیری

جنس مصالح می‌تواند بین صفر تا یک باشد [۱]. هرچه سطوح مصالح دارای چگالی بالاتر و سطح صافتر و یکدست‌تری باشند، بازتابش انرژی صوتی از آن‌ها بالاتر بوده و سبب تشدید صدا در داخل بناها می‌گردد. در مقابل مصالح با چگالی پایین و تخلخل زیاد، جاذب‌های بهتری برای صوت هستند. در این ارتباط باید گفت که هرچه ضریب جذب صوتی مصالح سطوح داخلی بنا بالاتر باشد، تشدید صدای ناشی از سطوح کمتر خواهد بود.

از دیدگاه مهندسی صدا، ضریب جذب مهم‌ترین ویژگی یک ماده جاذب صوت است که در تعیین ویژگی‌های آکوستیکی مصالحی که در کنترل صدا به کار می‌روند اهمیت دارد [۲،۳]. مقدار ضریب جذب صوتی مصالح گوناگون در فرکانس‌های مختلف، متفاوت است؛ به همین دلیل ضریب کاهش صدا (NRC) محاسبه می‌شود. NRC میانگین حسابی مقدار ضریب جذب صوتی مصالح در فرکانس‌های ۲۵۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ هرتز است [۱].

اطلاع از ویژگی‌های آکوستیکی مصالح برای استفاده و کاربرد آن‌ها ضروری می‌باشد. امروزه تعداد زیادی مصالح آکوستیکی برای کاربرد در حوزه کنترل صدای پژوهش‌های مختلف معرفی می‌شوند. ویژگی‌های آکوستیکی مصالح نقش مهمی در انتخاب و کاربرد مناسب آن‌ها برای کاهش صدای داخل بناها دارد [۱،۴]. روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری و مطالعه ویژگی‌های آکوستیکی مصالح ارائه و استانداردسازی شده‌اند که در منابع معتبر در دسترس می‌باشند. در این روش‌ها ویژگی‌های آکوستیکی مصالح مانند امپدانس آکوستیکی، ضریب جذب و ثابت انتشار سنجش می‌شوند [۳،۴]. روش‌های متداول برای تعیین ویژگی‌های آکوستیکی مصالح در روش انجام، صحت، دقت و سرعت اندازه‌گیری با یکدیگر تفاوت دارند [۴]. معمولاً برای اندازه‌گیری ضریب جذب صوتی مصالح از روش‌های اتاق بازآوا، بازتابشی و لوله امپدانس استفاده می‌شود [۱،۳-۵].

اتاق بازآوا که در ISO 354 شرح داده شده است، قدیمی‌ترین روشی می‌باشد که امروزه نیز استفاده می‌گردد [۶]. اتاق بازآوا یک روش دقیق به‌منظور برآورد جذب آکوستیکی برای همه زوایای برخوردی به سطح مورد آزمایش است؛ اما در روش لوله امپدانس، تنها زاویه برخورد نرمال مد نظر قرار می‌گیرد [۱،۳]. اتاق بازآوا نسبت به لوله امپدانس نیازمند نمونه‌های بزرگ‌تری از مصالح می‌باشد. همچنین، اجرای آن طولانی و دارای هزینه بالا بوده و نیازمند امکانات آزمایشگاهی خاصی است که همیشه در دسترس نمی‌باشند. باید عنوان نمود که این روش نیازمند نصب نمونه روی سطح دیوار یک اتاق آزمایش به حجم حداقل ۲۰۰ متر مکعب و نمونه‌ای به مساحت حداقل ۱۰ تا ۱۲ متر مربع است [۱،۳،۷].

در روش بازتابشی، نمونه‌ها در معرض امواج برخوردی در میدان آزاد در یک زاویه خاص قرار می‌گیرند [۳]. هرچند این روش یک روش رئالیستی است که می‌تواند در شرایط واقعی و همراه با صدای زمینه به کار رود؛ اما از آنجایی که ساینز نمونه در این روش بزرگ است، برای اهداف تحقیقاتی مناسب نمی‌باشد؛

از این رو، پژوهشگران روش لوله امپدانس را ترجیح می‌دهند [۱]. امروزه برای اندازه‌گیری ضریب جذب صوتی مصالح از دستگاه لوله امپدانس مبتنی بر استاندارد ISO 10534 بهره گرفته می‌شود. در این روش از یک لوله افقی بسته که در یک سمت آن بلندگو و در سمت دیگر آن نمونه مورد آزمایش قرار داده می‌شود، استفاده می‌گردد. امواج تولیدی از بلندگو در لوله به سطح نمونه برخورد کرده و بازتابش می‌شوند. از برهم‌نهی موج سینوسی و تخت برخوردی با موج منعکس‌شده از نمونه در لوله، یک موج ایستا ایجاد می‌شود که دارای نقاط گره و شکم فشار می‌باشد. با اندازه‌گیری فشار یا شدت صوت در این دو نقطه و انجام محاسبات مربوط به آن می‌توان ضریب جذب صوتی نمونه را که ضریب برخورد جذب نرمال (NAC: Normal Incidence Sound Absorption Coefficient) نامیده می‌شود، تعیین نمود [۸،۹]. روش لوله امپدانس نسبت به روش اتاق بازآوایی، سریع‌تر و آسان‌تر بوده و برای بررسی پارامتریک جذب صوتی مناسب‌تر است؛ زیرا تنها به نمونه‌های کوچکی از مصالح برای آزمایش نیاز دارد [۹]. دو روش برای اندازه‌گیری ضریب جذب برخورد نرمال به وسیله لوله امپدانس عبارت هستند از: روش نسبت موج ایستا (مستند به استاندارد ISO 10534-1) و روش تابع انتقال (مستند به استاندارد ISO 10534-2 و ASTM 1050) [۹-۱۱]. هرچند روش‌های دیگری برای محاسبه ضریب جذب با استفاده از لوله وجود دارد [۷]؛ اما روش نسبت موج ایستا قدیمی‌ترین و ساده‌ترین روش برای اندازه‌گیری ضریب جذب برخورد نرمال می‌باشد. در این روش برای اندازه‌گیری ضریب جذب در هر فرکانس نیاز به حرکت دادن میکروفون است؛ به همین دلیل کمی زمان‌بر بوده و وابسته به اپراتور می‌باشد [۱۳].

روش تابع انتقال براساس محاسبات تابع انتقال با دو میکروفون در سال ۱۹۸۰ معرفی گردید. امروزه این روش به دلیل دقت و سرعت اندازه‌گیری و حداقل وابستگی به اپراتور، مقبولیت زیادی در تعیین ضریب جذب صوتی مصالح دارد. در این روش که مبتنی بر پردازشگری دقیق است، ضریب جذب برخورد نرمال مصالح به وسیله اندازه‌گیری تابع انتقال بین دو یا سه میکروفون ثابت تعیین می‌شود. این روش نیازمند آنالیزور دوگانه یا سه‌گانه برای اندازه‌گیری قدرت چگالی طیفی S_{11} و S_{22} و چگالی طیف عبوری S_{12} در محل میکروفون‌ها است [۴]. هرچند استفاده از روش تابع انتقال در مقایسه با روش نسبت موج ایستا سریع‌تر و دقیق‌تر است؛ اما گران بودن تجهیزات این سیستم همواره به‌عنوان یک مانع بزرگ در به‌کارگیری آن مطرح می‌باشد [۴،۱۰،۱۳-۱۵]. با توجه به اهمیت اطلاع از ضریب جذب صوتی در انتخاب مصالح جاذب صدا برای اهداف کنترل صدای داخل بناهای شهری و صنعتی و همچنین با توجه به اینکه مصالح جاذب صدا در ایران دارای شناسنامه آکوستیکی قابل اعتمادی نیستند و دستگاه‌ها و تجهیزات مورد نیاز برای اندازه‌گیری ضریب جذب صوتی مصالح، وارداتی و گران‌قیمت می‌باشند [۸]؛ مطالعه حاضر با هدف

مربوطه، ضریب جذب صوتی نمونه تعیین می‌گردید. محاسبات تعیین ضریب جذب صدا، قطر و طول لوله و تعیین محدوده فرکانسی مطابق با استاندارد ISO 10534-1 انجام می‌شود [۹]. در این روش نسبت موج ایستا (S) و فاکتور بازتابی فشار صوت (r) از روابط ۱ و ۳ به دست می‌آید.

$$S = \frac{|P_{\max}|}{|P_{\min}|} \quad (1)$$

$$S = \frac{1 + |r|}{1 - |r|} \quad (2)$$

$$|r| = \frac{S - 1}{S + 1} \quad (3)$$

در رابطه فوق، P_{\max} حداکثر فشار صوت و P_{\min} حداقل فشار صوت اندازه‌گیری شده برای هر نمونه می‌باشد.

در این روش ضریب جذب صوتی نمونه در هر فرکانس با استفاده از رابطه زیر تعیین می‌گردد:

$$\alpha = 1 - |r|^2 \quad (4)$$

لازم به ذکر است که محدوده فرکانسی معتبر در لوله امیدانس، تابع طول و قطر داخلی آن می‌باشد [۸] که در این پژوهش محدوده ۱۲۵ تا ۲۰۰۰ هرتز مورد نظر بود. از آنجایی که در عمل، تراز فشار صوت در لوله امیدانس توسط ترازسنج صوت در مقیاس لگاریتمی (dB: Decibel) برای هر فرکانس اندازه‌گیری می‌شود، ابتدا باید اختلاف بین تراز فشار حداکثر و تراز فشار حداقل صوت ($L\Delta$) را محاسبه نمود. در ادامه، نسبت موج ایستا (S) و ضریب جذب صدای نمونه (α) از روابط ۵ و ۶ به دست می‌آید.

$$S = 10^{\frac{\Delta L}{20}} \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{4 \times 10^{\frac{\Delta L}{20}}}{\left(10^{\frac{\Delta L}{20}} + 1\right)^2} \quad (6)$$

مقایسه نتایج اندازه‌گیری مصالح متداول مورد استفاده در کنترل صدا با دو روش نسبت موج ایستا و تابع انتقالی و تدوین مدل ارتباط نتایج این دو روش انجام شد. از اهداف دیگر این مطالعه ارزیابی عملکرد لوله امیدانس ساخت داخل از نظر اعتبار و دقت جهت اندازه‌گیری ضریب جذب صوتی مصالح آکوستیکی بود.

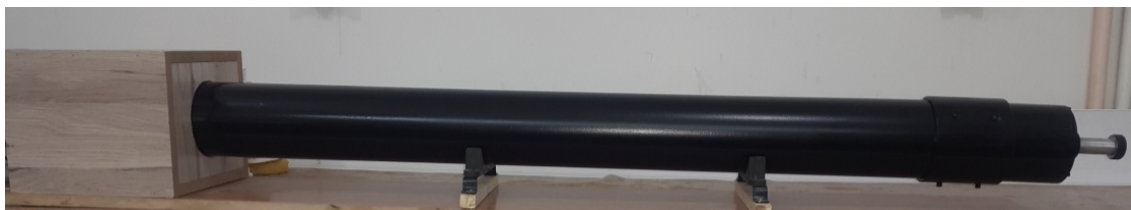
مواد و روش‌ها

در این پژوهش توصیفی-مقطعی ۴۶ نمونه از مصالح آکوستیکی مورد آزمایش قرار گرفتند؛ از جمله انواع تایل‌های گچی، مقوایی و ترکیبی، فوم‌های مصنوعی مانند پلی‌یورتان، پلی‌اتیلن، پلی‌استایرن، فوم الاستومری، الیاف آلی و پشم‌های معدنی مانند پشم شیشه و پشم سنگ.

برای اندازه‌گیری ضریب جذب مصالح از لوله امیدانس مدل ۹۴۱۰ شرکت ایرانی آوا سینا ساخته‌شده به روش نسبت موج ایستا مطابق با استاندارد ISO 10534-1 (شکل ۱) و لوله امیدانس مدل SW 260 شرکت BSWA ساخته‌شده به روش تابع انتقال مطابق با استاندارد ISO 10534-2 (شکل ۲) مستقر در دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی همدان در محدوده فرکانسی ۱۲۵ تا ۲۰۰۰ هرتز استفاده شد.

روش نسبت موج ایستا

در روش نسبت موج ایستا، دستگاه لوله امیدانس مدل ۹۴۱۰ شرکت آوا سینا (شکل ۱) که دارای قطر لوله ۱۰ سانتی‌متر با طول ۱۰۷ سانتی‌متر و توان صوتی ۲۰ وات است و مطابق با استاندارد ISO 10534-1 دارای یک میکروفون متحرک برای اندازه‌گیری حداقل و حداکثر تراز فشار صوت می‌باشد، استفاده گردید. داده‌های میکروفون کریستالی روی یک ترازسنج صوت کالیبره‌شده مدل SPL 8810 قرائت گردید. در این روش کمیت مورد نظر فشار صوت حداکثر و حداقل موج صوتی مربوط به تابش و بازتابش است و با اندازه‌گیری تراز فشار صوت و انجام محاسبات



شکل ۱: لوله امیدانس نسبت موج ایستا مدل 9410 شرکت آوا سینا



شکل ۲: لوله امیدانس مدل SW260 شرکت BSWA به همراه برخی از نمونه‌های مورد مطالعه

روش تابع انتقال

باید خاطر نشان ساخت که محدوده فرکانسی در روش تابع انتقال به قطر لوله و فاصله بین موقعیت‌های میکروفون بستگی دارد [۱۰، ۱۱، ۱۶].

$$\alpha = 1 - |r|^2 = 1 - r_1^2 - r_2^2 \quad (۸)$$

α : ضریب جذب صوتی

r : فاکتور بازتابش صوتی

در پژوهش حاضر قبل از انجام آزمایش مصالح، هر دو دستگاه لوله امپدانس با روش تعیین شده توسط سازنده کالیبراسیون گردیدند. کالیبراسیون دستگاه آوا سینا توسط کالیبراتور مدل AWA 6221 B و برای دستگاه BSWA با استفاده از آزمایش نمونه فوم ارائه شده توسط سازنده صورت گرفت. اندازه‌گیری ضریب جذب صوتی مصالح در هر دو روش در هوایی با دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد، رطوبت نسبی ۴۰ درصد و چگالی ۱/۲ کیلوگرم بر متر مکعب صورت گرفت که در این شرایط سرعت صوت در هوا ۳۴۲ متر در ثانیه و امپدانس صوتی ۴۱۳ پاسکال ثانیه بر متر محاسبه گردید. در نهایت، داده‌های نتایج طرح با استفاده از نرم‌افزار SPSS 16 تحلیل شدند.

یافته‌ها

نتایج اندازه‌گیری ضریب جذب صوتی برای ۴۶ نمونه با دو روش نسبت موج ایستا و روش تابع انتقال در جداول ۱ تا ۳ ارائه شده است. لازم به ذکر می‌باشد که در اندازه‌گیری ضریب جذب صوتی مصالح در هر دو روش، نمونه‌ها کاملاً مماس با سطح سخت فلزی نگهدارنده و بدون فاصله هوا قرار داشتند.

در پژوهش حاضر آزمایشات روش تابع انتقال با استفاده از سیستم لوله امپدانس مدل SW 260 شرکت BSWA (شکل ۲) که دارای قطر داخلی ۶ سانتی‌متر و توان صوتی ۲۰ وات بوده و مطابق با استاندارد ISO 10534-2 می‌باشد، انجام شد. این دستگاه از طریق تولید موج تخت در لوله با استفاده از بلندگو و اندازه‌گیری فشار صوت با استفاده از دو میکروفون ثابت در جداره دستگاه و در نزدیکی محل نصب نمونه، ضریب جذب صوت مصالح را در هر فرکانس تعیین می‌کند. پس از نصب نمونه در محل نگهدارنده، سیستم با کمک نرم‌افزار مراحل آزمون را مطابق با راهنمای دستگاه انجام می‌دهد. در این روش تابع انتقال آکوستیکی سیگنال‌های دو میکروفون تعیین شده توسط پردازشگر دریافت می‌گردد و سپس برای محاسبه فاکتور بازتابشی و ضریب جذب صوتی، نسبت امپدانس نمونه‌های مورد آزمایش استفاده می‌شود. فاکتور نرمال بازتابشی از طریق رابطه ۷ محاسبه می‌گردد [۱۰، ۱۱، ۱۶].

$$r = |r| e^{i\phi_r} = \frac{H_{12} - H_L}{H_R - H_{12}} e^{2jk_0x_1} \quad (۷)$$

در رابطه فوق، X_1 فاصله بین نمونه و دورترین میکروفون، θ_1 زاویه فازی فاکتور بازتابشی و H_{12} تابع انتقالی از میکروفون یک تا دو است که از طریق نسبت پیچیده $P_2/P_1 = S_{12}/S_{21}$ تعریف می‌شود. H_L و H_R نیز بخش واقعی و تصویر بخش H_{12} می‌باشند. در ادامه، با استفاده از نرم‌افزار Va-Lab 2 Imp-A ضریب جذب صوتی نمونه مورد آزمایش مطابق با رابطه ۸ محاسبه می‌شود.

جدول ۱: نتایج تعیین ضریب جذب صوتی انواع فوم موجود در بازار به روش تابع انتقال (TFM) و نسبت موج ایستا (SWR)

روش آزمایش	فرکانس مرکزی (هرتز)					ضخامت (سانتی‌متر)	دانسیته (کیلوگرم بر متر مکعب)	نام مصالح	ردیف
	۱۲۵	۲۵۰	۵۰۰	۱۰۰۰	۲۰۰۰				
TFM	۰/۰۳	۰/۰۷	۰/۰۲	۰/۲۷	۰/۶۴	۱/۵	۱۲	فوم پلی‌یورتان	۱
SWR	۰/۳۰	۰/۴۹	۰/۳۳	۰/۶۸	۰/۹۹				
TFM	۰/۰۹	۰/۱۴	۰/۳۷	۰/۵۶	۰/۹	۲/۵	۱۲	فوم پلی‌یورتان	۲
SWR	۰/۵۵	۰/۶۷	۰/۴۶	۰/۸۹	۰/۶۶				
TFM	۰/۰۲	۰/۳۳	۰/۳۹	۰/۸۸	۰/۶۶	۳/۵	۱۲	فوم پلی‌یورتان	۳
SWR	۰/۷۳	۰/۸۰	۰/۵۶	۰/۸۹	۰/۶۳				
TFM	۰/۰۱	۰/۳۳	۰/۴۶	۰/۹۲	۰/۷۳	۴/۲	۱۲	فوم پلی‌یورتان	۴
SWR	۰/۷۴	۰/۹۰	۰/۴۹	۰/۷۹	۰/۷۰				
TFM	۰/۰۵	۰/۰۷	۰/۱۴	۰/۲۱	۰/۸۳	۱/۵	۱۷	فوم پلی‌یورتان	۵
SWR	۰/۲۲	۰/۳۸	۰/۲۷	۰/۴۹	۰/۷۹				
TFM	۰/۰۵	۰/۱۹	۰/۴۵	۰/۶۱	۰/۸۴	۳	۱۷	فوم پلی‌یورتان	۶
SWR	۰/۷۵	۰/۷۶	۰/۵۸	۰/۷۰	۰/۶۴				
TFM	۰/۱۸	۰/۲۶	۰/۳۵	۰/۷۹	۰/۵۷	۳	۱۷	فوم پلی‌یورتان	۷
SWR	۰/۶۹	۰/۷۱	۰/۵۳	۰/۷۴	۰/۵۲				
TFM	۰/۱۲	۰/۳۴	۰/۶۹	۰/۹۶	۰/۷۸	۴/۵	۱۷	فوم پلی‌یورتان	۸
SWR	۰/۷۹	۰/۸۳	۰/۶۵	۰/۹۲	۰/۷۵				

ادامه جدول ۱.									
TFM	۰/۲۲	۰/۳۹	۰/۴۹	۰/۷۸	۰/۶۸	۵	۲۰	فوم پلی‌یورتان	۹
SWR	۰/۶۶	۰/۶۱	۰/۶۹	۰/۵۹	۰/۶۶				
TFM	۰/۰۷	۰/۱۲	۰/۱۲	۰/۱۶	۰/۲۱	۱	۳۰	فوم پلی‌یورتان	۱۰
SWR	۰/۲۰	۰/۳۲	۰/۲۹	۰/۱۹	۰/۲۱				
TFM	۰/۰۶	۰/۱	۰/۳۱	۰/۶۲	۰/۹۷	۲/۷	۳۰	فوم پلی‌یورتان	۱۱
SWR	۰/۵۷	۰/۶۴	۰/۴۹	۰/۷۹	۰/۹۶				
TFM	۰/۰۸	۰/۲۱	۰/۴۴	۰/۸۴	۰/۹۴	۴/۴	۳۰	فوم پلی‌یورتان	۱۲
SWR	۰/۸۰	۰/۸۱	۰/۶۲	۰/۹۸	۰/۸۸				
TFM	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۱۱	۰/۱	۰/۱۹	۱/۵	۵۰	فوم NBR-PVC شانه تخم مرغی	۱۳
SWR	۰/۲۳	۰/۱۹	۰/۲۳	۰/۴۲	۰/۲۶				
TFM	۰/۰۶	۰/۱۳	۰/۱۵	۰/۴۱	۰/۳۱	۲/۷	۵۰	فوم NBR-PVC	۱۴
SWR	۰/۲۳	۰/۳۴	۰/۲۴	۰/۴۷	۰/۲۸				
TFM	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۱۳	۰/۰۷	۰/۱۳	۱	۲۰	فوم پلی‌اتیلن	۱۵
SWR	۰/۵۵	۰/۳۴	۰/۲۴	۰/۶۷	۰/۳۵				
TFM	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۱	۰/۰۸	۰/۱۶	۱/۹	۲۰	فوم پلی‌اتیلن	۱۶
SWR	۰/۴۹	۰/۳۴	۰/۲۴	۰/۶۰	۰/۴۴				
TFM	۰/۰۶	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۱۱	۰/۲۲	۱/۹	۱۹	فوم پلی‌اتیلن فویل‌دار	۱۷
SWR	۰/۷۶	۰/۴۰	۰/۲۴	۰/۶۴	۰/۵۸				
TFM	۰/۰	۰/۰۵	۰/۱۴	۰/۰۵	۰/۰۵	۱	۱۲	فوم پلی‌استایرن	۱۸
SWR	۰/۲۷	۰/۱۴	۰/۲۱	۰/۳۲	۰/۲۱				
TFM	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۱۳	۰/۰۹	۰/۱۴	۱/۹	۱۲	فوم پلی‌استایرن	۱۹
SWR	۰/۸۶	۰/۳۰	۰/۳۵	۰/۶۶	۰/۳۹				
TFM	۰/۰۴	۰/۰۷	۰/۱۸	۰/۱۶	۰/۲۷	۳	۱۲	فوم پلی‌استایرن	۲۰
SWR	۰/۲۱	۰/۴۸	۰/۲۹	۰/۵۸	۰/۶۷				

جدول ۲: نتایج تعیین ضریب جذب صوتی انواع مصالح موجود در بازار به دو روش تابع انتقال (TFM) و نسبت موج ایستا (SWR)

روش	فرکانس مرکزی (هرتز)					ضخامت (سانتی‌متر)	دانسیته (کیلوگرم بر متر مکعب)	نام مصالح	ردیف
	۱۲۵	۲۵۰	۵۰۰	۱۰۰۰	۲۰۰۰				
TFM	۰/۰۵	۰/۰۹	۰/۱۷	۰/۴۳	۰/۶۶	۱/۵	۱۱۵	پشم سنگ	۲۱
SWR	۰/۳۲	۰/۴۴	۰/۳۱	۰/۵۵	۰/۸۰				
TFM	۰/۳۹	۰/۱۸	۰/۳۷	۰/۶۷	۰/۹۰	۳	۱۰۰	پشم سنگ	۲۲
SWR	۰/۶۶	۰/۶۸	۰/۵۶	۰/۸۱	۰/۹۶				
TFM	۰/۱۶	۰/۴	۰/۵۹	۰/۸۸	۰/۸۸	۵	۸۵	پشم سنگ	۲۳
SWR	۰/۸۱	۰/۸۱	۰/۷۷	۰/۸۴	۰/۸۹				
TFM	۰/۰۱	۰/۱۱	۰/۱۵	۰/۳۳	۰/۷۹	۳/۲	۱۲	پشم شیشه	۲۴
SWR	۰/۳۱	۰/۳۳	۰/۲۷	۰/۴۳	۰/۵۳				
TFM	۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۰۹	۱	۶۴	عایق الاستومری	۲۵
SWR	۰/۲۶	۰/۱۷	۰/۲۱	۰/۴۸	۰/۲۷				
TFM	۰/۰	۰/۰۳	۰/۱	۰/۱۱	۰/۱	۱/۲	۶۰۵	تایل گچی روکش مقوا (گچ برگ)	۲۶
SWR	۰/۳۰	۰/۱۵	۰/۲۳	۰/۵۲	۰/۲۳				
TFM	۰/۲۷	۰/۰۴	۰/۱۲	۰/۰۸	۰/۱۲	۱/۲	۵۹۴	تایل گچی ساده با روکش کاغذ	۲۷
SWR	۰/۲۹	۰/۱۶	۰/۲۰	۰/۴۵	۰/۳۲				
TFM	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۲۶	۰/۹	۶۲۲	تایل گچی سوراخ‌دار روکش پلاستیک	۲۸
SWR	۰/۵۵	۰/۲۸	۰/۲۱	۰/۵۳	۰/۳۶				
TFM	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۸	۶۵۳	تایل گچی روکش پلاستیکی	۲۹
SWR	۰/۷۰	۰/۳۶	۰/۱۹	۰/۶۰	۰/۲۸				

ادامه جدول ۲.									
TFM	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۰۸	۰/۶	۵۵۲	تایل مقوایی سوراخ‌دار	۳۰
SWR	۰/۲۴	۰/۱۹	۰/۲۳	۰/۴۳	۰/۱۹				
TFM	۰/۰۷	۰/۱۳	۰/۲۵	۰/۳۸	۰/۵۳	۰/۹	۳۱۱	تایل مقوایی USG	۳۱
SWR	۰/۱۶۷	۰/۱۵۵	۰/۴۵	۰/۱۶۹	۰/۴۷				
TFM	۰/۱۱۵	۰/۱۱۲	۰/۳۲	۰/۴۹	۰/۵۳	۱/۴	۱۹۱	تایل مقوایی Thermatex	۳۲
SWR	۰/۱۶۷	۰/۱۵۵	۰/۴۵	۰/۷۰	۰/۴۷				
TFM	۰/۰۷	۰/۰۱	۰/۰۹	۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۲	۱۴۶۵	کفپوش صنعتی PVC	۳۳
SWR	۰/۱۵۰	۰/۳۶	۰/۱۹	۰/۵۸	۰/۴۰				
TFM	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۰۹	۰/۰۵	۰/۰۹	۲	۱۴۰	کفپوش تاتامی	۳۴
SWR	۰/۴۸	۰/۴۵	۰/۲۳	۰/۱۶۴	۰/۳۳				
TFM	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۱	۰/۰۸	۰/۰۱	۰/۵	۱۱۷۲	تایل لاستیکی الاستومری	۳۵
SWR	۰/۲۶	۰/۱۷	۰/۲۳	۰/۵۲	۰/۲۲				
TFM	۰/۰۶	۰/۰۴	۰/۱۵	۰/۱۳	۰/۱۷	۰/۷	۲۰۰	موکت طرح‌دار	۳۶
SWR	۰/۲۰	۰/۴۴	۰/۲۳	۰/۴۹	۰/۳۹				
TFM	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۰۷	۰/۰۸	۰/۱۴	۰/۶	۱۰۶	موکت ساده	۳۷
SWR	۰/۲۰	۰/۲۰	۰/۲۴	۰/۲۸	۰/۱۴				
TFM	۰/۱۰	۰/۰۵	۰/۲۴	۰/۴۵	۰/۷۴	۰/۸	۲۸۶	دیوار پوش PVC توخالی دولایه	۳۸
SWR	۰/۱۵۲	۰/۴۶	۰/۳۴	۰/۶۰	۰/۴۸				

جدول ۳: نتایج تعیین ضریب جذب صوتی برخی از لایه‌های مورد استفاده در پانل‌های آکوستیک آوا سینا به دو روش تابع انتقال (TFM) و نسبت موج ایستا (SWR)

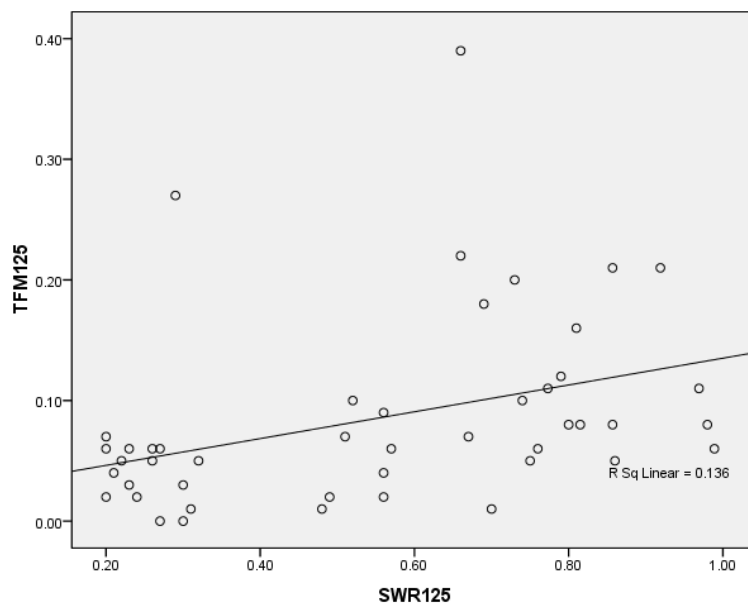
ردیف	نام مصالح	دانسیتته (کیلوگرم بر متر مکعب)	ضخامت (سانتی‌متر)	فرکانس (هرتز)				
				۱۲۵	۲۵۰	۵۰۰	۱۰۰۰	۲۰۰۰
۳۹	فوم آکوستیک یورتان روکش مخمل	۳۰	۵	۰/۱۱	۰/۳۶	۰/۸۵	۰/۸۵	۰/۶۱
				۰/۵۸	۰/۸۰	۰/۹۱	۰/۸۲	۰/۹۷
۴۰	فوم آکوستیک یورتان روکش چرم مصنوعی	۳۰	۵	۰/۰۸	۰/۳۱	۰/۷۹	۰/۶۳	۰/۳۹
				۰/۱۷	۰/۴۰	۰/۸۹	۰/۷۲	۰/۸۱
۴۱	فوم آکوستیک یورتان روکش مخمل	۳۰	۴	۰/۰۸	۰/۲۹	۰/۷۳	۰/۸۵	۰/۶۱
				۰/۵۳	۰/۷۵	۰/۸۲	۰/۷۷	۰/۸۶
۴۲	فوم آکوستیک یورتان روکش چرم مصنوعی	۳۰	۴	۰/۱۲	۰/۳۹	۰/۹۱	۰/۵۰	۰/۲۴
				۰/۱۹	۰/۳۹	۰/۹۲	۰/۶۳	۰/۷۷
۴۳	فوم آکوستیک یورتان روکش مخمل	۳۰	۳	۰/۰۸	۰/۲۱	۰/۶۶	۰/۸۶	۰/۶۸
				۰/۶۵	۰/۹۷	۰/۵۷	۰/۷۱	۰/۹۸
۴۴	فوم آکوستیک یورتان روکش چرم مصنوعی	۳۰	۳	۰/۰۹	۰/۲۷	۰/۶۵	۰/۷۸	۰/۳۰
				۰/۳۱	۰/۵۱	۰/۶۰	۰/۷۵	۰/۹۰
۴۵	فوم آکوستیک یورتان یک لایه PE و روکش مخمل	۳۰	۴	۰/۲۱	۰/۲۲	۰/۶۲	۰/۹۷	۰/۷۰
				۰/۵۷	۰/۸۷	۰/۷۰	۰/۶۹	۰/۸۶
۴۶	فوم آکوستیک یورتان یک لایه PE و روکش چرم	۳۰	۴	۰/۰۶	۰/۰۴	۰/۱۷	۰/۵۱	۰/۳۰
				۰/۵۶	۰/۳۳	۰/۸۹	۰/۵۲	۰/۲۳

ضریب جذب صوت مصالح در فرکانس‌های یک اکتاو باند مورد نظر و همچنین مقایسه شاخص NRC دو روش، نسبت موج ایستا (SWR) و روش تابع انتقال (TFM) از مدل رگرسیون استفاده شد. نتایج این مقایسه و مدل رابطه بهترین خط رگرسیونی برای تعیین خطای روش SWA در جدول ۴ و نمودار پراکندگی بین این مقادیر در شکل‌های ۳ تا ۸ نشان داده شده است. همان‌طور

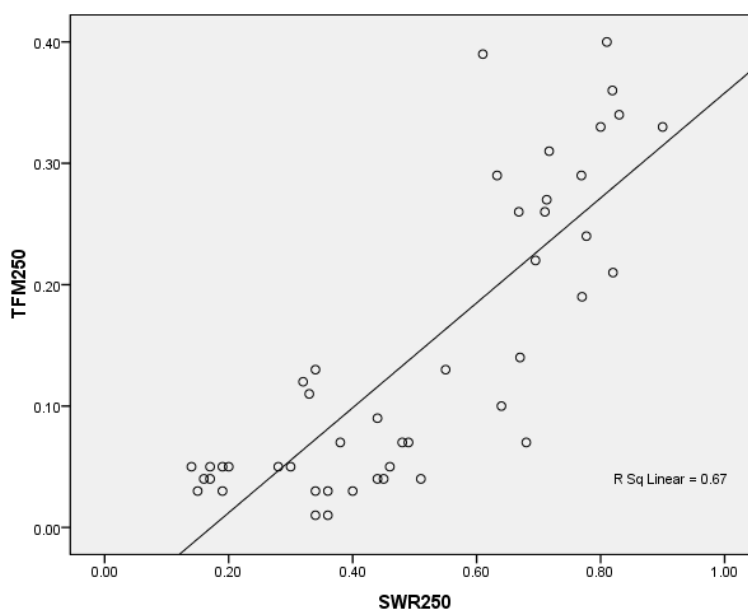
جهت بررسی میزان اختلاف بین روش تابع انتقال و نسبت موج ایستا برای مصالح جاذب صوت، میانگین اختلاف در نمونه‌های فوم پلی‌یورتان در ضخامت‌های مختلف بررسی شد. نتایج نشان داد که در فرکانس‌های ۱۲۵، ۲۵۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ هرتز، میانگین اختلاف به ترتیب ۰/۴۸، ۰/۴۴، ۰/۱۴، ۰/۰۱ و ۰/۰۰ بوده است. از سوی دیگر، برای مقایسه نتایج تعیین میزان

جدول ۴: مدل رگرسیونی بین نتایج ضریب جذب صوتی مصالح دو روش تابع انتقال (TFM) و نسبت موج ایستا (SWR) در فرکانس‌های مورد نظر و NRC

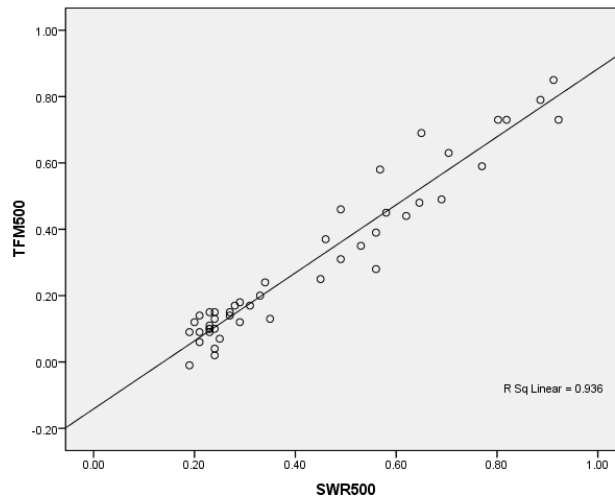
فرکانس مرکزی یک اکتاو باند (هرتز)	معادله بهترین خط	r	r ²
۱۲۵	$\alpha_{TFM} = 0.111 \alpha_{SWR} + 0.024$	۰/۳۶۸	۰/۱۳۶
۲۵۰	$\alpha_{TFM} = 0.432 \alpha_{SWR} - 0.0740$	۰/۸۱۸	۰/۶۷۰
۵۰۰	$\alpha_{TFM} = 1.025 \alpha_{SWR} - 0.141$	۰/۹۶۸	۰/۹۳۶
۱۰۰۰	$\alpha_{TFM} = 1.223 \alpha_{SWR} - 0.334$	۰/۶۷۹	۰/۴۶۲
۲۰۰۰	$\alpha_{TFM} = 1.059 \alpha_{SWR} - 0.071$	۰/۸۱۰	۰/۶۵۶
NRC	$NRC_{TFM} = 1.128 NRC_{SWR} - 0.247$	۰/۹۱۱	۰/۸۲۹



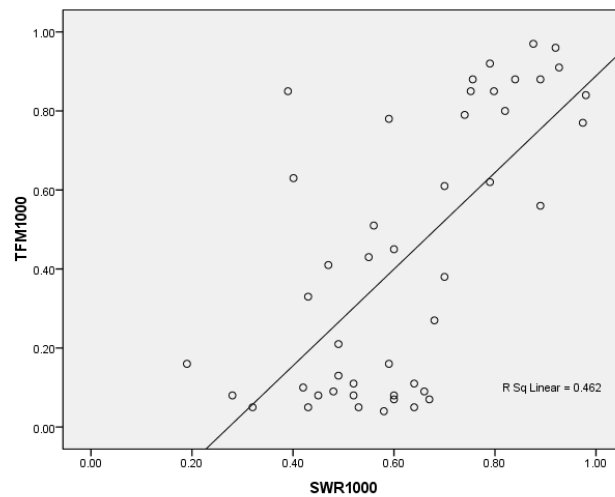
شکل ۳: مدل رگرسیونی بین نتایج ضریب جذب صوتی مصالح با استفاده از دو روش تابع انتقال (TFM) و نسبت موج ایستا (SWR) در فرکانس ۱۲۵ هرتز



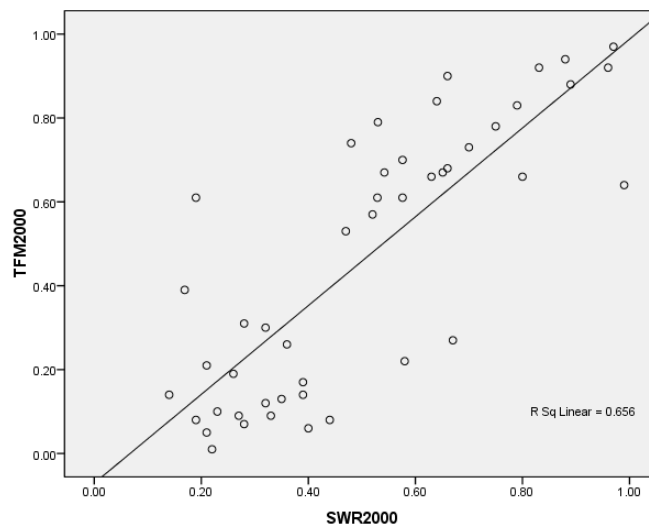
شکل ۴: نمودار همبستگی بین نتایج ضریب جذب صوتی مصالح با استفاده از دو روش تابع انتقال (TFM) و نسبت موج ایستا (SWR) در فرکانس ۲۵۰ هرتز



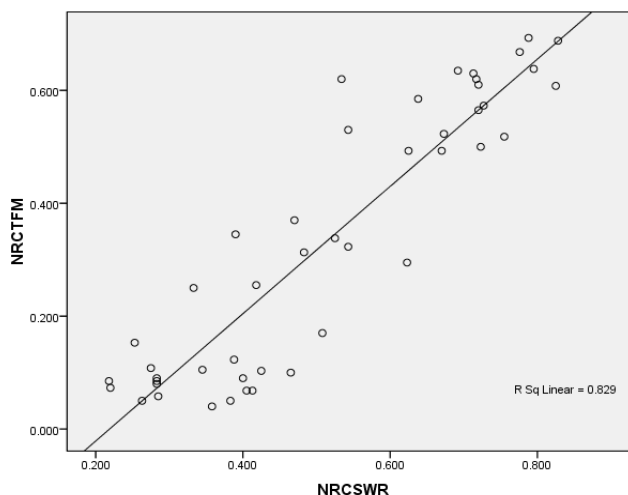
شکل ۵: نمودار همبستگی بین نتایج ضریب جذب صوتی مصالح با استفاده از دو روش تابع انتقال (TFM) و نسبت موج ایستا (SWR) در فرکانس ۵۰۰ هرتز



شکل ۶: نمودار همبستگی بین نتایج ضریب جذب صوتی مصالح با استفاده از دو روش تابع انتقال (TFM) و نسبت موج ایستا (SWR) در فرکانس ۱۰۰۰ هرتز



شکل ۷: نمودار همبستگی بین نتایج ضریب جذب صوتی مصالح با استفاده از دو روش تابع انتقال (TFM) و نسبت موج ایستا (SWR) در فرکانس ۲۰۰۰ هرتز



شکل ۸: نمودار همبستگی بین نتایج متوسط ضریب جذب صوتی مصالح با استفاده از دو روش تابع انتقال (TFM) و نسبت موج ایستا (SWR)

که این موضوع می‌تواند ناشی از طول و قطر لوله امیدانس مورد استفاده در روش نسبت موج ایستا باشد. به نظر می‌رسد با توجه به شروط ISO 10435-1 [۹] در مورد حد فرکانسی پایین، با توجه به طول لوله، برای فرکانس ۱۲۵ هرتز نیاز به لوله‌ای با طول بیشتر است. Heed (۲۰۰۸) در مطالعه خود با عنوان "ضریب جذب و امیدانس سطحی صوت" گزارش کرده است که در فرکانس‌های کمتر از ۱۲۰۰ هرتز، ضریب جذب برای روش موج ایستا در مقایسه با روش تابع انتقال به سرعت کاهش می‌یابد [۱۷]. da Silva (۲۰۱۳) نیز در مطالعه خود اشاره نموده است که روش لوله امیدانس، نتایج دقیقی را برای فرکانس‌های پایین ارائه نمی‌دهد؛ زیرا لازم است نمونه کاملاً بدون نفوذ هوا در داخل لوله قرار گیرد. باید خاطر نشان ساخت که در عین حال، نمونه باید به صورت آزادانه مرتعش شود [۲].

نتایج مطالعه حاضر با یافته‌های Deaconu (۲۰۱۴) همخوانی دارد. وی در مطالعه‌ای با عنوان "تجزیه و تحلیل مقایسه‌ای روش‌های تابع انتقال و نسبت موج ایستا در اختلاف ضریب جذب آکوستیکی" عنوان نموده است که روش تابع انتقال برای ارزیابی ویژگی‌های آکوستیکی در فرکانس‌های پایین قابل استفاده است؛ اما روش موج ایستا نیازمند لوله بلند برای اندازه‌گیری ضریب جذب در فرکانس‌های پایین می‌باشد [۱۳]. لازم به ذکر است که یافتن حداقل فشار صوت در روش نسبت موج ایستا کمی مشکل است؛ زیرا آن‌ها محدوده گره باریکی دارند. لرش‌های احتمالی میکروفن نیز می‌تواند دلیل دیگری برای این اختلاف باشد [۱۷]. از سوی دیگر، Mia Suhaneck و همکاران (۲۰۰۸) نیز در پژوهشی گزارش کردند که روش تابع انتقال برای اندازه‌گیری ضریب جذب برخورد نرمال برای نمونه‌های کوچک، سریع‌تر از روش نسبت موج ایستا است. در این پژوهش نمونه‌هایی که توسط لوله ساخته شده با روش نسبت موج ایستا اندازه‌گیری شدند، ضریب جذب پایین‌تری داشتند (بالتر از ۰/۲). این پژوهشگران پیشنهاد نمودند که یک لوله

که ملاحظه می‌گردد، مقدار ضریب تبیین بین مقادیر NRC روش معادل ۰/۸۲۹ می‌باشد.

بحث

هدف از انجام مطالعه حاضر مقایسه نتایج اندازه‌گیری مصالح جاذب آکوستیک مورد استفاده در کنترل صدا با دو روش نسبت موج ایستا (SWR) و روش تابع انتقال (TFM) و تدوین مدل ارتباط نتایج این دو روش بود. در این مطالعه روش تابع انتقال به‌عنوان روش مبنا در نظر گرفته شد و نتایج روش موج ایستا با آن مقایسه گردید. ضرایب جذب ۴۶ نمونه با استفاده از دو دستگاه لوله امیدانس در فرکانس‌های ۱۲۵، ۲۵۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ هرتز اندازه‌گیری شد و نتایج به‌دست‌آمده به وسیله دو روش مقایسه و در نهایت مدل رگرسیونی برای تصحیح نتایج دستگاه SWR تدوین گردید. هرچند در حال حاضر روش تابع انتقال به دلیل سرعت انجام آزمایشات و وابستگی محدود به اپراتور محبوبیت بیشتری دارد؛ اما نتایج پژوهش حاضر حاکی از آن بودند که روش نسبت موج ایستا با مشخصات دستگاه مورد بررسی با طول ۱۰۷ سانتی‌متر نیز برای فرکانس‌های ۲۵۰ تا ۲۰۰۰ هرتز کارایی مناسبی دارد و با انجام تصحیحات مدل رگرسیونی قابل اعتماد خواهد بود. در این راستا، Heed (۲۰۰۸) عنوان نموده است که به‌طور کلی، روش تابع انتقال بهتر از روش موج ایستا می‌باشد [۱۷]. یکی از مزیت‌های روش تابع انتقال نسبت به روش موج ایستا این است که خطاهای ناشی از عوامل انسانی کاهش می‌یابند؛ از این رو نتایج دقیق‌تر هستند [۱۳]. شایان ذکر است که در این پژوهش امکان تعیین خطای روش تابع انتقال میسر نبود؛ به همین دلیل نتایج این روش به‌عنوان مبنا در نظر گرفته شدند.

نتایج مطالعه حاضر در ارتباط با ضرایب جذب صوتی مصالح در دو روش نشان داد که اختلاف نتایج در فرکانس‌های ۱۲۵ و ۲۵۰ هرتز بیشتر از فرکانس‌های ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ هرتز است

قابل تعمیم نمی‌باشد.

نتیجه‌گیری

نتایج مطالعه حاضر در راستای مقایسه روش نسبت موج ایستا با روش پایه تابع انتقال و اعتبارسنجی آن نشان داد که دو روش در فرکانس‌های ۲۵۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ هرتز همخوانی دارند و با استفاده از مدل رگرسیونی تصحیح نتایج روش نسبت موج ایستا که در این مطالعه برای اعتباربخشی نتایج آن ارائه شده است، می‌توان با اطمینان از روش نسبت موج ایستا برای تعیین ضریب جذب مصالح آکوستیکی تا چگالی حدود ۱۵۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب استفاده نمود. با توجه به اینکه گستره فرکانسی قابل اندازه‌گیری دستگاه برای تعیین ضرایب جذب در فرکانس به قطر و طول لوله امپدانس بستگی دارد، پیشنهاد می‌شود جهت تعیین ضریب جذب صوتی در فرکانس ۲۵۰ هرتز و کمتر از آن با استفاده از روش نسبت موج ایستا، از لوله امپدانس با طول بیشتر می‌باشد. پژوهش در زمینه مصالح چگال کماکان یکی از نیازهای مطالعاتی برای آینده است.

تشکر و قدردانی

این تحقیق با همکاری مرکز تحقیقات علوم بهداشتی دانشگاه علوم پزشکی همدان و شرکت آوا سینا انجام شده است.

سخت‌تر، میکروفون کوچک‌تر ($1/4$ in) و نیز لوله کوچک‌تر برای فرکانس‌های بالاتر می‌تواند نتایج را بهبود بخشد [۷].

علاوه‌براین، نتایج به‌دست‌آمده از مدل رگرسیون در پژوهش حاضر حاکی از آن بود که بیشترین همبستگی بین ضرایب جذب اندازه‌گیری‌شده به وسیله دو روش در فرکانس ۵۰۰ هرتز وجود دارد ($r^2=0/936$ ، $r=0/968$). کمترین ضریب همبستگی نیز در فرکانس ۱۲۵ هرتز به‌دست آمد ($r^2=0/136$ ، $r=0/368$). از سوی دیگر ضریب تبیین در فرکانس‌های ۲۵۰ هرتز برابر با $r^2=0/670$ ، فرکانس ۱۰۰۰ هرتز معادل $r^2=0/462$ ، فرکانس ۲۰۰۰ هرتز برابر با $r^2=0/656$ و بین نتایج NRC دو روش معادل $r^2=0/829$ به‌دست آمد که اعداد مناسبی هستند؛ از این رو می‌توان گفت که نتایج حاصل از روش نسبت موج ایستا برای فرکانس‌های ۲۵۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ هرتز قابل توجه می‌باشند؛ اما برای رفع اختلاف نتایج این روش با روش تابع انتقالی باید از معادله تصحیح مندرج در جدول ۴ برای اعتباربخشی نهایی استفاده نمود. شایان ذکر است که نتایج پژوهش حاضر با یافته‌های Deaconu (۲۰۱۴) همسویی دارد. این پژوهشگر نیز گزارش نموده است که دو روش نسبت موج ایستا و تابع انتقال توافق خوبی دارند [۱۳]. ذکر این نکته ضرورت دارد که در این پژوهش نمونه محدود به مصالح آکوستیکی نسبتاً سبک الاستیک با چگالی حدود ۱۵۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب بود که برای مصالح چگال سخت همچون فلز، بتن، سنگ، آجر، امدی‌اف، نئوپان، چوب سخت و مانند آن

REFERENCES

- Arunkumar B, Jeyanthi S. Design and analysis of impedance tube for sound absorption measurement. *ARPJ Eng Appl Sci*. 2017;12(5):1400-5.
- da Silva GC, de Araújo Nunes MA, Lopes RV, Júnior AB. Design and construction of a low cost impedance tube for sound absorption coefficients measurements. Proceedings of the 22nd international congress of mechanical engineering, Ribeirão Preto; 2013.
- Niresh J, Neelakrishnan S, Rani SS. Investigation and correction of error in impedance tube using intelligent techniques. *J Appl Res Technol*. 2016;14(6):405-14. DOI: [10.1016/j.jart.2016.09.003](https://doi.org/10.1016/j.jart.2016.09.003)
- Niresh J, Neelakrishnan S, Subharani S, Kannaian T, Prabhakaran R. Review of acoustic characteristics of materials using impedance tube. *ARPJ Eng Appl Sci*. 2015;10(8):3319-26.
- Robin O, Amedin CK, Berry A, Atalla N, Doutres O, Sgard F. Sound absorption measurement: comparison of standard test in reverberant room with measurement using a synthesized diffuse acoustic field. *Instit Noise Control Eng*. 2016;253(4):4759-68.
- ISO 354. Acoustics—Measurement of sound absorption in a reverberation room. Geneva: International Standard; 2003
- Suhanek M, Jambrosic K, Horvat M. A comparison of two methods for measuring the sound absorption coefficient using impedance tubes. *Int Symp*. 2008;1:321-4.
- Golmohammadi R, Olyaei M, Samavat H, Motamedzadeh M. Producing of impedance tube for measurement of acoustic absorption coefficient of some sound absorber materials. *Avicenna J Clin Med*. 2008;15(1):55-61. [Persian]
- ISO 10434-1. Acoustics-determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes-part 1. New Yoek: Method Using Standing Wave Ratio; 2001.
- Suhanek M, Jambrosic K, Domitrovic H. Student project of building an impedance tube. *J Acoustic Soc*. 2008; 123(5):3616.
- ISO 10534-2. Acoustics-determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes. Part 2: transfer-function method. New Yoek: Method Using Standing Wave Ratio; 2001.
- Active Standard ASTM C384. Standard test method for impedance and absorption of acoustical materials by impedance tube method. West Conshohocken, PA: ASTM International; 1998.
- Deaconu M. Comparative analysis of transfer function and standing wave methods in determination of acoustic absorption coefficient. *Proc Sisom Acoustics*. 2014;2014:22-3.
- Farina A, Fausti P. Standing wave tube techniques for measuring the normal incidence absorption coefficient: comparison of different experimental setups. Proc of 11th International FASE Symposium, Ferrara, Italy; 1994.
- Suhanek M, Jambrosic K, Horvat M. A comparison of two methods for measuring the sound absorption coefficient using impedance tubes. ELMAR, 50th International Symposium, Zadar, Croatia; 2008.
- Aliabadi M, Golmohammadi R, Oliaei M, Shahidi R. Study of noise absorption characteristics for current building materials applied in industrial and office rooms. *J Occupat Hyg Eng*. 2016;3(3):32-9. DOI: [10.21859/johe-03031](https://doi.org/10.21859/johe-03031)
- Heed C. Sound absorption and acoustic surface impedance. Stockholm: SD2165 Acoustical Measurements; 2008.