

بررسی تاثیر زاویه رأس هرم بر ضریب جذب صوتی ورق سوراخ دار با هندسه هرمی

علی خوانین^{*}، مهدی صادقی مالواحدی^۱، رمضان میرزایی^۲، علی صفری^۳

۱. گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده علوم پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس

۲. گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی زاهدان

۳. گروه بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی قزوین

چکیده

تقریباً در تمام صنایع، نوافه صوتی یکی از عوامل زیان‌آور برای نیروی انسانی است. جهت مهار نوافه شیوه‌های متفاوتی به کار گرفته شده‌اند. جذب صوتی غیرعامل، یکی از این شیوه‌ها می‌باشد. البته، برای جذب امواج صوتی می‌توان از جاذب‌های متفاوتی استفاده نمود. در سال‌های اخیر، استفاده از ورق‌های سوراخ دار بهمنظور جذب صدا در صنایع و هم‌چنین در ساختمان‌سازی مورد توجه قرار گرفته است. عموماً ورق‌های سوراخ دار به همراه یک ماده جاذب متخلخل و یا الیافی مانند پشم سنگ به کار می‌روند. متغیرهای اثرگذار بر میزان جذب صدا در یک ورق مسطح عبارتند از: ضخامت ورق، قطر سوراخ، نسبت سوراخ به سطح و فاصله ورق از منبع صلب پشتی. در هندسه هرمی، پارامتر جدیدی تحت عنوان زاویه رأس مطرح می‌شود. در این راستا، یکی از اهداف این مطالعه، بررسی تاثیر متغیر فوق بر مقدار ضریب جذب صوتی در این دسته از جاذب‌ها می‌باشد. در این تحقیق، هندسه هرمی از ورق‌های سوراخ دار ساخته شده و میزان ضریب جذب صوتی آن بدون حضور ماده جاذب ثانوی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. نمونه‌های ساخته شده در سه زاویه رأس ۲۹، ۳۶ و ۴۴ درجه، با استفاده از لوله مقاومت ظاهری صوتی دو میکروفون بی‌اس‌دبليوای با تفکیک‌پذیری ۱۰ هرتز و براساس استاندارد ایزو ۲۱۰۵۳۴ مورد آزمون قرار گرفتند. مقایسه نتایج در بازه بسأمدی ۴۰۰ تا ۲۵۰۰ هرتز و آزمون‌های آماری توصیفی با استفاده از نرم‌افزار ای‌پی‌اس‌اس ۱۶ انجام شد. بالاترین میانه جذب در زاویه رأس ۳۶ درجه، در بسأمد ۱۰۰۰ هرتز و به میزان ۸۹/۵ درصد، در زاویه رأس ۲۹ درجه، در بسأمد ۹۰۰ هرتز، ۹۲ درصد و در زاویه رأس ۴۴ درجه، در بسأمد ۸۰۰ هرتز، ۹۳ درصد بود. نتایج نشان دادند که با کاهش زاویه رأس هرم و البته با مساحت قاعده ثابت و هم‌چنین ضخامت و نسبت سوراخ به سطح ثابت، ضریب جذب در بسأمد‌های باند اکتاو بهویژه در بسأمد‌های کمتر از ۱۰۰۰ هرتز افزایش می‌یابد. علاوه بر این، قله جذب به سمت بسأمد‌های پایین تغییر مکان می‌دهد. با توجه به نتایج به دست آمده، می‌توان از این هندسه (بدون وجود مواد جاذب ثانوی)، جذب قابل توجهی را در یک بسأمد خاص و به ویژه بسأمد‌های کمتر از ۱۰۰۰ هرتز ایجاد نمود.

کلیدواژه‌ها: ورق سوراخ دار هرمی، ضریب جذب، نوافه، زاویه رأس هرم.

جدیدی برای پیش‌بینی و اندازه‌گیری ویژگی‌های مواد جاذب ارائه شده‌اند. برای مهار^۱ صدای فضاهای داخل ساختمان، تاکید بر روی جذب انرژی صوتی می‌باشد [۱]. روش‌های متعددی برای افزایش ضریب جذب سطوح داخلی معرفی شده‌اند. برای نمونه می‌توان به کاربرد مبلمان، استفاده از پرده‌های پرچین و استفاده از فرش برای محیط‌های مسکونی [۲] و بهره‌گیری از فوم‌های پلی‌یورتان^۲، جاذب‌های حاوی الیاف معدنی، سفال‌های

۱. مقدمه

از زمان یافته‌های معماری توسط سابین^۳، مطالعات قابل توجهی بر روی جذب سطوح انجام شده است. در طی این دوره، مطالعات آزمایشگاهی برای تعیین و جدول‌بندی ضرایب جذب صوتی و هم‌چنین چگونگی طراحی و دست‌یابی به مواد جاذب صورت گرفته‌اند. این روند هم‌چنان ادامه دارد و در طی دهه‌های اخیر روش‌های ابتکاری زیادی برای طراحی جاذب‌ها تدوین و راههای

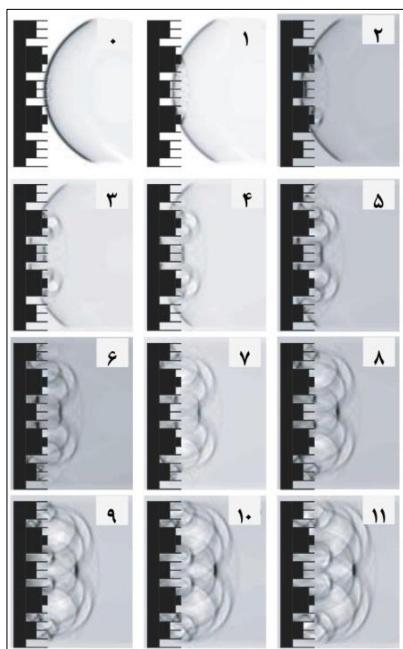
² Control

³ Polyurethane foams

* نویسنده پاسخگو: khavanin@modares.ac.ir

¹ Sabin

الگوی افدى تى دى^۶ محاسبه شده‌اند را نشان می‌دهد [۱]. این شرایط موجب فراهم شدن ضریب جذب نسبتاً پایینی خواهد شد. برای افزایش میزان جذب به کمک هندسه سطحی، تحقیقات متعددی صورت گرفته‌اند [۱، ۶-۸]. یکی از این تحقیقات منجر به ایجاد نوعی از جاذب سطحی به نام پخش کننده‌های شرودر^۷ شد. شکل ۲ اثر استفاده از این پخش کننده را نشان می‌دهد. جبهه موج انعکاسی بسیار پیچیده‌تر از شکل ۱ است. با مقایسه کادرهای مختلف از شکل‌های ۱ و ۲، مشخص می‌شود که چرا این پیچیدگی به وجود می‌آید. می‌توان دید که موج صوتی برای برخورد و انعکاس از سطح نیاز به یک بازۀ زمانی دارد؛ اما با توجه به شکل سطح، در برخورد و بازتاب، یک تاخیر زمانی رخ داده و موج برخورده تبدیل به امواج کوچکی می‌شود که با تأخیر، از سطح منعکس می‌شوند. این تأخیر زمانی باعث تداخل امواج بازتابی شده و این شکل پیچیده از بازتاب را ایجاد می‌کند. در چنین شرایطی، شنونده، موج صوتی را در بازه زمانی طولانی‌تری نسبت به موج برخورده می‌شنود و این منجر به کاهش شدت صدای دریافتی خواهد شد [۱].



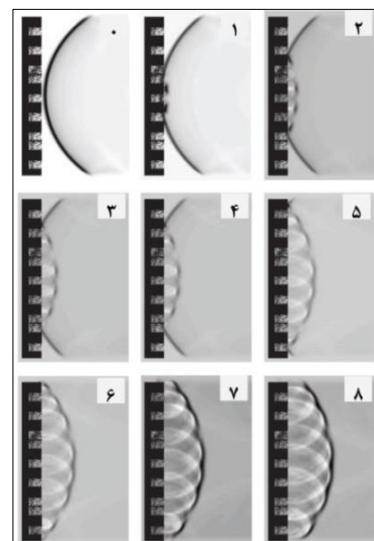
شکل ۲ امواج استوانه‌ای بازتابی از یک پخش کننده شرودر که با استفاده از الگوی افدى تى دى محاسبه شده‌اند. دیوارهای تیره با استفاده از مواد جاذب پوشیده شده‌اند [۱].

⁶ FDTD; Finite Difference Time Domain

⁷ Schroeder diffusers

صوتی، مواد مرکب^۱ و مواد پلیمری برای نصب در سطوح داخلی و سقف [۴-۳] و همچنین، استفاده از صداخه‌کن‌ها^۲ در سامانه‌های تهويه اشاره نمود [۱، ۵-۶]. در سال‌های اخیر، برای جذب صدا در مهندسی شهری و صنایع حمل و نقل، توجه خاصی به ورق‌های سوراخ دار^۳ شده است [۷]. از این جاذب‌ها در صنایع غذایی، طراحی صداخه‌کن‌ها، پانل‌های^۴ جاذب، سقف‌های کاذب، اتومبیل‌سازی و طراحی داخلی ساختمان استفاده می‌شود [۲].

در حال حاضر، برای برخی از اهداف مهار آلودگی صوتی، از ورق‌های سوراخ دار به عنوان جاذب سطحی استفاده می‌شود که دارای سطح تخت هستند. این ویژگی ظاهری، دارای کمترین میزان اثربخشی در پخش صدا می‌باشد، چرا که در استفاده از ورق‌های سوراخ دار تخت، با توجه به ویژگی‌های ورق، بخشی از امواج صوتی در محل سوراخ‌ها جذب و میرا شده؛ بخشی هم‌سو با هم، انعکاس می‌یابند؛ و بخش ناچیزی هم در برخورد به سطوح داخلی لبه سوراخ‌ها حالت پخشی پیدا می‌کند. شکل ۱ امواج استوانه‌ای بازتابی از یک سطح پیوندی^۵ که با استفاده از



شکل ۱ امواج استوانه‌ای بازتابی از یک سطح پیوندی که با استفاده از الگوی افدى تى دى محاسبه شده‌اند. دیوارهای تیره با استفاده از مواد جاذب پوشیده شده‌اند [۱].

¹ Composite materials

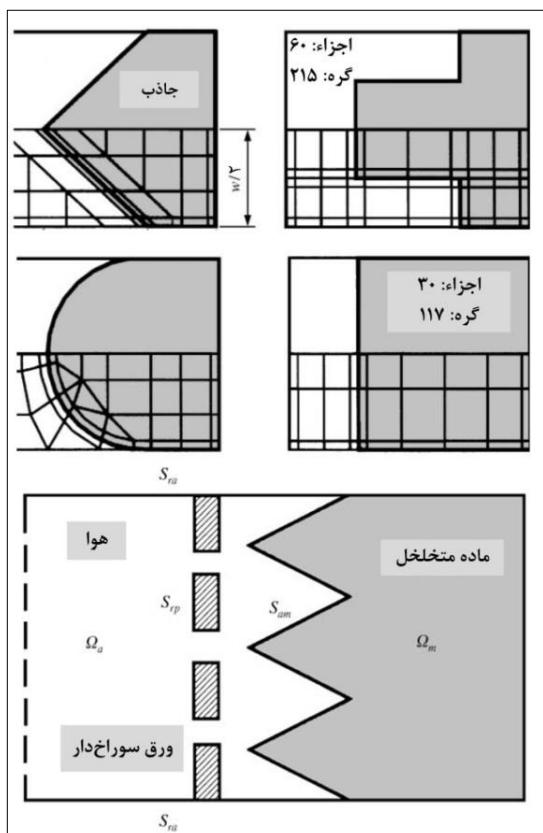
² Silencer

³ Perforated sheet

⁴ Panels

⁵ Hybrid

۲-۱. جذب صدا در ورق‌های سوراخ دار در سال ۲۰۰۰، ون هووا چن و همکاران، اثر جذب صدای مواد جاذب با شکل سطوح متفاوت اما با رویه ورق سوراخ دار را به دو روش تجربی و عددی مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق، چهار هندسه متفاوت برای سطح ماده جاذب به صورت مسطح، مکعب، نیم‌دایره محدب و مثلث بررسی شد (شکل ۳). نتایج نشان داد که هندسه‌های مثلثی و نیم‌دایره محدب در بسیامدهای زیر ۳۰۰۰ هرتز عملکرد بهتری دارند، اما در بسیامدهای بالای ۳۰۰۰ هرتز، دو هندسه دیگر (مسطح و مکعب) دارای جذب بهتری هستند. استفاده از یک ورق سوراخ دار بر روی مواد جاذب در بسیامد ۷۰۰ هرتز و کمتر از آن باعث بهبود جذب و در بسیامدهای بالاتر باعث کاهش جذب می‌شود [۱۷].



شکل ۳ نمایی مواد جاذب با رویه ورق سوراخ دار تخت در داخل لوله مقاومت ظاهری صوتی [۱۷].

دریز و همکاران در سال ۲۰۰۵، در دانشگاه فنی میشیگان اتفاقی نیمه جاذب را با استفاده از کف پلی‌یورتان به‌شکل

استفاده از هندسه هرمی برای افزایش ضریب جذب جاذب‌های اسفنجی یکی از اقدامات مؤثری است که استفاده از آن در اتفاق‌های بی‌پژواک^۱ و نیمه بی‌پژواک^۲ بسیار رایج است [۱۱-۱۰]. مشکل این جاذب‌ها عدم مقاومت در برابر حرارت و ایجاد گازهای سمی به هنگام بروز حريق می‌باشد. البته جاذب‌های فوق مقاومت مکانیکی بسیار پایینی دارند و در ابعاد بزرگ توان حفظ حالت ایستای^۳ هرم یا گوه را در موقعیت افقی ندارند.

هندسه سطحی جاذب، اثر قابل توجهی در میزان جذب خواهد داشت. از آنجایی که زاویه برخورد امواج صوتی بر میزان جذب مؤثر است [۲۰]، تغییر هندسه سطحی می‌تواند زاویه برخورد را تغییر داده و این تغییر زاویه می‌تواند باعث بهبود ضریب جذب شود.

۱-۱. کاربردهای ورق‌های سوراخ دار

ورق‌های سوراخ دار کاربردهای متنوعی دارند که از این جمله می‌توان به استفاده از آن‌ها در صنایع اتومبیل‌سازی، اهداف صوتی، معماری، طراحی داخلی، تابلوهای نمایش، تولیدات صنعتی، کف‌پوش‌های ایمنی، کشاورزی، حمل و نقل و مهار آلودگی اشاره نمود [۱۲]. اخیراً، به‌طور گستردگی از ورق‌های ریز-سوراخ دار با ابعاد بسیار کوچک، معروف به ورق‌های ریز-سوراخ دار^۴، در جذب صدا و برای سطوح داخلی ساختمان‌ها و همچنین سامانه‌های صدای صدای خفه کن استفاده شده است [۱۳]. از سامانه‌های صدای خفه کن به‌طور معمول در مهار صدای سامانه‌های تهیه صنعتی و مطبوع، و نیز مهار خروجی‌های پرفشار در صنعت و اگزو-اتومبیل‌ها و موتورهای درون‌سوز استفاده می‌شود [۱۴-۱۵، ۱۶]. از ورق‌های ریز-سوراخ دار به‌نهایی و بدون مواد جاذب، برای جذب صدایی با بسیامدهای میانه و بسیامدهای بالا استفاده می‌گردد. علاوه بر این، برای گسترش دامنه جذب، از دو لایه ورق سوراخ دار با یک فاصله هوایی در میان آن‌ها و یک دیواره صلب در پشت آن‌ها استفاده می‌شود [۱۶].

¹ Anechoic

² Semi anechoic

³ Static

⁴ Micro-perforated sheet

ساخت، با توجه به مطالعات انجام شده [۱۱] و با الگوگیری از نمونه‌های مشابه و البته با مدنظر قرار دادن محدودیت ابعادی مربوط به قطر لوله مقاومت‌ظاهری^۴ (۶۰ میلی‌متر برای دامنه بسامدی ۴۰۰ تا ۲۵۰۰ هرتز)، ابعاد میلی‌متر برای سه زاویه رأس، ۳۶، ۲۹ و ۲۴ درجه نمونه‌های هرمی برای سه زاویه رأس ۴۰۰، ۳۶، ۲۹ و ۲۴ درجه تعیین و نقشه گستردۀ هرم تهیه شد. سپس، ورق‌های سوراخ دار از جنس فولاد زنگنزن براساس نقشه‌های دو بعدی و با دستگاه سی‌ان‌سی^۵ لیزری با دقت ۰/۱ میلی‌متر برش داده شدند. در ادامه، با استفاده از یک قالب فلزی که برای این منظور تهیه شده بود، ورق‌ها خم شده و هندسه هرمی ایجاد گردید. از آنجایی که در مرحله ساخت و بهویژه خم‌کردن ورق و ایجاد هندسه نهایی، امکان خطاهای جزئی وجود دارد، از هر هرم با زاویه رأس مشخص، سه نمونه ساخته شد تا در مرحله آزمون آزمایشگاهی، خطای ناشی از ساخت، به حداقل ممکن کاهش یابد. تصویر مربوط به نمونه‌های برش خورده و خمشده در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است.



شکل ۴ برش گستردۀ ورق سوراخ دار و نمای خمشده بهصورت هندسه هرمی.



شکل ۵ سه نمونه از هر زاویه رأس جهت کاهش اثر خطاهای جزئی در ساخت.

در نمونه‌های آزمایشگاهی، برای رسیدن به یک مقدار میانگین از ضریب جذب برای یک ترتیب ثابت از این پارامترها (ضخامت ورق، قطر سوراخ، نسبت سوراخ به

هرمی طراحی کرده و ساختند. در این پژوهش، از هرم‌هایی با طول ۳۶ اینچ و ابعاد قاعده‌ی ۱۲ اینچ استفاده گردید. طول هرم براساس یک چهارم طول موج محاسبه شده و تأکید این تحقیق بر جذب امواج صوتی با بسامد ۱۰۰ هرتز بود [۱۸]. در سال ۲۰۰۶، فرشنر و همکاران نشان دادند که استفاده از ورق‌های سوراخ دار به صورت دولایه می‌تواند صدا را در باند پهن‌تری جذب کند و ایجاد فاصله در پشت این ساختار دولایه، باعث تبدیل سطوح انعکاسی به سطوح جذبی می‌شود [۷]. در سال ۲۰۰۶، تحقیقاتی توسط تسای بر روی هندسه هرمی از فوم پلی‌یورتان انجام شد و ضریب جذب قائم برای زاویه رأس ۲۱، ۲۴، ۳۶، ۴۷، ۵۶، ۶۴ و ۱۰۷ درجه مورد آزمون قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان داد که زاویه رأس ۲۹ درجه دارای جذب در باند گستردۀ تری می‌باشد [۱۱]. در سال ۲۰۰۸، قبرززاده و همکاران با هدف ساخت جاذب‌های صوتی بر پایه بازیافت ترکیبی پلی‌اتیلن ترفتالات^۱ و پلی‌استایرن^۲، نشان دادند که شبکه‌های^۳ کوچک‌تر (۱ تا ۵ میلی‌متر) نسبت به شبکه‌های درشت‌تر (۶ تا ۲۰ میلی‌متر) در بسامدهای ۵۰، ۶۳۰، ۱۲۵۰ و ۱۶۰۰ هرتز دارای جذب بیش‌تری هستند. هدف کاربردی از انجام این طرح، ایجاد یک جاذب پلیمری برای مهار آلوگی صوتی بود که از نظر اقتصادی نیز قابل توجه باشد. در این پژوهش، مواردی از جمله مقاومت فیزیکی و مقاومت در برابر رطوبت مدنظر قرار گرفته شد [۱۹]. در سال ۲۰۱۱، رویز و همکاران پژوهشی را بر روی پانل‌های ریزسوراخ دار چند لایه انجام دادند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که استفاده از چند لایه ورق سوراخ دار می‌تواند میزان جذب را در بازه بسامدی گستردۀ تری افزایش دهد. همچنین، در این تحقیق، به قطر سوراخ، ضخامت ورق، فاصله سوراخ‌ها از یکدیگر و نسبت سوراخ به سطح به عنوان عوامل مؤثر بر میزان جذب اشاره شد [۲۰].

۲. مواد و روش‌ها

تحقیق حاضر، در سه مرحله ساخت نمونه، انجام آزمون آزمایشگاهی و تحلیل آماری انجام شده است. در مرحله

¹ $(C_{10}H_8O_4)_n$

² $(C_8H_8)_n$

³ Meshes

از آن جایی که یکاها مربوط به d و s یکسان و از جنس طول هستند، نسبت سوراخ به سطح بر حسب درصد بیان می‌شود.

۲-۲. تنظیم دستگاه اندازه‌گیری ضریب جذب و انجام آزمون تجربی

در این مرحله لوله مقاومت‌ظاهری صوتی اس‌دابلیو^۱ ۲۶۰ ساخت شرکت بی‌اس‌دابلیوای^۲ چین و مطابق با استانداردهای ایزو ۲-۱۰۵۳۴^۳ و ای‌اس‌تی‌ام ۱۰۵۰-۰۸^۴، تنظیم و برای اندازه‌گیری ضریب جذب آمده شد (شکل ۷). تنظیمات این سامانه شامل، مراحل سرمه‌بندی^۵ بخش‌های مختلف لوله مقاومت‌ظاهری و سامانه پردازنده و هم‌چنین، اتصال بخش پردازنده به لوله مقاومت‌ظاهری و رایانه شخصی (که حامل نرم‌افزار مربوط به دستگاه است) می‌باشد. در نرم‌افزار مربوط به لوله مقاومت‌ظاهری صوتی، نوع آزمون، کالیبراسیون میکروفون‌ها، انتخاب دامنه بس‌آمدی، قطر لوله و ترتیب نصب میکروفون‌ها تعیین می‌شود. پس از انجام تنظیمات دستگاه، آزمون‌های تجربی با تفکیک‌پذیری ۱۰ هرتز انجام می‌پذیرند.



شکل ۷ لوله مقاومت‌ظاهری مورد استفاده در آزمون آزمایشگاهی.

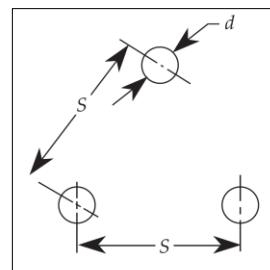
روش کار با دستگاه به این صورت است که پس از انجام تنظیمات اولیه، منبع صوتی لوله مقاومت‌ظاهری به مدت ۱۰ دقیقه روش نگهدارشده شده تا عملکرد آن ثابت شود. سپس، مطابق با دستورالعمل دستگاه، پس از شروع آزمون، زمان لازم داده شده تا منحنی نمایش توسط نرم‌افزار به صافترین حالت ممکن برسد و پس از آن

سطح)، سه نمونه با یک ترتیب ثابت از پارامترهای مذکور ساخته شدند (جدول ۱).

جدول ۱ مشخصات سه دسته هرم ساخته شده از ورق سوراخ دار.

| زاویه رأس (درجه) | قطر قاعده (میلی‌متر) | نسبت سوراخ به سطح (درصد) | ضخامت ورق (میلی‌متر) | قطر سوراخ (میلی‌متر) |
|------------------|----------------------|--------------------------|----------------------|----------------------|
| ۳۶ | ۶۰ | ۲۲,۶۵ | ۰,۳ | ۰,۵ |
| ۲۹ | ۶۰ | ۲۲,۶۵ | ۰,۳ | ۰,۵ |
| ۲۴ | ۶۰ | ۲۲,۶۵ | ۰,۳ | ۰,۵ |

در مطالعه حاضر، از حالت مثلثی ارائه شده در شکل ۶ استفاده شد. علت استفاده از این حالت، سهولت ساخت آن می‌باشد.



شکل ۶ رابطه مربوط به محاسبه نسبت سوراخ به سطح با توجه به چیدمان سوراخ بر روی ورق [۶].

۲-۱. محاسبه نسبت سوراخ به سطح

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، نسبت سوراخ به سطح در یک ورق سوراخ دار، یکی از پارامترهای اثرگذار بر میزان جذب صوتی است. در این مطالعه، پارامتر فوق با توجه به نحوه چینش سوراخ‌ها در شکل ۶ بر روی ورق فولادی با ضخامت $0,3$ میلی‌متر از رابطه ۱ محاسبه شد:

$$\frac{90}{\left(\pi \left(\frac{d}{s} \right)^2 \right)} = \text{لخلخت \%} \quad (1)$$

در این رابطه، s فاصله بین مرکز دو سوراخ در محل رؤس یک مثلث و d قطر سوراخ می‌باشد.

پس از انجام محاسبه، نسبت سوراخ به سطح ورق برابر است با:

$$\frac{90}{\left[\pi \left(\frac{0,5}{1} \right)^2 \right]} = 22,65 \text{ لخلخت \%} \quad (2)$$

¹ SW260

² BSWA

³ ISO 10534-2

⁴ ASTM 1050-08

⁵ Montage

جدول ۳ شاخص‌های توصیفی ضرایب جذب در بازه بسأمدی ۴۰۰ تا ۲۵۰۰ هرتز.

| زاویه رأس (درجه) | شاخص‌های توصیفی | بسأمد | ۳۶ | ۲۹ | ۲۴ |
|------------------|-----------------|-------|----|--------------|----|
| میانه | آی‌کیوآر* | ۴۰۰ | | ضریب جذب (a) | |
| میانه | آی‌کیوآر* | ۵۰۰ | | | |
| میانه | آی‌کیوآر | ۶۳۰ | | | |
| میانه | آی‌کیوآر | ۸۰۰ | | | |
| میانه | آی‌کیوآر | ۱۰۰۰ | | | |
| میانه | آی‌کیوآر | ۱۲۵۰ | | | |
| میانه | آی‌کیوآر | ۱۶۰۰ | | | |
| میانه | آی‌کیوآر | ۲۰۰۰ | | | |
| میانه | آی‌کیوآر | ۲۵۰۰ | | | |

* IQR; Inter Quartile Range

شکل ۸ نشان می‌دهد که هر سه هرم در بسأمد ۱۲۵۰ هرتز تقریباً جذب یکسانی دارند. هرم با زاویه رأس ۲۹ درجه در بازه بسأمدی پهن‌تری مؤثر است (بسأمدی بین ۶۳۰ تا ۱۰۰۰ هرتز). ارقام مربوط به میانه ضریب جذب بیان‌گر آن است که زاویه رأس ۳۶ درجه در محدوده بسأمدی ۱۰۰۰ هرتز دارای جذب بهینه می‌باشد. هم‌چنین، زوایای ۲۴ و ۲۹ درجه به ترتیب جذب بهینه را در محدوده‌های بسأمدی ۸۰۰ و ۹۰۰ هرتز پوشش می‌دهند. مقادیر میانه ضریب جذب برای زوایای رأس ۲۴، ۲۹ و ۳۶ درجه در بسأمدی‌های مذکور، به ترتیب، ۸۹، ۹۲، ۹۳ و ۸۹/۵ درصد بود.

آزمون متوقف می‌شود. پس از تغییر حالت نرمافزار با استفاده از دکمه مربوطه، میکروفون‌ها را جابجا کرده و دوباره همان عملیات تکرار می‌گردد. در پایان، حاصل دو اندازه‌گیری برای یک نمونه ثبت می‌شود. تکرار هر چه بیش‌تر این اقدام، دقت نتیجه میانگین به دست‌آمده از آزمون را افزایش خواهد داد. در این راستا، حداقل تکرار برای هر نمونه سه مرتبه می‌باشد.

برای هر نمونه، عملیات اندازه‌گیری ۱۰ بار تکرار می‌شود. با توجه به این‌که برای هر زاویه رأس سه نمونه تهیه شده، ۳۰ مورد ثبت برای هر کدام بددست آمد. صدای تراگسیل یافته از منبع صوتی از نوع امواج صوتی سفید می‌باشد، بنابراین کلیه بسأمدی‌های موجود در بازه بسأمدی ۴۰۰ تا ۲۵۰۰ هرتز با تفکیک‌پذیری ۱۰ هرتز و با تراز فشار صدای ۹۵ دسی‌بل در هر آزمون، بررسی شدند. در مجموع سه دسته سه-تایی از نمونه‌ها مورد آزمون قرار گرفت. داده‌های حاصل، به نرمافزار اس‌پی‌اس‌اس^۱ منتقل شده و برای هر گروه از داده‌ها در بسأمدی ۴۰۰ تا ۲۵۰۰ هرتز، تحلیل اکتاو^۲ در بازه بسأمدی ۶۳۰ تا ۱۰۰۰ هرتز، تحلیل توصیفی^۳ انجام شد. در آزمون مورد نظر، دامنه بین چارک‌ها و میانه برای تحلیل نتایج مورد استفاده قرار گرفت.

۳. نتایج

نتایج حاصل از تحلیل داده‌های مربوط به اندازه‌گیری ضریب جذب هندسه هرمی از ورق‌های سوراخ دار با استفاده از لوله مقاومت‌ظاهری، در جداول ۲ و ۳ و نیز شکل ۸ خلاصه شده‌اند. مطابق با آن‌چه که در جدول ۳ ارائه شده، میانه ضریب جذب برای تمام بسأمدی‌ها با کاهش زاویه رأس، افزایش می‌یابد. نتایج جدول ۳ نیز به صورت نمودار در شکل ۸ نشان داده شده‌اند.

جدول ۲ میانه مقادیر ضریب جذب در کلیه بسأمدی‌ها در بازه ۴۰۰ تا ۲۵۰۰ هرتز

| زاویه رأس هرم | ۲۴ درجه | ۲۹ درجه | ۳۶ درجه |
|---------------|---------|---------|---------|
| مقدار میانه | ۰,۶۴۰۰ | ۰,۶۰۵۰ | ۰,۵۶۵۰ |

¹ SPSS

² Octave band

³ Descriptive

شرايط از چند جنبه قابل بررسی می باشد. اول اين که، با گذشت زمان و اضمحلال مواد و الیاف جاذب، ميزان ضریب جذب کاهش خواهد یافت. همچنین، با تئنهشيني غبار بر روی مواد جاذب نيز همین نتيجه حاصل می شود. علاوه بر اين، ورود الیاف جاذب به جو محیط، می تواند پیامدهای بهداشتی منفی را از جنبه تنفسی به همراه داشته باشد.

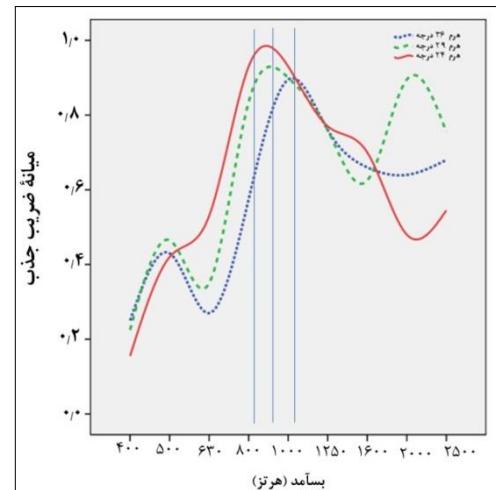
در مقایسه با مطالعه‌ای که توسط قنبرزاده [۱۹] انجام شد، مواد مورد استفاده در مطالعه مذکور، در برابر حرارت و حریق مقاوم نیستند، اگرچه در مقابل رطوبت حساسیت پایینی دارند، اما ورق سوراخ دار فولادی با هندسه هرمی علاوه بر مقاومت در برابر رطوبت، در برابر حریق و حرارت نیز دارای مقاومت بالایی می باشد.

نتایج تجربی به دست آمده از آزمون دسته هرمها با زاویه رأس ۲۹ درجه و نتایج مطالعه انجام شده توسط تساي [۱۱] با يكديگر مطابقت دارند. آنها نشان دادند که هرم ۲۹ درجه در بازه گستردۀ ترى دارای جذب صدا می باشد؛ با اين تفاوت که در مطالعه مذکور ميزان ضریب جذب در محدوده بسامد ۱۰۰۰ هرتز برای هرم پلی یورتان با زاویه ۲۹ درجه در حدود ۰/۶ بوده اما برای هرم ساخته شده از ورق سوراخ دار فولادی با همان زاویه مقدار ۰/۹۰ را نشان می دهد.

با توجه با مزاياي ذكر شده برای ورق های سوراخ دار، و به ويژه با در نظر گرفتن مقادير جذب بالا برای هندسه هرمي از ورق های سوراخ دار، در شرايطي با وجود رطوبت، احتمال حریق و دمای بالا و همچنین در صنایعی که نیاز به اتاق تمیز و البته با تجهیزات پر سروصدا بوده و استفاده از الیاف جاذب امکان پذیر نیست، استفاده از این نوع جاذب می تواند بسیار اثر بخش باشد.

۵. فهرست منابع

- [1] T.J. Cox, P. D'Antonio, "Acoustic Absorber and Diffusers, Theory, Design and Application," Second Edition, Taylor and Francis, pp. 495, 2009.
- [2] "Electro Acoustics," Available from: <http://www.e-a.ir/index.php/audio-engineering/an-overview-of-the-types-of-sound-absorbing>.
- [3] P. Jaime, "Rubber Crumb as Granular Absorptive Acoustic Material," Available



شکل ۸ مقایسه منحنی های میانه ضریب جذب نسبت به بسامد.

۴. بحث و نتیجه گیری

نتایج حاصل از مطالعه حاضر نشان داد که، با کاهش زاویه رأس هرم، قله جذب به سمت بسامدهای پایین تغییر مکان می دهد. با نگاهی به شکل ۸، دریافت می شود که ميزان جذب در بسامد ۱۰۰۰ هرتز رو به افزایش است. نتایج آماری نشان می دهند که قله جذب انرژی صوتی در بسامد ۱۰۰۰ هرتز در آزمون دسته هرمها با زاویه رأس ۳۶ درجه بیشتر از دو دسته دیگر است. همچنین، این موضوع برای بسامدهای ۹۰۰ و ۸۰۰ هرتز به ترتیب در آزمون دسته هرمها با زاویه رأس ۲۹ و ۲۴ درجه مشهود می باشد. البته، از جدول ۳ می توان این را دریافت که با کاهش زاویه رأس هرم، تقریباً در تمام بسامدها افزایش جذب رخ می دهد. این افزایش در محدوده ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ هرتز دارای بیشترین مقدار بوده و یکنواخت می باشد. اما در دیگر بسامدها این یکنواختی دیده نمی شود.

یکی از نقاط قوت مطالعه فوق، این است که آزمون این هندسه با استفاده از ورق های سوراخ دار و بدون حضور مواد جاذب (پشم سنگ^۱، الیاف شیشه^۲، فوم یا هر گونه جاذب دیگری) صورت گرفت؛ که نتایج حاصل، بیان گر ميزان جذب قبل توجهی می باشد. موضوع مذکور از این نظر حائز اهمیت است که مواد جاذب استفاده شده به همراه ورق های سوراخ دار، با گذشت زمان متلاشی شده و به صورت ذرات بسیار ریز هوابرد وارد محیط می شوند. این

¹ Rock wool

² Glass fiber

- Applied Acoustics, vol. 71, no. 5, pp. 411-417, 2010.
- [17] W.H. Chen, , F.C. Lee, D.M. Chiang, "On the acoustic absorption of porous materials with different surface shapes and perforated plates," Journal of Sound and vibration, vol. 237, no. 2, pp. 337-355, 2000.
- [18] J. Dreyer, A.S. Jangale, M.D. Rao, "Design and analysis of a hemi-anechoic chamber at Michigan Technological University," The Journal of the Acoustical Society of America vol. 118, no. 3, 2005.
- [19] Z. Ghanbarzadeh Alamdari, A. Khavanin, M. Kokabi, "Manufacturing sound absorber based on combined recycling of polyethilen terphetalat and polystyren at low and median frequencies," Journal of Aoudiology, vol. 17, no. 1, pp. 1-10, 2008.
- [20] H. Ruiz, P. Cobo, F. Jacobsen, "Optimization of multiple-layer microperforated panels by simulated annealing," Applied Acoustics, vol. 72, pp. 772-776, 2011.
- from:
<http://www.google.com/url?q=http://digital.cscic.es/bitstream/10261/7999/1/mat01005.pdf&sa=U&ei=BfpjUd3FBsSj4gTj44DYBA&ved=0CBoQFjAA&usg=AFQjCNGiQzk4VejxqlLyqPxQbgpq-3zH1A>.
- [4] Z.G. Alamdari, A. Khavanin, M. Kokabi, "Manufacture development of sound absorber based on polymeric materials at low frequency," Audiol, vol. 17, no. 1, pp. 1-10, 2008.
- [5] P.M. Morse, "Vibration and Sound," vol. 2, McGraw-Hill, New York, 1948.
- [6] F.A. Everest, K.C. Pohlmann, "Master Handbook of Acoustics," Fifth Edition, McGraw-Hill, pp. 529, 2009.
- [7] J. Pfretzschnner, P. Cobo, F. Simón, M. Cuesta, A. Fernández, "Microperforated insertion units: An alternative strategy to design microperforated panels," Applied Acoustics, vol. 67, pp. 62-73, 2006.
- [8] "Acoustic Impedance," Available from: http://www.sfu.ca/sonic-studio/handbook/Acoustic_Impedance.html.
- [9] R.F. Barron, "Industrial Noise Control and Acoustics," CRC Press, 2002.
- [10] Å. Anders, "The design and evaluation of a hemi-anechoic engine test room," Applied Acoustics, vol. 37, no. 2, pp. 151-161, 1992.
- [11] H.-S. Tsay, "Analysis of normal incidence absorption of pyramidal polyurethane foam by three-dimensional finite element frequency domain acoustical analysis," Journal of Acoustical Society of America, vol. 120, no. 5, pp. 2686-2692, 2006.
- [12] <http://www.perforatedmetal.net/perforatedmetal/applications-of-perforated-sheet.html>.
- [13] K. Sakagami, M. Morimoto, M. Yairi, "A note on the relationship between the sound absorption by microperforated panels and panel/membrane-type absorbers," Applied Acoustics, vol. 70, no. 8, pp. 1131-1136, 2009.
- [14] H. Lewis, H. Douglas, "Industrial Noise Control: Fundamentals and Applications Mechanical Engineering," CRC Press, 1994.
- [15] A. Esmaelian, M. khodadadi, "Noise control in ventilation systems," First National Industrial Ventilation and Hygeine Conference, Sharif University of Technology, 2009.
- [16] K. Sakagami, K. Matsutani, M. Morimoto, "Sound absorption of a double-leaf microperforated panel with an air-back cavity and a rigid-back wall: Detailed analysis with a Helmholtz-Kirchhoff integral formulation,"

The effect of apex angle on acoustic absorption coefficient in perforated sheet with pyramidal geometry

A. Khavanin^{*1}, M. Sadeghi Malvajerdi¹, R. Mirzaei², A. Safary³

1. Department of Occupational Health and Safety, Faculty of Medical Sciences, Tarbiat Modares Univ.
2. Department of Occupational Health Engineering, School of Public Health, Zahedan Univ. of Medical Sciences
3. Department of Occupational Health, School of Public Health, Qazvin Univ. of Medical Sciences

Abstract

Almost, in all industries, acoustic noise is one of the harmful physical agents for human. In order to control noise, different methods are applied and acoustic absorption is one of the passive methods. For sound absorption wide range of absorbers are used. In recent year, perforated sheets are considered for sound absorption in industries and constructions. Usually perforated sheet are used with one of porous or fibrous materials, like rock fibers. Effective parameters on a flat perforated sheet are as follows; thickness, hole diameter, perforation ratio, and clearance of perforated plat from the solid back plate. In pyramidal perforated sheet a new parameter is defined, apex angle. Aim of this study was evaluation of apex angle effect on acoustic absorption coefficient. The first step of this study was construction of pyramidal geometry. Then, acoustic absorption coefficient measurments were carried out for apex angles of 24, 29, and 36 degree without any absorbing material.

Keywords: Pyramidal perforated sheet, Acoustic absorption coefficient, Apex angle

pp. 21-28 (In Persian)

* Corresponding author E-mail: khavanin@modares.ac.ir