

## طراحی و ساخت لوله امیدانس برای تعیین ضریب جذب صوتی برخی مصالح مورد استفاده در کنترل صدا

دکتر رستم گلمحمدی\*، محمد علیایی\*\*، دکتر حمید سموات\*\*\*، دکتر مجید معتمد زاده\*\*\*\*

دریافت: ۸۶/۵/۲۱، پذیرش: ۸۷/۳/۱۱

### چکیده:

**مقدمه و هدف:** صدا یکی از مهمترین عوامل زیان آور محیط کار و فراگیرترین عامل فیزیکی تهدیدکننده سلامت شاغلین است. مواجهه با صدای زیان آور در بیش از حد مجاز علی رغم پیشرفت های صنعتی کماکان یکی از معضلات بهداشتی کارگران در دنیا محسوب می گردد. در ایران به دلیل عدم ارائه خصوصیات جذب آکوستیکی مصالح توسط وارد کنندگان و حتی تولید کنندگان، استفاده کنندگان اطلاع موثقی در خصوص استفاده از جاذبهای صوتی برای کنترل صدای داخل اماکن صنعتی و غیر صنعتی ندارند. هدف از انجام این مطالعه ساخت لوله امیدانس و بدست آوردن ضرایب جذب مصالح جاذب صوت موجود در بازار کشور بوده است. **روش کار:** در این مطالعه تجربی با استفاده از یک روش بر مبنای تجهیزات در دسترس و نسبتاً آسان جهت اندازه گیری ضریب جذب صوتی مصالح آکوستیکی با استفاده از یک لوله امیدانس بر مبنای موج ایستا و روش اندازه گیری تراز فشار صوت معین مطابق استاندارد ISO10534-1 و با کمک یک مولد صوت خالص، و تراز سنج صوت کالیبره شده، ضرایب جذب صوت مصالح موجود در بازار اندازه گیری و مورد بررسی قرار گرفت.

**نتایج:** نتایج تکرار آزمایش ۲۳ نمونه مصالح آکوستیکی موجود در بازار ایران نشان داد که متوسط انحراف معیار ضرایب جذب صوتی اندازه گیری شده کوچکتر از  $10^{-2} \times 3$  بوده است.

**نتیجه نهایی:** فناوری ساخت دستگاهی برای آزمایش ضریب جذب مصالح آکوستیکی و انجام آزمایشات با حداقل خطا در این مطالعه محقق گردیده است و این فناوری می تواند نیاز های کشور را در زمینه آزمایش و تهیه شناسنامه برای مصالح جاذب صوت موجود برآورده نماید.

**کلید واژه ها:** استوانه امیدانس / ضریب جذب صوتی / نسبت موج ایستا

### مقدمه:

می باشند. در محیطهای صنعتی، علاوه بر توان صوتی مجموع منابع موجود در محیط کار، انعکاس صدا از سطوح داخلی می تواند نقش تشدید کننده داشته باشد. وجود سطوح انعکاسی در اطراف منابع صوتی باعث می شود که تراز فشار صوت بعلت انعکاس مکرر افزایش یابد. محاسبات نشان می دهد که حدود ۵ دسی بل از صدای موجود در کارگاههای صنعتی موجود ناشی از تشدید صدا در اثر

صدا یکی از مهمترین عوامل زیان آور محیط کار و فراگیرترین عامل فیزیکی تهدیدکننده سلامت شاغلین است. امروزه علی رغم پیشرفت های صنعتی، مواجهه با صدای بیش از حد مجاز کماکان یکی از معضلات بهداشتی کارگران در دنیا محسوب می گردد. امروزه در سراسر دنیا طیف وسیعی از کارگران در معرض صدای زیان آور شغلی

\* استادیار گروه بهداشت حرفه ای دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی همدان (golmohamadi@umsha.ac.ir)

\*\* کارشناس ارشد بهداشت حرفه ای دانشگاه علوم پزشکی همدان

\*\*\* دانشیار گروه فیزیک پزشکی دانشکده پزشکی دانشگاه علوم پزشکی همدان

\*\*\*\* دانشیار گروه بهداشت حرفه ای دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی همدان

گردیده است (۶).

تحقیق دیگر روشی را برای اندازه گیری ضریب جذب صوتی مصالح با استفاده از لوله موج ایستا بدون میکروفون پیشنهاد نموده است که در آن از بلندگو به عنوان یک acoustic driver و به طور همزمان به عنوان یک سنسور استفاده گردیده است. در مقایسه با روش تابع انتقالی این روش می تواند به طور صحیح ضریب جذب صوتی مصالح را در محدوده فرکانسی پایین اندازه گیری نماید ولی در فرکانسهای بالا میزان صحت آن کاهش پیدا می کند (۷). برای اندازه گیری ضریب جذب صوتی مصالح روش جدیدی توسط پرودی (Prodi) گزارش شده است که با بیشتر روش های رایج بر اساس تابع انتقالی تفاوت دارد. در این روش فقط از یک میکروفون استفاده شده است و از طریق اندازه گیری زمان بازآوایی صوت، ضریب جذب صوتی مواد تعیین شده است. این ابزار جدید از یک استوانه افقی که نمونه های آزمایشی را می توان در هر دو انتهای آن قرار داد تشکیل شده است (۸).

روش دیگری نیز توسط یانگ (Yang) و همکاران ارائه شده است که در آن اندازه گیری فشار صدا و مولفه های سرعت ذره با استفاده از پروب شدت صوت P-U انجام شده است. این روش با روش تابع انتقالی مقایسه شده و نتایج نشان دادند که روش جدید می تواند همانند روش قبلی صحت داشته باشد (۹).

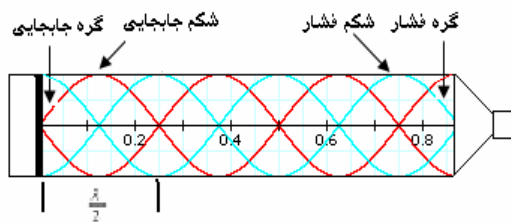
در مطالعه ای دیگری توسط رابرت (Robert) و همکاران لوله امیدانسی را جهت بدست آوردن نسبت های امیدانس آکوستیکی و ضریب جذب برخوردی نرمال مواد گوناگونی که در سطوح داخل هواپیما استفاده شده اند طراحی و آزمایش نموده است. این طراحی بر اساس روش دو میکروفون و بر مبنای استاندارد 1050-90 (ASTM) American Society of Testing & Materials صورت گرفته است. فرکانس های قابل اندازه گیری با این دستگاه ۱۲۵-۵۰۰ هرتز بوده است (۱۰). در تحقیقی که توسط ریو (Ryo) انجام شده است با استفاده از روش تابع انتقالی و بکار گیری دو میکروفون جهت اندازه گیری خصوصیات آکوستیکی، مانند ضریب جذب، ضریب انعکاس، امیدانس و ادمیتانس سطحی با استفاده از سیستم آزمایش PULSE بکار گرفته شده است دستگاه طراحی شده توسط وی در محدوده فرکانسی ۶۴۰۰-۵۰ هرتز نتایج قابل قبولی ارائه

بازتابش سطوح می باشد. پدیده جذب صوت کم و بیش در تمام مصالح وجود دارد. درصد جذب انرژی صوت در کل باند فرکانسی برای هر ماده اختصاصی و ثابت بوده که تحت عنوان ضریب جذب صوتی آن ماده نامیده می شود. هر چه ضریب جذب صوتی ماده ای بیشتر باشد، میزان افزایش صدای ناشی از انعکاس از سطح آن کمتر خواهد بود. استفاده از مصالح جاذب صوت به عنوان یکی از مؤثرترین راهها برای کنترل صدای ناشی از بازتابش سطوح و کنترل مواجهه افراد با صدا می باشد. استفاده از مصالح آکوستیک در اماکن عمومی و صنعتی می تواند در کنترل صدای داخل بناها نقش بسیار مؤثری داشته باشد (۱).

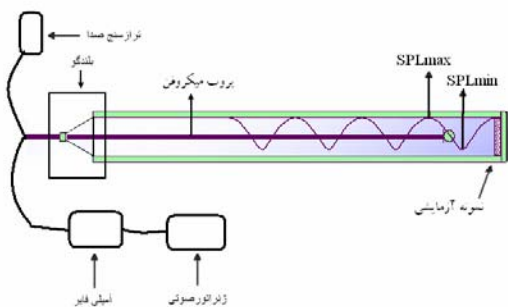
در حال حاضر اندازه گیری ضریب جذب برخورد نرمال صوت مصالح معمولاً توسط سیستم مبتنی بر لوله موج ایستا یا استوانه امیدانس انجام می شود. استفاده از استوانه امیدانس خود دارای دو روش فرعی شامل روش نسبت موج ایستا (Standing wave ratio (SWR) و روش تابع انتقالی برای اندازه گیری ضریب جذب صوتی مواد می باشد. روش تابع انتقالی (روش شدت) نسبت به روش نسبت موج ایستا (روش فشار) از دقت بالاتری برخوردار است و انجام آزمایشات از نظر زمانی سریعتر انجام می شود. ولی نیاز به تجهیزات پیشرفته تری دارد (۲،۳).

راسل (Russel) با استفاده از لوله موج ایستا ساخت B&k و آنالیزور صوتی با اندازه گیری حداقل و حداکثر فشار صوت در لوله امیدانس نسبت موج ایستا ضریب جذب صوتی مواد را به دست آورده است (۴). در روش دیگری که توسط آنجلو (Angelo) ارائه شده است با استفاده از یک میکروفون که به صورت متحرک در فواصل مختلف در امتداد لوله قرار گرفته، تابع انتقالی بین هر جفت از محلها محاسبه گردیده است که بر آن اساس ضریب جذب نمونه ها تعیین شده است. این تکنیک اندازه گیری وقت گیرتر از روش تابع انتقالی است و احتیاج به جانمایی دستی دقیق سنسورها دارد اما دقت بالایی در تعیین مشخصات جذب در فرکانسها دارد (۵). سایر پژوهشگران تکنیک های دیگری را مبتنی بر اندازه گیری شدت صوت ارائه نموده اند که با دیگر روش های شدت پیشنهادی برای اندازه گیری ضریب جذب صوت متفاوت است. در این روش تنها با اندازه گیری شدت صوت و دانسیته انرژی میدان صدا با استفاده از دو میکروفون و براساس تناسب ریاضی ساده ای که بین آنها وجود دارد ضریب جذب صوتی مواد محاسبه

و در انتهای دیگر آن محل قرار گرفتن نمونه مورد آزمایش است. بلندگو به یک ژنراتور صوت خالص و یک آمپلی فایر متصل شده است. هنگام آزمایشات، موج صوتی از بلندگو به سمت انتهای دیگر استوانه منتشر می گردد و بعد از برخورد به نمونه ها بازتابش می یابد. تداخل موج ها ناشی از موج برخوردی ( $P_i$ ) و موج بازتابشی ( $P_r$ ) سبب شکل گیری موج ایستاده در استوانه می شود. در اینجا در گره ها، فشار حداقل و در شکم ها فشار حداکثر خواهد بود. با استفاده از یک میکروفون متحرک که به صورت کشویی در روی بدنه استوانه قابل جابجایی است، دامنه های موج صوتی دریافت و مستقیماً به تراز سنج صوت کالیبره شده منتقل می شود که از طریق آن می توان مقادیر دامنه تراز فشار حداقل و حداکثر را مستقیماً اندازه گیری نمود. شکل ۱ نحوه تشکیل موج ایستا و دامنه های فشار و جابجایی را در لوله امپدانس و شکل ۲ نمای ساده مدار آزمایش را نشان می دهد.



شکل ۱: دامنه های فشار و جابجایی در استوانه امپدانس



شکل ۲: برش ساده استوانه امپدانس و تجهیزات متصل به آن

مبانی محاسبات: نسبت بین دامنه فشار صوت در فشار حداکثر به فشار حداقل، نسبت موج ایستا (S) نامیده می شود. این نسبت برای یک نمونه در همه فرکانس های اکتاو باند تعیین خواهد شد. با تعیین نسبت موج ایستا در هر فرکانس با روابط ریاضی که وجود دارد، ضریب جذب صوتی در آن فرکانس به دست خواهد آمد.

کرده است (۱۱).

نظر به اینکه در ایران استفاده کنندگان از مصالح جاذب صوت اطلاعات دقیقی از خصوصیات جذب آکوستیکی مصالح ندارند و تولید کنندگان داخلی نیز امکانات آزمایشگاهی کافی برای تعیین جدول مشخصات کالای خود ندارند به طور مضاعف استفاده از جاذبهای صوتی برای کنترل صدای داخل اماکن صنعتی و غیر صنعتی دچار محدودیت شده است. هر چند استاندارد بین المللی برای شیوه اندازه گیری جذب صوتی مصالح منتشر گردیده است (۲،۳،۱۲) اما طبق بررسی انجام شده در داخل کشور آزمایشگاه یا دستگاهی جهت تعیین ضریب جذب صوتی مصالح مورد استفاده در کنترل صدا موجود نمی باشد و خرید آن از شرکت های سازنده نیز مستلزم صرف هزینه سرسام آور (لوله امپدانس همراه با میکروفون، بلندگو، آمپلی فایر و ترازسنج و آنالیزور صدا ۴۰۰۰۰ یورو) می باشد. بعلاوه طبق بررسی مولفین، تحقیق مؤثری در جهت تعیین ضریب جذب صوتی مصالح داخل کشور منتشر نشده است.

با توجه به اهمیت تعیین خصوصیات جذب صوتی مصالح متداول موجود یا تولید شده در کشور، طراحی و ساخت دستگاهی برای تعیین ضریب جذب صوتی مصالح مورد استفاده در کنترل صدا در کشورمان امری ضروری بوده است. هر چند امکان خرید ست کامل اندازه گیری فوق الذکر از سازنده خارجی منتفی نیست. هدف از این مطالعه استفاده از یک روش نسبتاً آسان بر مبنای تجهیزات در دسترس جهت اندازه گیری ضریب جذب صوتی مواد بوده است. در این طرح با استفاده از یک لوله امپدانس بر مبنای موج ایستا و روش اندازه گیری تراز فشار صوت و با کمک یک مولد صدای خالص با فرکانس معین، ضرایب جذب صوت مصالح آکوستیکی موجود در بازار کشور با روش استاندارد اندازه گیری و مورد بررسی قرار گرفته است.

## روش کار:

برای نیل به هدف مطالعه ابتدا با استفاده از نتایج تجربیات سایر محققین برای طراحی و ساخت دستگاه تعیین ضریب جذب صوتی اقدام گردید و آزمایشات تحقیق نیز مطابق استاندارد ISO 10534-1 انجام شد.

دستگاه ساخته شده برای انجام آزمایشات شامل یک استوانه آزبستی یکپارچه بوده که در یک انتهای آن بلندگو

(۸)

$$\alpha = \frac{4 \times 10^{\Delta L/20}}{(10^{\Delta L/20} + 1)^2}$$

در عمل محدوده فرکانسی در استوانه بوسیله طول و ابعاد آن تعیین می شود. یک گره و یک شکم مجاور به اندازه یک چهارم طول موج از هم فاصله دارند. بم ترین صوت استوانه هنگامی است که فقط یک گره و یک شکم در استوانه ایجاد شود که در این صورت:

(۹)

$$L = \frac{\lambda}{4}$$

L: طول استوانه بر حسب متر  
λ: طول موج بر حسب متر

حال اگر استوانه هماهنگ دوم و سوم و .... خود را تولید کند، طول استوانه برابر  $3\lambda/4$  و  $5\lambda/4$  و .... خواهد بود. به طور کلی طول استوانه مضرب فردی از  $\lambda/4$  است. در این صورت می توان روابط زیر را نوشت:

$$L = \frac{(2K-1)\lambda}{4} \quad (10)$$

$$\lambda = \frac{V}{f}$$

$$L = \frac{(2K-1)V}{4f} \quad (11)$$

$$f = \frac{(2K-1)V}{4L}$$

L: طول استوانه بر حسب متر  
λ: طول موج بر حسب متر  
F: فرکانس صوت در استوانه بر حسب هرتز  
V: سرعت صوت در استوانه بر حسب متر بر ثانیه  
K: شماره صوت در استوانه (شماره هماهنگ)

قطر و طول استوانه با تبعیت از فرمول زیر تنظیم می شود:

(۱۲)

$$f_U \cdot d \leq 170$$

d: قطر داخلی استوانه بر حسب متر  
F<sub>U</sub>: حد فرکانسی بالا

فشار حداکثر در موج ایستا وقتی است که P<sub>r</sub> و P<sub>i</sub> در یک فاز هستند:

(۱)

$$|P_{\max}| = |P_i|(1 + |r|)$$

P<sub>i</sub>: فشار موج برخوردی  
P<sub>max</sub>: فشار بیشینه موج بازتابی  
r: فاکتور انعکاس فشار صوت

فشار حداقل در موج ایستا وقتی ایجاد می گردد که P<sub>r</sub> و P<sub>i</sub> در فاز مخالف هستند:

(۲)

$$|P_{\min}| = |P_r|(1 - |r|)$$

تنظیم روابط مربوط به هم فاز بودن یا تقابل فاز با تنظیم طول استوانه متناسب با فرکانس مورد نظر میسر می باشد. لذا نسبت موج ایستا (S) از رابطه زیر به دست می آید:

(۳)

$$S = \frac{|P_{\max}|}{|P_{\min}|}$$

P<sub>max</sub>: حداکثر فشار صوت  
P<sub>min</sub>: حداقل فشار صوت

(۴)

$$S = \frac{1 + |r|}{1 - |r|}$$

(۵)

$$|r| = \frac{S - 1}{S + 1}$$

در نهایت، ضریب جذب صوتی نمونه در فرکانس موج صوتی تولید شده در لوله امپدانس با استفاده از رابطه زیر تعیین می گردد:

(۶)

$$\alpha = 1 - |r|^2$$

در استوانه امپدانس عملاً برای اندازه گیری مقادیر دامنه از تراز فشار به جای کمیت فشار استفاده می گردد. از آنجایی که تراز فشار صوت دارای مقیاس لگاریتمی (dB) می باشد، می توان با داشتن اختلاف بین تراز فشار حداکثر و تراز فشار حداقل (ΔL) میزان ضریب جذب صوتی را بصورت متناظر بدست آورد (۸):

(۷)

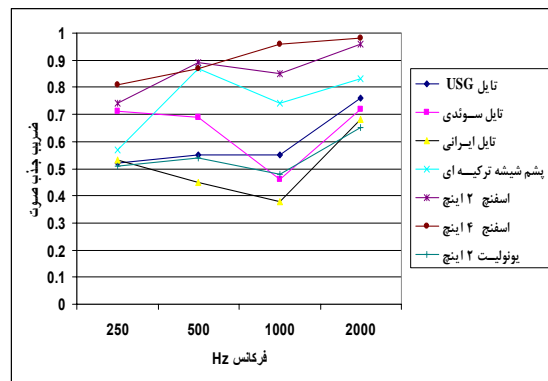
$$S = 10^{\Delta L/20}$$

## نتایج:

پس از ساخت و تأیید کارایی دستگاه مطابق با استاندارد مربوطه، ۲۳ نمونه از مصالح جاذب صوت متداول و موجود در داخل کشور مورد آزمایش قرار گرفت. تمامی آزمایشات اصلی در آزمایشگاه آکوستیک دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی همدان انجام گردیده است و اثر عوامل مداخله کننده به حداقل رسانده شده است.

دستگاه ساخته شده در این مطالعه شامل لوله آربستی به قطر ۱۰۰ میلیمتر، یک مولد صدای خالص با فرکانس معین، میکروفون و تراز سنج صوت است که قابلیت تست انواع مصالح جاذب صوت را دارد.

نتایج آزمایشات مربوط به اندازه گیری ضریب جذب صوتی گروه مصالح مورد بررسی که شامل مصالح آکوستیکی موجود در بازار تهران در فرکانسهای یک اکتاو باند در محدوده ۲۵۰ تا ۲۰۰۰ هرتز در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳: ضرایب تعیین شده جذب صوتی مصالح جاذب صوت مورد آزمایش

جهت تعیین میزان تکرار پذیری نتایج، برای همه ۲۳ نمونه مصالح آکوستیکی مورد استفاده در این تحقیق در چهار فرکانس ۲۵۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ هرتز، آزمایشات سه مرتبه تکرار شد. مقادیر متوسط انحراف معیار به عنوان یک شاخص پراکندگی مهم در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱: مقادیر متوسط انحراف معیار

مقادیر ضریب جذب اندازه گیری شده مصالح مورد بررسی	فرکانس (هرتز)			
	۲۰۰۰	۱۰۰۰	۵۰۰	۲۵۰
	$3 \times 10^{-2}$	$2/8 \times 10^{-2}$	$1/2 \times 10^{-2}$	$1/1 \times 10^{-2}$

## بحث:

همانگونه که در بخشهای پیشین ذکر گردید اصول طراحی دستگاه بر مبنای استفاده از نتایج مطالعات سایر محققین و استاندارد ذکر شده انجام گردید که شامل تعیین مناسبترین طول و قطر و خصوصیات مهم بوده است لیکن برای دستیابی به نتایج قابل قبول مطابق آنچه در استاندارد آمده است آزمایشات مقدماتی متعددی انجام گردید که ذکر آن در این مقاله نمی گنجد لیکن پس از انجام آزمایشات مقدماتی بهترین مصالح لوله آربستی سنگین تشخیص داده شد و انجام آزمایشات و مطابقت با دستورات مرجع در استاندارد مرتبط و ۳ بار تکرار آزمایشات برای نمونه ها اطمینان کافی را برای قابلیت دستگاه ایجاد نمود و دستیابی به فناوری ساخت این وسیله فراهم گردید. نتایج ارائه شده در مورد ضرایب جذب صوتی مواد در کتب و مقالات موجود، برای یک ماده ضرایب مختلفی گزارش کرده اند، که این ناشی از متفاوت بودن نوع ماده از نظر ساختاری است و همچنین ذکر این نکته که در داخل کشور مصالح مورد استفاده بعنوان جاذب صوت فاقد شناسنامه معتبری می باشند، در نتیجه نمی توان بطور قطعی ضرایب بدست آمده از استوانه امیدانس طراحی شده را با ضرایب کتب مرجع یا مقالات مقایسه کرد. لیکن تشابه نتایج برای مصالح می تواند دلیل قانع کننده ای برای تأیید صحت نتایج این مطالعه باشد لیکن تکرار و تنوع آزمایشات این تحقیق برای نزدیک نمودن نتایج در مصالح مختلف مشابه با سایر مطالعات بوده است.

مسئله حائز اهمیت بعدی این است که ضرایب جذبی که بدست آمده، ضریب جذب برخورد نرمال است، در حالیکه در اکثر منابع و مطالعات دیگر، ضریب جذب آماری آورده شده است. این بدان معنی است که اگرچه با استفاده از استوانه امیدانس بطور مستقیم ضریب جذب برخورد نرمال تعیین می شود، اما عملاً صدا بطور نرمال با سطح جاذب مورد آزمایش برخورد نمی کند. بنابراین برای محاسبه یک محدوده وسیعی از زاویه های برخوردی، ضریب کاربردی که معمولاً ضریب جذب آماری ( $\alpha_{Stat}$ )، بکار می رود. این ضریب را می توان با استفاده از لوله امیدانس و تکرار آزمایشات در سطح بالا برای هر نمونه مورد آزمایش بدست آورد (۱۳).

تحقیقات انجام گرفته در دسترس در مورد دستگاههای اندازه گیری امیدانس و ضریب جذب صوتی مواد اکثراً بر مبنای روش شدت (تابع انتقالی) بر اساس

طور مثال در دستگاه طراحی شده توسط پرودی، مقادیر متوسط انحراف معیارها کوچکتر از  $3/9 \times 10^{-2}$  گزارش شده است (۸). نتایج بدست آمده از این مطالعه نشان می‌دهند که موارد زیر می‌تواند در آزمایشات ایجاد خطا نماید:

- ۱- تضعیف بیش از حد در استوانه امیدانس بدلیل زبری و تخلخل سطح داخلی آن، دیواره‌های مرتعش و نشستی صدا.
- ۲- تضعیف بوسیله لوله پروب.
- ۳- تداخل صدای هواپرد یا پیکری (Structure-borne) به دلیل عایق بندی نامناسب بلندگو و ارتعاش لوله پروب.
- ۴- لقی اجزاء سیستم و برخورد آنها شامل لوله پروب و ساپورت‌ها
- ۵- رنج خروجی محدود بلندگو، آمپلی فایر و میکروفن.

### نتیجه نهایی:

بررسی‌های انجام شده در حد دسترسی نویسندگان بیانگر این موضوع است که مطالعه حاضر اولین تحقیق منسجم در کشور برای طراحی و ساخت استوانه امیدانس جهت سنجش ضریب جذب صوتی مصالح بوده است که مبنای آن تجهیزات و مدار اندازه‌گیری ساده با استفاده از روش فشار بوده است که فناوری ساخت و انجام آزمایشات با حداقل خطا در این پژوهش محقق گردیده است. در مقایسه با مطالعات سایر محققین که اکثراً از روش شدت و استفاده از تجهیزات پیشرفته انجام شده است، این فناوری می‌تواند نیازهای کشور را در زمینه آزمایش و تهیه شناسنامه برای مصالح تولیدی جذب صوت برآورده نماید. علی‌رغم صعوبت و طولانی بودن مراحل انجام کار و صرف زمان بسیار زیاد برای انجام آزمایشات، اهداف تحقیق برای دستیابی به فناوری و ساخت دستگاهی برای آزمایش ضریب جذب مصالح آکوستیکی محقق گردیده است و با استفاده از دستاورد‌های این پژوهش می‌توان برای کلیه مصالح جذب صوت تولید داخل یا مصالح فاقد شناسنامه، در محیط آزمایشگاهی با استفاده از لوله امیدانس طراحی شده، آزمایشات را انجام داد و ضرایب جذب صوتی آنها را تعیین نمود.

### منابع:

۱. گل محمدی رستم. مهندسی صدا و ارتعاش. ویرایش ۳، همدان: انتشارات دانشجو، ۱۳۸۶.
2. International standard organization, Acoustics- Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes-

ISO 10534-2 و ASTM 1050 90 صورت گرفته است. تنها گزارش در دسترس که براساس روش فشار (روش نسبت موج ایستا) بر اساس ISO 10534-1 انجام شده است، مربوط به راسل (۴) می‌باشد که فقط برای ۵ ماده جاذب صوت، ضرایب جذب آورده شده است و هیچگونه نتیجه‌گیری در مورد میزان دقت و صحت روش فشار با توجه به ۵ نمونه آزمایش شده، آورده نشده است. مقایسه نتایج حاصل از آزمایشات روی مصالح مشابه در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است با سایر تحقیقات انجام گرفته - با استفاده از روش شدت بر مبنای تابع انتقالی - بیانگر این نکته است که، روشهای استوانه امیدانس از دقت و صحت مطلوبی جهت اندازه‌گیری ضریب جذب صوتی مواد برخوردار می‌باشد (۱۱-۲).

قابل ذکر است که روش شدت (تابع انتقالی) نسبت به روش فشار (نسبت موج ایستا) از دقت بالاتری برخوردار می‌باشد و انجام آزمایشات از نظر زمانی سریعتر انجام می‌شود. ولی نیاز به تجهیزات پیشرفته تری دارد در حالیکه هدف از اجرای تحقیق حاضر استفاده از یک روش بر مبنای تجهیزات در دسترس و نسبتاً آسان جهت اندازه‌گیری ضریب جذب صوتی مواد بوده است.

در این مطالعه معلوم گردید که لوله‌ای از جنس آلزبت با ضخامت بالا، به قطر ۱۰۰ میلی‌متر و طول ۱/۷ متر در گستره فرکانسی  $500 < \alpha < 2000$  هرتز نتایج قابل قبولی خواهد داشت. برای محدوده‌های کوچکتر از ۵۰۰ هرتز نیاز به لوله‌ای با طول بزرگتر و برای رنج فرکانسی بالاتر از ۲۰۰۰ نیاز به لوله‌ای با طول کمتر و قطر کوچکتر خواهد بود. موضوع قابل اهمیت دیگر، نحوه قرار دادن نمونه در دهانه استوانه امیدانس است. برای کم کردن میزان خطا باید ابعاد نمونه دقیقاً برابر با قطر داخلی استوانه امیدانس باشد و نگهدارنده نمونه باید هیچ گونه نشستی صدا نداشته باشد (۲). در آزمایشات انجام شده، جهت درزگیری نشستی‌ها از خمیر بازی استفاده شد.

جهت تعیین میزان تکرار پذیری آزمایشات (قابلیت اطمینان)، برای همه نمونه‌های مورد بررسی، آزمایشات سه مرتبه تکرار شد. نتایج نشان داد که انحراف معیارها در فرکانس‌های آزمایش شده (۲۵۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ هرتز) کاملاً رضایت بخش می‌باشد، زیرا مقادیر متوسط انحراف معیارها کوچکتر از  $3 \times 10^{-2}$  است که در مقایسه با مطالعه مشابه نتایج مناسبی را داشته است. به

- Part 1: Method using standing wave ratio, ISO 10534- 1:1996.
3. International standard organization, Acoustics-Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes-Part 2: Transfer-Function method", ISO 10534-2, 1998.
  4. Russel DA. Absorption coefficient and impedance, Science and mathematics department, GMI engineering and management institute flint, MI, 48504, 1997.
  5. Angelo F, Patrizio F. Standing wave tube techniques for measuring the normal incidence absorption coefficient, comparison of different experimental setups, Dipart, Di Ing, Industriale, Università di Parma, Via delle Scienze, 43100 Parma, Italy, (1994).
  6. Angelo F, Anna T. Measurement of the sound absorption coefficient of materials with a new sound intensity technique. Ipartimento ingegneria industriale. University of parma - Viale delle scienze, 3100 Parma, Italy, 1997.
  7. Dewei P, Shih-Fu L. Microphone-free measurement of acoustic absorption coefficient of materials using standing wave tube, Center for mechanics of micro systems, school of technical & production engineering, 22 March 2005.
  8. Prodi N, Pompoli F, Bonfiglio P. A new apparatus for measuring the absorption coefficient for normal incidence, dipartimento di ingegneria, università di ferrara, Italia, Vol 25, Pt4, 2003.
  9. Yang L, Finn J, Measurement of absorption with a p-u sound intensity probe in an impedance tube (L). J Acoustic Soc Am 2005 Oct; 118(4) : 2117-2120.
  10. Robert TD, Bargainer JD. Acoustic impedance tube, Department of engineering Baylor university (report) ,Waco, Texas, 1998.
  11. Ryu Y. The acoustic impedance measurement system using two microphones, Bruel & Kjaer Co, (report), Denmark.
  12. International standard organization, Acoustics-measurement of sound absorption in a reverberation room' ISO 354:2003,
  13. Bell LH, Bell DH. Industrial noise control, Second edition, New York, Marcel Dekkel, 1994.