

# بررسی تاثیر زاویه رأس هرم بر ضریب جذب صوتی ورق سوراخ‌دار با هندسه

## هرمی

علی خوانین\*<sup>۱</sup>، مهدی صادقی مالواجردی<sup>۱</sup>، رمضان میرزایی<sup>۲</sup>، علی صفری<sup>۳</sup>

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، نوفه صوتی یکی از عوامل زیان‌آور برای نیروی انسانی است. جهت مهار نوفه 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 سوراخ‌دار به‌منظور جذب صدا در صنایع و همچنین در ساختمان‌سازی مورد توجه قرار گرفته است. معمولاً ورق‌های سوراخ‌دار به‌همراه یک ماده جاذب متخلخل و یا الیافی مانند پشم سنگ به‌کار 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 مانع 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 سوراخ‌دار ساخته شده و میزان ضریب جذب صوتی آن بدون حضور ماده جاذب ثانوی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. نمونه‌های ساخته‌شده در سه زاویه رأس ۳۶، ۲۹ و ۲۴ درجه، با استفاده از لوله مقاومت‌ظاهری صوتی دو میکروفون بی‌اس‌دبلیو‌ای با تفکیک‌پذیری ۱۰ هرتز و براساس استاندارد ایزو ۱۰۵۳۴-۲ مورد آزمون قرار گرفتند. مقایسه نتایج در بازه بسامدی ۴۰۰ تا ۲۵۰۰ هرتز و آزمون‌های آماری توصیفی با استفاده از نرم‌افزار اس‌پی‌اس‌اس ۱۶ انجام شد. بالاترین میانگین جذب در زاویه رأس ۳۶ درجه، در بسامد ۱۰۰۰ هرتز و به میزان ۸۹/۵ درصد، در زاویه رأس ۲۹ درجه، در بسامد ۹۰۰ هرتز، ۹۲ درصد و در زاویه رأس ۲۴ درجه، در بسامد 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 بسامدهای باند اکتاو به‌ویژه در بسامدهای کم‌تر از ۱۰۰۰ هرتز افزایش می‌یابد. علاوه بر این، قله جذب به سمت بسامدهای پایین تغییر مکان می‌دهد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، می‌توان از این هندسه (بدون وجود مواد جاذب ثانوی)، جذب قابل توجهی را در یک بسامد خاص و به ویژه بسامدهای کم‌تر از ۱۰۰۰ هرتز ایجاد نمود.

**کلیدواژه‌ها:** ورق سوراخ‌دار هرمی، ضریب جذب، نوفه، زاویه رأس هرم.

### ۱. مقدمه

جدیددی برای پیش‌بینی و اندازه‌گیری ویژگی‌های مواد جاذب ارائه شده‌اند. برای مهار<sup>۲</sup> 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<sup>۳</sup>، جاذب‌های حاوی الیاف معدنی، سفال‌های

از زمان یافته‌های معماری توسط سابین<sup>۱</sup>، 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

<sup>۲</sup> Control

<sup>۳</sup> Polyurethane foams

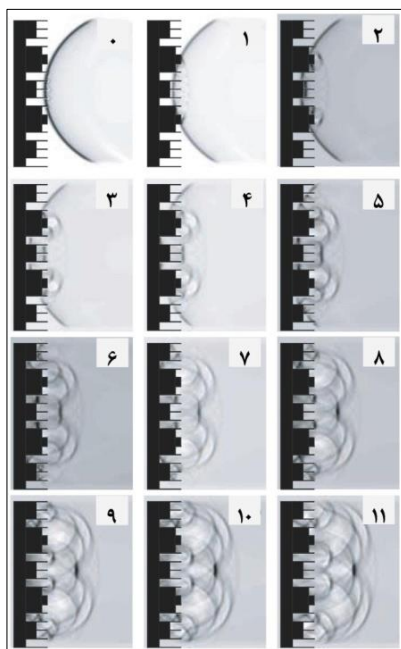
\* نویسنده پاسخگو: khavanin@modares.ac.ir

<sup>۱</sup> Sabin

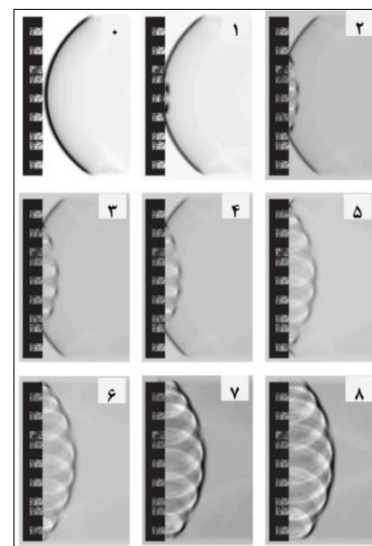
الگوی فیدتی دی<sup>۶</sup> محاسبه شده‌اند را نشان می‌دهد [۱]. این شرایط موجب فراهم شدن ضریب جذب نسبتاً پایینی خواهد شد. برای افزایش میزان جذب به کمک هندسه سطحی، تحقیقات متعددی صورت گرفته‌اند [۱، ۶، ۸-۹]. یکی از این تحقیقات منجر به ایجاد نوعی از جاذب سطحی به نام پخش‌کننده‌های شرودر<sup>۷</sup> شد. شکل ۲ اثر استفاده از این پخش‌کننده را نشان می‌دهد. جبهه موج انعکاسی بسیار پیچیده‌تر از شکل ۱ است. با مقایسه کادراهی 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 بازه زمانی دارد؛ اما با توجه به شکل سطح، در برخورد و بازتاب، یک تأخیر زمانی رخ داده و موج برخوردی 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 برخوردی می‌شنود و این منجر به کاهش شدت صدای دریافتی خواهد شد [۱].

صوتی، مواد مرکب<sup>۱</sup> و مواد پلیمری برای نصب در سطوح داخلی و سقف [۳-۴] و هم‌چنین، استفاده از صداخفه‌کن‌ها<sup>۲</sup> در سامانه‌های تهویه اشاره نمود [۵-۶]. در سال‌های اخیر، برای جذب صدا در مهندسی شهری و صنایع حمل‌ونقل، توجه خاصی به ورق‌های سوراخدار<sup>۳</sup> شده است [۷]. از این جاذب‌ها در صنایع غذایی، طراحی صداخفه‌کن‌ها، پانل‌های<sup>۴</sup> جاذب، سقف‌های کاذب، اتومبیل‌سازی و طراحی داخلی ساختمان استفاده می‌شود [۲].

در حال حاضر، برای برخی از اهداف مهار آلودگی صوتی، از ورق‌های سوراخدار 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 سوراخدار 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 پخش پیدا می‌کند. شکل ۱ امواج استوانه‌ای بازتابی از یک سطح پیوندی<sup>۵</sup> که با استفاده از



شکل ۲ امواج استوانه‌ای بازتابی از یک پخش‌کننده شرودر که با استفاده از الگوی فیدتی دی محاسبه شده‌اند [۱].



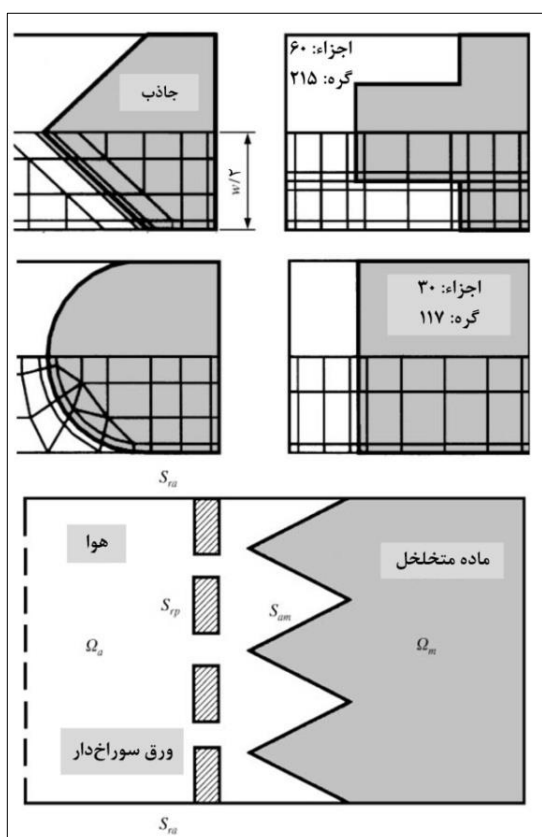
شکل ۱ امواج استوانه‌ای بازتابی از یک سطح پیوندی که با استفاده از الگوی فیدتی دی محاسبه شده‌اند. دیواره‌های تیره با استفاده از مواد جاذب پوشیده شده‌اند [۱].

<sup>1</sup> Composite materials  
<sup>2</sup> Silencer  
<sup>3</sup> Perforated sheet  
<sup>4</sup> Panels  
<sup>5</sup> Hybrid

<sup>6</sup> FDTD; Finite Difference Time Domain  
<sup>7</sup> Schroeder diffusers

### ۲-۱. جذب صدا در ورق‌های سوراخ‌دار

در سال ۲۰۰۰، ون هووا چن و همکاران، اثر جذب صدای مواد جاذب با شکل سطوح متفاوت اما با رویه ورق سوراخ‌دار 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 بسامدهای زیر ۳۰۰۰ هرتز عملکرد بهتری دارند، اما در بسامدهای بالای ۳۰۰۰ هرتز، دو هندسه دیگر (مسطح و مکعب) دارای جذب بهتری هستند. استفاده از یک ورق سوراخ‌دار بر روی مواد جاذب در بسامد ۷۰۰ هرتز و کم‌تر از آن باعث بهبود جذب و در بسامدهای بالاتر باعث کاهش جذب می‌شود [۱۷].



شکل ۳ نمای مواد جاذب با رویه ورق سوراخ‌دار تخت در داخل لوله مقاومت‌ظاهری صوتی [۱۷].

دریر و همکاران در سال ۲۰۰۵، در دانشگاه فنی میشیگان اتاقکی نیمه جاذب را با استفاده از کف پلی‌یورتان به شکل

استفاده از هندسه هرمی برای افزایش ضریب جذب جاذب‌های اسفنجی یکی از اقدامات مؤثری است که استفاده از آن در اتاق‌های بی‌پژواک<sup>۱</sup> و نیمه بی‌پژواک<sup>۲</sup> بسیار رایج است [۱۰-۱۱]. مشکل این جاذب‌ها عدم مقاومت در برابر حرارت و ایجاد گازهای سمی به هنگام بروز حریق می‌باشد. البته جاذب‌های فوق مقاومت مکانیکی بسیار پایینی دارند و در ابعاد بزرگ توان حفظ حالت ایستای<sup>۳</sup> 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 [۲]، تغییر هندسه سطحی می‌تواند زاویه برخورد را تغییر داده و این تغییر زاویه می‌تواند باعث بهبود ضریب جذب شود.

### ۱-۱. کاربردهای ورق‌های سوراخ‌دار

ورق‌های سوراخ‌دار 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، حمل‌ونقل و مهار آلودگی اشاره نمود [۱۲]. اخیراً، به‌طورگسترده‌ای از ورق‌های سوراخ‌دار با ابعاد بسیار کوچک، معروف به ورق‌های ریز-سوراخ‌دار<sup>۴</sup>، در جذب صدا و برای سطوح داخلی ساختمان‌ها و همچنین سامانه‌های صدای صداخفه‌کن استفاده شده است [۱۳]. از سامانه‌های صدای صداخفه‌کن به‌طور معمول در مهار صدای سامانه‌های تهویه صنعتی و مطبوع، و نیز مهار خروجی‌های پرفشار در صنعت و آگزوز اتومبیل‌ها و موتورهای درون‌سوز استفاده می‌شود [۵-۹، ۱۴-۱۵]. از ورق‌های ریزسوراخ‌دار به‌تنهایی و بدون مواد جاذب، برای جذب صداهایی با بسامدهای میانه و بسامدهای بالا استفاده می‌گردد. علاوه بر این، برای گسترش دامنه جذب، از دو لایه ورق سوراخ‌دار با یک فاصله هوایی در میان آن‌ها و یک دیواره صلب در پشت آن‌ها استفاده می‌شود [۱۶].

<sup>1</sup> Anechoic

<sup>2</sup> Semi anechoic

<sup>3</sup> Static

<sup>4</sup> 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<sup>۴</sup> (۶۰ میلی‌متر برای دامنه بسآمدی ۴۰۰ تا ۲۵۰۰ هرتز)، ابعاد نمونه‌های هرمی برای سه زاویه رأس ۳۶، ۲۹ و ۲۴ درجه تعیین و نقشه گسترده هرم تهیه شد. سپس، ورق‌های سوراخدار از جنس فولاد زنگ‌نزن براساس نقشه‌های دو بعدی و با دستگاه سی‌ان‌سی<sup>۵</sup> 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 خم کردن 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 برش‌خورده و خم‌شده در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است.



شکل ۴ برش گسترده ورق سوراخدار 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 تاکید این تحقیق بر جذب امواج صوتی با بسآمد ۱۰۰ هرتز بود [۱۸]. در سال ۲۰۰۶، فرشنر و همکاران نشان دادند که استفاده از ورق‌های سوراخدار به‌صورت 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 زوایای رأس ۲۱، ۲۴، ۲۹، ۳۶، ۴۷، ۶۶، ۱۰۷ و ۱۸۰ درجه مورد آزمون قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان داد که زاویه رأس ۲۹ درجه دارای جذب در باند گسترده‌تری می‌باشد [۱۱]. در سال ۲۰۰۸، قنبرزاده و همکاران با هدف ساخت جاذب‌های صوتی بر پایه بازافت ترکیبی پلی‌اتیلن ترفتالات<sup>۱</sup> و پلی‌استایرن<sup>۲</sup>، نشان دادند که شبکه‌های<sup>۳</sup> 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 آلودگی 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 ریزسوراخدار چند لایه انجام دادند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که استفاده از چند لایه ورق سوراخدار می‌تواند میزان جذب را در بازه بسآمدی گسترده‌تری افزایش دهد. همچنین، در این تحقیق، به قطر سوراخ، ضخامت ورق، فاصله سوراخ‌ها از یکدیگر و نسبت سوراخ به سطح به‌عنوان 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

<sup>۱</sup> (C<sub>10</sub>H<sub>8</sub>O<sub>4</sub>)<sub>n</sub>

<sup>۲</sup> (C<sub>8</sub>H<sub>8</sub>)<sub>n</sub>

<sup>۳</sup> Meshs

<sup>۴</sup> Impedance tube

<sup>۵</sup> CNC

از آن جایی که یکاهای مربوط به  $d$  و  $s$  یکسان و از جنس طول هستند، نسبت سوراخ به سطح بر حسب درصد بیان می شود.

## ۲-۲. تنظیم دستگاه اندازه گیری ضریب جذب و انجام آزمون تجربی

در این مرحله لوله مقاومت ظاهری صوتی اس دابلیو ۲۶۰<sup>۱</sup> ساخت شرکت بی اس دابلیو ای<sup>۲</sup> چین و مطابق با استانداردهای ایزو ۱۰۵۳۴-۲<sup>۳</sup> و ای اس تی ام ۱۰۵۰-۴۰۸<sup>۴</sup> تنظیم و برای اندازه گیری ضریب جذب آماده شد (شکل ۷). تنظیمات این سامانه شامل، مراحل سرهم بندی<sup>۵</sup> بخش های مختلف لوله مقاومت ظاهری و سامانه پردازنده و همچنین، اتصال بخش پردازنده به لوله مقاومت ظاهری و رایانه شخصی (که حامل نرم افزار مربوط به دستگاه است) می باشد. در نرم افزار مربوط به لوله مقاومت ظاهری صوتی، نوع آزمون، کالیبراسیون میکروفون ها، انتخاب دامنه بسامدی، قطر لوله و ترتیب نصب میکروفون ها تعیین می شود. پس از انجام تنظیمات دستگاه، آزمون های تجربی با تفکیک پذیری ۱۰ هرتز انجام می پذیرند.



شکل ۷ لوله مقاومت ظاهری مورد استفاده در آزمون آزمایشگاهی.

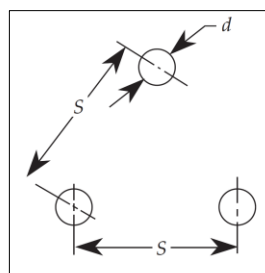
روش کار با دستگاه به این صورت است که پس از انجام تنظیمات اولیه، منبع صوتی لوله مقاومت ظاهری به مدت ۱۰ دقیقه روشن نگه داشته شده تا عملکرد آن تثبیت شود. سپس، مطابق با دستورالعمل دستگاه، پس از شروع آزمون، زمان لازم داده شده تا منحنی نمایش توسط نرم افزار به صاف ترین حالت ممکن برسد و پس از آن

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 (میلی متر)	نسبت سوراخ به سطح (درصد)	ضخامت ورق (میلی متر)	قطر سوراخ (میلی متر)
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 می باشد.



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

همان طور 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 سوراخ ها در شکل ۶ بر روی ورق فولادی با ضخامت ۰٫۳ میلی متر از رابطه ۱ محاسبه شد:

$$\% \text{ لخلخت} = \frac{90}{\left(6 \left(\frac{d}{s}\right)^2\right)} \quad (1)$$

در این رابطه،  $s$  فاصله بین مرکز دو سوراخ در محل رئوس یک مثلث و  $d$  قطر سوراخ می باشند.

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

$$\% \text{ لخلخت} = \frac{90}{\left[6 \left(\frac{0.5}{1}\right)^2\right]} = \frac{22.65}{\%} \quad (2)$$

<sup>1</sup> SW260

<sup>2</sup> BSWA

<sup>3</sup> ISO 10534-2

<sup>4</sup> ASTM 1050-08

<sup>5</sup> Montage

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

۲۴	۲۹	۳۶	بسامد	زاویه رأس (درجه)
ضریب جذب ( $\alpha$ )				شاخص‌های توصیفی
۰٫۱۵۵۰	۰٫۲۲۵۰	۰٫۲۵۰۰	۴۰۰	میان
۰٫۵۰	۰٫۴۲	۰٫۳۷		آی کیوآر*
۰٫۴۲۰۰	۰٫۴۶۵۰	۰٫۴۵۰۰	۵۰۰	میان
۰٫۳۴	۰٫۲۱	۰٫۲۰		آی کیوآر
۰٫۵۳۰۰	۰٫۳۵۰۰	۰٫۲۷۰۰	۶۳۰	میان
۰٫۳۵	۰٫۵۰	۰٫۲۲		آی کیوآر
۰٫۹۳۰۰	۰٫۸۳۵۰	۰٫۵۷۵۰	۸۰۰	میان
۰٫۱۰۷	۰٫۲۳	۰٫۸۶		آی کیوآر
۰٫۹۳۰۰	۰٫۹۰۰۰	۰٫۸۹۵۰	۱۰۰۰	میان
۰٫۱۰۴	۰٫۰۹	۰٫۱۱		آی کیوآر
۰٫۷۷۰۰	۰٫۷۶۰۰	۰٫۷۶۰۰	۱۲۵۰	میان
۰٫۲۹	۰٫۲۱	۰٫۲۸		آی کیوآر
۰٫۷۰۰۰	۰٫۶۲۵۰	۰٫۶۶۰۰	۱۶۰۰	میان
۱٫۹۲	۰٫۲۹	۰٫۲۲		آی کیوآر
۰٫۴۸۰۰	۰٫۸۹۵۰	۰٫۶۴۰۰	۲۰۰۰	میان
۰٫۹۹	۵٫۸	۱٫۷۹		آی کیوآر
۰٫۵۴۵۰	۰٫۷۵۵۰	۰٫۶۸۰۰	۲۵۰۰	میان
۰٫۸۵	۰٫۴۶	۱٫۱۵		آی کیوآر

\* IQR; Inter Quartile Range

شکل ۸ نشان می‌دهد که هر سه هرم در بسامد ۱۲۵۰ هرتز تقریباً جذب یکسانی دارند. هرم با زاویه رأس ۲۹ درجه در بازه بسامدی پهن‌تری مؤثر است (بسامدهای بین ۶۳۰ تا ۱۰۰۰ هرتز). ارقام مربوط به میان‌ضریب جذب بیان‌گر آن است که زاویه رأس ۳۶ درجه در محدوده بسامدی ۱۰۰۰ هرتز دارای جذب بهینه می‌باشد.

هم‌چنین، زوایای ۲۴ و ۲۹ درجه به ترتیب جذب بهینه را در محدوده‌های بسامدی ۸۰۰ و ۹۰۰ هرتز پوشش می‌دهند. مقادیر میان‌ضریب جذب برای زوایای رأس ۲۴ و ۲۹ درجه در بسامدهای مذکور، به ترتیب، ۹۳، ۹۲ 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 به‌دست‌آمده 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 به‌دست آمد. صدای تراگسیل‌یافته از منبع صوتی از نوع امواج صوتی سفید می‌باشد، بنابراین کلیه بسامدهای موجود در بازه بسامدی 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 اسپ‌اس‌اس<sup>۱</sup> منتقل شده و برای هر گروه از داده‌ها در بسامدهای مرکزی باند اکتاو<sup>۲</sup> در بازه بسامدی ۴۰۰ تا ۲۵۰۰ هرتز، تحلیل توصیفی<sup>۳</sup> انجام شد. در آزمون مورد نظر، دامنه بین چارک‌ها و میان‌ها برای تحلیل نتایج مورد استفاده قرار گرفت.

### ۳. نتایج

نتایج حاصل از تحلیل داده‌های مربوط به اندازه‌گیری ضریب جذب هندسه هرمی از ورق‌های سوراخ‌دار 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، میان‌ضریب جذب برای تمام بسامدها با کاهش زاویه رأس، افزایش می‌یابد. نتایج جدول ۳ نیز به صورت نمودار در شکل ۸ نشان داده شده‌اند.

جدول ۲ میان‌مقادیر ضریب جذب در کلیه بسامدها در بازه ۴۰۰ تا ۲۵۰۰ هرتز.

زاویه رأس هرم	۲۴ درجه	۲۹ درجه	۳۶ درجه
مقدار میان	۰٫۶۴۰۰	۰٫۶۰۵۰	۰٫۵۶۵۰

<sup>1</sup> SPSS

<sup>2</sup> Octave band

<sup>3</sup> Descriptive



شرایط از چند جنبه قابل بررسی می‌باشد. اول این‌که، با گذشت زمان و اضمحلال مواد و الیاف جاذب، میزان ضریب جذب کاهش خواهد یافت. هم‌چنین، با ته‌نشینی غبار بر روی مواد جاذب نیز همین نتیجه حاصل می‌شود. علاوه بر این، ورود الیاف جاذب به جو محیط، می‌تواند پیامدهای بهداشتی منفی را از جنبه تنفسی به‌همراه داشته باشد.

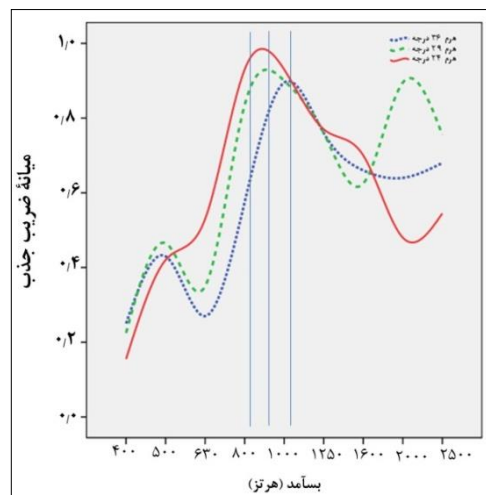
در مقایسه با مطالعه‌ای که توسط قنبرزاده [۱۹] انجام شد، مواد مورد استفاده در مطالعه مذکور، در برابر حرارت و حریق مقاوم نیستند، اگرچه در مقابل رطوبت حساسیت پایینی دارند، اما ورق سوراخ‌دار فولادی با هندسه هرمی علاوه بر مقامت در برابر رطوبت، در برابر حریق و حرارت نیز دارای مقومت بالایی می‌باشد.

نتایج تجربی به‌دست‌آمده از آزمون دسته هرم‌ها با زاویه رأس ۲۹ درجه و نتایج مطالعه انجام شده توسط تسای [۱۱] با یکدیگر مطابقت دارند. آن‌ها نشان دادند که هرم ۲۹ درجه در بازه گسترده‌تری دارای جذب صدا می‌باشد؛ با این تفاوت که در مطالعه مذکور میزان ضریب جذب در محدوده بسامدی ۱۰۰۰ هرتز برای هرم پلی‌یورتان با زاویه ۲۹ درجه در حدود ۰٫۶ بوده اما برای هرم ساخته‌شده از ورق سوراخ‌دار فولادی با همان زاویه مقدار ۰٫۹۰ را نشان می‌دهد.

با توجه با مزایای ذکر شده برای ورق‌های سوراخ‌دار، و به‌ویژه با در نظر گرفتن مقادیر جذب بالا برای هندسه هرمی از ورق‌های سوراخ‌دار، در شرایطی 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 امکان‌پذیر نیست، استفاده از این نوع جاذب می‌تواند 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 منحنی‌های میانه ضریب جذب نسبت به بسامد.

#### ۴. بحث و نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از مطالعه حاضر نشان داد که، با کاهش زاویه رأس هرم، قله جذب به سمت بسامدهای پایین تغییر مکان می‌دهد. با نگاهی به شکل ۸، دریافت می‌شود که میزان جذب در بسامد ۱۰۰۰ هرتز رو به افزایش است. نتایج آماری نشان می‌دهند 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 به‌ترتیب در آزمون دسته هرم‌ها با زوایای رأس ۲۹ و ۲۴ درجه مشهود می‌باشد. البته، از جدول ۳ می‌توان این را دریافت که با کاهش زاویه رأس هرم، تقریباً در تمام بسامدها افزایش جذب رخ می‌دهد. این افزایش در محدوده ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ هرتز دارای بیش‌ترین مقدار بوده و یکنواخت می‌باشد. اما در دیگر بسامدها این یکنواختی دیده نمی‌شود.

یکی از نقاط قوت مطالعه فوق، این است که آزمون این هندسه با استفاده از ورق‌های سوراخ‌دار و بدون حضور مواد جاذب (پشم سنگ<sup>۱</sup>، الیاف شیشه<sup>۲</sup>، فوم یا هر گونه جاذب دیگری) صورت گرفت؛ که نتایج حاصل، بیان‌گر میزان جذب قابل توجهی می‌باشد. موضوع مذکور از این نظر حائز اهمیت است که مواد جاذب استفاده شده به همراه ورق‌های سوراخ‌دار، با گذشت زمان متلاشی شده و به‌صورت ذرات بسیار ریز هوابرد وارد محیط می‌شوند. این

<sup>1</sup> Rock wool

<sup>2</sup> 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.csic.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. Pfretzschner, 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](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<sup>\*1</sup>, M. Sadeghi Malvajerdi<sup>1</sup>, R. Mirzaei<sup>2</sup>, A. Safary<sup>3</sup>

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