

Investigation and Modeling the Effect of Different Filler Materials on the Sound Absorption Properties of Double Base Persian Rugs

Touba Ardekani, Aliasghar Alamdar Yazdi*, and Morteza Vadood
Textile Engineering, Yazd University, Postal Code 8915818411, Yazd, Iran

Received: 9 September 2021, Accepted: 30 November 2021

Abstract

Rug is one of the cultural and artistic symbols of Iran, which is several thousand years old and is used as an exquisite flooring or to decorate the interior of various places. Nevertheless, this art work has acoustic properties due to the high volume of fibers and thickness. Therefore, in this paper, first a new structure of the rug is introduced and then its acoustic properties are evaluated and modeled. The structure of the new Double Base Persian rug is similar to the structure of a regular rug, and the only difference is that there are two sets of warp yarns (instead of one) with a certain distance. In order to investigate the effect of double bases and also the presence of various materials with different percentages in the gap between the two bases on the sound absorption of the new rug, different samples were produced. It is worth mentioning that the effect of the presence of pile on the sound absorption of the new rug has been investigated. The sound absorption of the samples was measured using an impedance tube method and the Johnson-Champoux-Allard model was used to model the sound absorption of the samples. The obtained results showed that although the kind of filler material has a little effect on sound absorption, the sound absorption increases by filling the gap between the two bases and by increasing the filling percentage. The Johnson-Champoux-Allard model also indicated a very good agreement with the experimental data.

Keywords: rug base, double base persian rug, sound absorption coefficient, impedance tube, Johnson-Champoux-Allard model

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail: aalamdar@yazd.ac.ir

می‌یابد. همچنین، وجود لایه پستی به بهبود جذب صوت، به‌ویژه در بسامدهای میانی منجر می‌شود. Küçük و همکاران [۱۰]، اثر پارامترهای طول و چگالی خاب را بر قالی‌های آکرلیک بررسی کردند. نتایج پژوهش‌های آن‌ها بیانگر این بود که دو عامل مزبور بر خواص جذب صوت قالی در تمام محدوده‌های بسامدی اثرگذارند. همچنین، جذب صوت در نمونه‌ها با ازدیاد بسامد افزایش می‌یابد. اخیراً نیز Çelik [۱۱]، اثر ارتفاع خاب را آزمایش کرد و نشان داد، با افزایش ارتفاع خاب و بسامد، جذب صوت قالی نیز افزایش می‌یابد.

مجموع مطالعات در این زمینه نشان می‌دهند، در قالی‌ها با افزایش بسامد، جذب صوت نیز افزایش می‌یابد و قالی‌ها در بسامدهای متوسط و کم، جذب صوت کمتری دارند، در حالی که در بسامدهای بیشتر دارای جذب بیشتری هستند. بنابراین آنچه چالش‌برانگیز است، جذب کم صوت در بسامدهای کم و متوسط است. همچنین، اگرچه حجم زیادی از ساختار قالی را بستر آن تشکیل داده، اما در مطالعات انجام‌شده درباره جذب صوت قالی تاکنون به تأثیر بخش بستر توجه خاصی نشده است. بنابراین، در این مطالعه به‌منظور بهبود جذب صوت قالی، به‌ویژه در بسامدهای میانه، روی بخش بستر آن تمرکز شده است. بدین منظور، خواص آکوستیک قالی جدید با بستر متفاوتی که فاصله هوایی ایجادشده در آن با مواد و درصدهای مختلف پر شده، مطالعه و بررسی شده است. همچنین، درنهایت برای پیش‌بینی خواص صوتی این قالی از مدل JCA استفاده شده است.

۲ تجربی

۲-۱ مواد و تهیه نمونه

مشخصات نخ‌های استفاده‌شده در ساختار نمونه قالی‌های این پژوهش در جدول ۱ مشخص شده است. نمونه قالی‌های جدید به پیروی از مطالعه صادقی با دو دسته‌کردن بستر قالی تولید شد [۱۲]. به‌عبارت دیگر، سازوکار تولید این قالی بدین شکل است که دسته نخ‌های تار به‌جای یک‌دسته به دو دسته مجزا و مساوی تقسیم و این دو دسته با فاصله ۱ mm از یکدیگر قرار داده شدند. سپس، همانند قالی ایرانی متداول، نخ‌های خاب به‌جای گره خوردن به یک دسته نخ تار، به دو دسته گره می‌خورند که یک دسته جلوتر و دسته دیگر عقب‌تر قرار گرفته‌اند. تفاوت ساختار قالی ایرانی عادی با قالی جدید در شکل ۱ قابل مشاهده است.

متحمل شدن هزینه‌های اضافی، عملی نیست. بنابراین، قالی‌ها افزون بر کاربرد آن‌ها به‌عنوان کف‌پوش می‌توانند با توجه به ضخامت درخور توجه آن‌ها در مقایسه با سایر جاذب‌ها به‌عنوان جاذب صوت مطلوب نیز استفاده شوند.

قالی‌ها به‌دلیل برخورداری از ضخامت و سطح وسیع، فضای گسترده‌ای از ترکیب مقدار زیادی الیاف و هوا را برای به‌دام‌اندازی امواج صوتی فراهم می‌آورند. پس از به‌دام‌اندازی امواج صوتی، انرژی ارتعاشی آن‌ها از طریق اصطکاک با الیاف داخل قالی به انرژی گرمایی تبدیل می‌شود، در نتیجه سطح انرژی صوت کاهش می‌یابد. از سوی دیگر، قالی‌ها نه تنها صدای موجود در هوا و درون اتاق را جذب می‌کنند، بلکه به‌عنوان عایقی برای کاهش انتقال صدا به طبقات بالاتر یا پایین‌تر نیز عمل می‌کنند [۴]. این مطالب اهمیت فوق‌العاده قالی را در کاهش نوفه اثبات می‌کند. بدنه قالی‌ها دارای دو قسمت خاب و بستر هستند که به‌ترتیب معمولاً از نخ‌های پشمی یا آکرلیک با حجم زیاد و نخ‌های تار و پود تشکیل می‌شوند. هر قسمت بر ویژگی‌های قالی اثر می‌گذارد.

مطالعات اولیه درباره جذب صوت قالی از سال ۱۹۵۵ آغاز شده است [۵]. اکثر مطالعات به بررسی اثر پارامترهای خاب، مانند ارتفاع، تراکم و وزن به‌منظور بهبود جذب صوت قالی پرداخته‌اند. به‌عنوان مثال Nute و همکاران [۶]، برخی از عوامل مؤثر بر جذب صوت قالی را مطالعه کردند. آن‌ها نمونه را با استفاده از لوله امپدانس آزمایش و گزارش کردند، ضخامت خاب، نمره و ارتفاع خاب اثر اندکی بر جذب صوت قالی دارند. در حالی که تراکم خاب عملاً هیچ اثری ندارد و جذب صوت نمونه‌ها با ازدیاد بسامد افزایش می‌یابد. در پژوهشی دیگر، Shoshani و همکاران [۷،۸]، اثر پارامترهای خاب را بر جذب صوت قالی‌های تافته بررسی کردند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان دادند، بسته به محدوده بسامد، افزایش ارتفاع خاب می‌تواند به افزایش یا کاهش میانگین ضریب جذب صوت در بسامدهای ۲۵۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ Hz یا ضریب کاهش نوفه (noise reduction coefficient, NRC) منجر شود یا ممکن است، حتی هیچ اثری نداشته باشد و افزایش تراکم خاب موجب افزایش NRC می‌شود. همچنین، وجود یک لایه پستی در پشت قالی به بهبود جذب صوت قالی، به‌ویژه در بسامدهای میانی، منجر می‌شود و به‌طور کلی جذب صوت با افزایش بسامد سیر صعودی دارد.

نتایج مطالعات Elkhateeb [۹]، درباره جذب صوت قالی استفاده‌شده در مسجد با استفاده از روش اتاقک طنین نشان داد، هرچه تراکم خاب بیشتر باشد، ضریب جذب صوت نیز افزایش

جدول ۱- مشخصات نخ‌های استفاده‌شده در نمونه‌ها.

نوع نخ	مواد	سامانه ریسندگی	سامانه نمره‌گذاری	نمره نخ و تاب
تار	پنبه	رینگ	Ne (yds/lb)	1.33/3Z250
پود کلفت	پنبه	رینگ	Ne (yds/lb)	0.83/3Z150
پود نازک	پنبه	رینگ	Ne (yds/lb)	6/5S140
خاب	پشم	ورستد	Nm (m/g)	2.33/6S100

مؤثر بر ویژگی‌های جذب صوت جاذب‌های متخلخل است که میزان سختی عبور جریان هوا از نمونه را نشان می‌دهد. این پارامتر با معادله (۱) قابل محاسبه است:

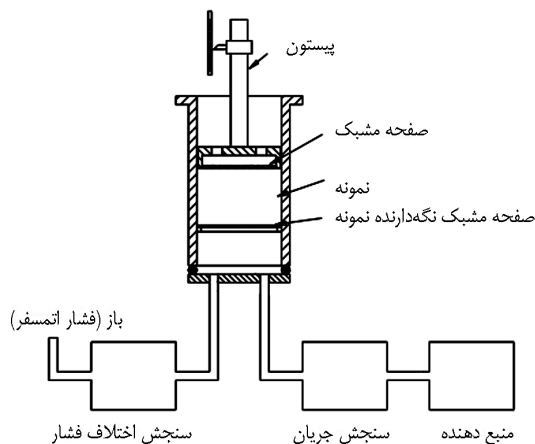
$$\sigma = \frac{\Delta P}{V \times d} \quad (1)$$

در این معادله، ΔP نسبت اختلاف فشار هوا در دو طرف نمونه، V سرعت هوا و d ضخامت در جهت جریان هوا را نشان می‌دهد [۱۳]. در این مطالعه، σ براساس استاندارد ISO 9053 با دستگاه آزمایشگاهی اندازه‌گیری مقاومت در برابر جریان هوا (ساخته‌شده در دانشگاه بولونیای ایتالیا) اندازه‌گیری شد (شکل ۳).

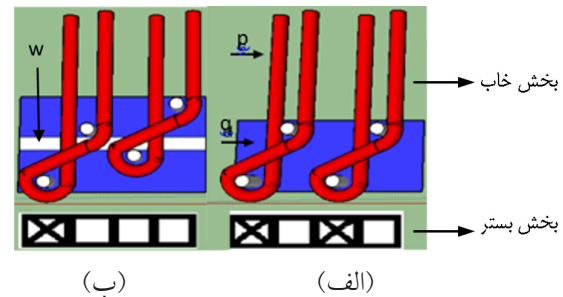
۲-۲-۲ تخلخل باز

عامل بعدی دیگر که بر ویژگی‌های صوتی مواد متخلخل اثر می‌گذارد، تخلخل باز (ϕ) است. ϕ معمولاً به‌صورت نسبت حجم منافذ متصل به هم به حجم کل نمونه تعریف می‌شود، که به‌شکل زیر اندازه‌گیری می‌شود:

$$\phi = 1 - \frac{\rho_s}{\rho_f} \quad (2)$$



شکل ۳- نمای دستگاه سنجش مقاومت در برابر جریان هوا [۱۴].



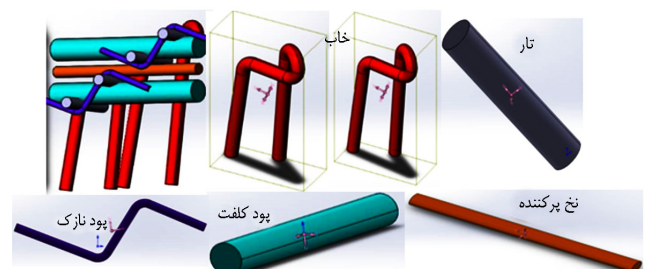
شکل ۱- مقایسه ساختار قالی ایرانی: (الف) عادی و (ب) قالی جدید DBP. p بخش خاب، q بخش بستر و w فاصله هوایی بین دو بستر در قالی جدید.

به‌منظور بررسی اثر وجود مواد پرکننده میان فضای خالی بین دو بستر و اثر جنس آن‌ها، ۴ نمونه از قالی بستر دوگانه ایرانی یا DBP (double base persian) با فاصله بین دو بستر ۱ و تراکم 4 warp/cm طوری تهیه شدند که فاصله بین دو بستر با ۳ مواد مختلف پنبه، پشم و آکرلیک (قطر نخ‌ها ۱ mm) پر شد و این فضا در یک نمونه خالی ماند. درنهایت به‌منظور تمرکز بر بخش بستر، افزون بر آزمودن نمونه‌ها، با تراشیدن تمام خاب‌ها از روی آن‌ها مجدداً آزمایش شدند. شکل ۲ ساختار قالی جدید را با وجود نخ به‌عنوان پرکننده در فضای میان دو بستر نشان می‌دهد.

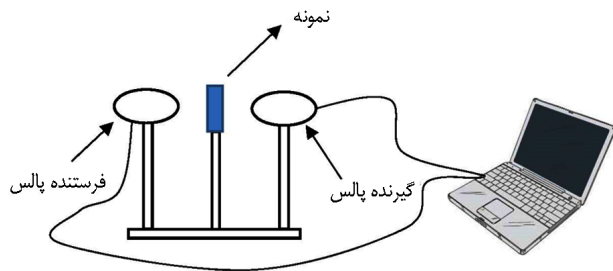
۲-۲-۲ روش‌ها

۲-۲-۱ مقاومت در برابر جریان هوا

مقاومت به جریان هوا، σ (Ns/m^4)، از مهم‌ترین عوامل ساختاری



شکل ۲- ساختار نمونه قالی DBP.



شکل ۵- نمایش از اندازه‌گیری پیچ‌خوردگی.

اندازه‌گیری دستگاه در حالت با و بدون نمونه، می‌توان مقدار این تغییرات و در نتیجه مقدار پیچ‌خوردگی را محاسبه کرد.

۲-۲-۴ طول مشخصه گرانو و گرمایی

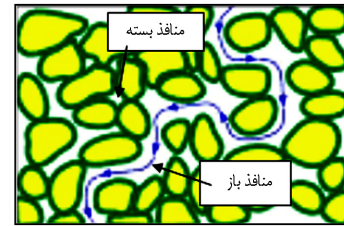
طول‌های مشخصه گرانو و گرمایی، Λ و Λ' (μm)، نیروهای گرانو و تبادل‌های گرمایی قاب جامد و سیال اشباع موجود در آن را در بسامدهای زیاد توصیف می‌کنند. اندازه‌گیری این دو عامل برای نمونه‌هایی با پیچیدگی ساختاری زیاد، کار آسانی نیست و از روی منحنی برازش داده‌های تجربی و مدل نظری (با استفاده از روش معکوس)، براساس الگوریتم حداقل مربع ارزیابی می‌شود [۱۸، ۱۹]. در این پژوهش، با استفاده از الگوریتم ژنتیک با نرم‌افزار MATLAB، در محدوده مشخص‌شده برای ۵ عامل مدل که در ادامه توضیح داده شده‌اند، این دو عامل طوری محاسبه شدند که نمودار داده‌های تجربی بهترین انطباق را با مقادیر پیش‌بینی‌شده با مدل داشته باشند.

۲-۲-۵ ضریب جذب صوت

در این مطالعه، ضریب جذب صوت با استفاده از روش ماتریس انتقال در لوله امپدانس مطابق استانداردهای ISO 10534-2 و ASTM E 1050-10 [۲۰] با استفاده از دستگاه آزمایشگاهی ساخته‌شده در آزمایشگاه آکوستیک بلونیای ایتالیا، مطابق شکل ۶، اندازه‌گیری شد. نمونه‌هایی با قطر ۱۰۰ و ۴۰ mm برای اندازه‌گیری مقدار جذب صوت به ترتیب در محدوده ۲۰۰-۱۰۰ و ۴۴۰۰-۷۰۰ Hz استفاده شدند. سپس، اندازه‌گیری‌های لوله بزرگ و کوچک را می‌توان ترکیب کرد تا جذب صوت را در محدوده بسامد بین ۱۰۰ و ۴۴۰۰ Hz به دست آورد. قابل ذکر است، ضخامت قالی‌ها با فشار ۵ g/cm² اندازه‌گیری شد.

۲-۲-۶ پیش‌بینی جذب صوت با مدل JCA

مدل JCA، شامل ۵ پارامتر فیزیکی (تخلخل (ϕ)، مقاومت جریان هوا



شکل ۴- انواع تخلخل‌ها (باز و بسته).

در این معادله، ρ_s چگالی قالی و ρ_f چگالی الیاف درون ساختار قالی است [۱۵]. تفاوت تخلخل باز با تخلخل بسته در شکل ۴ قابل مشاهده است. تخلخل بسته مربوط به تخلخلی است که راهی به بیرون ندارد و محبوس است. تخلخل باز به حفره‌هایی گفته می‌شود که راه ارتباطی با بیرون و سایر منافذ را داشته باشند. حفره‌های بسته اثر چندانی بر جذب صوت ندارند [۱۶].

چگالی قالی با استفاده از وزن و حجم قالی محاسبه شد. برای محاسبه چگالی متوسط الیاف، از آنجا که نمونه قالی از نوع الیاف مختلف با درصد‌های متفاوت ساخته شده است، یک نمونه تجزیه و هر نوع به‌طور جداگانه توزین شد تا نسبت وزن هر لیف به دست آید. با توجه به چگالی مخصوص هر لیف، متوسط چگالی الیاف با معادله زیر به دست می‌آید:

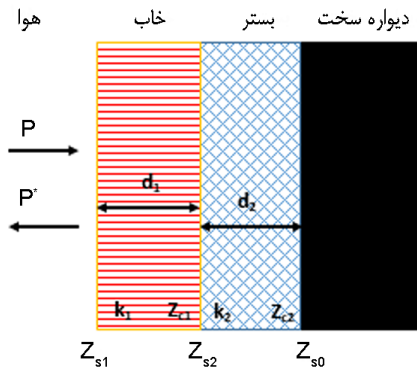
$$\rho_f = \sum_{i=1}^4 \rho_i \times \frac{w_i}{w_t} \quad (3)$$

که ρ_i چگالی هر لیف، w_i/w_t نسبت وزن هر لیف بر وزن واحد قالی و $w_t = \sum_{i=1}^4 w_i$ است.

۲-۲-۳ پیچ‌خوردگی

پیچ‌خوردگی (tortuosity)، α_m ، پارامتر بدون بعدی است که پیچیدگی مسیر منافذ را نشان می‌دهد. این پارامتر نشانگر نسبت مسیر طی‌شده یک موج صوتی در جاذب نسبت به مسیر مستقیم (ضخامت نمونه) است [۱۷].

در این پژوهش، مقدار پیچ‌خوردگی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه آزمایشگاهی فراصوت‌دهی در آزمایشگاه آکوستیک دانشگاه فرارای ایتالیا اندازه‌گیری شد (شکل ۵). طبق اصل فراصوت‌دهی، پالس الکتریکی ایجادشده به وسیله پالس فراصوت به فرستنده ارسال و به یک موج فراصوت تبدیل می‌شود. این موج به وسیله فرستنده در هوا پخش می‌شود و گیرنده پس از عبور موج از نمونه، آن را دریافت می‌کند. وجود نمونه بین فرستنده و گیرنده در دستگاه، باعث تغییر در اندازه و جهت سرعت میکروسکوپی سیال می‌شود. با مقایسه نتایج



شکل ۷- نمایی از قالی به عنوان یک جاذب دولایه.

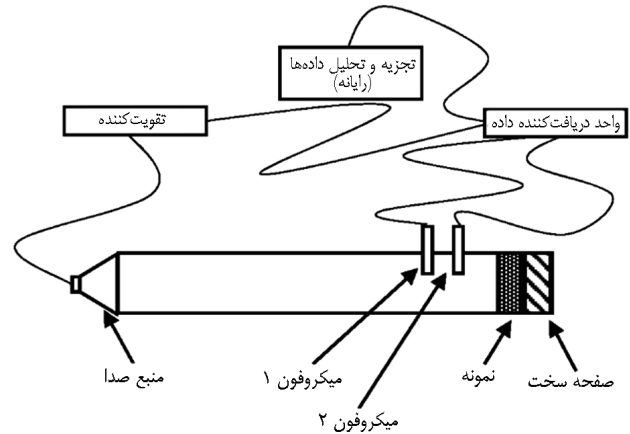
در ساختار چندلایه، نیاز به ارزیابی لایه‌های مختلف به‌طور جداگانه برای مدل‌سازی امپدانس سطح است. از آنجا که در قالی، ساختار بستر و منطقه خاب متفاوت است، فرض می‌شود که قالی یک جاذب دولایه باشد. همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است، ابتدا باید امپدانس سطح لایه بستر (Z_s^2) نمونه بدون خاب محاسبه شود تا امپدانس کل سطح با توجه به معادله زیر ارزیابی و در نهایت جذب صوت کل قالی با توجه به $Z_{s, total}$ در معادله (۱۰) محاسبه شود [۲۲]:

$$Z_{s, total} = \frac{-iZ_{s2}Z_{cl} \cot(k_1 d_1) + Z_{cl}^2}{Z_{s2} - iZ_{cl} \cot(k_1 d_1)} \quad (10)$$

در شکل ۷، p و p' به ترتیب بیانگر موج صوت برخوردی به سطح قالی و موج بازتابی آن است. d_1 و d_2 نیز به ترتیب ضخامت خاب و بستر نمونه قالی است. k معرف عدد موجی و Z_c امپدانس مشخصه بوده که زیروند ۱ معرف بخش خاب و ۲ معرف بخش بستر است. Z_{s1} امپدانس سطح قالی، Z_{s2} سطح بستر و Z_{s0} سطح دیواره سخت پشت نمونه است.

۳ نتایج و بحث

در این پژوهش، مقادیر جذب صوت نمونه‌ها با فاصله‌های مختلف بین دو لایه بستر، ضخامت شکاف هواست که این فاصله‌ها با مواد مختلف و با درصد‌های متفاوت پر شده‌اند. این مقادیر، با استفاده از سامانه لوله امپدانس در دو حالت با و بدون خاب محاسبه شد. افزون بر این، براساس پارامترهای فیزیکی پیش‌گفته، جذب صوت نمونه‌ها با استفاده از مدل JCA پیش‌بینی و با داده‌های تجربی در بسامدهای مختلف مقایسه شد.



شکل ۶- نمای لوله امپدانس.

(σ)، پیچ‌خوردگی (α_∞)، طول مشخصه گرانی و گرمایی (Λ' و Λ)، به عنوان ۵ ورودی برای مدل‌سازی جذب صوت است. با توجه به این مدل، می‌توان چگالی مؤثر ($\rho(\omega)$) و مدول توده ($k(\omega)$) را با معادله‌های (۴) و (۵) محاسبه کرد [۲۱]:

$$\rho(\omega) = \alpha_\infty \rho_0 \left[1 + \frac{\sigma \varphi}{j\omega \alpha_\infty \rho_0} \left(1 + \frac{4i\alpha_\infty^2 \eta \omega \rho_0}{(\sigma \Lambda \varphi)^2} \right)^2 \right] \quad (4)$$

$$K(\omega) = kP_0 \left[k - (k-1) \left[1 + \frac{8\eta \alpha_\infty \varphi}{\Lambda^2 \varphi i \omega \rho_0 \alpha_\infty N_{pr}} \left(1 + \frac{4i\alpha_\infty^2 \eta N_{pr} \omega \rho_0}{(\sigma \Lambda' \varphi)^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^{-1} \right]^{-1} \quad (5)$$

در این معادله، ρ_0 چگالی هوا، η گرانیوی هوا و N_{pr} عدد پرائتل بوده و P_0 فشار جو، k نسبت ظرفیت گرمایی ویژه و ω بیانگر بسامد زاویه‌ای (s^{-1}) است.

امپدانس صوتی سطح (Z_s) را می‌توان با استفاده از معادله (۸) با استفاده از امپدانس مشخصه ($Z_c(\omega)$) و عدد موجی ($K_c(\omega)$) تخمین زد [۲۱]:

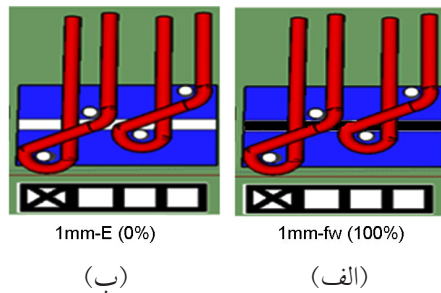
$$Z_c(\omega) = \frac{1}{\varphi} \sqrt{\rho(\omega) K(\omega)} \quad (6)$$

$$K_c = \omega \sqrt{\frac{\rho(\omega)}{K(\omega)}} \quad (7)$$

$$Z_s = Z_c(\omega) \cot(K_c(\omega) \times d) \quad (8)$$

که d ضخامت نمونه است. سپس، ضریب جذب صوت با استفاده از معادله زیر محاسبه می‌شود [۲۱]:

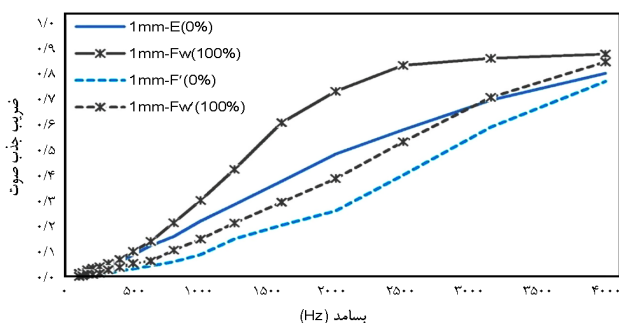
$$\alpha = 1 - \left| \frac{Z_s - \rho_0 c_0}{Z_s + \rho_0 c_0} \right|^2 \quad (9)$$



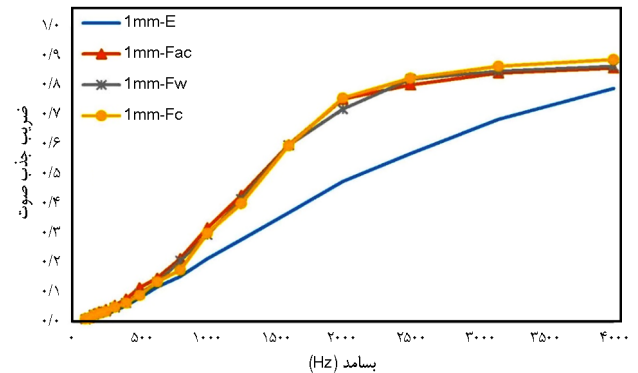
شکل ۱۰- نمونه با فضای بین دو بستر: (الف) ۱۰۰٪ پر شده و (ب) خالی.

این هستند که تمام خاب این نمونه‌ها تراشیده شده است. همان‌طور که از شکل‌های ۸ و ۹ مشهود است، اولاً ضریب جذب صوت در تمام نمونه‌ها با بسامد به‌صورت غیرخطی افزایش یافته و ثانیاً با وجود مواد پرکننده جذب صوت نیز افزایش می‌یابد، اما جنس مواد تأثیر چندانی بر جذب صوت ندارد. همچنین مطابق با شکل ۸، وجود مواد پرکننده به بهبود جذب صوت، به‌ویژه در بسامدهای میانه، منجر شده است.

در ادامه به‌منظور بررسی اثر درصد پرشدگی فاصله بین دو بستر، نمونه قالی DBP با تراکم ۴ بار و فاصله بین دو بستر ۲ mm طوری تهیه شدند که فضای ۲ mm یک‌بار با یک نخ پشمی با قطر ۱ mm و بار دیگر با دو نخ پشمی ۱ mm پر شدند. به‌عبارت دیگر، یک بار ۵۰٪ و بار دیگر ۱۰۰٪ فضای میان دو بستر پر شده و برای نمونه آخر این فضا، خالی نگه داشته شد. همچنین، ۳ mm قالی DBP دیگر با تراکم ۴ بار و فاصله بین دو بستر ۳ mm طوری تهیه شدند که این فاصله هوایی یک‌بار با ۱ نخ پشمی ۱ mm (۶۷٪) پر شدند. و بار دیگر با دو نخ پشمی ۱ mm (۳۳٪) پر شدند. فضای ۳ mm بین دو بستر برای نمونه آخر خالی نگه داشته شد که نتایج آن در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ قابل مشاهده است. شکل ۱۰



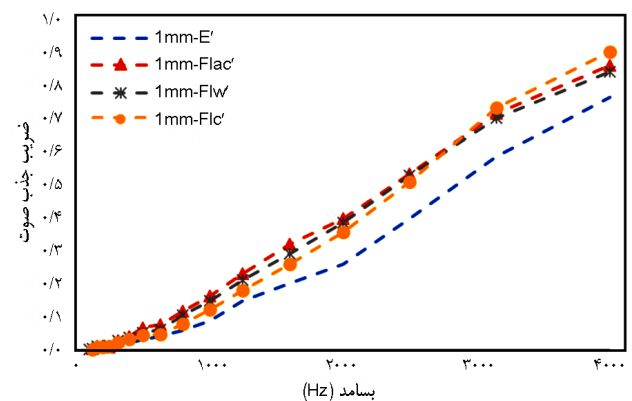
شکل ۱۱- اثر درصد مواد پرکننده بر فضای بین دو بستر در جذب صوت قالی DBP برای نمونه با فاصله بین دو بستر ۱ mm (— با وجود خاب و --- بدون خاب).



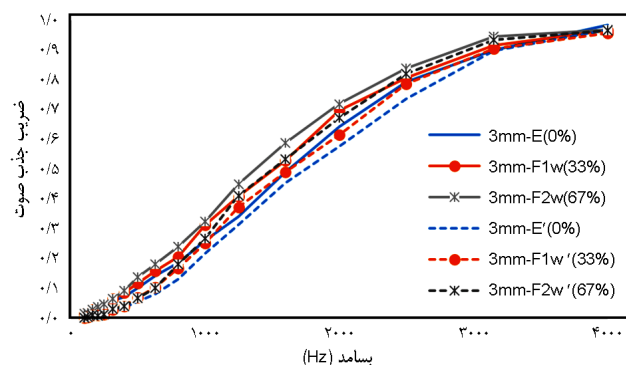
شکل ۸- اثر جنس مواد پرکننده در فضای ۱ mm میان دو بستر در جذب صوت قالی DBP (با وجود خاب).

۱-۳ اثر وجود مواد پرکننده و جنس و درصد آن‌ها بر فضای بین دو بستر قالی DBP

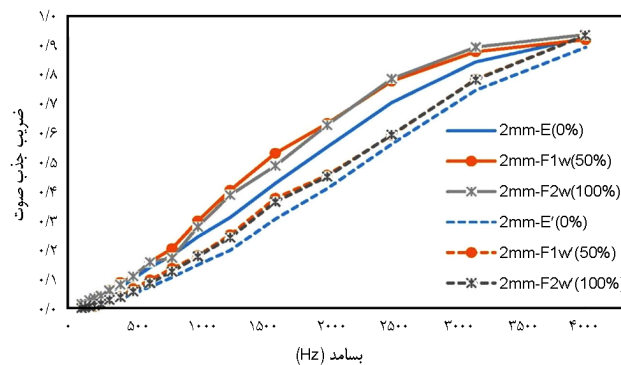
بدین منظور، ۴ نمونه قالی DBP با تراکم ۴ warp/cm و فاصله بین دو بستر ۱ mm طوری تهیه شدند که فضای میان دو بستر با یک نخ به قطر ۱ mm با ۳ جنس مختلف پنبه، پشم و آکرلیک پر شدند و در نمونه باقی‌مانده فضای میان دو بستر خالی نگه داشته شد. ابتدا جذب صوت این نمونه‌ها آزمایش شد. به‌منظور مطالعه بهتر و تمرکز روی بخش بستر، خاب روی تمام نمونه‌ها تراشیده و جذب صوت نمونه‌ها در حالت بدون خاب نیز دوباره آزمایش شد. نتایج این آزمایش‌ها در شکل‌های ۸ و ۹ مشهود است. باید توجه داشت که در نام‌گذاری نمونه‌ها، رقم اول کد از سمت چپ به‌معنای فاصله بین دو بستر است. به‌عنوان مثال، در نمونه 1mm-E، فاصله بین دو بستر ۱ mm است و حروف بعدی نشانگر ماده پرکننده فضای بین دو بستر مانند آکرلیک (ac)، پشم (w) یا پنبه (c) هستند. همچنین، این فضا می‌تواند خالی (E) بماند. کدهای دارای نشانه (') نمایانگر



شکل ۹- اثر جنس مواد پرکننده در فضای ۱ mm بین دو بستر در جذب صوت قالی DBP (بدون خاب).



شکل ۱۳- اثر درصد مواد پرکننده بر فضای بین دو بستر در جذب صوت قالی DBP برای نمونه با فاصله بین دو بستر ۳ mm (— با وجود خاب و --- بدون خاب).



شکل ۱۲- اثر درصد مواد پرکننده بر فضای بین دو بستر در جذب صوت قالی DBP برای نمونه با فاصله بین دو بستر ۲ mm (— با وجود خاب و --- بدون خاب).

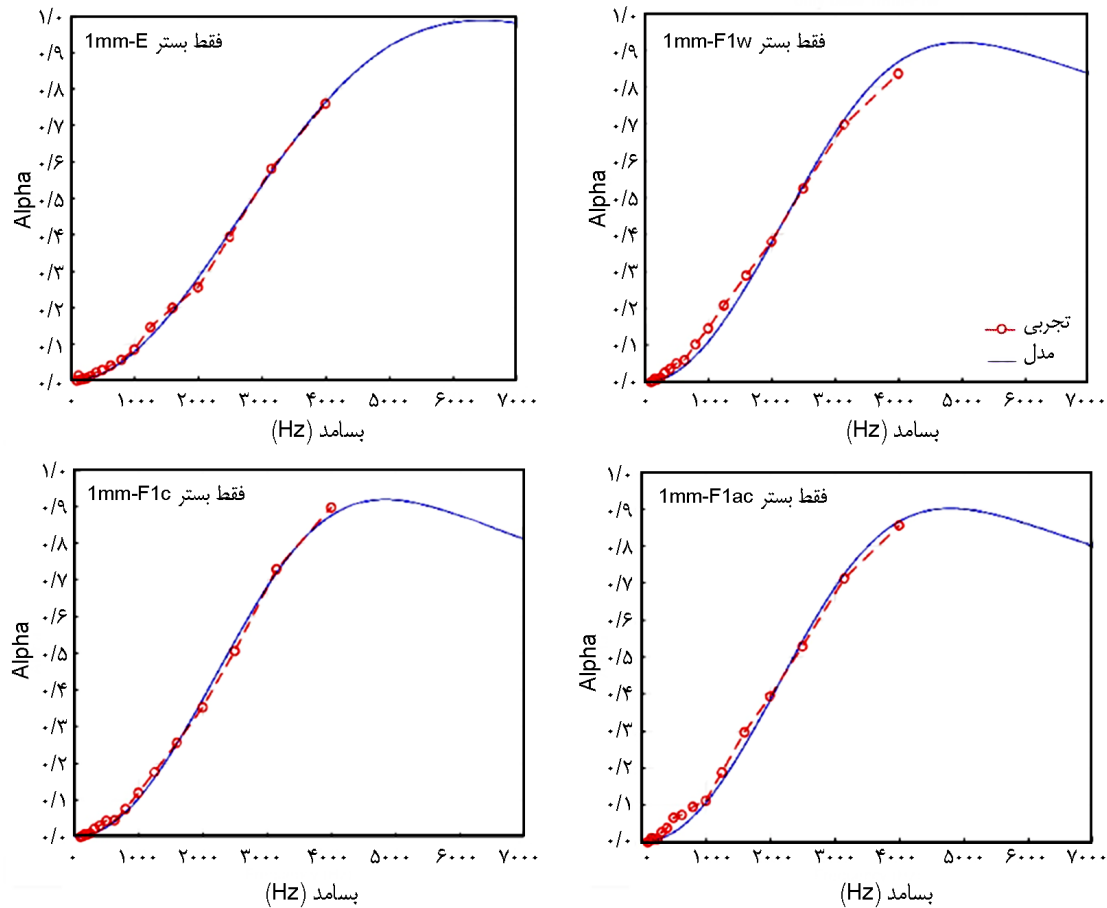
برکردن کامل فضای بین دو بستر (نمونه 1mm-F1w) در مقایسه با نمونه‌ای که فضای میان دو بستر خالی است (نمونه 1mm-E)، جذب صوت افزایش می‌یابد. برای نمونه با فاصله بین دو بستر ۳ mm، همان‌طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، با افزایش درصد پرشدن فاصله بین دو بستر، جذب صوت از ۰٪ (نمونه 3mm-E) و ۳۳٪ (نمونه 3mm-F1w) به ۶۷٪ (نمونه 3mm-F2w) افزایش می‌یابد. اما در نمونه‌های با فاصله بین دو بستر ۲ mm با افزایش درصد پرشدگی از ۵۰٪ (نمونه 2mm-f1w) به ۱۰۰٪ (نمونه 2mm-f2w) افزایش چشمگیری در جذب صوت مشاهده نمی‌شود (شکل ۱۲). علت را می‌توان در این دانست که با پرشدن کامل فاصله میان دو بستر، مقاومت در برابر جریان آنقدر زیاد شده (جدول ۲) که ورود موج صوت به درون ساختار مشکل می‌شود و

نیز به‌منظور سهولت در فهم درصد پرشدن فضای میان دو بستر رسم شده است. جذب صوت نمونه‌ها یک بار با وجود خاب انجام شد. برای تمرکز بیشتر روی بخش بستر، بار دیگر تمام خاب‌ها از روی نمونه‌های تراشیده و جذب صوت نمونه‌ها بدون وجود خاب نیز مجدداً اندازه‌گیری شد. شکل ۱۱ افزون بر مقایسه نتایج این آزمایش‌ها، نتایج آزمون نمونه قالی با فاصله ۱ mm را که فضای میان دو بستر بدون وجود نخ پشمی (۰٪) و با وجود یک نخ پشمی ۱ mm (۱۰۰٪) پر شده را نیز نمایش می‌دهد.

همان‌گونه که در شکل‌های ۱۱ تا ۱۳ دیده می‌شود، با وجود مواد پرکننده جذب صوت قالی DBP افزایش می‌یابد. افزایش درصد مواد پرکننده بر افزایش جذب صوت مؤثر است. همان‌طور که از شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، در نمونه قالی با فاصله ۱ mm با

جدول ۲- پارامترهای آکوستیک نمونه‌های بدون خاب (منطقه بستر).

کد نمونه	ضخامت (mm)	σ (Ns/m ²)	ϕ	α_0	Λ (μ m)	Λ' (μ m)	درصد خطا	NRC	$\bar{\sigma}$
1mm-E	۸	۶۴۳۲۸	۰/۷۵	۱/۰۳	۱۸/۶۰	۸۵/۰۰	۰/۰۱۰	۰/۰۹	۰/۱۵
1mm-F1ac	۸	۷۴۸۸۴	۰/۷۲	۱/۰۴	۸/۶۳	۱۳۴/۳۱	۰/۰۱۴	۰/۱۴	۰/۲۰
1mm-F1c	۸	۷۴۰۰۱	۰/۷۲	۱/۰۶	۸/۴۷	۱۴۲/۹۷	۰/۰۱۳	۰/۱۳	۰/۱۹
1mm-F1w	۸	۷۴۹۸۸	۰/۷۲	۱/۰۸	۹/۷۳	۱۱۱/۸۳	۰/۰۱۶	۰/۱۵	۰/۲۰
2mm-E	۹	۵۸۶۴۹	۰/۸۰	۱/۰۳	۱۳/۲۱	۱۰۸/۳۹	۰/۰۱۶	۰/۱۶	۰/۲۱
2mm-F1w	۹	۷۱۷۵۳	۰/۷۸	۱/۰۳	۹/۶	۱۳۹/۶۰	۰/۰۲۱	۰/۱۸	۰/۲۳
2mm-F2w	۹	۷۳۹۹۶	۰/۷۵	۱/۰۹	۱۰/۷۳	۱۲۵/۰۱	۰/۰۲۰	۰/۱۸	۰/۲۳
3mm-E	۱۰	۵۳۳۸۳	۰/۸۵	۱/۰۳	۱۰/۵۸	۱۲۳/۶۵	۰/۰۱۴	۰/۲۲	۰/۲۷
3mm-F1w	۱۰	۶۹۹۵۹	۰/۸۲	۱/۰۳	۱۱/۳۲	۹۷/۱۸	۰/۰۴	۰/۲۴	۰/۲۸
3mm-F2w	۱۰	۷۲۰۷۹	۰/۷۸	۱/۰۴	۸/۱۷	۱۰۲/۰۳	۰/۰۴۷	۰/۲۵	۰/۳۰



شکل ۱۴- مقایسه بین داده‌های تجربی و مقادیر پیش‌بینی‌شده با مدل JCA برای نمونه‌های بدون خاب (نمونه‌های با فاصله بین دو بستر ۱ mm).

به‌دست آمدند. بدین منظور، با استفاده از الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی با نرم‌افزار MATLAB این دو مقدار محاسبه شدند که نتایج آن در جدول ۲ موجود است.

همان‌طور که از جدول ۲ مشاهده می‌شود، با افزایش درصد مواد پرکننده بین دو لایه بستر، مقاومت جریان هوا افزایش و تخلخل کاهش می‌یابد. شکل‌های ۱۴ و ۱۵ مقایسه بین نتایج تجربی آزمون جذب صوت نمونه‌های بدون خاب با مقادیر پیش‌بینی‌شده با مدل JCA را نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مدل کاملاً متناسب با داده‌های تجربی در کل دامنه بسامد مقادیر اندازه‌گیری شده است. بنابراین، Z_{S2} امپدانس صوتی سطح برای نمونه‌های بدون خاب، می‌تواند برای بستر به‌تنهایی (نمونه بدون خاب) با استفاده از معادلات (۴) تا (۸) محاسبه شود.

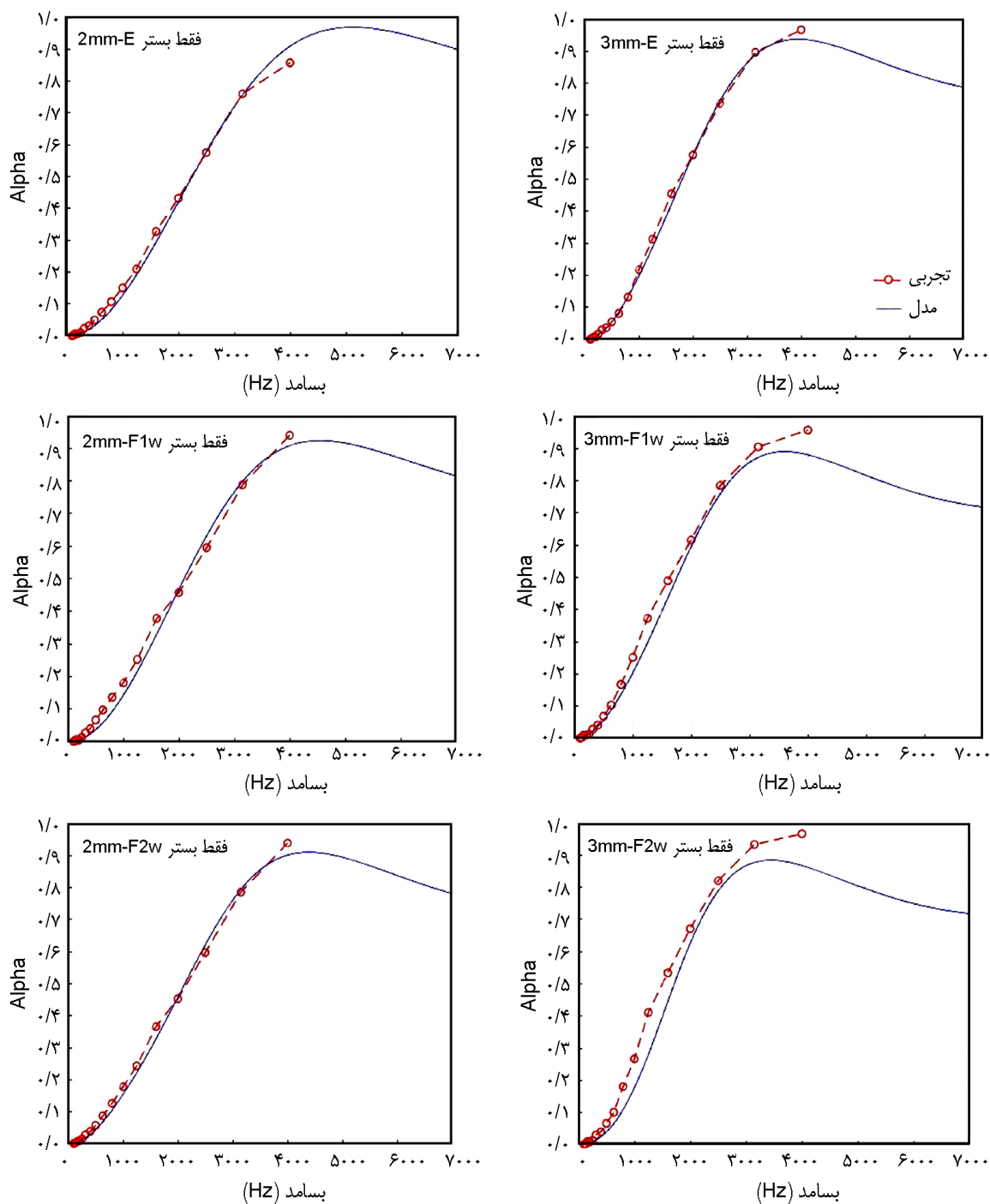
همان‌طور که در شکل ۱۵ دیده می‌شود، مدل JCA به‌خوبی با داده‌های تجربی برای تمام محدوده بسامد آزمایش‌شده سازگار است. تنها اختلاف جزئی در نمونه‌های با فاصله بین دو بستر ۳ mm

انعکاس صوتی بستر افزایش می‌یابد. این موضوع باعث می‌شود تا بخشی از موج صوت به‌جای جذب، بازتاب یابد.

۳-۲ مدل‌سازی جذب صوت بستر قالی DBP

در مرحله آخر، به‌منظور پیش‌بینی خواص صوتی، مدل‌سازی جذب صوت نمونه‌ها بررسی شدند. در این راستا، با توجه به اینکه ساختار قالی از دو بخش با ساختارهای مختلف تشکیل شده است، برای مدل‌سازی، می‌توان آن را یک جاذب دولایه فرض کرد و بنا بر مطالعه Cox و d'Antonio لازم است که هر بخش از قالی به‌طور مجزا مدل‌سازی شود [۲۲]. بنابراین، در این بخش به مدل‌سازی بخش بستر قالی با استفاده از مدل JCA پرداخته شده است. این مدل دارای ۵ پارامتر ورودی بوده و از دقت زیادی برخوردار است. بدین دلیل در این مطالعه از مدل یادشده استفاده شده است.

به‌منظور محاسبه پارامترهای ورودی، پارامترهای α ، σ_{∞} و ϕ از نمونه‌های بدون خاب با آزمایش و Λ و Λ' نیز با روش معکوس



شکل ۱۵- مقایسه بین داده‌های تجربی و مقادیر پیش‌بینی شده با مدل JCA برای نمونه‌های بدون خاب (نمونه‌های با فاصله بین دو بستر ۲ و ۳ mm).

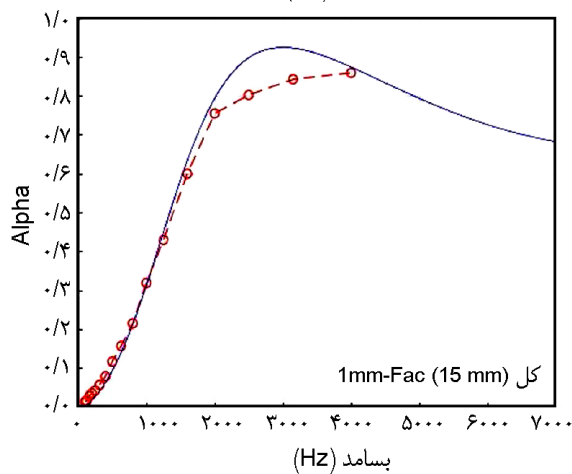
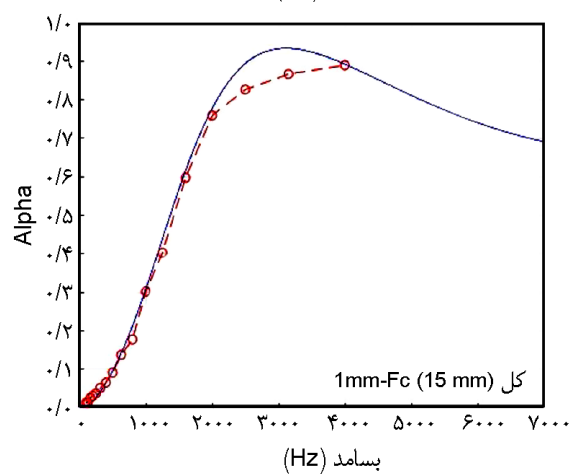
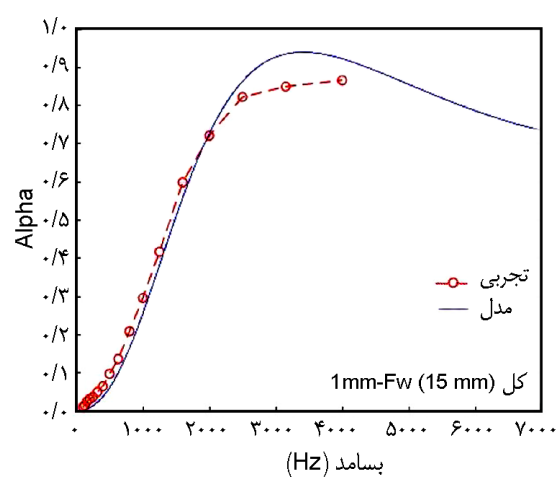
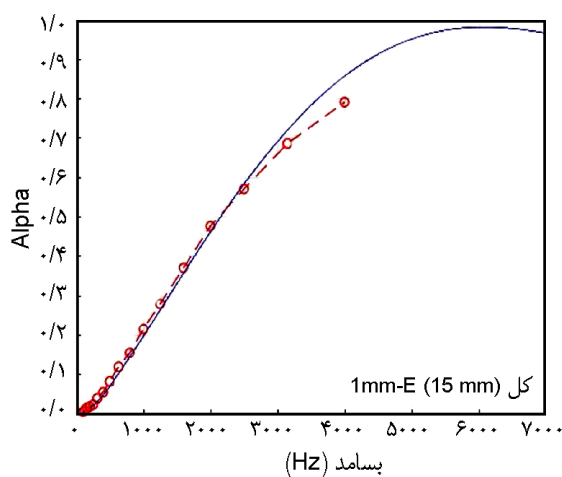
ژنتیک محاسبه شده است. مقادیر پیش‌بینی شده پارامترهای صوتی بخش خاب در جدول ۳ گزارش شده است. همان‌طور که از شکل‌های ۱۶ و ۱۷ مشاهده می‌شود، مدل با داده‌های تجربی در کل دامنه بسامد منطبق است. به‌جز در مواردی که تداخل نمونه کم است، کمی انحراف در بسامدهای زیاد میان مقادیر تجربی و

مشاهده می‌شود که در بسامدهای زیاد مقادیر پیش‌بینی شده کمتر از مقادیر تجربی هستند.

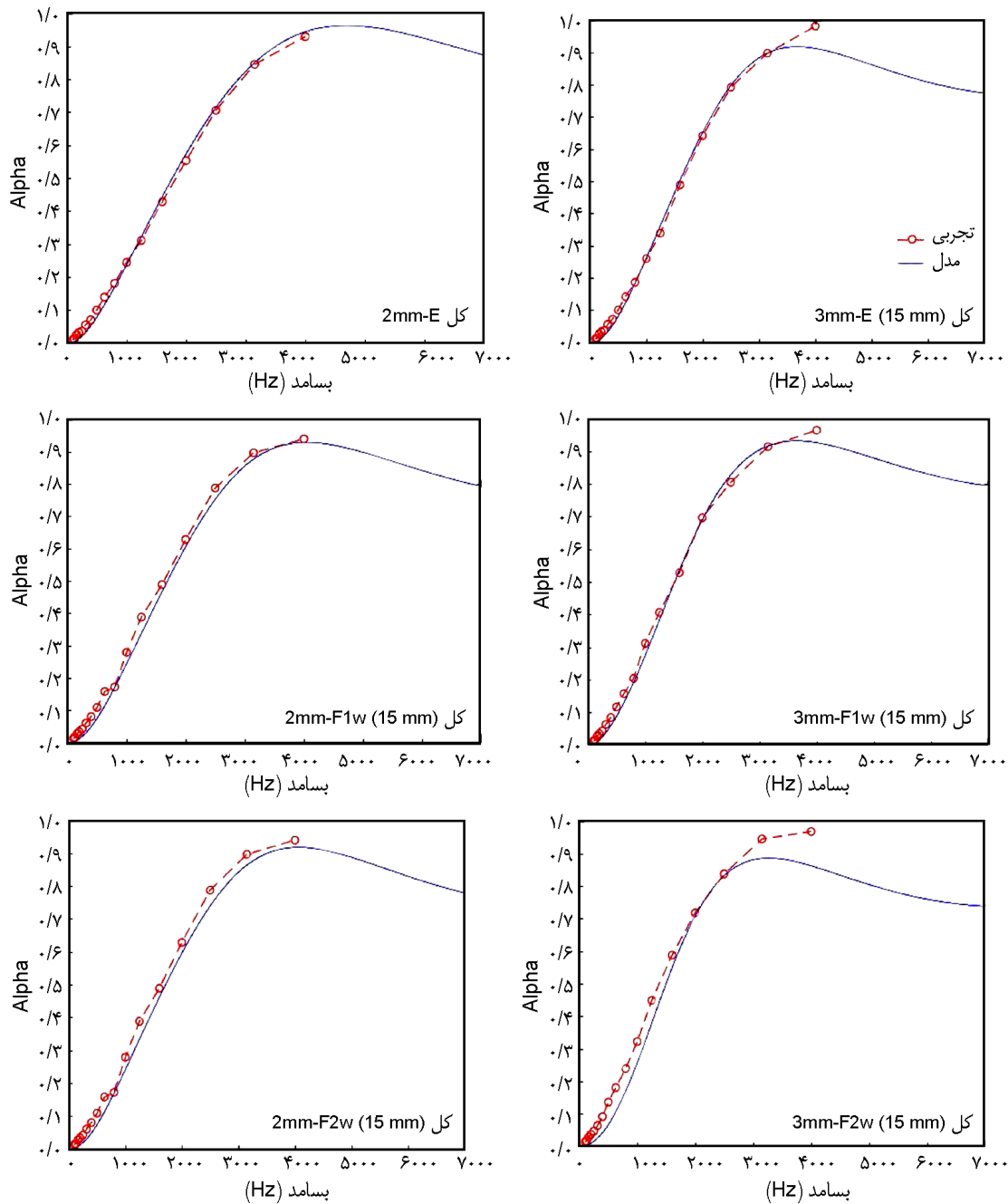
برای لایه خاب (لایه اول در سمت چپ در شکل ۷)، جذب صوت نمونه‌های قالی کامل (بستر+خاب) مدل‌سازی شده و ۵ پارامتر JCA منطقه خاب با استفاده از روش معکوس با الگوریتم

جدول ۳- پارامترهای آکوستیک نمونه‌های دارای خاب (ضخامت نمونه ۱۵ mm).

شماره	کد نمونه	ضخامت خاب (mm)	σ (Ns/m ²)	φ	α_0	Λ (μ m)	Λ' (μ m)	درصد خطا	NRC	$\bar{\alpha}$
۱	1mm-E	۷	۲۵۰۵۷	۰/۹۹	۱/۰۱	۸۹/۸	۱۶۷/۲۰	۰/۰۱۵	۰/۲۰	۰/۲۳
۲	1mm-F1ac	۷	۲۵۴۷۵	۰/۹۹	۱/۰۱	۱۰/۱۹	۱۹۴/۹۲	۰/۰۲۹	۰/۳۱	۰/۳۲
۳	1mm-F1c	۷	۲۵۴۲۵	۰/۹۹	۱/۰۱	۱۰/۲۹	۱۹۳/۹۸	۰/۰۲۴	۰/۳۰	۰/۳۱
۴	1mm-F1w	۷	۲۵۶۷۷	۰/۹۹	۱/۰۰	۱۰/۰۰	۱۵۴/۶۸	۰/۰۴۰	۰/۲۹	۰/۳۱
۵	2mm-E	۶	۲۴۰۸۴	۰/۹۹	۱/۰۱	۶۹/۳۸	۱۹۹/۹۰	۰/۰۱۱	۰/۲۳	۰/۲۸
۶	2mm-F1w	۶	۲۴۰۹۸	۰/۹۹	۱/۰۱	۲۶/۴۵	۱۷۳/۹۸	۰/۰۲۱	۰/۲۷	۰/۳۱
۷	2mm-F2w	۶	۲۴۰۷۰	۰/۹۹	۱/۰۱	۲۵/۷۷	۱۹۹/۲۸	۰/۰۱۷	۰/۲۷	۰/۳۰
۸	3mm-E	۵	۲۳۰۰۰	۰/۹۹	۱/۰۱	۷۰/۰۰	۱۹۹/۹۹	۰/۰۲۳	۰/۲۶	۰/۳۰
۹	3mm-F1w	۵	۲۳۰۸۳	۰/۹۹	۱/۰۱	۴۲/۵۷	۱۸۷/۶۰	۰/۰۲۲	۰/۲۹	۰/۳۲
۱۰	3mm-F2w	۵	۲۳۰۲۷	۰/۹۹	۱/۰۱	۳۸/۴۹	۱۶۴/۰۶	۰/۰۴۰	۰/۳۱	۰/۳۴



شکل ۱۶- مقایسه بین داده‌های تجربی و مقادیر پیش‌بینی شده با مدل JCA برای نمونه‌های بدون خاب با فاصله بین دو بستر ۱ mm.



شکل ۱۷- مقایسه بین داده‌های تجربی و مقادیر پیش‌بینی شده با مدل JCA برای نمونه‌های با وجود خاب با فاصله بین دو بستر ۲ و ۳ mm.

صرف‌نظر از بخش خاب در این نمونه‌ها، جذب صوت آن‌ها در حالت با و بدون خاب آزمایش شد تا بتوان اثر این دو عامل را به‌تنهایی بر جذب صوت بخش بستر قالی سنجید. همچنین، امکان پیش‌بینی جذب صوت قالی DBP با استفاده از مدل ریاضی بررسی شد که نتایج این پژوهش به شرح زیر است:

- ضریب جذب صوت تمام نمونه‌ها با افزایش بسامد به‌طور غیرخطی افزایش می‌یابد.

پیش‌بینی شده وجود دارد.

۴ نتیجه‌گیری

در این مطالعه، اثر وجود مواد پرکننده در فضای خالی ایجادشده بین دو بستر در قالی‌های جدید DBP بررسی شده است. به‌منظور

نشود.

- توافق خوبی میان مدل JCA و داده‌های تجربی جذب صوت نمونه‌های قالی DBP با و بدون وجود مواد پرکننده در فضای میان دو بستر نمونه قالی‌های DBP با درصد‌های مختلف وجود دارد.
- به‌منظور مدل‌سازی جذب صوت قالی DBP، می‌توان آن را یک جاذب دولایه (لایه‌های خاب و بستر) فرض کرد.

- وجود مواد پرکننده در فضای خالی میان دو بستر به افزایش جذب صوت در نمونه‌های با و بدون خاب منجر می‌شود، اما جنس مواد پرکننده اثر چندانی بر جذب صوت ندارد.
- وجود مواد پرکننده موجب بهبود جذب صوت قالی DBP، به‌ویژه در بسامدهای میانی می‌شود.
- با افزایش درصد پرکردن فضای بین دو بستر، ضریب جذب صوت قالی تا زمانی افزایش می‌یابد که مقاومت جریان خیلی زیاد

مراجع

- [1] Y. Liu and H. Hu, "Sound absorption behavior of knitted spacer fabrics", *Text. Res. J.*, vol. 80, no. 18, pp. 1949-1957, 2010.
- [2] H. Memon, Z.A. Abro, A. Ahmed, and N.A. Khoso., "Considerations while designing acoustic home textiles: a review", *J. Text. Apparel, Technol. Manage.*, vol. 9, no. 3, pp. 1-29, 2015.
- [3] R. Pieren, B. Schäffer, S. Schoenwald, and K. Eggenschwiler, "Sound absorption of textile curtains—theoretical models and validations by experiments and simulations", *Text. Res. J.*, vol. 88, no. 1, pp. 36-48, 2018.
- [4] D. Whitefoot, "1-Carpet types and requirements", *Adv. Carpet Manuf.*, pp. 1-16, 2009.
- [5] C.M. Harris, "Acoustical properties of carpet", *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 27, no. 6, pp. 1077-1082, 1955.
- [6] M.E. Nute and K. Slater, "62—a study of some factors affecting sound reduction by carpeting", *J. Text. Inst.*, vol. 64, no. 11, pp. 645-651, 1973.
- [7] Y. Shoshani and M. Wilding, "Effect of pile parameters on the noise absorption capacity of tufted carpets", *Text. Res. J.*, vol. 61, no. 12, pp. 736-742, 1991.
- [8] Y.Z. Shoshani, "Effect of nonwoven backings on the noise absorption capacity of tufted carpets", *Text. Res. J.*, vol. 60, no. 8, pp. 452-456, 1990.
- [9] A. Elkhateeb, A. Adas, M. Attia, and Y. Balila, "Absorption characteristics of masjid carpets", *Appl. Acoust.*, vol. 105, pp. 143-55, 2016.
- [10] M. Küçük and Y. Korkmaz, "Sound absorption properties of acrylic carpets", *J. Text. Inst.*, vol. 108, no. 8, pp. 1398-405, 2017.
- [11] H.İ. Çelik and H.K. Kaynak, "Effect of pile yarn filament fineness and pile height on sound absorption characteristics of carpets", *Conference: Autex*, 2016.
- [12] M. Sadeghi-Sadeghabad, A. Alamdar-Yazdi, M.R. Fazel, and H. Mashroteh, "Subjective evaluation of the rug feet feeling comfort", *J. Text. Inst.*, vol. 111, no. 8, pp. 1089-96, 2020.
- [13] M. Asadi, A. Ohadi, and R. Keshavarz, "Effect of non-acoustic properties on the sound absorption of polyurethane foams", *J. Theor. Appl. Vib. Acoust.*, vol. 1, no. 2, pp. 122-132, 2015.
- [14] M. Garai and F. Pompoli, "A european inter-laboratory test of airflow resistivity measurements", *Acta Acust. United Acust.*, vol. 89, no. 3, pp. 471-478, 2003.
- [15] P. Soltani, E. Taban, M. Faridan, S.E. Samaei, and S. Amininasab, "Experimental and computational investigation of sound absorption performance of sustainable porous material: Yucca Gloriosa fiber", *Appl. Acoust.*, vol. 157, pp. 106999, 2020.
- [16] S.G. Mosanenzadeh, Design, Characterization and Modeling of Biobased Acoustic Foams, *Ph.D Dissertation*, University of Toronto, Canada, 2014.
- [17] J. Allard and N. Atalla, *Propagation of Sound in Porous Media: Modelling Sound Absorbing Materials*, 2nd ed., John Wiley & Sons, 2009.
- [18] D.L. Johnson, J. Koplik, and R. Dashen, "Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media", *J. Fluid Mech.*, vol. 176, pp. 379-402, 1987.
- [19] F. Mechel, "Extension to low frequencies of the formulae of delany and bazley for a bsorbing materials", *Acta Acust. United Acust.*, vol. 35, no. 3, pp. 210-213, 1976.
- [20] ISO E. 10534-1. Acoustics—Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes-Part.1, 2001.
- [21] E. Taban, P. Soltani, U. Berardi, A. Putra, S.M. Mousavi, M. Faridan, S.E. Samaei, and A. Khavanin, "Measurement, modeling, and optimization of sound absorption performance of Kenaf fibers for building applications", *Build. Environ.*, vol. 180, pp. 107087, 2020.
- [22] T. Cox and P. d'Antonio, *Acoustic Absorbers and Diffusers: Theory, Design and Application*, CRC, 2016.

