



Part B: Persian Edition

Journal of Textiles and Polymers

Vol. 11, No. 2, 49-59, April 2023

<https://doi.org/10.48302/jtp.2644.178930>



RESEARCH PAPER

The Effect of the Structural Characteristics of Plain Knitted Fabrics on the Sound Absorption Coefficient: In Single-Layer and Multi-Layer

Mohammad-Reza Saffari¹, Mehdi Kamali Dolatabadi^{1*}, Abosaeed Rashidi¹, and
Mohammad Esmail Yazdanshenas²

1. Department of Textile Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2. Department of Textile Engineering, Yazd Branch, Islamic Azad University, Yazd, Iran

Received: 4 February 2023 , Accepted: 21 September 2023

Abstract

Textile structures are widely used in the sound absorber industry due to their cheap production cost and lightness. In this way a lot of research has been done to investigate the effect of structural parameters for different fabrics on sound absorption coefficient. One of the most important of these parameters is the percentage of porosity. The main aim in the paper is to examine the degree of conformity of a mathematical model and a computer simulation with the experimental results. In this study, three samples of plain knitted fabric with different densities were produced and tested in terms of the sound absorption coefficient in single-layer and multi-layer modes with an impedance tube device. The analysis of the results obtained from the data variance analysis method showed that with increase of thickness and weight per square meter, the sound absorption coefficient also increases. On the other hand, an inverse relationship between sound absorption coefficient and porosity percentage was observed. In the following, the sound absorption coefficient was calculated using Dias modeling and a computer simulation for single-layer and multi-layer modes. The obtained results showed that in the computer simulation done with the Comsol software using the Delaney-Bazley method, the results related to the sound absorption coefficient show more conformity with the experimental results. This is despite the fact that in the Dias method, a good match between the theoretical and experimental results was not observed.

Keywords: polyester yarn, sound absorption coefficient, weft knitting, porosity percentage

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail: kamalimehdi@yahoo.com

بررسی اثر مشخصه‌های ساختاری بافت حلقوی پودی ساده تک‌لایه و چندلایه بر ضریب جذب صوت

محمد رضا صفاری^۱، مهدی کمالی^۱، ابوسعید رشیدی^۱، محمد اسماعیل یزدان‌شناس^۲

۱- تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، دانشکده مهندسی نساجی

۲- تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد یزد، دانشکده مهندسی نساجی

دریافت: 1401/11/15، پذیرش: 1402/06/20

چکیده

منسوجات با توجه به هزینه تولید ارزان و سبکی، کاربرد گسترده‌ای در صنعت جاذب‌های صوتی دارند. در این راستا، پژوهش‌های زیادی درباره بررسی اثر پارامترهای ساختاری بافت در انواع منسوجات بر ضریب جذب صوت انجام گرفته که یکی از مهم‌ترین آن‌ها درصد تخلخل است. هدف اصلی کار حاضر، بررسی میزان انطباق یک مدل ریاضی و نیز یک شبیه‌سازی رایانه‌ای با نتایج تجربی است. در این پژوهش، سه نمونه پارچه حلقوی پودی ساده با تراکم‌های مختلف تولید و از نظر میزان ضریب جذب صوت در حالت‌های تک‌لایه و چندلایه با دستگاه لوله امپدانس آزمون شدند. تحلیل نتایج به دست آمده از روش تحلیل واریانس داده‌ها نشان داد، با افزایش ضخامت و وزن در هر متر مربع، ضریب جذب صوت نیز افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، رابطه معکوسی میان ضریب جذب صوت و درصد تخلخل مشاهده شد. در ادامه ضریب جذب صوت با استفاده از مدل‌سازی دیاس (Dias) و نیز شبیه‌سازی رایانه‌ای با نرم‌افزار کامسول (Comsol) برای حالت‌های تک‌لایه و چندلایه محاسبه شد. نتایج نشان داد، در شبیه‌سازی رایانه‌ای با نرم‌افزار کامسول به روش دلانی-بازلی (Delaney-Bazley)، نتایج مربوط به ضریب جذب صوت انطباق بیشتری با نتایج تجربی نشان می‌دهد. این در حالی است که در روش دیاس چنین

انطباق خوبی میان نتایج مشاهده نشد.

واژه‌های کلیدی: پارچه پلی‌استر، ضریب جذب صوت، بافت حلقوی، درصد تخلخل

۱ مقدمه

با توسعه و پیشرفت فناوری، آلودگی صوتی به یکی از مشکلات مهم جوامع تبدیل شده است. سروصدا می‌تواند آثار مخربی بر سلامت انسان داشته باشد. این موضوع سبب شده است تا تلاش‌های درخور توجهی برای کاهش و به حداقل رسانی صداهای ناهنجار انجام گیرد. در این راستا از مواد و ترکیبات زیادی استفاده شده است که سبب جذب یا انعکاس امواج صوتی از روی سطوح می‌شوند و در نتیجه انتشار امواج صوتی را کاهش می‌دهند [۱].

امواج صوتی در برخورد با سطح دچار انعکاس، شکست، جذب، پراش و تداخل می‌شوند که میزان هر یک از آن‌ها به ویژگی‌های سطح مدنظر بستگی دارد. امواج صوتی به راحتی وارد برخی از مواد می‌شوند که به آن‌ها متخلخل می‌گویند. مواد آکوستیک متخلخل می‌توانند تا بیش از ۹۰٪ تخلخل داشته باشند. جذب صدا در حقیقت نوعی فرایند تبدیل انرژی است. هنگامی که صوت وارد

دوجداره حلقوی تولیدشده با نانوالیاف را بر میزان جذب صوت بررسی کردند [۱۸].

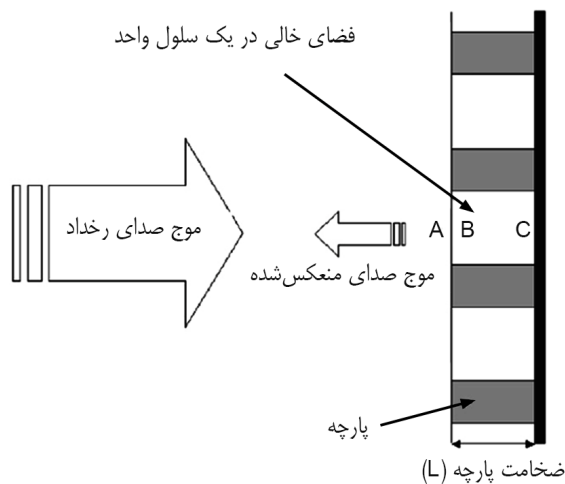
با توجه به پژوهش‌های مشابه که به‌طور تجربی با استفاده از دستگاه لوله امیدانس در زمینه جذب صوت در پارچه‌های حلقوی انجام گرفته در کار حاضر سعی شده است تا افزون بر مرور عوامل مؤثر بر ضریب جذب صوت، اثر تعداد لایه‌های منسوج نیز بر جذب صوت به‌طور تجربی بررسی شود. در این راستا، افزون بر مدل ریاضی استفاده‌شده توسط دیاس، از شبیه‌سازی با نرم‌افزار کامسول و مدل دلانی-بازلی برای بررسی انطباق و تحلیل نتایج تجربی و نظری استفاده شد تا مشخص شود، نتایج به‌دست‌آمده در کدام یک از این دو مدل به نتایج تجربی نزدیک‌تر است.

۱-۱ مدل ریاضی ارائه‌شده برای محاسبه ضریب جذب صوت در پارچه حلقوی بافت پودی به روش دیاس

Dias در سال ۲۰۰۶، مدل ریاضی برای محاسبه ضریب جذب صوت در پارچه حلقوی پودی ارائه داد. نمای این مدل در شکل ۱ آورده شده است [۱۲].

در این مدل فرض شده، منسوج به‌شکل لایه‌ای با منافذ استوانه‌ای یکسان است. همان‌گونه که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، لایه هوای درون این منافذ به‌عنوان یک لایه سیال با ضخامت L که همان ضخامت منسوج بوده، در نظر گرفته شده است. در این مدل‌سازی با فرض اینکه پارچه روی سطح سخت یا نفوذناپذیر قرار دارد و یک موج صوتی یکنواخت به‌صورت یک تابع نرمال به واحد سطح ماده برخورد می‌کند، معادلاتی ارائه شده است.

با توجه به‌شکل ۱، نقطه A روی سطح پارچه، نقطه B در درون



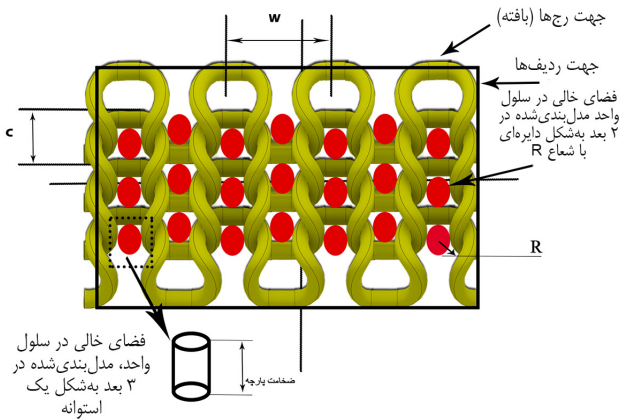
شکل ۱- نمای برخورد موج صوتی به سطح براساس مدل دیاس [۱۲].

جسم متخلخل می‌شود، مولکول‌های هوا در حفره‌ها با بسامدی مشابه بسامد امواج صوتی به نوسان درمی‌آیند. مولکول‌های هوای موجود در حفره‌ها به‌وسیله امواج صوتی، تحت تأثیر یک چرخه فشرده‌گی و رهاسازی قرار می‌گیرند که به تغییرات دمایی منجر می‌شود. بنابراین، انرژی صوت در اثر برخورد با لایه یا فضاها خالی به گرما تبدیل می‌شود و بدین ترتیب صدا از بین می‌رود. پس می‌توان چنین نتیجه گرفت، جذب صدا نتیجه اتلاف انرژی صوتی به‌شکل گرماست [۱].

مواد جاذب صوت به‌عنوان راه‌حلی برای به‌حداقل‌رسانی سروصدا در نظر گرفته می‌شوند که در این راستا عملکرد خوبی نشان داده‌اند [۲،۳]. پارامترهای مختلفی بر رفتار آکوستیک منسوجات مؤثرند که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به تخلخل، تجعد نخ‌ها، تراکم نخ‌ها، مقاومت جریان هوا و ضخامت منسوج اشاره کرد. با توجه به ساختار متخلخل پارچه و منسوجات، این محصولات به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مواد جاذب صوت در مهندسی آکوستیک به‌شمار می‌آیند. در این میان، نقش منسوجات بی‌بافت به‌عنوان جاذب صوت از سایرین پررنگ‌تر است. پژوهش‌های Tascan و همکاران درباره منسوجات بی‌بافت نشان داد، با افزایش قطر الیاف و کاهش گذردهی هوا، ضریب جذب صوت افزایش می‌یابد [۴-۶].

Yilmaz و همکاران در بررسی‌های خود درباره منسوجات بی‌بافت پلی‌پروپیلن و پشم شیشه و پلی‌لاکتیک اسید بدین نتیجه رسیدند که با کاهش تخلخل و افزایش ضخامت منسوج، ضریب جذب صوت افزایش پیدا می‌کند [۶]. افزون بر پارچه‌های بی‌بافت، مطالعاتی نیز درباره کاربرد پارچه‌هایی با بافت حلقوی و نیز تار پودی برای بررسی میزان ضریب جذب صوت یا مدل‌سازی ضریب جذب صوت انجام گرفته است [۷-۱۲].

Honarvar و همکاران، مدل‌سازی ضریب جذب صوت را برای پارچه‌های حلقوی با بافت ریب انجام دادند و آن‌ها را با نتایج عملی مقایسه کردند. این پژوهشگران دو نوع حفره را با عنوان حفره‌های باز و بسته در بافت پارچه تعریف کرده و تأثیر آن‌ها را بر ضریب جذب صوت بررسی کردند [۱۳]. Liu و همکاران، اثر ضخامت را در پارچه‌هایی از جنس پلی‌استر و بافت اسپیسر حلقوی تار بر پارامتر ضریب جذب صوت مطالعه کردند [۱۴]. Kim و همکاران و همچنین Arumugam و همکاران، اثر مشخصه‌های ساختاری پارچه‌های حلقوی تار را بر ضریب جذب صوت بررسی کردند [۱۵،۱۶]. Chen و همکاران رفتار جذب صوت را در کامپوزیت‌های متشکل از پارچه پلی‌اتیلن با بافت اسپیسر حلقوی تار مطالعه کردند [۱۷]. داوودآبادی و همکاران، رفتار پارچه‌های



شکل ۲- تصویر ساختار بافت حلقوی ساده [۱۲].

که در آن ϕ بیانگر تخلخل ماده است. بر این اساس، مقدار ضریب جذب صوت ماده با جایگزینی مقادیر Z_A و Z_B به دست می‌آید:

$$NAC = 1 - \left(\frac{Z_A - Z_C}{Z_A + Z_C} \right)^2 \quad (۸)$$

به منظور تعیین شعاع یک سلول واحد استوانه‌ای شکل باید این مسئله را در نظر گرفت که سلول واحد یک ساختار حلقوی بافت ساده، به وسیله حلقه‌ها در بافت ایجاد می‌شود. حلقه‌ها در رج‌ها و ردیف‌ها سازمان‌دهی می‌شوند. Dias با توجه به شکل ۲، فضای خالی درون یک سلول واحد در یک پارچه با بافت حلقوی ساده را با در نظر گرفتن شرایط زیر به طور تقریبی محاسبه کرد [۱۲]:

الف- ناحیه خالی در یک استوانه به صورت مساحت یک دایره با شعاع R تقریب زده می‌شود.

ب- فضاهای خالی میان نقاط تقاطع حلقه و فضاهای خالی بین الیاف یک نخ، قابل چشم‌پوشی هستند.

پ- حلقه‌ها از نخ‌های ایده‌آل تشکیل شده‌اند. یعنی نخ‌ها دارای سطح مقطع مدور و قطر ثابت در سراسر طول آن‌ها هستند.

ت- از تغییر شکل نخ در نقاط تقاطع نخ‌ها صرف‌نظر شده است. Dias و همکاران طبق فرمول زیر شعاع فضای خالی یک استوانه را ارائه کرده‌اند [۱۲]:

$$R = \sqrt{\frac{1 - S(ld - 4d^2)}{2S\pi}} \quad (۹)$$

با توجه به مطالب پیش‌گفته، شعاع حفره یک حلقه از پارچه با بافت ساده را می‌توان با استفاده از چگالی بافت حلقه، قطر نخ و طول حلقه محاسبه کرد. در نتیجه با داشتن مقدار R و با استفاده از معادلات (۴) و (۶) می‌توان مقادیر μ و K را به راحتی به دست آورد و

فضای خالی سلول واحد و در نزدیک سطح پارچه و نقطه C روی پارچه نزدیک به دیوار سخت است. برای تعیین ضریب جذب صوت این جسم، نیاز به تعیین مقادیر امپدانس صوتی در نقاط A ، B و C است. امپدانس صوتی در نقطه B توسط Allard و Kosten و Zwicker به صورت زیر محاسبه شده است [۱۹، ۲۰]:

$$Z_B = -iZ_C \cot(\beta l) \quad (۱)$$

در این معادله، Z_C امپدانس لایه سیال (هوا)، β عدد موج سیال، l ضخامت منسوج و Z_B امپدانس صوت در نقطه B هستند. امپدانس لایه سیال و عدد موج، متغیرهای پیچیده‌ای هستند که می‌توان آن‌ها را با استفاده از معادلات ارائه‌شده توسط Allard محاسبه کرد:

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\rho}{K}} \quad (۲)$$

$$Z_C = \sqrt{K \cdot \rho} \quad (۳)$$

در اینجا چگالی مؤثر، K مدول یانگ هوا در منافذ استوانه‌ای و ω بسامد زاویه‌ای ستون هوا هستند. Kosten و Zwicker، جریان هوای درون یک استوانه با شعاع R را به صورت جریان لایه‌ای (لایه نازک) مدل‌سازی کردند و معادلاتی برای محاسبه مقادیر ρ و K به دست آوردند [۱۹]:

$$\mu = \sqrt{\frac{\omega \rho_0 R}{\eta}} \quad (۴)$$

$$\rho = \rho_0 \left(1 - \frac{2(-1)}{\mu} \right) \quad (۵)$$

$$K = \gamma \cdot \rho_0 \left(1 + \frac{\sqrt{2(-1+i(\gamma-1))}}{B \cdot \mu} \right) \quad (۶)$$

مقادیر مربوط به متغیرهای ارائه‌شده توسط Allard در شرایط جوی عادی دمای 18°C و فشار $1/1033 \text{ Pa}$ به صورت $\gamma=1/4$ ، $B=0/84$ ، $\rho_0=1/213 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ، $P_0=1/0132 \times 10^5 \text{ Pa}$ و $\eta=1/84 \times 10^{-5}$ گزارش شده است [۲۰]. پس از برخورد موج صوتی به سطح ماده، جریان هوا از سطح ماده به داخل منافذ ایجاد می‌شود. با توجه به این معادلات مقدار امپدانس در نقطه A از معادله زیر به دست می‌آید:

$$Z_A = \frac{Z_B}{\phi} \quad (۷)$$

اگر M جرم در هر واحد پارچه و L ضخامت پارچه در نظر گرفته شود، آنگاه چگالی الیاف برابر است با:

$$\rho_t = \frac{M}{L} \quad (12)$$

با جاگذاری آن در معادله (۱۱) می‌توان میزان تخلخل را به صورت زیر محاسبه کرد:

$$P = \left(1 - \frac{M}{L \cdot \rho_m}\right) \times 100 \quad (13)$$

که در آن، V_v حجم فضای خالی (cm^3)، V_t حجم کل ماده (cm^3)، ρ_t چگالی کل ماده متخلخل (g/cm^3) و ρ_m چگالی الیاف در پارچه است.

۲-۲-۲ ضخامت پارچه

ضخامت نمونه پارچه‌های حلقوی با دستگاه ضخامت‌سنج طبق استاندارد ASTM D1777-96 اندازه‌گیری شده است. نمونه‌ها پیش از آزمون در شرایط فشار جوی، دمای 20°C و رطوبت نسبی $65 \pm 2\%$ برای ۴۸ h قرار داده شدند. این نتایج در جدول ۲ آورده شده است.

۳-۲-۲ وزن متر مربع پارچه

وزن متر مربع پارچه طبق استاندارد ASTM D3776-96 اندازه‌گیری شده است. هر نمونه به‌طور تصادفی، پنج مرتبه توزین شده و میانگین وزن متر مربع در جدول ۲ گزارش شده است.

۴-۲-۲ ضریب جذب صوت

برای تعیین میزان ضریب جذب صوت نمونه‌ها، از دستگاه آکوستیک امپدانس لوله ساخت B&K مدل ۴۲۰۶ طبق استاندارد ASTM E1050 استفاده شد. نمای این دستگاه در شکل ۳ نشان داده شده است. برای بسامدهای کم ۵۰ Hz تا ۱۶۰۰ Hz از لوله بزرگ و برای بسامدهای کم ۵۰۰ Hz تا ۶۴۰۰ Hz از لوله کوچک

با جاگذاری مقادیر در معادلات (۱) تا (۳) و (۷) و (۸) می‌توان میزان ضریب جذب صوت را در هر بسامد محاسبه کرد.

۲ مواد و روش‌ها

۱-۲ تولید نمونه پارچه

به‌منظور بافت پارچه‌های حلقوی به‌کاررفته در این مطالعه از نخ پلی‌استر با سطح مقطع دایره‌ای با چگالی $1/37 \text{ g/cm}^3$ و نمره نخ ۵۰۰ dtex با قطر $0/216 \text{ mm}$ و ظرافت لیف $1/8 \text{ den}$ استفاده شده است. نمونه‌ها با سه نوع تراکم مختلف بافته شده و شرایط بافت برای هر سه نوع تراکم متفاوت، یکسان بوده است.

به‌منظور بافت پارچه از دستگاه جوراب‌بافی ساخت شرکت Bently Komet با قطر دهنه $3/75 \text{ in}$ استفاده شد. تعداد سوزن‌های بافت در ماشین به‌ترتیب ۱۵۴، ۱۶۸ و ۱۷۵ است. نوع بافت پارچه از نوع بافت حلقوی ساده بوده و در جدول ۱ مشخصات ساختار بافت پارچه شامل تعداد رج در سانتی‌متر، تعداد ردیف در سانتی‌متر، چگالی بافت و طول حلقه آورده شده است. در این جدول، طول حلقه براساس نظریه پیرس محاسبه شده است. همچنین، تراکم بافت در هر سانتی‌متر مربع برابر با حاصل ضرب تعداد رج‌ها و ردیف‌هاست.

۲-۲ اندازه‌گیری خواص فیزیکی پارچه

۱-۲-۲ تخلخل

Guidoin و همکاران، تخلخل را به‌عنوان نسبت فضای خالی یا حجم منافذ درون مرزهای یک ماده جامد به حجم کل تعریف می‌کنند. به‌عبارتی پارچه با تراکم زیاد، شعاع حفره‌های کوچک‌تر و درحقیقت درصد تخلخل کمتری دارد [۲۱]. تخلخل معمولاً به‌صورت درصد بیان شده و به‌شکل زیر قابل محاسبه می‌شود:

$$P = \left(\frac{V_v}{V_t}\right) \times 100 \quad (10)$$

$$P = \left(1 - \frac{\rho_t}{\rho_m}\right) \times 100 \quad (11)$$

جدول ۱- پارامترهای ساختاری پارچه‌های حلقوی پودی.

کد نمونه	تعداد سوزن بافت	W (تعداد رج در سانتی‌متر)	انحراف استاندارد	C (تعداد ردیف در سانتی‌متر)	انحراف استاندارد	تراکم بافت	نمره نخ (tex)	طول حلقه (cm)
A1	۱۵۴	۸	۰/۵۰	۹	۰/۵۳	۷۲	۵۱/۳	۰/۴۷
A2	۱۶۸	۹/۴	۰/۵۹	۱۰	۰/۴۷	۹۴	۵۱/۳	۰/۴۳
A3	۱۷۵	۱۰	۰/۴۸	۱۲	۰/۵۷	۱۲۰	۵۱/۳	۰/۳۹

جدول ۲- اندازه‌گیری خواص فیزیکی پارچه‌ها.

کد نمونه	تعداد لایه‌ها	وزن پارچه (g/m ²)	انحراف استاندارد	تخلخل (%)	ضخامت پارچه (mm)	انحراف استاندارد
A1	۱	۱۲۰	۱/۰۷	۸۶/۰۹	۰/۶۳	۰/۰۲
A2	۱	۱۶۰	۱/۱۰	۸۰/۳۷	۰/۵۹	۰/۰۳
A3	۱	۱۸۵	۰/۷۷	۷۸/۴۸	۰/۶۲	۰/۰۲
A3P5	۵	۹۲۵	۱/۰۶	۷۹/۵۳	۳/۳۰	۰/۳۲

حاکم است. گام بعدی، محاسبه فشار کل توزیع شده در محیط (سیال و ماده جاذب) است. به منظور محاسبه نحوه توزیع این فشار، معادله هلمهولتز (Helmholts) به کار گرفته شد که برای فشار کل یک محیط سیال است. در ادامه برای محاسبه ضریب جذب ماده متخلخل، از فرمول تجربی ارائه شده توسط دلانی-بازلی استفاده شد که به صورت زیر است:

$$Z_f = \rho_a c_a \left[1 + c_1 \left(\frac{\rho_a f}{\sigma} \right)^{-c_2} - i \left(c_3 \left(\frac{\rho_a f}{\sigma} \right)^{-c_4} \right) \right]$$

$$\gamma_f = k_0 \left[1 + c_5 \left(\frac{\rho_a f}{\sigma} \right)^{-c_6} - i \left(c_7 \left(\frac{\rho_a f}{\sigma} \right)^{-c_8} \right) \right]$$

$$\Gamma_f = i Z_f \tan \left(\frac{\pi}{2} + \gamma_f t_f \right) \quad (14)$$

در این معادله، ρ_a چگالی هوا، c_a سرعت صدا در هوا، σ مقاومت جریان هوا، k_0 عدد موج است. همچنین، t_f ضخامت لایه متخلخل است. ضرایب c_1 تا c_8 مقادیر ثابتی هستند. در این مطالعه، پارچه به شکل حجم متخلخلی از الیاف فرض شده و بر همین اساس مدل دلانی-بازلی مش بندی شده است. با استفاده از معادله (۱۴)، امپدانس سطح ماده متخلخل به دست می‌آید. سپس انعکاس صوت از ماده متخلخل را می‌توان از معادله زیر محاسبه کرد:

$$R_f = \frac{\Gamma_f - Z_f}{\Gamma_f + Z_f} \quad (15)$$

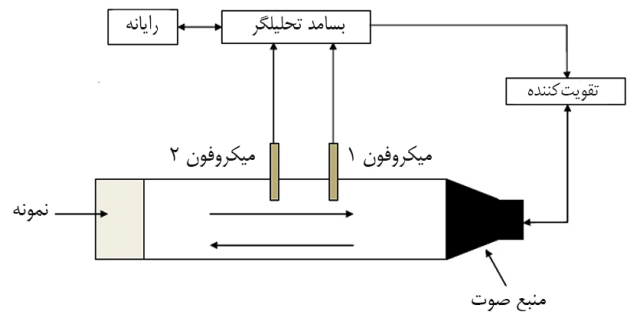
در نهایت با محاسبه مقدار انعکاس صوت از معادله (۱۵) ضریب جذب صوت از معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$\alpha = 1 - R^2 \quad (16)$$

این معادلات برای مواد متخلخل تا زمانی اعتبار دارند که تخلخل ماده نزدیک به ۱ باشد و رابطه $1 \leq \rho_a f / \sigma \leq 0.1$ صادق باشد.

۲-۳ شرایط مرزی مسئله

یکی از موضوعات مهم دارای نقش اساسی در شبیه‌سازی رفتار



شکل ۳- نمای لوله امپدانس.

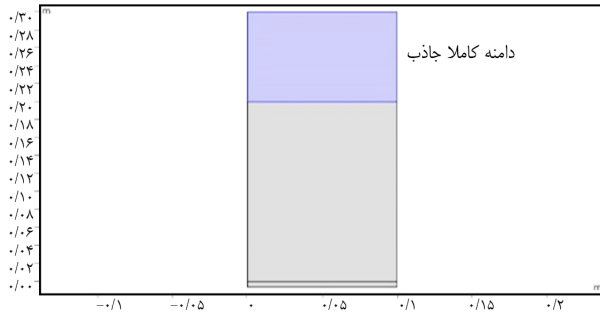
استفاده شده است. گفتنی است، قطر نمونه‌ها برای لوله‌های بزرگ و کوچک به ترتیب ۱۰۰ و ۳۰ mm بوده‌اند.

۳ شبیه‌سازی نرم‌افزاری ضریب جذب صوت

در این بخش به منظور اطمینان از صحت نتایج، از روش عملی شبیه‌سازی ضریب جذب صوت در پارچه با استفاده از نرم‌افزار کامسول (Comsol) انجام پذیرفت و نتایج شبیه‌سازی عددی با مقادیر عملی مقایسه شد.

۳-۱ شبیه‌سازی جاذب صوتی متخلخل در هوا

جاذب‌های صوتی متخلخل عملکرد مناسبی در جذب امواج صوتی، به‌ویژه در بسامدهای زیاد دارند. هدف از این بخش، شبیه‌سازی یک جاذب صدا برای جذب امواج صوتی در بسامدهای مختلف است. همچنین، عوامل مؤثر بر جذب ماده متخلخل بررسی می‌شود. به منظور بررسی نحوه جذب موج صوتی در ماده متخلخل، باید به نحوه توزیع فشار صوت در این محیط سیال در هنگام برخورد به ماده متخلخل پرداخته شود. بدین منظور، ابتدا توزیع فشار اولیه مربوط به سیال زمینه محیط با روابط ریاضی تعریف می‌شود. این توزیع فشار، در واقع فشاری است که پیش از ورود موج برخوردی به ماده متخلخل و به صورت پیش فرض بر محیط



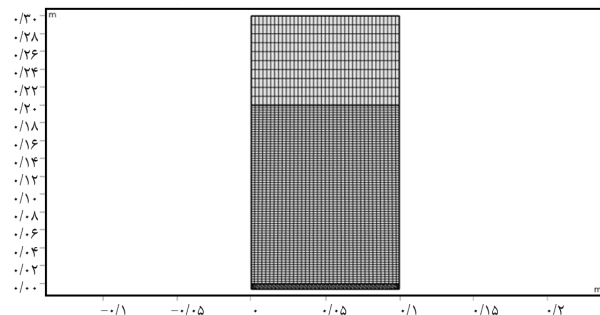
شکل ۶- جانمایی از لایه کاملاً جاذب (اندازه محورهای مش بندی برحسب متر است).

میرایی امواج صوتی را برعهده دارد. به عبارت دیگر، موج صوتی پس از ورود به این لایه به طور کامل جذب می شود.

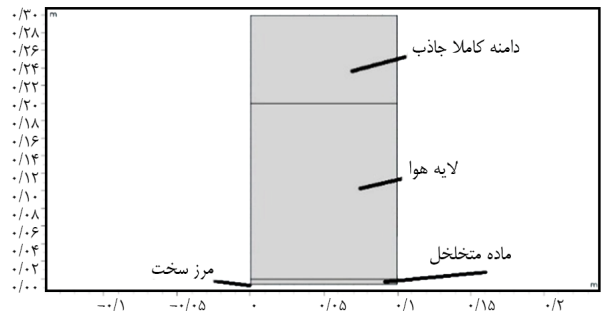
۳-۳ هندسه و شبکه بندی

شبکه بندی یا مش بندی، عضو جدایی ناپذیر هر مسئله حل عددی یک پدیده فیزیکی است. در واقع، شبکه بندی مشخص می کند که معادلات حاکم بر پدیده فیزیکی در کدام محل و برای چه المانی باید حل شوند. در نرم افزار کامسول شبکه بندی به دو صورت خودکار و دستی انجام می شود. شبکه بندی خودکار با توجه به هندسه مسئله و پدیده فیزیکی حاکم بر آن انجام می پذیرد. در این شبیه سازی، به دلیل عدم پیچیدگی های هندسی، استفاده از شبکه بندی خودکار سبب ایجاد المان های بسیار زیادی می شود که وجود آن ها برای حل مسئله ضروری نیست. ایجاد این المان های اضافی سبب زمان بری حل مسئله با نرم افزار می شود که مطلوب نیست. راه حل جایگزین، استفاده از شبکه بندی دستی است به گونه ای که امکان انتخاب نوع و اندازه المان ها را در نقاط مختلف هندسه فراهم می آورد. مهم ترین معیاری که باید در نظر گرفته شود این است که نباید حداکثر طول المان بیش از $\lambda_{max} / 40$ باشد.

شکل ۷، شبکه بندی در سطح تماس هوا و ماده متخلخل را نشان



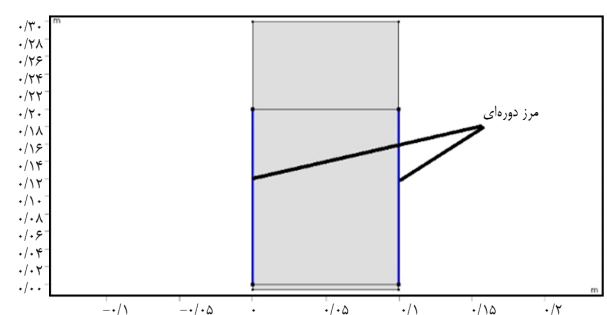
شکل ۷- شبکه بندی کل دامنه محاسباتی (اندازه محورهای مش بندی برحسب متر است).



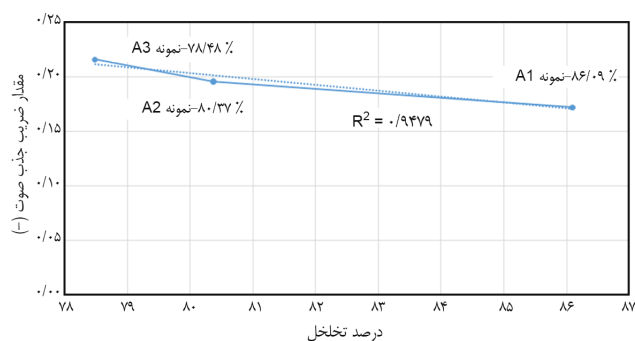
شکل ۴- تعریف شرایط مرزی دوره ای برای محیط هوا (اندازه محورهای مش بندی برحسب متر است).

پدیده های فیزیکی، شرایط مرزی اعمال شده بر مسئله است. به عبارت دیگر، شرایط مرزی مسئله تعیین می کند، رفتار یک پدیده فیزیکی در مرز بین دو محیط دارای خواص متفاوت چگونه تنظیم می شود. شرط مرزی که برای مرزهای خارجی این مسئله در نظر گرفته شده، شرایط مرزی تناوبی صوتی (fluted periodicity) و مرز سخت صوتی (sound hard) است. به عبارت دیگر، شرط مرزی تناوبی صوتی تعیین می کند که موج صوتی برخوردی به مرزهای خارجی در مسئله همواره به طور کاملاً ایده آل (۱۰۰٪) و بدون هیچ گونه انعکاسی از آن عبور می کند. همچنین، شرط مرزی سخت صوتی به طور ایده آل امواج صوتی را به صورت کامل انعکاس می دهد. این مرزها در شکل های ۴ و ۵ به منظور درک بهتر مکان آن ها در این شبیه سازی نشان داده شده اند. همان طور که در شکل دیده می شود، این مرز در جایی قرار گرفته است که موج صوتی ورودی می تواند از آن عبور کند و از محیط خارج شود. بنابراین، در این مرز رفتار موج صوتی باید به گونه ای تعیین شود که قابلیت خارج شدن از محیط را داشته باشد. در نتیجه شرط مرزی اعمال شده به گونه ای است که موج پس از رسیدن بدین سطح، بدون هیچ مشکلی از آن عبور می کند و از محیط خارج می شود.

در شکل ۶، لایه کاملاً جاذب نشان داده شده است که وظیفه



شکل ۵- تعریف شرایط مرزی دوره ای برای ماده متخلخل (اندازه محورهای مش بندی برحسب متر است).

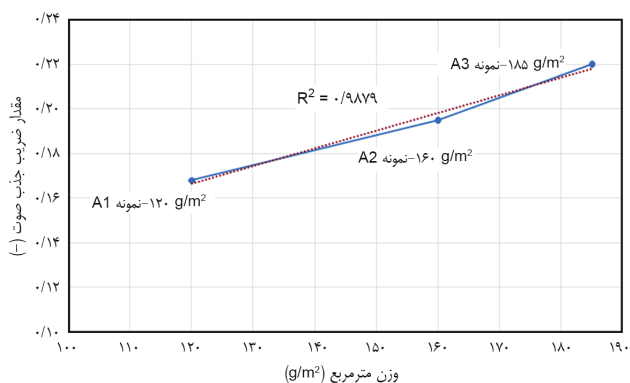


شکل ۹- رابطه درصد تخلخل نمونه‌ها و میانگین ضریب جذب صوت.

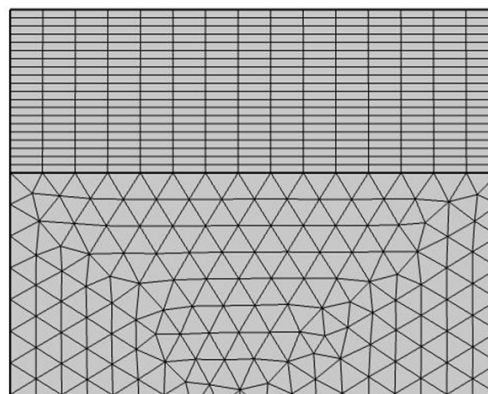
دارای طول حلقه‌های کوچک‌تر نسبت به نمونه‌های A2 و A1 بوده که در حقیقت دارای تراکم بافت بیشتری است. بنابراین با توجه به تعریف درصد تخلخل می‌توان گفت، نمونه A3 دارای کمترین اندازه شعاع فضای خالی و A1 بیشترین اندازه شعاع فضای خالی است. همان‌گونه که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، با افزایش درصد تخلخل در نمونه‌های A1، A2 و A3 جذب صوت روندی کاهشی یافته است که با ضریب همبستگی به‌دست‌آمده از روش پیرسون هم‌خوانی دارد. این همبستگی به‌صورت خطی و معکوس و برابر با ۰/۹۴۷۹ است.

۴-۲ اثر وزن هر متر مربع بر ضریب جذب صوت در نمونه‌های تک‌لایه

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل واریانس یک‌طرفه به روش توکی، تفاوت معناداری میان حداقل یکی از گروه‌های وزنی با بقیه گروه‌ها از نظر میزان ضریب جذب صوت وجود دارد. بر این اساس، کمترین میزان ضریب جذب صوت به نمونه A1 و بیشترین آن به نمونه A3 اختصاص دارد. در شکل ۱۰، تغییرات ضریب جذب صوت در برابر مقادیر مختلف وزن هر متر مربع منسوج آمده



شکل ۱۰- رابطه وزن متر مربع نمونه‌ها و ضریب جذب صوت.



شکل ۸- نوع شبکه‌بندی در ناحیه لایه کاملاً جاذب و سطح هوا.

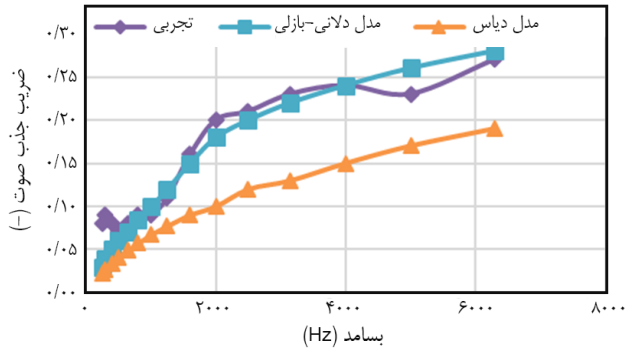
می‌دهد. در سطح تماس هوا باید شبکه‌بندی ریزتر باشد. همچنین در ناحیه کاملاً جاذب شبکه‌بندی باید با ساختار باشد که این موضوع در شکل ۸ نشان داده شده است.

۴ نتایج و بحث

در این مطالعه، اثر متغیرهای وزن متر مربع، درصد تخلخل و تعداد لایه‌ها بر میزان ضریب جذب نمونه‌ها مطالعه شده است. در ادامه، نتایج عملی به‌دست‌آمده با استفاده از تحلیل واریانس یک‌طرفه و با فاصله اطمینان ۹۵٪ در نرم‌افزار آماری SPSS تحلیل شده و میزان همبستگی متغیرها با آزمون پیرسون محاسبه شده است. در ادامه از مدل ریاضی ارائه‌شده توسط دیاس برای پیش‌بینی وضعیت جذب صوت نمونه‌های مدنظر استفاده شد. در نهایت به‌منظور صحت‌سنجی و بررسی چگونگی میزان انطباق نتایج عملی با استفاده از نرم‌افزار کامسول وضعیت جذب صوت برای نمونه‌های A1، A2، A3 و A3 پنج‌لایه بررسی و تحلیل شد. به‌عبارتی دیگر، هدف ما بررسی میزان انطباق یافته‌های تجربی با مدل‌سازی دیاس و همچنین شبیه‌سازی نرم‌افزاری کامسول بوده است.

۴-۱ اثر تخلخل و فضای خالی بر ضریب جذب صوت در نمونه‌های تک‌لایه

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل واریانس یک‌طرفه به روش توکی، تفاوت معناداری بین حداقل یکی از نمونه‌ها با سایر نمونه‌ها از نظر میزان ضریب جذب صوت وجود دارد. بر این اساس، نمونه A1 کمترین و نمونه A3 بیشترین میزان ضریب جذب صوت را دارند. در شکل ۹، ضریب همبستگی میان نمونه‌های مختلف نمایش داده شده است. همان‌گونه که قبلاً بیان شد، نمونه A3

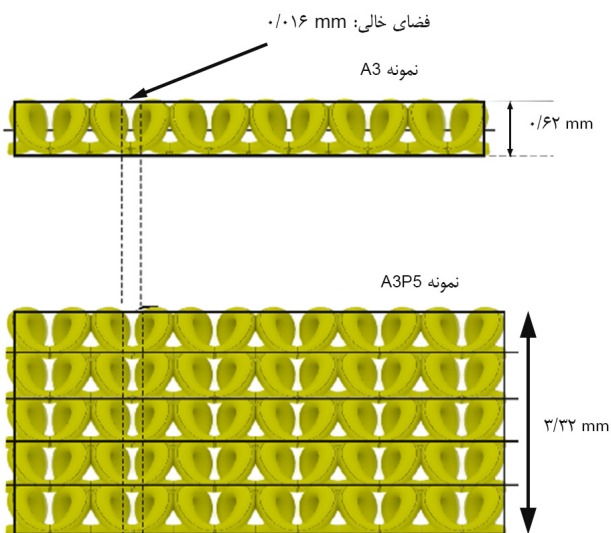


شکل ۱۳- مقایسه نتایج تجربی و عددی جذب صوت نمونه A3 در بازه بسامد ۱۰۰ Hz تا ۶۳۰۰ Hz.

توجه به نتایج شبیه‌سازی نرم‌افزاری این موضوع نیز رد می‌شود. داده‌های تجربی، اوج‌های رزونانس را در ۲۰۰۰ Hz تا ۳۰۰۰ Hz نشان می‌دهد. این مسئله ممکن است ناشی از وجود لایه بسیار نازکی از هوا بین پارچه و نگهدارنده نمونه لوله به‌عنوان حفره رزونانس با حفره‌های پارچه باشد که به‌عنوان دیواره میکروحفره‌دار نازک عمل می‌کند.

۴-۴ اثر ضخامت (تعداد لایه‌ها) با تخلخل یکسان بر ضریب جذب صوت

برای بررسی دقیق‌تر اثر تعداد لایه‌ها بر مقدار ضریب جذب، آزمون روی نمونه‌های چندلایه انجام شد. با توجه به اینکه نمونه A3 به دلیل دارا بودن کمترین میزان تخلخل، بیشترین میزان جذب صوت را دارد،



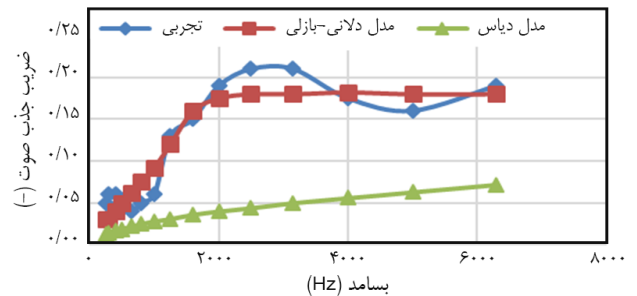
شکل ۱۴- نمایش نمای سطح جانبی شبیه‌سازی شده نمونه پارچه‌های حلقوی بافت کد A3 استفاده شده در آزمون تجربی: A3 پارچه تک‌لایه با ضخامت ۰/۶۲ mm و A3P5 پارچه پنج‌لایه با ضخامت ۳/۳۲ mm.

است. در نمودار به‌وضوح دیده می‌شود، با افزایش وزن هر متر مربع در نمونه‌های A1، A2 و A3 میزان ضریب جذب صوت به‌طور خطی افزایش می‌یابد که این همبستگی قوی را می‌توان ناشی از افزایش تراکم بافت و کاهش درصد تخلخل دانست.

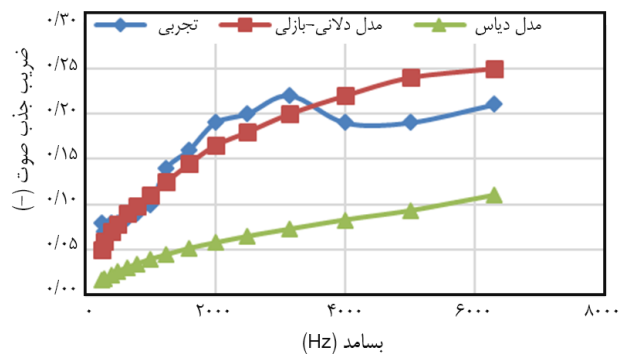
۳-۴ مقایسه نتایج نظری و عملی با نتایج شبیه‌سازی

در شکل‌های ۱۱ تا ۱۳ نتایج مدل‌سازی شده به روش تجربی با نتایج به‌دست‌آمده از مدل ریاضی دیاس و شبیه‌سازی با نرم‌افزار کامسول (روش دلتا-بازلی) در نمونه‌های A1، A2 و A3 مقایسه شده‌اند.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، روش شبیه‌سازی نرم‌افزاری کامسول انطباق مناسب‌تری نسبت به مدل‌سازی ریاضی دیاس دارد. این مسئله نشانگر آن است که روش مدل‌سازی دیاس دارای خطای بیشتری نسبت به شبیه‌سازی نرم‌افزاری است. تفاوت نتایج نظری و تجربی می‌تواند به دلیل فرض دایره کامل بودن حفره‌ها در پارچه و یکنواختی کامل استوانه‌ها در مدل نظری دیاس باشد. اما در حقیقت شکل آن‌ها یکنواخت نیست. همچنین دیاس دقت اندازه‌گیری لوله امیدانس را برای نمونه‌های تک‌لایه نازک ضعیف و این مورد را سبب اختلاف نتایج تجربی با مدل‌سازی دانسته است [۱۲]. اما با



شکل ۱۱- مقایسه نتایج تجربی و عددی جذب صوت نمونه A1 در بازه بسامد ۱۰۰ Hz تا ۶۳۰۰ Hz.



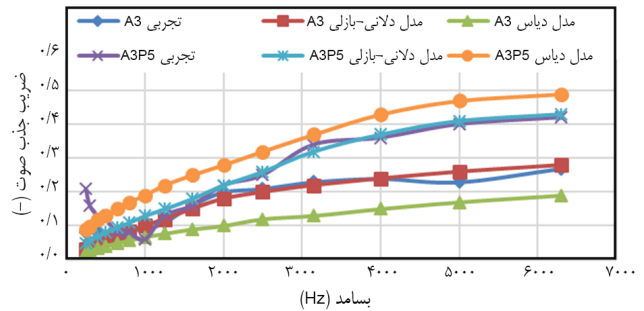
شکل ۱۲- مقایسه نتایج تجربی و عددی جذب صوت نمونه A2 در بازه بسامد ۱۰۰ Hz تا ۶۳۰۰ Hz.

۵ نتیجه گیری

هدف از انجام این پژوهش، تعیین مشخصه‌های آکوستیکی پارچه‌های حلقوی پودی به منظور شناخت عوامل مؤثر بر ضریب جذب صوت منسوجات حلقوی بافت پودی است. در این پژوهش، اثر عوامل مختلف از قبیل تعداد لایه‌های منسوج، ضخامت، درصد تخلخل، وزن متر مربع بر ضریب جذب صوت به طور تجربی بررسی شد. سپس با استفاده از نظریه دیاس، مقدار ضریب جذب صوت پیش‌بینی و با نتایج تجربی مقایسه شد. به منظور اطمینان از چگونگی میزان انطباق نتایج نظری دیاس با نتایج تجربی، شبیه‌سازی نرم‌افزاری با نرم‌افزار کامسول برای حالت‌های تک‌لایه و چندلایه با استفاده از مدل دلانی-بازلی انجام پذیرفت. نتایج نشان داد، شبیه‌سازی نرم‌افزاری انطباق بهتری با نتایج تجربی نسبت به مدل دیاس دارد که بیانگر دقت بیشتر مدل شبیه‌سازی رایانه‌ای در مقایسه با مدل نظری دیاس است. همچنین در روش شبیه‌سازی مشخص شد، مهم‌ترین پارامتر اثرگذار بر ضریب جذب صوت، بسامد است. به عبارتی در بسامدهای زیاد و کم، نمونه واکنش متفاوتی نسبت به جذب صوت نشان می‌دهد. طبق نتایج، ضریب جذب صوت در بازه بسامد ۶۳۰۰-۳۱۵۰ Hz برای نمونه یک‌لایه A3 نسبت به نمونه A1، ۲۴/۶۳٪، و برای نمونه پنج‌لایه A3P5 نسبت به نمونه A3، ۷۶/۷۴٪ افزایش داشت. بر این اساس می‌توان گفت، متغیر درصد تخلخل با مقدار ضریب جذب رابطه خطی و معکوس دارد که بدین معنی است، با کاهش درصد تخلخل مقدار ضریب جذب صوت افزایش داشته است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از مقایسه متغیرهای مستقل و وابسته به روش تحلیل واریانس، به ترتیب درصد تخلخل-وزن متر مربع پارچه و ضخامت بر ضریب جذب صوت اثرگذار بوده‌اند. همچنین با توجه به نتایج حاصل از ضریب همبستگی پیرسون، اثرگذارترین متغیرها درصد تخلخل و ضخامت هستند. در پژوهش‌های آینده، به منظور بررسی دقیق‌تر اثر ضخامت بر ضریب جذب صوت، چگونگی تأثیر تعداد لایه‌ها را در نمونه‌هایی با درصد تخلخل وزن متر مربع و تراکم‌های مختلف بررسی می‌شود.

مراجع

[1] D.V. Bihola, H.N. Amin, and V.D. Shah, "Application of nano material to enhance acoustic properties", *J. Eng. Sci. Futur. Technol.*, vol. 1, no. 12, pp. 001-009, 2015.



شکل ۱۵- مقایسه ضرایب جذب صوت تجربی و مدل‌سازی برای نمونه‌های تک‌لایه و پنج‌لایه.

نمونه پارچه پنج‌لایه با کد A3 تهیه و آماده‌سازی شد. این نمونه پارچه پنج‌لایه به‌عنوان A3P5 نام‌گذاری شده است. در شکل ۱۵، تغییرات نتایج ضریب جذب صوت برای نمونه یادشده در سه حالت تجربی و مدل‌سازی‌های نرم‌افزاری و دیاس با یکدیگر مقایسه شده‌اند. به منظور انجام محاسبات نظری شعاع حفره از نتایج پارچه یک‌لایه منفرد استفاده شده است. پارچه A3P5 متشکل از پنج لایه است و حفره‌های لایه‌های متوالی، در یک راستا طبق شکل ۱۴ در نظر گرفته شده‌اند.

با توجه به مطالب پیش‌گفته، خلاصه محاسبات نظری و عملی و شبیه‌سازی‌شده را می‌توان در شکل ۱۵ مشاهده کرد. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش ضخامت منسوج، ضریب جذب صوت افزایش می‌یابد. افزون بر این نتایج تجربی نشان می‌دهند، ضریب جذب صوت به تدریج از بسامد ۲۰۰۰ Hz افزایش می‌یابد. از نتایج به‌دست‌آمده مشاهده می‌شود که ضخامت، یکی از متغیرهای اثرگذار بر مدل‌سازی جذب صوت در روش دیاس است. با افزایش ضخامت، نتایج مدل‌سازی و تجربی به هم نزدیک می‌شود. اما نتایج روش دلانی-بازلی، انطباق بیشتری با نتایج تجربی نشان می‌دهند.

میانگین ضریب جذب صوت نمونه A3P5 در بازه بسامد ۳۱۵۰ Hz تا ۶۳۰۰ Hz، ۷۶/۷۴٪ بیش از نمونه A3 است. این بدان معناست که پنج‌لایه‌کردن پارچه‌ها توانسته است نزدیک به ۷۷٪ سبب افزایش جذب صوت شود.

[2] Y. Lee and C. Joo, "Sound absorption properties of recycled polyester fibrous assembly absorbers", *Autex Res. J.*, vol. 3, no. 2, pp. 78-84, 2003.

- [3] X. Sagartzazu, L. Hervella-Nieto, and J.M. Pagalday, "Review in sound absorbing materials", *Arch. Comput. Method. Eng.*, vol. 15, no. 3, pp. 311-342, 2008.
- [4] A.E. Tiuc, O. Vasile, A.D. Usca, T. Gabor, and H. Vermesan, "The analysis of factors that influence the sound absorption coefficient of porous materials", *Rom. J. Acoust. Vib.*, vol. 11, no. 2, pp. 105, 2014.
- [5] M. Tascan and E.A. Vaughn, "Effects of fiber denier, fiber cross-sectional shape and fabric density on acoustical behavior of vertically lapped nonwoven fabrics", *J. Eng. Fiber. Fabr.*, 2008. doi: 10.1177/155892500800300206
- [6] N.D. Yilmaz, P. Banks-Lee, N.B. Powell, and S. Michielsen, "Effects of porosity, fiber size, and layering sequence on sound absorption performance of needle-punched nonwovens", *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 121, no. 5, pp. 3056-3069, 2011.
- [7] E. Yi, G. Cho, Y. Na, and J.G. Casali, "A fabric sound evaluation system for totally auditory-sensible textiles", *Text. Res. J.*, vol. 72, no. 7, pp. 638-644, 2002.
- [8] M. Küçük and Y. Korkmaz, "The effect of physical parameters on sound absorption properties of natural fiber mixed nonwoven composites", *Text. Res. J.*, vol. 82, no. 20, pp. 2043-2053, 2012.
- [9] P. Soltani and M. Zerrebini, "The analysis of acoustical characteristics and sound absorption coefficient of woven fabrics", *Text. Res. J.*, vol. 82, no. 9, pp. 875-882, 2012.
- [10] Y. Shoshani and G.J.A.A. Rosenhouse, "Noise absorption by woven fabrics", *Appl. Acoust.*, vol. 30, no. 4, pp. 321-333, 1990.
- [11] Y.K. Shoshani, "Noise absorption by a combination of woven and nonwoven fabrics", *J. Text. Inst.*, vol. 82, no. 4, pp. 500-503, 1991.
- [12] T. Dias and R. Monaragala, "Sound absorption in knitted structures for interior noise reduction in automobiles", *Meas. Sci. Tech.*, vol. 17, no. 9, pp. 2499, 2006.
- [13] M.G. Honarvar, A.A.A. Jeddi, and M. Amani Tehran, "Noise absorption modeling of rib knitted fabrics", *Text. Res. J.*, vol. 80, no. 14, pp. 1392-1404, 2010.
- [14] Y. Liu and H. Hu, "Sound absorption behavior of knitted spacer fabrics", *Text. Res. J.*, vol. 80, no. 18, pp. 1949-1957, 2010.
- [15] C. Kim, G. Cho, H. Yoon, and S. Park, "Characteristics of rustling sounds created by the structure of polyester warp knitted fabrics", *Text. Res. J.*, vol. 73, no. 8, pp. 685-691, 2003.
- [16] V. Arumugam, R. Mishra, J. Militky, and B. Tomkova, "Noise attenuation performance of warp knitted spacer fabrics", *Text. Res. J.*, vol. 89, no. 3, pp. 281-293, 2019.
- [17] S. Chen, H.X. Chen, X.P. Gao, and H.R. Long, "Sound absorption properties of polyurethane-based warp-knitted spacer fabric composites", *Indian J. Fibre Text. Res.*, vol. 42, pp. 299-306, 2017.
- [18] M. Davoudabadi Farahani, M. Jamshidi Avanaki, and A.A. Jeddi, "Sound absorption of (WKSF) based on knit structure and nanofiber enhancement", *J. Ind. Text.*, 2020. doi: 10.1177/152808372090341
- [19] C.W. Kosten and C. Zwicker, *Sound Absorbing Materials*, Amsterdam: Elsevier, 1949.
- [20] J. Allard and N. Atalla, *Propagation of Sound in Porous Media: Modelling Sound Absorbing Materials*, 2nd ed., John Wiley & Sons, 2009.
- [21] R. Guidoin, M. King, D. Marceau, A. Cardou, D. De La Faye, J.M. Legendre et al., "Textile arterial prostheses: is water permeability equivalent to porosity?", *J. Biomed. Mater. Res.*, vol. 21, no. 1, pp. 65-87, 1987.