

Design and Fabrication of Polyurethane Foams Modified with Rock Wool Fiber: The Effect of Reinforcement Amount on Acoustical and Mechanical Properties

Available in: <http://jips.ippi.ac.ir>

Iran. J. Polym. Sci. Technol.

(Persian),

Vol. 35, No. 2, 97-109

June-July 2022

ISSN: 1016-3255

Online ISSN: 2008-0883

DOI: 10.22063/IJPST.2022.3065.2119

Behzad Mohammadi¹, Amir Ershad-Langroudi², Gholamreza Moradi^{1*},
Abdolrasoul Safaiyan³, Farnaz Heyran Kahnamuei¹

1. Department of Occupational Health Engineering, School of Public Health, Tabriz University of Medical Sciences, P.O. Box 5166614711, Tabriz, Iran
2. Department of Color and Surface Coatings, Faculty of Polymer Processing, Iran Polymer and Petrochemical Institute, P.O. Box 14975-112, Tehran, Iran
3. Department of Biostatistics and Epidemiology, Faculty of Health, Tabriz University of Medical Sciences, P.O. Box 5166614711, Tabriz, Iran

Received: 28 December 2021, accepted: 1 August 2022

ABSTRACT

Hypothesis: The goal of the study was to focus on improving the acoustic and mechanical properties of polyurethane foams doped with rock wool fibers, at different percentages (rock wool fiber, RF) (0-1.2% by wt), that were synthesized using the polymerization process.

Methods: In order to fabricate acoustic composites, the relationship between non-acoustical parameters (airflow resistivity, porosity, density, and percentage of reinforcing fibers) and microstructure with sound absorption coefficient (SAC) was investigated. SAC was measured using a two-microphone impedance tube in the frequency range of 63-6400 Hz according to the ISIRI 9803 standard without an air gap behind the sample. Physical structure morphology and tensile strength were investigated using field emission scanning electron microscopy (FE-SEM) and tensile strength test, respectively. Non-acoustic measurements including porosity and air flow resistance (AFR) were performed using porosimetry test (BET), and Archimedes method.

Findings: The results showed that increasing the RF amount in the polyurethane foam increased the hardness of the foam surface, and the SAC increased in all frequency range on all the studied samples. The highest SAC was shown by fiber-polyurethane composite foam (2% by wt) sample in the frequency range of 2000-4000 Hz. This increase in the sound absorption coefficient is probably related to the reduction in pore size with the increase in the amount of fibers in polyurethane foam, as shown by the morphological results. The mechanical properties (tensile strength) of foams were investigated by changing the amount of reinforcing fibers. The results showed that the tensile strength of composite foams significantly improved by adding fibers. Eventually, regression analysis was performed to investigate the relationship between non-acoustic parameters (airflow resistivity, porosity, density, and percentage of reinforcing fibers) and SAC. A relatively good fit between the experimental and statistical data was obtained. The data and results of this study showed that composite foams can be used to reduce noise.

Keywords:

sound absorption coefficient,
non-acoustical parameters,
rock wool fiber,
composite foam,
mechanical properties

(*To whom correspondence should be addressed.

E-mail: moradig@tbzmed.ac.ir

Please cite this article using:

Mohammadi B., Ershad-Langroudi A., Moradi Gh., Safaiyan A., Heyran Kahnamuei F., Design and Fabrication of Polyurethane Foams Modified with Rock Wool Fiber: The Effect of Reinforcement Amount on Acoustical and Mechanical Properties, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, 35, 97-109, 2022.

طراحی و ساخت اسفنج‌های پلی‌یورتان اصلاح‌شده با الیاف پشم سنگ: اثر مقدار تقویت‌کننده بر خواص آکوستیکی و مکانیکی

بهزاد محمدی^۱، امیر ارشاد لنگرودی^۲، غلامرضا مرادی^{۳*}، عبدالرسول صفاییان^۳، فرناز حیران کهنمویی^۱

۱- تبریز، دانشگاه علوم پزشکی تبریز، دانشکده بهداشت، گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، صندوق پستی ۵۱۶۶۶۱۴۷۱۱

۲- تهران، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، پژوهشکده فرایند، گروه رنگ و روکش‌های سطح،

صندوق پستی ۱۱۲-۱۴۹۷۵

۳- تبریز، دانشگاه علوم پزشکی تبریز، دانشکده بهداشت، گروه آمار و اپیدمیولوژی، صندوق پستی ۵۱۶۶۶۱۴۷۱۱

دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۷، پذیرش: ۱۴۰۱/۵/۱۰

چکیده

فرضیه: هدف از این مطالعه، تمرکز بر بهبود خواص آکوستیکی و مکانیکی اسفنج‌های پلی‌یورتان اصلاح‌شده با درصدهای مختلف (۱/۲-۰ wt%) الیاف پشم سنگ است که طی فرایند پلیمرشدن سنتز شدند.

روش‌ها: به منظور ساخت کامپوزیت‌های آکوستیک، ارتباط بین پارامترهای غیرآکوستیکی (مقاومت جریان هوا، تخلخل، چگالی و درصد الیاف تقویت‌کننده) و ریزساختاری با مقدار ضریب جذب صوت بررسی شد. اندازه‌گیری ضریب جذب صوت با لوله امپدانس دومیکروفونی در محدوده بسامد ۶۳ Hz تا ۶۴۰۰ Hz مطابق با استاندارد ISIRI 9803 بدون شکاف هوا در پشت نمونه انجام شد. شکل‌شناسی ساختار فیزیکی و استحکام کششی به ترتیب با میکروسکوپی الکترونی پویشی گسیل میدانی (FE-SEM) و آزمایش استحکام کششی بررسی شد. اندازه‌گیری پارامترهای غیرآکوستیکی شامل تخلخل و مقاومت جریان هوا (AFR) به ترتیب با آزمون تخلخل‌سنجی و روش ارشمیدس انجام شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد، افزایش درصد الیاف پشم سنگ در اسفنج پلی‌یورتان، سبب افزایش سختی سطح اسفنج شده است و ضریب جذب صوت در همه محدوده بسامدی برای همه نمونه‌های مطالعه‌شده افزایش یافت. بیشترین ضریب جذب صوت را نمونه‌های اسفنج کامپوزیتی الیاف-پلی‌یورتان ۱/۲ wt% در محدوده بسامد ۴۰۰۰-۲۰۰۰ Hz نشان دادند. این افزایش در ضریب جذب صوت احتمالاً مرتبط با کوچک‌شدن اندازه منفذ با افزایش مقدار الیاف در ترکیب با اسفنج پلی‌یورتان حاصل از نتایج شکل‌شناسی است. با تغییر مقدار الیاف تقویت‌کننده، خواص مکانیکی اسفنج‌ها (استحکام کششی) بررسی شد. نتایج نشان داد، استحکام کششی اسفنج‌های کامپوزیت با اضافه‌کردن الیاف به‌طور شایان توجهی بهبود یافت. در نهایت تحلیل رگرسیون برای بررسی ارتباط بین پارامترهای غیرآکوستیکی (شامل مقاومت جریان هوا، تخلخل، چگالی و درصد الیاف تقویت‌کننده) و ضریب جذب صوت انجام شد که تناسب نسبتاً خوبی بین داده‌های تجربی و آماری حاصل شد. داده‌ها و نتایج این مطالعه نشان داد، این اسفنج‌های کامپوزیتی را می‌توان برای کاهش صدا به‌کار برد.

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:
moradig@tbzmed.ac.ir

واژه‌های کلیدی

ضریب جذب صوت،
پارامترهای غیرآکوستیکی،
الیاف پشم سنگ،
اسفنج کامپوزیتی،
خواص مکانیکی

مقدمه

فناوری‌های نوین، هرچند به ظاهر برای بشریت زندگی توأم با رفاه را به ارمغان آورده اما در اصل با برهم‌زدن تعادل طبیعی، اساس حیات را به‌خطر انداخته‌اند. انواع بیماری‌ها، حوادث، مسائل مختلف زیست‌محیطی از جمله مشکلات عصر کنونی است که در کنار توسعه جوامع و برتری حاصل از آن، گریبان‌گیر بشریت است. در این میان، صدا بدون تردید از معضلات اساسی کشورهای صنعتی و غیرصنعتی بوده و خیل عظیمی از افراد، چه در محیط کار خود یا در محل زندگی، از آزار ناشی از آن در مخاطره‌اند [۱،۲]. صدا به‌عنوان رایج‌ترین مواجهه شغلی در سراسر جهان و شایع‌ترین عامل فیزیکی زیان‌آور محیط کار به‌شمار می‌آید [۳-۵]. از این‌رو، ارزیابی و کنترل صدا در محیط‌های صنعتی از دیرباز مورد توجه پژوهشگران بوده است. این موضوع به‌دلیل اثرهای بهداشتی، تنوع فرایندها و تجهیزات مختلف مولد است. یکی از مهم‌ترین و اثرگذارترین روش‌های کنترل مهندسی برای منابع آزاردهنده صدا، کنترل آن به‌وسیله جاذب‌های صوتی است.

یکی از رایج‌ترین مواد جاذب صدا، مواد متخلخل سلول‌باز هستند که با جذب صوت زیاد، هزینه تولید کم و خاصیت قالب‌گیری مناسب استفاده می‌شوند [۶]. سازوکار جذب صوت به‌وسیله مواد متخلخل بدین صورت است که امواج صوتی به اسفنج‌های سلول‌باز برخورد کرده و به‌واسطه اصطکاک با دیواره‌ها و هوای داخل منفذها، انرژی صوتی آن به انرژی گرمایی تبدیل می‌شود [۷-۹]. یکی از روش‌های بهبود خواص پلیمرها، استفاده از الیاف در ترکیب با پلیمرهاست [۱۰،۱۱]. نمونه‌ای از این جاذب‌ها (مواد آلی پلیمری)، اسفنج‌های پلیمری هستند که به‌طور گسترده به‌عنوان مواد جاذب صوتی به‌کار می‌روند. انرژی موج صوتی برخوردی تا حدودی به‌صورت گرما به‌دلیل اصطکاک هوا داخل سلول‌ها و اصطکاک بین زنجیرهای پلیمری مجاور اتلاف می‌شود [۱۲]. اسفنج‌های پلیمری زیرمجموعه جامدهای سلولی هستند و جزو پرکاربردترین اسفنج‌ها به‌شمار می‌آیند [۱۳]. اسفنج‌های پلیمری سامانه‌های دوفازی گاز-جامد هستند که فاز جامد بخش پیوسته و فاز گازی بخش ناپیوسته را تشکیل می‌دهند. به‌عبارت دیگر، اسفنج پلیمری کامپوزیتی است که حباب‌های گاز درون ماتریس پلیمری پخش شده‌اند. فاز گاز در اسفنج به‌شکل منفذهایی قرار دارد که سلول نام گرفته است. نوع سلول، استحکام کششی و خواص آکوستیکی و گرمایی اسفنج‌های پلیمری را تغییر می‌دهد. اگر سلول‌ها به یکدیگر متصل باشند، اسفنج را سلول‌باز و در غیر این حالت آن را سلول‌بسته می‌نامند [۱۴].

یکی از اسفنج‌های پلیمری استفاده‌شده در عایق صوت، اسفنج

پلی‌یورتان (PU) است. فرایند تشکیل اسفنج پلی‌یورتان، شامل فرایندهای شیمیایی و فیزیکی هم‌زمان است. در فرایندهای شیمیایی واکنش‌های پلیمرشدن رخ می‌دهد و واکنش آب و ایزوسیانات به تولید گاز کربن دی‌اکسید منجر می‌شود. فرایند فیزیکی شامل رشد اسفنج در اثر تولید گاز کربن دی‌اکسید است. با توجه به کاربرد روزافزون پلیمرها در صنعت و اهمیت استفاده از حداقل مواد مصرفی در صنعت بسیار مهم است که روشی برای کاهش مقدار ماده مصرفی در فرایند تولید قطعه ابداع شود. بنابراین، استفاده از اسفنج‌های پلیمری در بخش‌های مختلف گسترش فراوانی یافته است. اسفنج‌ها که پلیمر اسفنجی یا انبساط‌یافته نیز خوانده می‌شوند، موادی هستند که حجم آن‌ها به‌دلیل وجود سلول‌های زیاد افزایش و چگالی ظاهری آن‌ها کاهش یافته است. استحکام در برابر پارگی، مقاومت سایشی، انعطاف‌پذیری در دمای کم، مقاومت شیمیایی و محیطی زیاد، مقاومت در برابر کپک و قارچ، خواص کشسانی زیاد، مقاومت در برابر تابش خورشید و آب و فرایندپذیری ساده از جمله خواص منحصر به‌فرد پلی‌یورتان‌های الاستومری است [۱۵]. افزون بر این، اسفنج‌های پلی‌یورتان با ساختار متخلخل به‌واسطه منفذها، کانال‌ها و پیچ‌وخم (tortuosity) در ساختار درونی، به‌طور گسترده استفاده می‌شوند.

اسفنج‌های متداول استحکام کششی ضعیفی دارند و برای کاربردهایی که به استحکام کششی زیاد و سفتی نیاز است، گزینه مناسبی نیستند. همچنین این اسفنج‌های پلی‌یورتان مقاومت گرمایی کم و کارایی جذب صوت زیاد فقط در محدوده‌های بسامد زیاد دارند [۱۸-۱۱،۱۶]. بنابراین، استفاده از مواد تقویت‌کننده مانند ذرات و الیاف می‌تواند استحکام کششی و آکوستیکی اسفنج را افزایش دهد [۱۹]. از دهه گذشته الیاف پشم سنگ به‌دلیل مقاومت گرمایی زیاد، وزن سبک، مقاومت کششی زیاد و هزینه کم، به‌طور گسترده به‌عنوان مواد عایق‌کاری استفاده می‌شود [۲۰]. مطابق با کارهای پژوهشی انجام‌شده، استفاده از الیاف پشم سنگ برای ساخت کامپوزیت‌های اسفنج الیاف-پلی‌یورتان، راهکاری آسان و مؤثر برای بهبود در تأخیراندازی شعله، خواص مکانیکی و آکوستیکی و نیز جلوگیری از شکنندگی آن است. Chuang و همکاران [۲۱] مطالعه‌ای درباره بررسی جذب صوت، اثرهای کاهش وزن و خواص مکانیکی لایه‌های کامپوزیت اسفنج PU تقویت‌شده با الیاف کربن (CF) و الیاف شیشه (GF) انجام دادند. نتایج در این مطالعه نشان داد، افزودن الیاف کربن و الیاف شیشه به اسفنج PU موجب افزایش محسوس در ضریب جذب صوت در همه بسامدها می‌شود. همچنین، افزودن الیاف کربن و شیشه به اسفنج PU باعث تقویت خواص آکوستیکی و مکانیکی در اسفنج PU شد.

بهرتر، مقاومت خوب در برابر گرمای زیاد و تخریب، بهبود خواص جذب صوتی در محدوده بسامدی باند پهن ضروری به نظر می‌رسد. در این راستا در پژوهش حاضر تلاش شد تا عملکرد آکوستیکی جذب صوتی اسفنج پلی‌یورتان اصلاح‌شده با الیاف پشم سنگ به‌عنوان ماده معدنی به‌منظور افزایش کنترل صوت در صنایع و به‌ویژه ساختمان‌های مسکونی بررسی شود.

تجربی

مواد

مواد خام برای آماده‌سازی اسفنج‌های کامپوزیتی پلی‌یورتان انعطاف‌پذیر شامل پلی‌ال (KPX.CO) با عدد هیدروکسیل $48 \text{ mg}_{\text{KOH}}/\text{g}$ و گرانروی 580 cps در 25°C (قطعه‌های نرم زنجیر پلیمری را تشکیل می‌دهد)، تولوئن دی‌ایزوسیانات (TDI) (قطعه‌های سخت زنجیر پلیمری را تشکیل می‌دهد) ساخت شرکت Merck آلمان ($80/20$) و روغن سیلیکون (Tegostab8870) ساخت شرکت Sigma-Aldrich آلمان برای تثبیت ساختار سطح سلول بود. آب یون‌زدوده به‌عنوان عامل اسفنج‌زا برای تولید گاز کربن دی‌اکسید (در اثر واکنش با ایزوسیانات) استفاده شد. کاتالیزگر آمین (33% تری‌اتیلن دی‌آمین و 67% دی‌پروپیلن گلیکول) (Dabco33LV) از شرکت Air Product با عدد هیدروکسیل $560 \text{ mg}_{\text{KOH}}/\text{g}$ و کاتالیزگر قلع (Kosmos19) از شرکت Essen آلمان (Evonik) با عدد هیدروکسیل $687 \text{ mg}_{\text{KOH}}/\text{g}$ به‌ترتیب برای سرعت‌بخشیدن به واکنش‌های اسفنج‌زا و ژل‌شدن استفاده شدند. از الیاف پشم سنگ (RF) خام محصول شرکت ایرانی تلاش صنعت سینا، به‌عنوان مواد تقویت‌کننده با مقاومت گرمایی زیاد در ساختار اسفنج پلی‌یورتان با درصدهای مختلف استفاده شد. تمام مواد استفاده‌شده با خلوص زیاد به‌همان شکل خریداری شده و بدون نیاز به خالص‌سازی اولیه مصرف شدند. در جدول ۱ فرمول‌بندی مواد سازنده اسفنج پلی‌یورتان آمده است.

دستگاه‌ها و روش‌ها

همان‌طور که در جدول ۱ دیده می‌شود، اجزای سازنده اسفنج کامپوزیتی برای نمونه‌های اسفنج پلی‌یورتان خالص (PU)، اسفنج پلی‌یورتان $0/4\%$ وزنی (PU-RF 0.4)، اسفنج پلی‌یورتان $0/7\%$ وزنی (PU-RF 0.7) و اسفنج پلی‌یورتان $1/2\%$ وزنی به‌ازای مقادیر به گرم آورده شده است. می‌توان مشاهده کرد، مقادیر مواد اولیه به‌جز الیاف پشم سنگ (RF)، برای همه نمونه‌های سنتزی یکسان است. بدین معنی که این مطالعه برای بررسی اثرهای افزودن مقدارهای مختلف از پرکننده به اسفنج پلی‌یورتان

Olcay و همکاران [۲۲] مطالعه‌ای با عنوان ضایعات گیاهی برنج تقویت‌کننده کامپوزیت‌های پلی‌یورتان برای استفاده به‌عنوان مواد جاذب آکوستیک انجام دادند. نتایج نشان داد، الیاف دارای 5% ضایعات برنج اصلاح‌شده بهترین کارایی جذب صوت را داشتند. همچنین پیرانی و همکاران [۲۳] در مطالعه‌ای در زمینه ارتباط بین شکل‌شناسی سلولی و آکوستیک در اسفنج‌های نانوکامپوزیت پلی‌یورتان-سیلیکا، اثر نسبت‌های مختلف نانوسیلیکا را در نواحی بسامد کم بررسی کردند. نتایج نشان داد، با افزایش مقدار نانوذرات، افزایش جذب صوت در اسفنج‌های نانوکامپوزیت مشاهده شد. محمدی و همکاران [۲۴] عملکرد آکوستیکی اسفنج‌های پلی‌یورتان اصلاح‌شده با الیاف پشم سنگ را در محدوده بسامد کم بررسی کردند. نتایج نشان داد، با افزودن الیاف پشم سنگ با مقداری بهینه، جذب صوت در بسامدهای بررسی‌شده افزایش یافت. همچنین محمدی و همکاران [۲۵] جاذب صوتی پلی‌یورتان با رویکرد افزایش خواص مکانیکی و صوتی را در گستره بسامد باند پهن ساختند. در ادامه کارهای پیشین و تکمیل‌کننده آن‌ها برای استفاده در عایق‌سازی صوت در صنعت ساختمان‌سازی با هدف بهینه‌سازی خواص جذبی صوتی و مکانیکی جاذب پلی‌یورتان، این مطالعه طرح‌ریزی شد. وجه تمایز مطالعه حاضر با مطالعات پیشین بهبود هم‌زمان خواص مکانیکی با خواص آکوستیکی در محدوده مشخص‌تری از پرکننده معدنی و شرایط سنتزی بود. در این مطالعه استفاده از مش‌های مشخصی از پرکننده معدنی پشم سنگ و استفاده از فرمول‌بندی متفاوت از مواد سنتزی به بهبود چشمگیری در خواص آکوستیکی و کششی نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های سنتزی پیشین منجر شد. با توجه به نتایج مطالعات انجام‌شده می‌توان گفت، بهبود خواص آکوستیکی جاذب‌های صوت یکی از اهداف اصلی پژوهشگران در این حوزه است. همچنین نتایج برخی از مطالعات انجام‌شده در بررسی پارامترهای گرمایی، مکانیکی و شکل‌شناسی در اسفنج‌های کامپوزیتی نشان می‌دهد، رابطه معناداری بین این پارامترها با ضریب جذب صوت وجود ندارد. با توجه به مطالب گفته‌شده و به‌منظور پیشگیری از بروز مشکلات ناشی از مواجهه با صداهای صنعتی و غیرصنعتی، طراحی جاذب‌های صوتی موضوع بسیار ضروری به نظر می‌رسد. همچنین تشخیص اثر عوامل غیرآکوستیکی (چگالی، تخلخل، مقاومت جریان هوا و مقدار الیاف تقویت‌کننده) بر جذب صوت یکی از اهداف مطالعه‌شده در این پژوهش است. بنابراین با توجه به محدودیت‌هایی که در انتخاب جاذب‌های غیرآلی وجود دارد و الزاماتی که در استفاده از جاذب‌های آلی همچون جاذب صوتی پلی‌یورتان باید به آن‌ها توجه داشت، ضرورت تهیه اسفنج‌های جاذب صوت، به‌دست‌آوردن موادی با خواص مکانیکی

برای به‌دست‌آوردن مش یکسان از الک عبور داده شدند (شکل ۱ (a)). برای آماده‌سازی، از محلول NaOH با غلظت ۱۰٪ استفاده شد. ابتدا، الیاف در محلول NaOH به مدت ۳۰ min در دمای ۵۰°C پراکنده شدند. سپس، برای برطرف کردن اثر قلیا (NaOH) از روی سطح، ابتدا الیاف صاف شده و چند مرتبه با آب یون‌زدوده شست‌وشو شده و در نهایت با استفاده از گرم‌خانه در دمای ۶۰°C به مدت ۲۴ h خشک شدند.

سنتز نمونه‌ها

اسفنج‌های پلی‌یورتان سلول‌باز با روش پلیمرشدن دومارحله‌ای از اجزای A و B سنتز شدند که فرمول‌بندی آن در جدول ۱ آمده است. ابتدا اجزای A (سامانه پلی‌ال) که شامل پلی‌ال، آب یون‌زدوده (عامل اسفنج‌زا)، عامل سطح‌فعال، کاتالیزگر (آمین و قلع) و درصد‌های مختلف از الیاف پشم سنگ (۰-۱/۲ wt٪) در لیوان پلاستیکی ۵۰۰ mL با سرعت ۳۰۰۰ rpm/min ترکیب شدند (پلی‌ال‌سازی). مقدارهای وزنی ۰/۱، ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵، ۱، ۱/۳، و ۱/۵٪ در نظر گرفته شد. اما، پس از ساخت نمونه‌های کامپوزیتی فقط به‌ازای ۰/۴، ۰/۷ و ۱/۲٪ وزنی، نمونه کامپوزیتی مطلوب ایجاد شد و به‌ازای سایر درصد‌های وزنی انتخابی اسفنج تشکیل نشد.

سپس، جزء B (ایزوسیانات) به‌سرعت و به‌طور یکجا به سامانه پلی‌ال اضافه شد و این بار عمل ترکیب‌شدن با سرعت ۶۰۰۰ rpm/min انجام شد. افزایش دور ترکیب به‌دلیل پراکنش بهتر الیاف در زمینه اسفنج پلی‌یورتان و نیز افزایش دادن سرعت واکنش (با کنارهم قراردادن عوامل واکنش‌دهنده) به‌دلیل تغییر در واکنش (آهسته‌ترشدن

جدول ۱- جزئیات فرمول‌بندی برای سنتز اسفنج PU خالص و اسفنج‌های کامپوزیتی پلی‌یورتان.

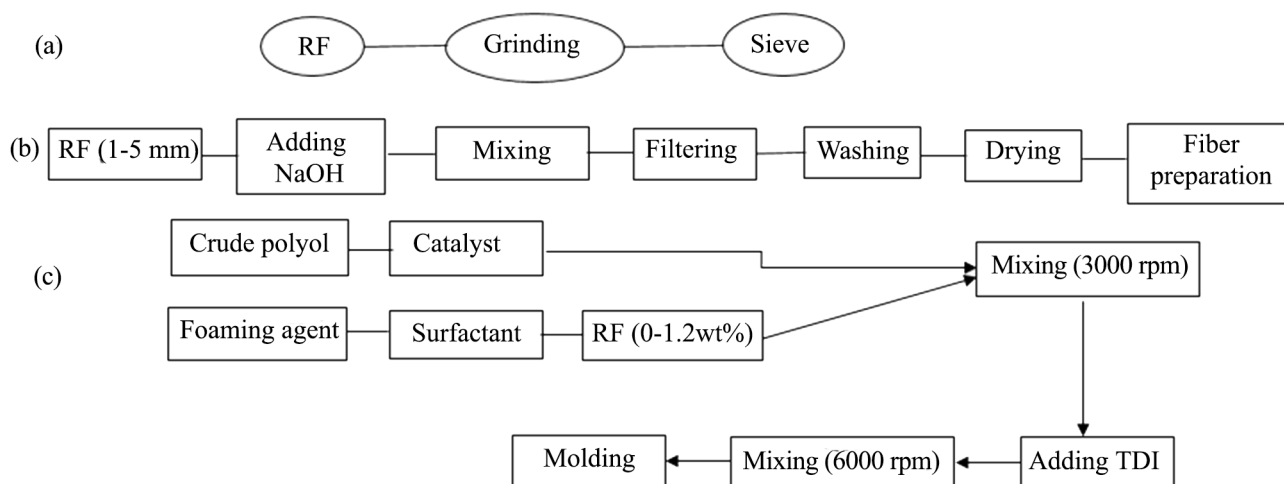
Table 1. Formulation detail for the synthesis of pure PU and polyurethane composite foams.

Component	PU	PU-RF 0.4	PU-RF 0.7	PU-RF 1.2
Polyol	100	100	100	100
Dabco33LV	0.1	0.1	0.1	0.1
Kosmos19	0.13	0.13	0.13	0.13
RF	0	0.59	1.04	1.78
Tegostab8870	0.8	0.8	0.8	0.8
Water	3.3	3.3	3.3	3.3
TDI	43	43	43	43
Index	110	110	110	110

با ثابت‌بودن سایر اجزای انجام شده است. مبنای انتخاب مقادیر مواد اولیه به‌جز برای مقدار ایزوسیانات که با استفاده از عدد هیدروکسیل پلی‌ال و شاخص ایزوسیانات (index) محاسبه شده، بر مبنای تعادل بین واکنش‌های پلیمرشدن و واکنش اسفنجی‌شدن برای چگالی بیش از ۳۰ kg/m³ به‌طور تجربی تخمین زده شده است. که در نهایت بتواند اسفنجی سلول‌باز، انعطاف‌پذیر و با کیفیت مطلوب ارائه دهد.

آماده‌سازی الیاف پشم سنگ

پیش از فرایند آماده‌سازی، الیاف پشم سنگ با آسیاب خرد شده و



شکل ۱- روندی از فرایند: (a) پیش‌آماده‌سازی الیاف پشم سنگ، (b) اصلاح سطحی الیاف پشم سنگ و (c) سنتز نمونه‌های پلی‌یورتان.

Fig. 1. Flowchart of (a) the pre-preparation process of rock wool fibers (RF), (b) surface modification of rock wool fibers, and (c) synthesis of polyurethane samples.

اندازه‌گیری ضریب جذب صوت

به‌طور کلی روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری ضریب جذب صوت با جاذب صوت وجود دارد. در مطالعه حاضر، مقدار جذب صوت با دستگاه امپدانس لوله دومیکروفونی ساخت شرکت BSWA چین مدل ۴۷۷ مطابق با استاندارد ISIRI 9803 برای نمونه‌های استوانه‌ای با قطرهای ۳ و ۱۰ cm و ضخامت ۲ cm بدون شکاف هوا در پشت نمونه در محدوده بسامد ۶۴۰۰-۶۳ Hz انجام شد. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، لوله امپدانس به‌شکل استوانه و از مواد سخت با سطحی یکنواخت، مستقیم و نامتخلخل است که در یک انتهای آن محل قرارگیری نمونه و در انتهای دیگر آن منبع تولید صدا (بلندگو) قرار دارد. این وسیله را می‌توان برای تعیین ضریب جذب و کاهش انتقال صوت مواد متخلخل به‌کار گرفت. با اندازه‌گیری فشارهای آکوستیکی در دو مکان ثابت با استفاده از میکروفون‌های نصب‌شده بر دیواره لوله و سپس محاسبه تابع تبدیل آکوستیکی مختلط، جذب صوت در حالت برخورد عمود و نسبت‌های امپدانس ماده جاذب محاسبه و اندازه‌گیری می‌شود. سامانه لوله امپدانس صوتی مجهز به لوله با قطر بزرگ (۱۰۰ mm) برای اندازه‌گیری ضریب جذب در بسامدهای کم و متوسط (۱۶۰۰-۶۳ Hz) و لوله با قطر کوچک (۳۰ mm) برای اندازه‌گیری ضریب جذب در بسامدهای زیاد (۸۰۰-۶۴۰۰ Hz) استفاده شد [۱۱].

خواص مکانیکی

اندازه‌گیری استحکام کششی با دستگاه آزمون کشش 506-B1 ساخت شرکت Comotech مطابق با استاندارد ASTM D412 انجام شد.

مقاومت در برابر جریان هوا

اندازه‌گیری مقاومت در برابر جریان هوا با استفاده از سامانه Nor1517A، ساخت شرکت Muller-BBM مطابق با استاندارد ISO9053-2:2020 انجام شد.



شکل ۲- طراحی از لوله امپدانس دومیکروفونی.

Fig. 2. The schematic of the two-microphone impedance tube.

واکنش) و برقراری پیوند میان گروه‌های OH- روی سطح الیاف آماده‌شده و OH- در پلی‌ال با گروه‌های NCO- ایزوسیانات است. در نهایت، ترکیب نهایی داخل قالب از جنس آلومینیم (برای جلوگیری از اختلاف دما در نواحی مختلف قالب) با حجم $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$ ریخته شده و درب قالب بسته شد. این اسفنج در دمای محیط و رطوبت $10 \pm 5\%$ به مدت ۲۴ h برای کامل شدن واکنش نگهداری شد. سپس، نمونه‌ها پس از ۷ تا ۱۰ روز نگهداری در دمای محیط (برای پخت کامل نمونه‌ها) ارزیابی شدند. روش سنتز نمونه‌ها در شکل ۱ (c) نشان داده شده است.

میکروسکوپی الکترونی پوششی گسیل میدانی (FE-SEM)

برای شناسایی ریزساختار و تعیین اندازه سلول، از ریزنگارهای میکروسکوپ الکترونی پوششی گسیل میدانی (FE-SEM) استفاده شد. میکروسکوپ الکترونی پوششی گسیل میدانی Tscane-mira3 به‌کار گرفته‌شده ساخت شرکت Zeiss جمهوری چک دارای ولتاژ شتاب‌دهی ۳۰ kV مجهز به طیف‌نورسنج پرتو X (EDS) بود. از دستگاه پوشش‌دهی طلا-پلادیم SC7620 برای آماده‌سازی نمونه FE-SEM استفاده شد.

اندازه‌گیری تخلخل

اندازه‌گیری مقدار تخلخل به روش تخلخل‌سنجی با گاز نیتروژن (BET) به‌کمک دستگاه مدل QUADRASORB evo ساخت شرکت Quantachrome و نرم‌افزار تحلیل BEL Master™ 7 انجام شد. اندازه‌گیری هندسی مقدار تخلخل سلول‌باز با تکرار اندازه از سه نمونه به‌دست آمد.

اندازه‌گیری چگالی

چگالی نمونه‌ها به‌منظور داشتن مقایسه‌ای بین اثر الیاف پشم سنگ و ترکیب اولیه اسفنج پلی‌یورتان بر چگالی، اندازه‌گیری شد. ذکر این نکته ضروری است که می‌توان با استفاده از چگالی و اندازه سلول به رابطه‌ای بین تغییرات ریزساختاری و مقدار ذرات افزوده‌شده دست یافت. برای اندازه‌گیری چگالی، نمونه‌ها با ابعاد $20 \times 40 \times 20 \text{ mm}$ برش داده شدند. سپس، با وزن کردن نمونه‌ها و اندازه‌گیری دقیق حجم آن‌ها با ابعاد مشخص (طبق استاندارد مربوط)، از تقسیم آن بر هم، چگالی گزارش شد. از هر نمونه اسفنج کامپوزیتی سه نمونه برای اندازه‌گیری چگالی تهیه شد که میانگین مقادیر به‌دست‌آمده، مقدار نهایی چگالی ظاهری نمونه در نظر گرفته شد. با وزن کردن نمونه‌ها و اندازه‌گیری دقیق حجم نمونه‌ها با ابعاد مشخص (طبق استاندارد مربوط) و از تقسیم آن بر هم، چگالی گزارش شد.

تحلیل آماری

پس از جمع‌آوری داده‌ها و ورود به نرم‌افزار SPSS26، تحلیل رگرسیون با روش گام‌به‌گام برای تشخیص اثر عوامل غیرآکوستیکی (چگالی، تخلخل، مقاومت جریان هوا و مقدار الیاف تقویت‌کننده) بر جذب صوت انجام شد. رسم نمودارها با نرم‌افزارهای MATLAB-v2020b و SASv9.4 انجام شد. سطح معناداری برابر با ۰/۰۵ بود.

نتایج و بحث

بررسی شکل‌شناسی

بررسی شکل‌شناسی (توزیع منفذ) عامل مهمی در به‌دست‌آوردن ظرفیت جذب صوت از اسفنج‌های پلی‌یورتان به‌واسطه پراکنده‌شدن امواج صوتی پس از برخوردی متوالی با دیواره‌ها و اصطکاک با دیواره‌ها و مولکول‌های هوا درون منفذهاست. این می‌تواند به دلیل اثرهای هسته‌زایی الیاف در طول تشکیل اسفنج باشد که به افزایش مسیرهای پیچ‌وخم در اسفنج منجر می‌شود [۲۶]. منحنی‌های توزیع منفذ از اسفنج‌های اصلاح‌شده با مقادیر مختلف از الیاف پشم سنگ با طراحی ساختار متخلخل به‌خوبی تعریف شده برای بررسی ساختار اسفنج‌مانند اندازه منفذ و توزیع آن، در شکل ۳ نشان داده شده است. این تصاویر به‌طور واضح نشان می‌دهند، الیاف اصلاح‌شده اثر معناداری بر ساختار حجم منفذ در ساختار اسفنج پلی‌یورتان دارند. در این مطالعه، الیاف پشم سنگ آماده‌شده با قلیا (NaOH)، به کاهش اندازه منفذ و افزایش تعداد آن منجر شده است. بدین معنی که با اضافه‌شدن پرکننده، اندازه و تعداد سلول اسفنج‌های کامپوزیتی، در مقایسه با اسفنج‌های پلی‌یورتان خالص به‌ترتیب کوچک‌تر و بیشتر شده است که می‌تواند اساس مناسبی برای خواص میرایی ارتعاشی و کارایی جذب صوت به‌ویژه در محدوده بسامد کم باشد. این روند به‌دست‌آمده

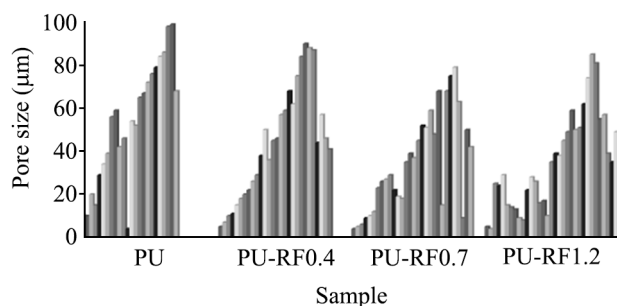
در مطالعه حاضر با مطالعات پیشین هم‌پوشانی دارد [۲۴، ۲۷، ۲۸]

این نتایج می‌تواند به ارتباط بین اندازه منفذ، چگالی و مقاومت جریان هوای اسفنج‌های کامپوزیتی مرتبط باشد که اندازه منفذ کوچک و چگالی زیاد، مقاومت جریان هوای زیادی را ایجاد می‌کند. بنابراین با افزایش مقاومت جریان هوا که مرتبط با اضافه‌کردن پرکننده است، چگالی افزایش می‌یابد و هم‌زمان، اندازه منفذ طی فرایند پلیمرشدن کاهش می‌یابد [۲۴]. همچنین با بررسی نمودارها می‌توان مشاهده کرد، نمونه‌ها به دلیل محدوده گسترده از اندازه منفذ، ناهمگن هستند. بدین معنی که اندازه ذرات در محدوده ۵ μm تا ۱۰۰ μm قرار دارند. بنابراین، با توجه به نمودارهای توزیع منفذ، می‌توان نتیجه

گرفت، ذرات کوچک‌تر از ۱۰۰ μm هستند و تراکم اندازه ذرات با ترکیب کردن الیاف داخل اسفنج پلی‌یورتان به سمت ذرات با اندازه کوچک‌تر جابه‌جا شده است. توزیع نامتقارن منفذ در اسفنج می‌تواند بدین دلیل باشد که توزیع یکنواخت الیاف پرکننده در فرایند تولید اسفنج و گسستن پیوند پلیمری در ساختار فیزیکی پلی‌یورتان، باعث ریزش و تراکم سلول‌ها شده است. بدین معنی که با ورود الیاف به‌عنوان فاز سوم به محلول پلی‌یورتان، آنگاه سلول‌ها حتی در فصل مشترک پلیمر-ذره جامد تشکیل خواهند شد. این فرایند هسته‌گذاری نامیده می‌شود. بنابراین در سنتز جاذب‌های کامپوزیت پلیمری با فازهای مختلف، توزیع منفذ یکنواخت نیست.

ضریب جذب صوت به‌شدت تحت تاثیر شکل‌شناسی اسفنج شامل چگالی (مرتبط با ضخامت دیواره سلولی) و ویژگی‌های منفذ (اندازه، تعداد، ارتباط درونی و پیچ‌وخم) است [۲۹]. افزایش ضریب جذب صوت در این محدوده بسامدی می‌تواند به‌واسطه کوچک‌بودن اندازه منفذهای سلول‌ها و افزایش مقاومت جریان هوا باشد که به اصطکاک بیشتر موج‌های صوتی با دیواره‌ها و مولکول‌های هوای داخل منفذها منجر می‌شود که با نتایج مطالعه Choe و همکاران [۳۰] مطابقت دارد. افزایش مقاومت جریان هوا در اسفنج پلی‌یورتان می‌تواند به دلیل افزایش مسیرهای پیچ‌وخم ایجادشده به‌وسیله منفذهای کوچک در اسفنج به‌واسطه افزون الیاف پشم سنگ باشد [۳۱، ۳۲].

شکل ۴ تصاویری از نحوه پراکنش پرکننده داخل اسفنج پلی‌یورتان (۴ (a)) و ضخامت دیواره‌های اسفنج با افزودن پرکننده به اسفنج پلی‌یورتان (۴ (b)) را نشان می‌دهند. می‌توان مشاهده کرد، با افزودن ذرات پرکننده به اسفنج، ضخامت دیواره‌های اسفنج در همه نمونه‌ها افزایش یافته است که می‌تواند با پراکنش پرکننده درون اسفنج در



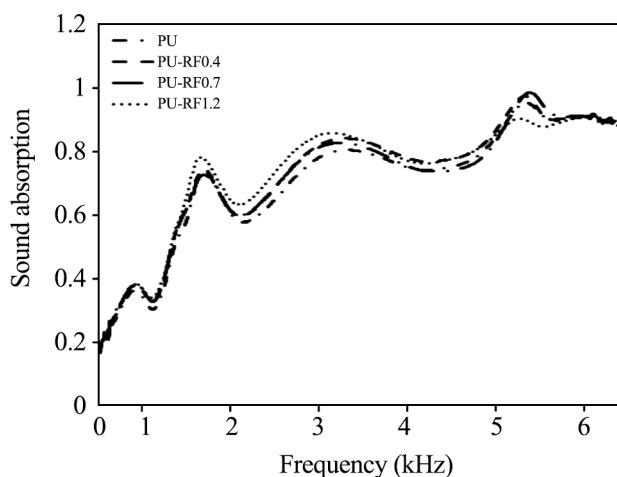
شکل ۳- نمودار توزیع اندازه منفذ در اسفنج‌های پلی‌یورتان تقویت‌شده با مقادیر مختلف از الیاف پشم سنگ.

Fig. 3. The diagrams of pore size distribution of PU foams reinforced with different contents of the rock wool fiber.

همکاران [۳۵] مبنی بر کنترل صدای بسامد کم، به دلیل بلندتر بودن طول موج در بسامدهای کم، می‌توان نتیجه گرفت، به منظور کاهش شدت صوت در بسامدهای کم باید از مواد با دیواره ضخیم‌تری استفاده کرد تا مسیر و زمان بیشتری برای عبور امواج صوتی از جاذب صوتی و تبدیل انرژی صوتی به گرما فراهم شود.

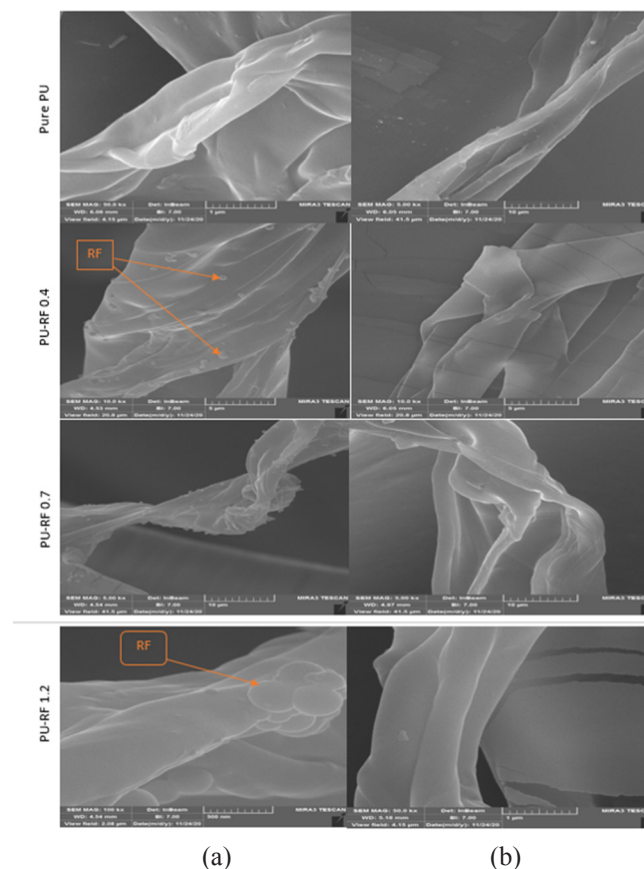
تعیین ضریب جذب صوت

نمودارهای جذب صوت در شکل ۵، نتایج ارزیابی خواص آکوستیک با روش امیدانس لوله در محدوده بسامدی ۶۳-۶۴۰۰ Hz برای نمونه‌های با قطرهای ۱۰۰ mm و ۳۰ mm و ضخامت ۲۰ mm را نشان می‌دهد. اثر ترکیب کردن الیاف پشم سنگ در مخلوط پلی‌یورتان پس از آماده‌سازی، در این محدوده بسامدی مطالعه شد. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، نمودارها در محدوده‌های بسامدی ۵۰۰-۱۴۰۰ Hz و ۵۰۰۰-۶۴۰۰ Hz تا حدود زیادی بر هم منطبق هستند. در نمونه اسفنج تقویت‌شده با ۱/۲٪ وزنی از الیاف-اسفنج پلی‌یورتان (PU-RF1.2) در بسامدهای ۵۴۳۲-۵۴۲۴ Hz، ضریب جذب به بیشینه مقدار ۰/۹۹ رسید. نمونه ۱/۲٪ وزنی، بیشترین جذب صوت را در محدوده بسامدهای ۴۰۰۰-۱۴۰۰ Hz داشت. در حقیقت در این محدوده بسامدی (۱۴۰۰-۴۰۰۰)، همه اسفنج‌های کامپوزیت جذب صوت بیشتری نسبت به اسفنج پلی‌یورتان خالص داشتند. یک دلیل برای این افزایش، زیاد شدن تعداد منفذها روی سطح جاذب است که موجب شد، انرژی صوتی بیشتری به داخل نمونه‌ها نفوذ



شکل ۵- ضریب جذب صوت اسفنج کامپوزیتی پلی‌یورتان برای درصد‌های مختلف پرکننده در محدوده بسامد ۵۰۰ Hz تا ۶۴۰۰ Hz.
Fig. 5. The sound absorption coefficient of the polyurethane composite foam to diverse percentages of filler in the frequency range of 500-6400 Hz.

ارتباط باشد. بدین معنی که الیاف پرکننده هیچ واکنشی با اجزای محلول در این مخلوط انجام نمی‌دهند. بنابراین، می‌توان دلیل آن را در فرایند هسته‌گذاری بررسی کرد. با فرایند هسته‌گذاری و رشد سلول، این الیاف پرکننده فضای داخل منفذها را پر می‌کنند و به موجب آن ضخامت لایه‌های دیواره اسفنج افزایش می‌یابد. ضخامت یکی از عوامل اثرگذار در بهبود جذب صوت است. با توجه به مقادیر جذب صوت (شکل ۵)، با افزودن الیاف پرکننده به اسفنج پلی‌یورتان، بهبود ضریب جذب صوت با افزایش ضخامت دیواره‌های اسفنج همراه است. نتایج مطالعه Lu و همکاران [۳۳] نشان داد، با افزایش ضخامت ضریب جذب صوت برای نمونه‌های فولاد متخلخل افزایش یافت. همچنین در راستای اثر ضخامت بر جذب صوت، Xie و همکاران [۳۴] گزارش کردند، با افزایش ضخامت و تخلخل، ضریب جذب صوت افزایش یافت. در همین راستا با توجه به نتایج مطالعه Zhang و



شکل ۴- ریزنگارهای SEM از (a) پرکننده پراکنده در داخل اسفنج پلی‌یورتان و (b) ضخامت لایه‌ها با افزودن پرکننده به اسفنج پلی‌یورتان.

Fig. 4. SEM micrographs of (a) dispersed filler within PU foam and (b) layers thickness, by addition of filler to PU foam.

چگالی، مقدار ضریب جذب صدا افزایش یافت [۳۹]. با توجه به تصاویر شکل ۳ می‌توان نتیجه گرفت، با افزایش درصد الیاف پشم سنگ اندازه سلول کاهش می‌یابد. این موضوع موجب افزایش ضریب جذب صوت به دلیل افزایش چسبناکی مخلوط پلی‌ال و الیاف است. داده‌های شکل ۴ نشان می‌دهد، در تمام نمونه‌ها ضریب جذب صوت افزایش محسوسی در بعضی از بسامدها نسبت به نمونه خالص داشته است. این افزایش ممکن است، به دلیل کاهش اندازه منفذ و افزایش تعداد منفذها باشد. همچنین با افزودن الیاف پشم سنگ، مقدار چگالی افزایش یافته است. این افزایش چگالی می‌تواند بهبود ضریب جذب صوت در بسامدهای زیاد را برای تمام نمونه‌ها، توجیه کند [۲۸]. در نهایت جذب صوت بهینه برای اسفنج ۱/۲٪ وزنی الیاف-اسفنج پلی‌یورتان به دست آمد که می‌تواند به عنوان گزینه خوبی برای استفاده مواد جاذب صوت انتخاب شود.

مقاومت در برابر جریان هوا

از مقاومت در برابر جریان هوا برای ارزیابی کارایی آکوستیکی استفاده می‌شود. مقاومت کم، در واقع حاکی از مقاومت کم برای عبور جریان هواست، در حالی که مقاومت زیاد به واسطه مسدود کردن جریان هوا به کاهش کارایی جذب صوت در محدوده بسامد کم منجر می‌شود [۱۶،۴۰]. این موضوع می‌تواند به واسطه تحت تاثیر قرار گرفتن مقاومت جریان هوا به وسیله چگالی و اندازه منفذ باشد که چگالی زیاد و اندازه منفذ کوچک مقاومت زیادی را برای عبور هوا ایجاد می‌کند. شکل ۶ نتایج اثر مقاومت جریان هوا بر کارایی مقدار جذب صوت از اسفنج‌های کامپوزیتی پلی‌یورتان را نشان می‌دهد. می‌توان مشاهده کرد، استفاده از الیاف معدنی در اسفنج پلی‌یورتان باعث افزایش مقاومت در برابر جریان هوا می‌شود. این موضوع بدین معنی است که اضافه کردن الیاف باعث کاهش تعداد سلول‌های باز و افزایش تعداد سلول‌های بسته می‌شود. بدین معنی که اضافه کردن الیاف معدنی باعث پُر شدن منفذهای خالی می‌شود. همچنین افزودن الیاف با چگالی و استحکام کششی زیاد، کشش سطحی محلول پلیمر را کاهش می‌دهد که به موجب آن مقاومت بیشتری برای باز شدن منفذ به وجود می‌آید. در نتیجه مقاومت در برابر جریان هوا افزایش می‌یابد و تعداد منفذهای بسته بیشتری تشکیل می‌شود.

همچنین این نمودار نشان می‌دهد، مقاومت هوا تا مقدار 2863 Pa.s/m افزایش و سپس کاهش می‌یابد. این ممکن است، بدین دلیل باشد که با افزایش مقاومت جریان هوا که با گنجانیدن الیاف داخل ماتریس اسفنج پلی‌یورتان مرتبط است، به طور هم‌زمان چگالی افزایش و اندازه منفذ کاهش پیدا کند. بدین معنی که مسیرها و کانال‌های نامنظم و

کند. اخیراً گزارش شده است، در ساختار منفذهای با ارتباط درونی کمتر، ضریب جذب صوت به واسطه مقاومت جریان هوای ایجاد شده به وسیله دیواره‌های سلولی در محدوده بسامدی کم افزایش می‌یابد [۳۶]. بنابراین، در این مطالعه با توجه به نقش الیاف بر ساختار سلولی و نیز مقدار باز و بسته بودن سلول‌ها، آزمون مقاومت جریان هوا انجام شد. نتایج نشان داد، با افزودن الیاف به اسفنج پلی‌یورتان، تعداد سلول‌های بسته افزایش یافته است. بنابراین، مقاومت بیشتری در برابر جریان هوا قرار داشته است. افزون بر این، تخلخل زیاد که با چگالی کم مرتبط است، مقاومت کمتری را برای عبور امواج و پراکنده شدن آن‌ها ایجاد می‌کند که به کاهش ضریب جذب منجر می‌شود. عامل‌های زیادی بر ضریب جذب صوت اثرگذارند که مقدار کلی آن تعادلی از همه عامل‌ها خواهد بود [۱۷،۲۹،۳۷]. ترکیب شدن الیاف در اسفنج پلی‌یورتان استحکام کششی اسفنج را افزایش می‌دهد. بنابراین، سلول‌ها گستره وسیعی از تحمل را در برابر فشار، کشش، خمش، ضربه و بریدگی خواهند داشت. همچنین با توجه به تصاویر میکروسکوپی، با اضافه کردن الیاف به اسفنج پلی‌یورتان، تخلخل و اندازه منفذ کاهش می‌یابد [۳۸].

نتایج حاصل از اثر الیاف سنگ بر ضریب جذب صوت نشان داد، استفاده از الیاف باعث افزایش مقدار جذب صوت می‌شود. با توجه به اینکه این الیاف با مخلوط پلی‌یورتان واکنش نمی‌دهند، در پرکردن فضاهای خالی و خلل و فرج سطوح نمونه‌ها اثر بسزایی دارد و به افزایش ضخامت دیواره‌های سلولی منجر می‌شود. در نتیجه موجب جذب امواج صوتی شده و مانع عبور آن‌ها می‌شوند. این نتایج با مطالعه Lee و همکاران [۳۹] مطابقت دارد که با هدف تعیین ویژگی‌های جذب صوت اسفنج‌های نانوکامپوزیتی پلی‌یورتان-نانوسیلیکا انجام شد. نتایج حاصل از ضریب جذب صوت در بسامدهای بررسی شده نشان داد، تمام نمونه‌های ساخته شده در بسامدهای کم و میانی (۵۰۰-۱۴۰۰ Hz) دارای ضریب جذب قابل ملاحظه‌ای هستند، اما با وجود این بیشترین مقدار ضریب جذب صوت در محدوده بسامدهای زیاد (۱۴۰۰-۶۴۰۰ Hz) به دست آمد. در این راستا Zhang و همکاران [۳۵] نشان دادند، دلیل کاهش جذب صوت در بسامدهای کم، طول موج بلندتر امواج در بسامدهای کم است. بدین منظور باید از مواد با چگالی بیشتر و لایه ضخیم‌تری از مواد برای جذب صوت در این بسامدها استفاده کرد، تا زمان کافی برای عبور امواج صوتی و تبادل انرژی فراهم شود.

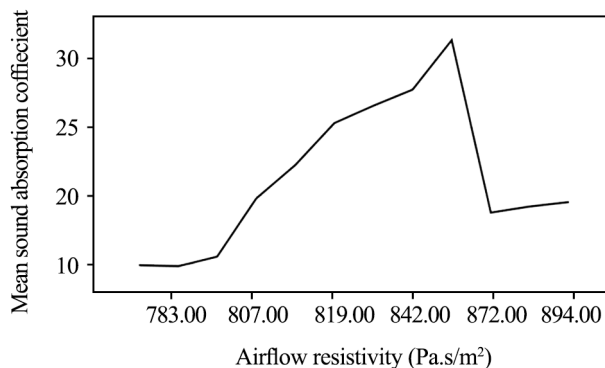
نتایج Lee و همکاران در بررسی اثر چگالی، اندازه منفذ و وزن مولکولی بر مقدار جذب صدا از اسفنج‌های پلی‌یورتان-نانوسیلیکا نشان داد، با افزایش درصد نانوسیلیکا، مقدار ضریب جذب صدا در تمام بسامدها افزایش یافت. همچنین، با کاهش اندازه منفذ و افزایش

برای همه چهار پیشگو، مقدارهای ضریب هم‌بستگی $R^2=0.13$ و $P < 0.01$ (P-value) به دست آمد. با توجه به ضرایب استاندارد (B)، مقدار الیاف پرکننده و مقاومت در برابر هوا، ارتباط مستقیمی با ضریب جذب صوت داشتند. چگالی حجمی و تخلخل، ارتباط غیرمستقیمی با جذب صوت نشان دادند. همچنین با توجه به ضرایب استاندارد، چگالی حجمی بیشترین ارتباط را با ضریب جذب نسبت به سایر متغیرها نشان داد. تخلخل کمترین مقدار ارتباط را در بین سایر متغیرها نشان داد که با نتایج مطالعات محمدی و همکاران [۲۴] و نیز Pinto و همکاران [۳۶] مطابقت دارد. افزون بر این مقدار P برای ارتباط بین پارامترهای غیراکوستیکی و ضریب جذب صوت، معنادار گزارش شد.

استحکام کششی

به کمک دستگاه آزمون مکانیکی چندمنظوری، استحکام کششی در اسفنج‌های کامپوزیتی پلی‌یورتان تخمین زده شد. منحنی‌های تنش-کرنش کششی اسفنج‌های کامپوزیتی پلی‌یورتان مرتبط با مقدارهای مشخص شده از الیاف پشم سنگ در شکل ۷ نشان داده شده است. گزارش شده است، اضافه کردن پرکننده به مواد سلولی، می‌تواند اثرهای مختلف داشته باشد که بسته به جنبه‌های مختلف از جمله اندازه و شکل، مقدار بارگذاری، تطابق بین الیاف و مخلوط پلی‌یورتان، می‌تواند موجب تغییر در جذب صوت شود [۴۲، ۴۳]. از منحنی‌های کشش در شکل ۷ می‌توان مشاهده کرد، استحکام کششی با مقدار الیاف متناسب است. این منحنی‌ها را می‌توان در سه مرحله تغییرشکل کشسان (مرحله ۱)، مسطح‌شدن کشسان (مرحله ۲) و متراکم‌شدن (مرحله ۳) ارزیابی و مقایسه کرد. مرحله ۱ در محدوده کرنش ۰-۱۰٪ و با مرحله مسطح‌شدن ادامه پیدا می‌کند. مرحله دوم طولانی‌ترین بخش از کل فرایند کشش است. ناحیه سوم بخشی است که ساختار پلی‌یورتان در حال فشرده‌شدن است [۳۸]. با افزایش درصد الیاف ساختار اسفنج سخت‌تر می‌شود و با توجه به افزایش چگالی استحکام نهایی بیشتری نسبت به نمونه خالص نشان می‌دهد.

افزایش استحکام نهایی به دلیل افزایش چگالی و در پی آن مقاومت جریان هوا در ساختار اسفنج است. برای همه نمونه‌ها هر سه ناحیه افزایش یافته است، به جز نمونه دارای ۰/۴٪ وزنی الیاف که مقدار مدول یانگ آن تغییر نکرده اما استحکام کششی آن در مقایسه با اسفنج خالص کاهش یافته است. یکی از دلایل ثابت ماندن مدول یانگ، نبود تغییر در مقدار باز و بسته‌شدن سلول‌هاست. همچنین نتایج نشان می‌دهد، زمانی که کشش به ۷۰٪ می‌رسد، استحکام کششی نمونه‌ها با اضافه‌شدن پرکننده به ترتیب ۰/۳۶، ۰/۳۲، ۰/۴۳ و ۰/۵۹٪ افزایش می‌یابد. به‌ویژه زمانی که مقدار الیاف به ۱/۲٪ وزنی می‌رسد، استحکام کششی در اسفنج



شکل ۶- ارتباط بین میانگین ضریب جذب صوت و مقاومت در برابر جریان هوا در اسفنج‌های پلی‌یورتان.

Fig. 6. The connection between mean sound absorption coefficient and airflow resistivity in the polyurethane foams.

پیچیده بیشتری برای حرکت امواج صوتی دارد. در نتیجه موج‌های صوتی برخورد‌های بیشتری با لبه‌ها و دیواره‌های اسفنج دارند که به افزایش جذب صوت منجر می‌شود. این نمونه با مقاومت در برابر جریان هوا ۲۸۶۳ Pa.s/m بیشترین مقدار را در مقایسه با سایر نمونه‌ها دارد. بنابراین، جذب صوت بهینه برای مقاومت جریان هوا ۲۸۶۳ Pa.s/m به دست آمد.

برای مقدارهای بیش از ۲۸۶۳ Pa.s/m، مقاومت بیشتری برای انتشار امواج صوتی در ماده وجود دارد که به کاهش جذب صوت منجر می‌شود. بنابراین می‌تواند به دلیل گران‌روی زیاد محلول پلیمر با افزودن الیاف معدنی حین سنتز اسفنج باشد. بدین صورت که گران‌روی ماتریس به‌طور مستقیم بر تعداد سلول‌های بسته‌شده اثر می‌گذارد. عبور جریان هوا از ماده را کاهش می‌دهد. بنابراین، خواص جذب صوت از اسفنج پلی‌یورتان تحت تأثیر مقدارهای الیاف پشم سنگ خواهد بود. این مقاومت هوا به‌طور مستقیم با تعداد منفذهای بسته‌شده مرتبط است. به دلیل اینکه تعداد سلول‌های بسته‌شده از عبور جریان هوا در ماده جلوگیری می‌کنند [۴۱]. به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت، اضافه‌کردن پرکننده به ماتریس، نوع پرکننده و گران‌روی ماتریس می‌تواند به‌عنوان عوامل مهمی در به‌دست‌آوردن مقدار مناسبی از مقاومت جریان هوا، برای جذب صوت بهینه به‌وسیله توزیع یکنواخت ذرات باشند.

تحلیل آماری

تحلیل رگرسیونی با روش گام‌به‌گام برای تعیین ضرایب و اثر چهار متغیر مستقل (چگالی، تخلخل، مقاومت جریان هوا و مقدار الیاف) بر جذب صوت (متغیر وابسته) انجام شده است. این مدل رگرسیون چندگانه

سلولی را در برابر از بین رفتن مقاوم می‌کنند که در نهایت به افزایش استحکام کششی منجر می‌شود.

نتیجه‌گیری

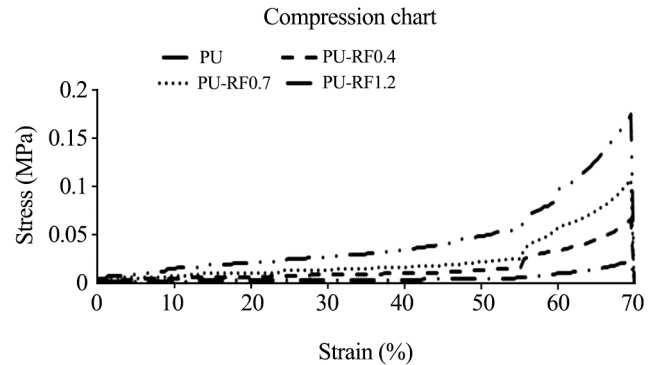
در مطالعه حاضر، ترکیب اسفنج‌های پلی‌یورتان با مقادیر مختلف از الیاف پشم سنگ (۱/۲-۰ wt%) با روش سنتز رشد آزاد تهیه شدند. مطابق با یافته‌ها، شکل‌شناسی سلولی، اندازه منفذ و توزیع اندازه منفذ اختلاف معناداری با افزایش مقادیر الیاف پشم سنگ نشان دادند. ضریب جذب صوت اسفنج‌های پلی‌یورتان متخلخل، با کاهش اندازه منفذ، افزایش یافت که می‌تواند با ترکیب کردن پرکننده درون مخلوط پلی‌یورتان مرتبط باشد. این پرکننده‌ها، حل‌پذیر درون مخلوط پلی‌یورتان نیستند. بنابراین می‌توانند واکنش‌های هسته‌زایی را سرعت بخشند و ارتباط درونی منفذها را بهبود دهند که این به نوبه خود موجب کوچک‌تر شدن اندازه سلول و افزایش کارایی ضریب جذب می‌شود. بنابراین، به‌کارگیری مقدار مشخصی از پرکننده در اسفنج پلی‌یورتان و پراکنش یکسان آن در اسفنج پلی‌یورتان، به تقویت دیواره سلولی اسفنج منجر شد. همچنین، مسیر عبور هوا از راه محیط متخلخل طولانی‌تر و اصطکاک امواج صوتی با دیواره‌های سلولی افزایش یافت که موجب افزایش ضریب جذب صوت شد. همچنین استحکام کششی اسفنج‌های کامپوزیت با گنجاندن پرکننده‌های الیافی با مقادیر تقویت‌کننده (۱/۲-۰ wt%) بررسی شد. نتایج نشان داد، اضافه کردن پرکننده به اسفنج پلی‌یورتان، استحکام کششی را تقویت کرد. بیشینه خواص کششی این اسفنج‌ها مقدار بهینه پرکننده را ۱/۲ wt% نشان داد. نتایج تحلیل رگرسیون مشخص کرد، پارامترهای غیرآکوستیکی اثرهای معناداری بر ضریب جذب صوت دارند و مرتبط با جذب صوت هستند.

قدردانی

این مقاله حاصل طرح مصوب شورای پژوهشی دانشگاه علوم پزشکی تبریز به شماره ثبت ۴۴۷۶۰ است. از معاونت تحقیقات و فناوری دانشگاه علوم پزشکی تبریز برای حمایت مالی از این مطالعه قدردانی می‌شود.

مراجع

1. Belojevic G., Noise and Performance: Research in Central,



شکل ۷- استحکام کششی اسفنج‌های کامپوزیتی پلی‌یورتان به‌عنوان تابعی از مقدار پرکننده الیاف پشم سنگ.

Fig. 7. The tensile strength of the polyurethane composite foams as a function of RF amount.

پلی‌یورتان بیشینه می‌شود که مطابق با بیشترین ضریب جذب صوت است. این الیاف پشم سنگ به‌طور یکسان در سلول‌ها پراکنده می‌شوند و در نتیجه دیواره سلول و ساختار اسفنج‌های پلی‌یورتان را تقویت می‌کنند. این نتایج با این حقیقت توصیف می‌شوند که درون اسفنج‌های پلی‌یورتان فشرده و متراکم‌شده، تعداد نقطه‌های برای تحمل فشار، افزایش می‌یابد که موجب افزایش در مساحت سطح و نقطه‌های قابل تحمل و مساحت کل برای نیروهای کششی از اسفنج‌های پلی‌یورتان با مقدار مشخص از الیاف می‌شود [۴۴].

از عوامل مهمی که سبب افزایش استحکام کششی می‌شود، می‌توان به کاهش مقدار تخلخل موجود در ساختار نمونه اشاره کرد. همان‌طور که در بررسی تخلخل اشاره شد، به‌ازای افزایش چگالی و نیز افزودن الیاف و افزایش درصد وزنی آن در ماتریس، درصد تخلخل کاهش می‌یابد [۴۴] که این عامل خود نیز می‌تواند دلیلی بر افزایش استحکام کششی باشد. نتایج پژوهش Saha و همکاران [۴۵] درباره خواص کششی نانوکامپوزیت ماتریس پلی‌یورتان تقویت‌شده با نانوذرات مختلف نشان داد، استحکام کششی نانوکامپوزیت‌ها با مقادیر وزنی متفاوت بیشتر از نمونه‌های خالص است. آن‌ها دلیل این موضوع را به خواص تقویت‌کنندگی نانوذرات افزوده‌شده نسبت دادند. در کل با توجه به نتایج در شکل‌ها، استحکام کششی نمونه‌های کامپوزیتی به‌دلیل افزودن الیاف در ماتریس افزایش یافته است. اعتقاد بر این است که الیاف گنجانده‌شده در ساختار سلولی، دیواره‌های

Eastern and South-Eastern Europe and Newly Independent

- States, *Noise and Health*, **15**, 32-41, 2013.
2. Geravandi S., Takdastan A., Zallaghi E., Niri M.V., Mohammadi M.J., and Saki H., Noise Pollution and Health Effects, *Jundishapur J. Health Sci.*, **7**, 2015.
 3. Ghotbi M.R., Monazzam M.R., Baneshi M.R., Asadi M., and Fard S.M.B., Noise Pollution Survey of a Two-Storey Intersection Station in Tehran Metropolitan Subway System, *Environ. Monit. Assess.*, **184**, 1097-1106, 2012.
 4. Sadr M.K., Nassiri P., Hosseini M., Monavari M., and Gharagozlou A., Assessment of Land Use Compatibility and Noise Pollution at Imam Khomeini International Airport, *J. Air Trans. Manag.*, **34**, 49-56, 2014.
 5. Moradi G., Omidi L., Vosoughi S., Ebrahimi H., Alizadeh A., and Alimohammadi I., Effects of Noise on Selective Attention: The Role of Introversion and Extraversion, *Appl. Acoust.*, **146**, 213-217, 2019.
 6. Cao L., Fu Q., Si Y., Ding B., and Yu J., Porous Materials for Sound Absorption, *Compos. Commun.*, **10**, 25-35, 2018.
 7. Chu R.K., Naguib H.E., and Atalla N., Synthesis and Characterization of Open-Cell Foams for Sound Absorption with Rotational Molding Method, *Polym. Eng. Sci.*, **49**, 1744-1754, 2009.
 8. Chen S., Jiang Y., Chen J., and Wang D., The Effects of Various Additive Components on the Sound Absorption Performances of Polyurethane Foams, *Adv. Mater. Sci. Eng.*, **2015**, 2015.
 9. Jahani D., *Injection-Molded Thermoplastic Foams for Sound Insulation*, ProQuest Dissertations, University of Toronto, Canada, 2015.
 10. Alexandre M. and Dubois P., Polymer-Layered Silicate Nanocomposites: Preparation, Properties and Uses of a New Class of Materials, *Mater. Sci. Eng. R: Reports*, **28**, 1-63, 2000.
 11. Moradi G., Nassiri P., Ershad-Langroudi A., and Monazzam M.R., Acoustical, Damping and Thermal Properties of Polyurethane/Poly(methyl methacrylate)-Based Semi-Interpenetrating Polymer Network Foams, *Plast. Rubber Compos.*, **47**, 221-231, 2018.
 12. Gibson L.J. and Ashby M.F., Cellular Solids: Structure and Properties, *Acta Materialia*, **10**, 2853-2863, 1999.
 13. Ugarte L., Saralegi A., Fernández R., Martín L., Corcuera M., and Eceiza A., Flexible Polyurethane Foams Based on 100% Renewably Sourced Polyols, *Ind. Crops Prod.*, **62**, 545-551, 2014.
 14. Han X., Zeng C., Lee L.J., Koelling K.W., and Tomasko D.L., Extrusion of Polystyrene Nanocomposite Foams with Supercritical CO₂, *Polym. Eng. Sci.*, **43**, 1261-1275, 2003.
 15. Daemi H., Barikani M., and Barmar M., Highly Stretchable Nanoalginate Based Polyurethane Elastomers, *Carbohydr. Polym.*, **95**, 630-636, 2013.
 16. Moradi G., Monazzam M., Ershad-Langroudi A., Parsimehr H., and Keshavarz S.T., Organoclay Nanoparticles Interaction in PU: PMMA IPN Foams: Relationship Between the Cellular Structure and Damping-Acoustical Properties, *Appl. Acoust.*, **164**, 107295, 2020.
 17. Sung G., Kim J.W., and Kim J.H., Fabrication of Polyurethane Composite Foams with Magnesium Hydroxide Filler for Improved Sound Absorption, *J. Ind. Eng. Chem.*, **44**, 99-104, 2016.
 18. Yuvaraj L., Jeyanthi S., and Babu M.C.L., Sound Absorption Analysis of Castor Oil Based Polyurethane Foam with Natural Fiber, *Mater. Today: Proc.*, **5**, 23534-23540, 2018.
 19. Lee L.J., Zeng C., Cao X., Han X., Shen J., and Xu G., Polymer Nanocomposite Foams, *Compos. Sci. Technol.*, **65**, 2344-2363, 2005.
 20. Siligardi C., Miselli P., Francia E., and Gualtieri M.L., Temperature-Induced Microstructural Changes of Fiber-Reinforced Silica Aerogel (FRAB) and Rock Wool Thermal Insulation Materials: A Comparative Study, *Energy Build.*, **138**, 80-87, 2017.
 21. Chuang Y.C., Li T.T., Huang C.H., Huang C.L., Lou C.W., Chen Y.S., and Lin J.H., Protective Rigid Fiber-Reinforced Polyurethane Foam Composite Boards: Sound Absorption, Drop-Weight Impact and Mechanical Properties, *Fibers Polym.*, **17**, 2116-2123, 2016.
 22. Olcay H. and Kocak E.D., Rice Plant Waste Reinforced Polyurethane Composites for Use as the Acoustic Absorption Material, *Appl. Acoust.*, **173**, 107733, 2021.
 23. Pirani M., Monazzam M.R., and Pourjandaghi S.Q., Correlation Between the Acoustic and Cell Morphology of Polyurethane/Silica Nanocomposite Foams: Effect of Various Proportions of Silica at Low Frequency Region, *J. Health Saf. Work*, **11**, 1-12, 2021.
 24. Mohammadi B., Safaiyan A., Habibi P., and Moradi G., Evaluation of the Acoustic Performance of Polyurethane Foams Embedded with Rock Wool Fibers at low-Frequency Range, Design and Construction, *Appl. Acoust.*, **182**, 108223, 2021.

25. Mohammadi B., Ershad-Langroudi A., Moradi G., Safaiyan A., and Habibi P., Mechanical and Sound Absorption Properties of Open-Cell Polyurethane Foams Modified with Rock Wool Fiber, *J. Build. Eng.*, **48**, 103872, 2022.
26. Kim J.M., Kim D.H., Kim J., Lee J.W., and Kim W.N., Effect of Graphene on the Sound Damping Properties of Flexible Polyurethane Foams, *Macromol. Res.*, **25**, 190-196, 2017.
27. Lu T.J., Hess A., and Ashby M., Sound Absorption in Metallic Foams, *J. Appl. Phys.*, **85**, 7528-7539, 1999.
28. Seddeq H.S., Factors Influencing Acoustic Performance of Sound Absorptive Materials, *Aust. J. Basic Appl. Sci.*, **3**, 4610-4617, 2009.
29. Najib N., Ariff Z., Bakar A., and Sipaut C., Correlation Between the Acoustic and Dynamic Mechanical Properties of Natural Rubber Foam: Effect of Foaming Temperature, *Mater. Des.*, **32**, 505-511, 2011.
30. Choe H., Sung G., and Kim J.H., Chemical Treatment of Wood Fibers to Enhance the Sound Absorption Coefficient of Flexible Polyurethane Composite Foams, *Compos. Sci. Technol.*, **156**, 19-27, 2018.
31. Baferani A.H., Keshavarz R., Asadi M., and Ohadi A., Effects of Silicone Surfactant on the Properties of Open-Cell Flexible Polyurethane Foams, *Adv. Polym. Technol.*, **37**, 71-83, 2018.
32. Van Krevelen D. and Te Nijenhuis K., *Polymer Properties, Properties of Polymers*, Elsevier, Amsterdam, Chapt. 1, 2009.
33. Lu M., Hopkins C., Zhao Y., and Seiffert G., Sound Absorption Characteristics of Porous Steel Manufactured by Lost Carbonate Sintering, *MRS Online Proceedings Library*, 1188, 2009.
34. Xie Z.K., Ikeda T., Okuda Y., and Nakajima H., Characteristics of Sound Absorption in Lotus-Type Porous Magnesium, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **43**, 7315, 2004.
35. Zhang C., Li J., Hu Z., Zhu F., and Huang Y., Correlation Between the Acoustic and Porous Cell Morphology of Polyurethane Foam: Effect of Interconnected Porosity, *Mater. Des.*, **41**, 319-325, 2012.
36. Pinto S.C., Marques P.A.A.P., Vicente R., Godinho L., and Duarte I., Hybrid Structures Made of Polyurethane/Graphene Nanocomposite Foams Embedded within Aluminum Open-Cell Foam, *Metals*, **10**, 768, 2020.
37. Gwon J.G., Kim S.K., and Kim J.H., Sound Absorption Behavior of Flexible Polyurethane Foams with Distinct Cellular Structures, *Mater. Des.*, **89**, 448-454, 2016.
38. Haghgou M., Mohammadi N., Ahmadi M., Faghihi F., and Pazouki M., Damping of Mechanical Waves with Styrene/Butadiene Rubber Filled with Polystyrene Particles: Effects of Particle Size and Wave Frequency, *J. Polym. Sci. Part B: Polym. Phys.*, **48**, 82-88, 2010.
39. Lee J., Kim G.H., and Ha C.S., Sound Absorption Properties of Polyurethane/Nano-Silica Nanocomposite Foams, *J. Appl. Polym. Sci.*, **123**, 2384-2390, 2012.
40. Sung G. and Kim J.H., Effect of High Molecular Weight Isocyanate Contents on Manufacturing Polyurethane Foams for Improved Sound Absorption Coefficient, *Korean J. Chem. Eng.*, **34**, 1222-1228, 2017.
41. Doutres O., Atalla N., and Dong K., Effect of the Microstructure Closed Pore Content on the Acoustic Behavior of Polyurethane Foams, *J. Appl. Phys.*, **110**, 064901, 2011.
42. Corredor-Bedoya A., Acuña B., Serpa A., and Masiero B., Effect of the Excitation Signal Type on the Absorption Coefficient Measurement Using the Impedance Tube, *Appl. Acoust.*, **171**, 107659, 2021.
43. Li Y., Zou J., Zhou S., Chen Y., Zou H., Liang M., and Lu W., Effect of Expandable Graphite Particle Size on the Flame Retardant, Mechanical, and Thermal Properties of Water-Blown Semi-Rigid Polyurethane Foam, *J. Appl. Polym. Sci.*, **131**, 2014.
44. Gholampour M., Aghvami-Panah M.A., and Anbaran S.R.G., Mechanical Properties and Electromagnetic Interference (EMI) Shielding Performance of PP/CNT/Glass Fiber Microcellular Foam, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **34**, 373-385, 2021.
45. Saha M., Kabir M.E., and Jeelani S., Enhancement in Thermal and Mechanical Properties of Polyurethane Foam Infused with Nanoparticles, *Mater. Sci. Eng. A*, **479**, 213-222, 2008.