AMNC
available online @ amnc.aut.ac.ir
نشریه علمی پژوهشی مواد پیشرفته و پوشش‌های نوین- ۲۹ (۱۳۹۸) ۲۰۸۰-۲۰۷۲

بهبود رفتار جذب صوت فوم پلی یورتان نرم تقویت شده با نانوالیاف پلیمری، نانولوله کربنی و نانوذرات

محمد علیزاده[۱]، مهدی حسن‌زاده[۲*]، سینا محتشمی[۳]

۱ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی پلیمر و رنگ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

۲ استادیار، دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

۳ کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی پلیمر و رنگ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

تاریخ دریافت:
۹۸/۰۳/۰۸

تاریخ پذیرش:
۹۸/۰۴/۰۲

چکیده

در این پژوهش فوم پلی‌یورتان با استفاده از تقویت کننده‌های نانومتری مختلف شامل نانوالیاف پلیمری، نانولوله کربنی و نانوذرات اکسید نیکل تهیه شد. برای این منظور ابتدا نانوالیاف پلیمری پلی‌یورتان، پلی(متیل متاکریلات) و پلی(وینیل الکل) به روش الکتروریسی تهیه شدند و پیش از شکل‌گیری فوم پلی‌یورتان به همراه نانولوله کربنی و نانوذرات اکسید نیکل به ترکیب فوم افزوده شدند. مورفولوژی، خواص مکانیکی و رفتار جذب صوت فوم‌های تهیه شده با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، دستگاه اینسترن و لوله امپدانس ارزیابی شد. نتایج بدست آمده نشان‌دهنده تولید نانوالیافی یکنواخت و عاری از نقص و همچنین حضور این نانوالیاف در بین حفرات و تخلخل فوم می‌باشد. همچنین فوم‌های تقویت شده با نانوالیاف پلیمری مقاومت فشاری بیشتری نسبت به فوم پلی‌یورتان خالص نشان دادند. بررسی‌های جذب صوت فوم‌های تهیه شده نشان داد که افزودن تقویت کننده‌های نانوساختار سبب بهبود قابلیت جذب صوت فوم پلی‌یورتان در محدوده فرکانس ۶۱۰۰-۲۵۰ هرتز می‌شود. در این میان فوم پلی‌یورتان تقویت شده با نانوالیاف پلی(متیل متاکریلات) و نانولوله کربنی یا نانوذرات اکسیدنیکل بیشترین میزان جذب صوت را به خود اختصاص داده است.

واژگان کلیدی: فوم پلی‌یورتان، نانوالیاف، نانوذرات، عایق صوت

عهده دار مکاتبات: m.hasanzadeh@yazd.ac.ir

AMNC

Improving Sound Absorption Behavior of Flexible Polyurethane Foams Infused with Polymer Nanofibers, Carbon Nanotubes and Nanoparticles

M. Alizadeh[1], M. Hasanzadeh[2*], S. Mohtashami[3]

1. PhD, Faculty of Polymer Engineering & Color Technology, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
2. Assitant Professor, Department of Textile Engineering, Yazd University, Yazd, Iran
3. MSc, Faculty of Polymer Engineering & Color Technology, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

Abstract

In this study, polyurethane foam was prepared using various nanostructures including polymer nanofibers, carbon nanotubes and nickel oxide nanoparticles. Polyurethane, poly (methyl methacrylate) and poly (vinyl alcohol) nanofibers were first fabricated by electrospinning method and added to the foam before the formation of polyurethane foam along with carbon nanotube and nickel oxide nanoparticles. The morphology, mechanical properties and sound absorption behavior of the foam were evaluated using scanning electron microscopy (SEM), Instron and impedance tube. The results indicate that the nanofibers are uniform and free of beads, as well as the presence of these nanofibers within the pores and porosity of the foam. Polyurethane foam reinforced with polymer nanofibers also showed a higher compressive strength than pure polyurethane foam. Sound absorption studies of foam showed that the addition of nanostructures improves the sound absorption efficiency of polyurethane foam in the frequency range of 250-610 Hz. Polyurethane foam reinforced with poly (methyl methacrylate) nanofibers and carbon nanotubes as well as nickel oxide nanoparticles exhibit the highest sound absorption.

Keywords

Polyurethane Foam, Nanofibers, Nanoparticles, Sound Insulator

۱- مقدمه

یکی از مسائل جدی زیست محیطی که تأثیرات زیادی بر سلامت، ارتباط اجتماعی، ناراحتی‌های عصبی و بروز اختلالات خواب در انسان می‌شود، آلودگی صوتی است. لذا در سال‌های اخیر توجه زیادی به مواد عایق یا جاذب صوت توسط پژوهشگران و صنعتگران در صنایع مختلف نظیر ساختمان‌سازی، شهرسازی و خودرو جلب شده است. در بین مواد جاذب مختلف نظیر پشم سنگ، پشم شیشه، آزبست، ضایعات مواد سلولزی، مواد متخلخل نظیر فوم‌های پلی‌یورتان، بدلیل فرآیندپذیری و امکان افزودن مواد تقویت‌کننده در ساختار فوم از اهمیت بیشتری برخوردار هستند. عبور امواج صوت از مواد جاذب صوت متخلخل نظیر فوم پلی‌یورتان، سبب تبدیل انرژی صوتی به گرما در اثر نیروی اصطکاک بین امواج صوتی و دیواره‌های سلول‌های فوم و درنتیجه جذب صوت می‌شود [۱-۳].

در حال حاضر پلی‌یورتان‌ها به اشکال، کیفیت و ویژگی‌های مختلف متناسب با زمینه‌های کاربردی متعدد تولید می‌شوند. ویژگی‌های هر نوع از پلی‌یورتان‌ها به‌طورکلی از طریق فرموله کردن پلی‌اُل جانبی برای شکل‌گیری یک سیستم فرمولاسیون تنظیم می‌شود. سیستم فرمولاسیون شامل دو یا چند پلی‌اُل، تثبیت‌کننده، کاتالیزور، افزودنی‌های مایع یا جامد و در مورد فوم‌ها عامل شکل‌دهنده است. باتوجه به ساختار پلی‌اُل مصرفی، به‌عبارت‌دیگر طول زنجیره، پلی‌یورتان‌ها از بسیار انعطاف‌پذیر تا بسیار سخت تولید می‌شوند. یکی از مشخصه‌های ساختاری فوم‌های پلیمری، چگالی آن است. فوم پلی‌یورتان دارای مقاومت خمشی و فشاری مناسبی بوده که مقاومت آن تابع چگالی فوم است. یکی از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر چگالی، اندازه و یکنواخت بودن ساختمان فوم است که توسط بازده اختلاط و هسته گذاری در مخلوط فوم کنترل می‌شود. سلول‌های کوچک‌تر دیواره نازکتری داشته و به‌راحتی شکسته و به سلول‌های بزرگ‌تر تبدیل می‌شوند که در نتیجه آن فوم با چگالی بیشتر ایجاد می‌شود [۴].

ویژگی‌های مکانیکی، حرارتی و صوتی فوم‌های پلی‌یورتان برای دامنه وسیعی از خواص مناسب نمی‌باشد. بطور مثال علی‌رغم جذب صوت قابل قبول فوم‌های پلی‌یورتان در فرکانس‌های بالا (بیش از ۱۶۰۰ هرتز)، در محدوده فرکانسی متوسط و پایین (کمتر از ۱۶۰۰ هرتز)، جذب صوت پایینی دارند. تلاش‌های فراوانی برای ارتقای و بهبود جذب صوت در فوم‌های پلیمری با استفاده از ترکیبات و بهبود دهنده‌های مختلف انجام شده است. به طور مثال مشخص شده است که استفاده از پرکننده‌های میکرومتری به دلیل تغییر در چگالی و ریخت‌شناسی آنها، منجر به بهبود خصوصیات جذب صوت این مواد شده است. با این حال استفاده از مقادیر بالای این پرکننده‌ها منجر به افزایش وزن صفحات جاذب صوت و کاهش کارایی جذب می‌شود. روشن است با توجه به ضخامت زیاد این جاذب‌ها، استفاده از این سیستم جز در مواردی خاص امکان پذیر نیست. از این‌رو محققان در سال‌های اخیر به استفاده از تقویت‌کننده‌های نانومتری در ساختار فوم و صفحه جاذب صوت بصورت نانوکامپوزیت روی آورده‌اند [۵-۱۰]. برخورداری از نسبت سطح به حجم بالا، چگالی کم و نسبت منظری بالا (در برخی از ترکیبات) سبب بهبود در میزان جذب صوت این نانوکامپوزیت‌ها شده است. همچنین باتوجه به نوع تقویت کننده نانوساختار، سایر خصوصیات نظیر خواص حرارتی، مکانیکی، ضدآتش و غیره نیز تقویت می‌شود .

نانوالیاف پلیمری به دلیل داشتن خواصی از جمله نسبت سطح به حجم بسیار زیاد، انعطاف‌پذیری مناسب در مقایسه با سایر مواد شناخته شده، تخلخل بالا و قطر کم در بسیاری از کاربردهای مهم مورد استفاده قرار گرفته است [۱۱-۱۳]. این نانوساختارهای لیفی بدون اینکه سبب افزایش ضخامت صفحه جاذب صوت شوند، منجر به بهبود کارایی جذب به ویژه در فرکانس‌های پایین می‌شود [۱۴]. از سوی دیگر چون مواد جاذب متداول نظیر فوم پلی‌یورتان قابلیت جذب صوت مناسبی در فرکانس‌های بالا دارند، افزودن نانوالیاف پلیمری به فوم پلی‌یورتان می‌تواند سبب جذب صوت در کل فرکانس صوت گردد. از این رو در این پژوهش به بررسی مشخصه‌های جذب صوت در فوم پلی‌یورتان تقویت شده با مواد نانوساختار نظیر نانوالیاف پلیمری، نانولوله‌های کربنی و نانوذرات اکسید نیکل پرداخته شده است. برای این منظور ابتدا ریخت‌شناسی و خواص مکانیکی فوم پلی‌یورتان خالص و تقویت شده با نانوالیاف پلی(متیل متاکریلات)، پلی‌یورتان و پلی(وینیل الکل) و نانولوله کربنی و نانوذرات اکسید نیکل بررسی شد و در ادامه رفتار جذب صوت آن با استفاده از روش لوله امپدانس مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت.

۲- تجربیات

۲-۱- مواد

پلی‌اُل پلی‌اتری (Yukol 4813) از شرکت بایر آلمان و ۲- دی فنیل متان ۴و۴'- دی ایزوسیانات (MDI) از شرکت Merck آلمان تهیه گردید. کاتالیست حاوی ۳۳% تری اتیلن دی آمین و ۶۷% دی پروپیلن گلایکول از شرکت Air product and chemicals خریداری شد. همچنین از سطح فعال‌های سیلیکونی برای تهیه فوم پلی‌یورتان استفاده شد. همچنین متیلن کلراید از شرکت سامسونگ کره جنوبی تهیه شد. نانولوله کربنی چندجداره (MWNT) با قطر داخلی کمتر از ۸ نانومتر و طول ۳۰-۱۰ میکرون از شرکت Neutrino تأمین شد. از پلی(وینیل الکل) (PVA) با جرم مولکولی ۷۲ کیلودالتون (خریداری شده از شرکت نوین سپهر سانیار)، پلی(متیل متاکریلات) (PMMA) با جرم مولکولی ۱۰ کیلودالتون (خریداری شده از شرکت بسپار شیمی) و پلی‌یورتان (PU) (خریداری شده از شرکت Evonic) نیز به عنوان پلیمر در تولید نانوالیاف استفاده شده است. حلال‌های دی متیل فرم آمید (DMF) و تتراهیدروفوران (THF) با درجه خلوص ۹۹/۵% و همچنین نانوذرات اکسید نیکل (NiO) ساخت شرکت

Merck آلمان نیز مورد استفاده قرار گرفت.

۲-۲- روش‌ها

برای تهیه فوم پلی‌یورتان با استفاده از روش دو مرحله‌ای، ابتدا کاتالیزور، آب مقطر، سطح فعال سیلیکونی، پلی‌اُل و متیلن کلراید به مقدار معین به مدت ۶ دقیقه باهم مخلوط می‌شوند. سپس با اضافه کردن ایزوسیانات (۲۵ درصد وزنی) و هم زدن به مدت ۵ دقیقه، فوم پلی‌یورتان شروع به شکل‌گیری می‌کند. پس از شکل‌گیری کامل فوم، آن را به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد قرار داده شد تا فرایند پخت کامل شود. به منظور تهیه فوم کامپوزیتی حاوی نانوذرات و نانوالیاف پلیمری، به روش مشابه عمل کرده، بااین تفاوت که نسبت مشخصی از تقویت کننده نانوساختار پیش از شکل‌گیری و ایجاد فوم، به داخل آن اضافه می‌شود. به طور مثال در خصوص فوم پلی‌یورتان تقویت شده با نانوالیاف پلیمری، ابتدا نانوالیاف پلیمری به پلی‌اُل اضافه شده و به مدت ۱۰ دقیقه به همراه آب مقطر و متیلن کلراید با همزن مکانیکی هم خورد. سپس کاتالیزور، آب مقطر و سطح فعال سیلیکونی اضافه شده و به مدت ۱ دقیقه هم زده شد. در ادامه ایزوسیانات اضافه شده و مخلوط تا شروع تشکیل فوم هم زده می‌شود. پس از شکل گیری فوم، به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد قرار گرفته تا عملیات پخت انجام شود.

به منظور تهیه نانوالیاف پلیمری، ابتدا محلول پلیمرهای مورد مطالعه آماده و مطابق شرایط جدول ۱ الکتروریسی شدند.

در ادامه نمونه‌های فوم خالص و فوم تقویت شده با مواد نانوساختار (نانولوله کربنی، نانوذرات و نانوالیاف پلیمری) به شرح جدول ۲ برای مشخصه یابی و بررسی عملکرد عایق صوت مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفتند.

۲-۳- تجهیزات

از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل AIS2100 ساخت کشور کره جنوبی به منظور بررسی ریخت‌شناسی و توزیع قطر نانوالیاف تولیدی و همچنین بررسی شکل سلول‌ها و حفرات فوم‌های تهیه شده استفاده شد. برای اندازه گیری قطر متوسط الیاف و توزیع آن، قطر حداقل ۵۰ الیاف در تصویر SEM به کمک نرم افزار Measure-ment و بصورت تصادفی اندازه گیری شد و در ادامه با استفاده از نرم افزار SPSS نمودار توزیع و هیستوگرام آن رسم گردید. براین اساس توزیع، پراکندگی، قطر میانگین و انحراف استاندارد قطر نانوالیاف بدست آمد. خواص مکانیکی فوم‌های تهیه شده توسط استاندارد ISO 527-4 اندازه‌گیری شد. از دستگاه لوله امپدانس ساخت شرکت B&K کشور دانمارک برای بررسی میزان جذب صوت نمونه‌های تهیه شده استفاده شد. برای این آزمون دو قرص کروی با قطرهای ۲۳ میلیمتر (برای اندازه‌گیری ضریب جذب صوت در فرکانس‌های بالای ۶۱۰۰ هرتز) و ۳۳ میلیمتری (برای اندازه‌گیری ضریب جذب صوت در فرکانس‌های پایین (۲۹۰ تا ۶۱۰۰ هرتز)) و با ضخامت یکسان ۱/۵ سانتیمتر تهیه شدند. لوله امپدانس با دو میکروفون، ضریب جذب مواد را به روش تابع انتقال اندازه گیری می‌کند. طول این لوله حدود ۳۵-۲۵ سانتیمتر و قطر آن ۱۵-۲/۵ سانتیمتر می‌باشد. منبع صوت در یک انتهای لوله

جدول ۱: شرایط تهیه محلول پلیمری و الکتروریسی نانوالیاف

پلیمرهای مورد مطالعه	حلال	غلظت پلیمر (wt.%)	ولتاژ (kV)	فاصله (cm)	نرخ تغذیه (ml/h)
پلی‌متیل متاکریلات	THF	۶	۲۰	۱۵	۱/۲
پلی‌یورتان	THF/DMF (60:40)	۱۰	۱۰	۴	۱
پلی‌وینیل الکل	Water	۱۰	۱۸	۱۰	۱/۱

جدول ۲: کدگذاری نمونه‌های فوم قبل و بعد از اصلاح با نانوساختارهای مختلف

مشخصات نمونه	کد نمونه	نوع تقویت کننده	درصد تقویت کننده (wt.%)
فوم پلی‌یورتان خالص	PU	-	-
فوم پلی‌یورتان تقویت شده با نانوالیاف پلی(متیل متاکریلات)	PU-PMMA	نانوالیاف PMMA	۱
فوم پلی‌یورتان تقویت شده با نانوالیاف پلی‌یورتان	PU-PU	نانوالیاف PU	۱
فوم پلی‌یورتان تقویت شده با نانوالیاف پلی(وینیل الکل)	PU-PVA	نانوالیاف PVA	۱
فوم پلی‌یورتان تقویت شده با نانوالیاف پلی‌یورتان و نانولوله کربنی	PU-PU-CNT	نانوالیاف PU	۱
		نانولوله کربنی	۰/۷
فوم پلی‌یورتان تقویت شده با نانوالیاف پلی‌یورتان و نانوذرات اکسید نیکل	PU-PU-NiO	نانوالیاف PU	۱
		نانوذرات اکسید نیکل	۰/۷

موج سینوسی صدا تولید می‌کند که پس از انتشار آن در طول لوله به نمونه جاذب برخورد می‌کند. امواج صوتی توسط دو میکروفون که در موقعیت‌های مشخص بر روی لوله نصب شده‌اند، دریافت و از طریق تابع انتقال بین امواج صوتی برخوردی و منعکس شده، ضریب جذب صوت مواد بدست می‌آید [۱۵].

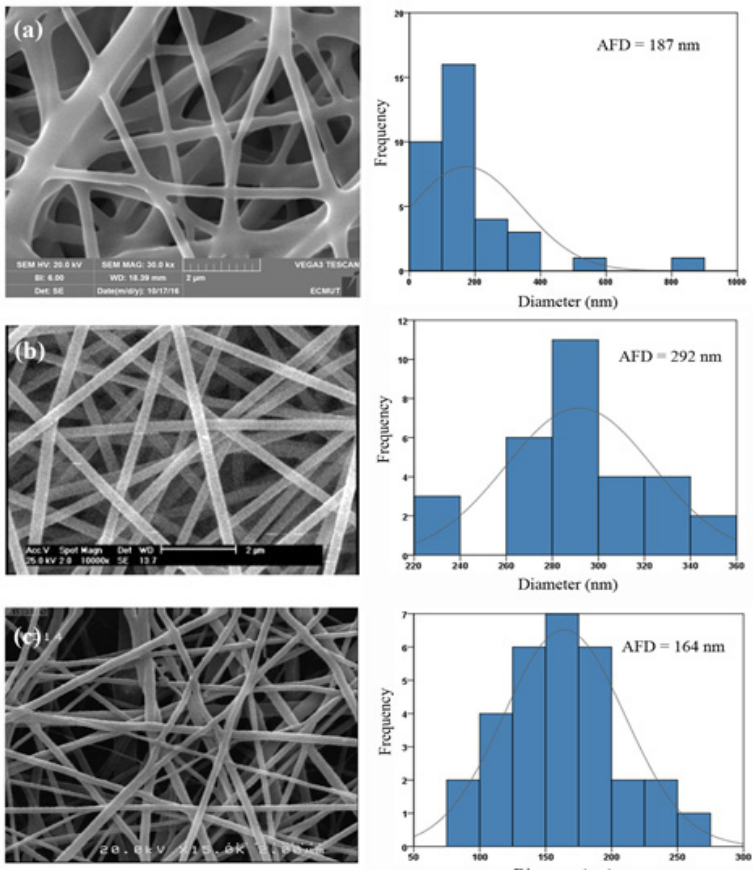
۳- نتایج و بحث

۳-۱- مطالعه مورفولوژی

به منظور بررسی ریخت‌شناسی و توزیع قطر نانوالیاف پلیمری تهیه شده، از تصاویر SEM استفاده شد. بررسی‌ها نشان دهنده تولید نانوالیافی یکنواخت و بدون دانه تسبیحی می‌باشد. به عنوان نمونه تصویر SEM نانوالیاف پلی‌یورتان، پلی(متیل متاکریلات) و پلی(وینیل الکل) و توزیع قطر آنها در شکل ۱ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، نانوالیاف PVA دارای کمترین قطر متوسط الیاف (۱۶۴ نانومتر) بوده و از توزیع قطر باریکی برخوردار است. همچنین علی‌رغم اینکه قطر متوسط نانوالیاف پلی‌یورتان ۱۸۷ نانومتر است، دارای پراکندگی قطر بالایی بوده و توزیع قطر پهن دارد.

مطالعه ریخت‌شناسی نمونه‌های فوم خالص و فوم تقویت شده با مواد نانوساختار در شکل ۲ ارائه شده است. بررسی تصاویر فوم پلی‌یورتان خالص و فوم تقویت شده با نانوالیاف پلیمری، نشان دهنده حضور نانوالیاف در ساختار فوم پلی‌یورتان و همچنین توزیع مناسب آنها در فضای متخلخل فوم می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود اندازه حفرات و قطر فواصل بین حفره‌ها در فوم پلی‌یورتان قبل و پس از حضور نانوالیاف پلیمری تفاوت چندانی نکرده‌است. دلیل این امر آن است که پارامترهای تخلخل فوم به نوع و ترکیب مواد بکار رفته در فرمولاسیون فوم وابسته است. با این حال افزودن تقویت کننده‌هایی نظیر نانوالیاف پلیمری بر روی خواص مکانیکی و پارامترهای عملکردی نظیر جذب صوت فوم پلی‌یورتان موثر است و بر ریخت‌شناسی آن چندان اثرگذار نیست.

مقایسه تصاویر SEM فوم تقویت شده با نانوالیاف پلی‌یورتان (شکل ۲c) و فوم تقویت شده با نانوالیاف پلی‌یورتان و نانولوله کربنی (شکل ۲e) نشان می‌دهد که در مورد اخیر (PU-PU-CNT)، تقویت کننده‌های نانوساختار کاملا درون ساختار فوم پخش نشده‌است و در برخی موارد بصورت مجتمع و نایکنواخت پراکنده شده‌اند. البته انتظار می‌رود این امر سبب بهبود خواص جذب صوت فوم پلی‌یورتان شود. براساس مطالعات گذشته مشخص شده است که میزان تخلخل و ریخت‌شناسی حفرات فوم پلی‌یورتان با توجه به نوع حفره و توزیع اندازه آنها بر میزان جذب صوت و عملکرد آکوستیکی جاذب تهیه شده تأثیرگذار است [۱۶]. همچنین استفاده از نانوالیاف با توزیع قطر پراکنده و متشکل از میکرو و نانوالیاف سبب ایجاد پوشش فرکانسی جذب



شکل ۱: تصویر SEM نانوالیاف (a) پلی‌یورتان، (b) پلی(متیل متاکریلات) و (c) پلی(وینیل الکل) و توزیع قطر آنها.

صوت بیشتر شده و علاوه بر فرکانس‌های بالا، در سایر فرکانس‌های صوت نیز ضریب جذب صوت را افزایش می‌دهد [۱۷]. براین اساس پیش‌بینی می‌شود بهره‌گیری از نانومواد متنوع با ابعاد و نسبت‌های منظری مختلف در این مطالعه (نانوالیاف، نانولوله کربنی، نانوذره) سبب بهبود جذب صوت در فرکانس‌های بالا و پایین گردد. درواقع تجمع ذرات با پهن‌تر کردن توزیع قطر و اندازه حفره فوم پلی‌یورتان، به قابلیت جذب بهتر در محدوده بیشتری از فرکانس صوت می‌افزاید.

۳-۲- بررسی خواص مکانیکی

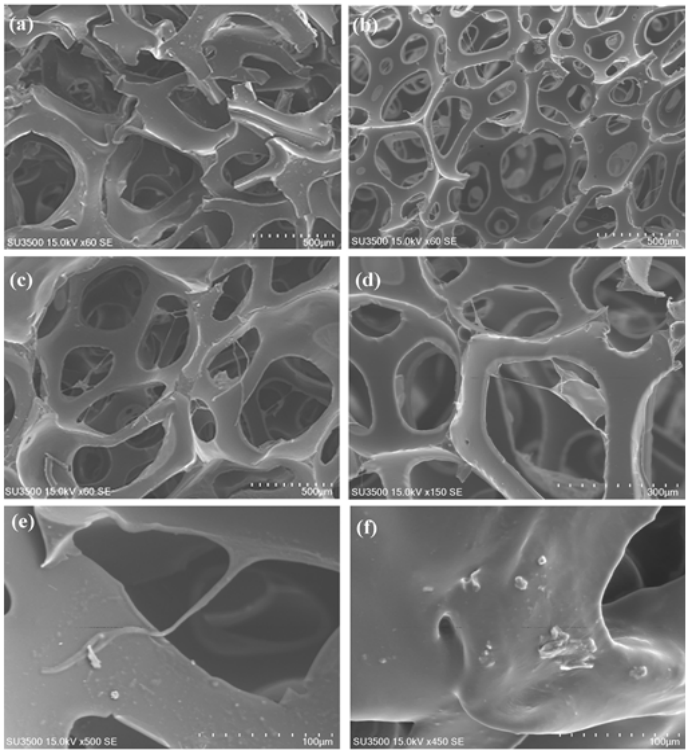
نتایج بررسی خواص مکانیکی (مقاومت فشاری) فوم‌های تقویت شده با نانوالیاف پلیمری در جدول ۳ خلاصه شده است. نتایج بدست آمده نشان دهنده بهبود مقاومت فشاری و افزایش استحکام در فوم پلی‌یورتان تقویت شده با نانوالیاف پلیمری است. دلیل این امر را می‌توان در خواص مکانیکی بالای نانوالیاف پلیمری دانست. همچنین همانطور که تصاویر SEM نشان‌دهنده حضور نانوالیاف پلیمری در بین حفرات و تخلخل فوم پلی‌یورتان بود، می‌توان نتیجه گرفت که این افزایش خواص مکانیکی درنتیجه توزیع و پراکندگی خوب نانوالیاف در ساختار فوم پلی‌یورتان بوده است.

۳-۳- بررسی رفتار جذب صوت

در شکل ۳ نمودار جذب صوت فوم پلی‌یورتان و فوم پلی‌یورتان تقویت شده با مواد نانوساختار نشان داده شده است. بررسی رفتار جذب صوت نمونه‌ها در فرکانس‌های بالای ۶۹۰۰ هرتز نشان می‌دهد که فوم پلی‌یورتان خالص در فرکانس‌های بالا جذب صوت مناسبی دارد (بیش از ۸۰%). همچنین با اضافه شدن نانوالیاف پلیمری به فوم پلی‌یورتان، ضریب جذب در فرکانس‌های بالا به میزان ۱۰% افزایش یافته است که علت آن را می‌توان حضور لایه‌های نانوالیاف در ساختار فوم دانست. همانطور که در تصاویر SEM (شکل ۲) نیز مشاهده می‌شود، وجود نانوالیاف در فوم سبب پرشدن فضای خالی درون فوم و خلل و فرج آن گردیده است. از سوی دیگر بدلیل اینکه قطر حفرات و خلل و فرج در لایه نانوالیاف در مقایسه با فوم معمولی بسیار بسیار کوچک می‌باشد، درنتیجه با افزودن نانوالیاف به فوم پلی‌یورتان از تفوذپذیری

جدول ۳: خواص مکانیکی فوم پلی‌یورتان تقویت شده با نانوالیاف پلیمری

کد نمونه	مدول یانگ (N/mm^2)
PU	0.010
PU-PMMA	0.013
PU-PU	0.023
PU-PVA	0.021



شکل ۲: تصویر SEM (a) فوم پلی‌یورتان، (b) فوم پلی‌یورتان تقویت شده با نانوالیاف PMMA، (c) فوم پلی‌یورتان تقویت شده با نانوالیاف PU، (d) فوم پلی‌یورتان تقویت شده با نانوالیاف PVA، (e) فوم پلی‌یورتان تقویت شده با نانوالیاف پلی‌یورتان و نانولوله کربنی، (f) فوم پلی‌یورتان تقویت شده با نانوالیاف پلی‌یورتان و نانوذرات اکسید نیکل.

هوا در ساختار فوم کاسته می‌شود. به‌عبارت دیگر امواج صوت در عبور از تخلخل فوم و نانوالیاف پلیمری با مانع بیشتری برخورد کرده و درنتیجه مقاومت در برابر امواج صوتی و میزان جذب صوت افزایش می‌یابد. در بین نمونه‌های تقویت شده با نانوالیاف مختلف، بیشترین مقدار جذب صوت مربوط به فوم پلی‌یورتان تقویت شده با نانوالیاف پلی(متیل متاکریلات) به میزان ۱۰۰ درصد در فرکانس ۲۵۰۰ هرتز می‌باشد.

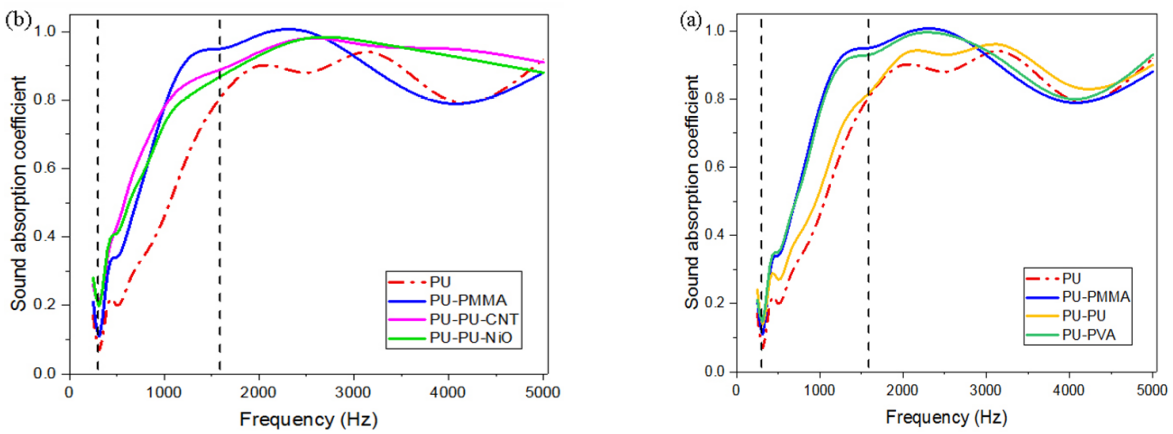
بررسی منحنی‌های جذب صوت نمونه‌های تقویت شده با نانوالیاف پلیمری نشان می‌دهد که رفتار جذب صوت فوم پلی‌یورتان خالص مشابه با فوم پلی‌یورتان تقویت شده با نانوالیاف پلی‌یورتان بوده و رفتار جذب صوت فوم تقویت شده با نانوالیاف پلی(وینیل الکل) نیز مشابه با فوم تقویت شده با نانوالیاف پلی(متیل متاکریلات) است. دلیل تفاوت در میزان و الگوی رفتار جذب صوت نمونه‌های فوم پلی‌یورتان با تغییر نوع نانوالیاف پلیمری این است که نانوالیاف با قطر و الاستیسیته کمتر، میزان جذب صوت بالاتری دارند. در چگالی برابر فوم پلی‌یورتان، نانوالیاف با قطر کمتر چگالی حجمی‌بیشتری دارند و در نتیجه درهم تنیدگی بیشتری در آنها مشاهده می‌شود؛ بنابراین میزان انتقال صوت را کاهش و امکان جذب صوت افزایش می‌یابد. از طرفی اگر الاستیسیته نانوالیاف بالا باشد در واقع قابلیت خمش و انعطاف‌پذیری آن بالا بوده و این امر موجب می‌شود امواج صوتی هنگام عبور از آنها کمتر دچار مشکل شوند. بنابراین دلیل اینکه نمونه فوم پلی‌یورتان تقویت شده با نانوالیاف پلی‌یورتان تأثیر کمتری در افزایش جذب صوت (در مقایسه با سایر نانوالیاف پلیمری) دارد، این است که نانوالیاف پلی‌یورتان به طور ذاتی از قابلیت انعطاف‌پذیری و ارتجاع بیشتری در مقایسه با دو نانوالیاف دیگر برخوردار است. با توجه به بررسی‌های مورفولوژیکی و توزیع قطر نانوالیاف پلیمری مشخص شد که توزیع قطر نانوالیاف پلی‌یورتان پهن و پراکنده بوده و در برخی موارد نانوالیاف با قطر ۶۰۰ نانومتر نیز مشاهده گردید. در نتیجه در مقایسه با نانوالیاف پلی(متیل متاکریلات) و پلی(وینیل الکل) که از توزیع قطر باریک و متمرکز برخوردارند، میزان جذب صوت کمتری دارند.

فوم پلی‌یورتان اصلاح شده با نانوالیاف پلی‌یورتان به همراه نانوذره اکسید نیکل و یا نانولوله کربنی نیز رویکرد جذب صوت یکسانی داشته و به طور کاملاً محسوسی عملکرد جذب صوت بهتری نسب به فوم پلی‌یورتان خالص از خود نشان می‌دهند. مقایسه نمودار جذب صوت فوم پلی‌یورتان خالص و فوم پلی‌یورتان تقویت شده با نانوالیاف پلی‌یورتان با نمونه‌های تقویت شده با نانولوله کربنی و نانوذرات اکسید نیکل نشان دهنده بهبود و تغییر در رفتار جذب صوت نمونه‌های فوم پلی‌یورتان پس از افزودن تقویت‌کننده‌های نانومتری (نانولوله کربنی و نانوذرات اکسید نیکل) می‌باشد.

بررسی رفتار جذب صوت در ناحیه فرکانس ۴۰۰ هرتز تا ۶۱۰۰ هرتز به طور مشخص اثر حضور نانوالیاف پلیمری و تقویت‌کننده‌های نانومتری در ساختار فوم پلی‌یورتان را نشان می‌دهد. در این ناحیه تغییر شیب منحنی‌ها قابل توجه است که نشان‌دهنده عملکرد مثبت نانوالیاف در بهبود میزان جذب صوت فوم پلی‌یورتان است. بطور کلی بیشترین میزان جذب صوت در تمامی‌فرکانس‌ها مربوط به نمونه فوم تقویت شده با نانوالیاف پلی‌یورتان و نانوذرات اکسید نیکل (PU-PU-NiO) و سپس نمونه فوم تقویت شده با نانوالیاف پلی‌یورتان و نانولوله کربنی (PU-PU-CNT) می‌باشد. بیشینه مقدار جذب صوت این نمونه‌ها در فرکانس ۲۵۰۰ هرتز بدست آمده است. نتایج بدست آمده در مطابقت با نتایج بدست آمده توسط سایر محققان در بررسی اثر حضور نانولوله‌های کربنی بر افزایش جذب صوت فوم‌های مختلف [۶،۸] می‌باشد.

٤- نتیجه گیری

در این تحقیق تاثیر افزودن تقویت کننده‌های نانومتری مختلف شامل نانوالیاف پلیمری، نانولوله کربنی و نانوذرات اکسید نیکل بر میزان جذب صوت فوم پلی‌یورتان بررسی گردید. نانوالیاف پلیمری پلی‌یورتان، پلی(متیل متاکریلات) و پلی(وینیل الکل) به روش الکتروریسی تهیه شدند و پیش از شکل گیری فوم پلی‌یورتان به ترکیب افزوده شدند. بررسی‌های ریخت‌شناسی نانوالیاف تهیه شده



شکل ۳: نمودار جذب صوت فوم پلی‌یورتان قبل و پس از تقویت با (a) نانوالیاف پلیمری مختلف، و (b) نانولوله کربنی و نانوذره اکسید نیکل در تمامی‌فرکانس‌ها.

توسط تصاویر SEM نشان دهنده تولید نانوالیافی با ساختار عاری از نقص (دانه تسبیحی) و با توزیع قطر یکنواخت بوده است. همچنین حضور نانوالیاف پلیمری و سایر تقویت کننده‌های نانومتری (نانولوله کربنی و نانواکسید نیکل) در داخل ساختار فوم و بین حفرات و تخلخل آن تأیید شد. ارزیابی خواص مکانیکی و مقاومت فشاری فوم‌های تقویت شده با نانوالیاف پلیمری نشان دهنده بهبود خواص مکانیکی فوم پلی‌یورتان در اثر افزودن نانوالیاف و نانولوله کربنی است. نتایج بدست آمده از جذب صوت با استفاده از لوله امپدانس نشان داد علیرغم اینکه فوم پلی‌یورتان خالص در فرکانس‌های بالا (بیش از ۱۶۰۰ هرتز) جذب مناسبی (بیش از ۴۰%) دارند، اما در فرکانس‌های متوسط و پایین (کمتر از ۱۶۰۰) جذب قابل قبولی ندارند. با افزودن نانوالیاف پلیمری به فوم پلی‌یورتان، ضریب جذب صوت در فرکانس‌های بالا به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد. همچنین حضور نانوالیاف پلیمری و نانولوله‌های کربنی یا نانوذرات اکسید نیکل نه تنها سبب بهبود جذب صوت در فرکانس‌های بالا می‌شود، بلکه بر میزان جذب صوت در فرکانس‌های متوسط و پایین نیز می‌افزاید. بعبارت دیگر می‌توان نتیجه گرفت افزودن تقویت‌کننده‌های نانومتری نظیر نانوالیاف پلیمری، نانولوله کربنی و نانوذرات سبب بهبود عملکرد جذب صوت جاذب‌های متداول نظیر فوم پلی‌یورتان در هر دو فرکانس بالا و پایین می‌شود.

۵- مراجع

[1] D. Yan, K. Dai, Z. Xiang, Z. Li, X. Ji, W. Zhang, Electrical Conductivity and Major Mechanical and Thermal Properties of Carbon Nanotube-Filled Polyurethane Foams, J. Appl. Polym. Sci. 120 (2011) 3014–3019.

[2] A. Rabbi, H. Bahrambeygi, K. Nasouri, A.M. Shoushtari, M.R. Babaei, Nonwoven Composite as Highly Effective Sound Absorbers, Adv. Polym. Technol. 33 (2014) 1–8.

[3] X. Tang, X. Yan, Composites : Part A Acoustic energy absorption properties of fibrous materials : A review, Compos. Part A. 101 (2017) 360–380.

[4] K. Ashida, Polyurethane and related foams: chemistry and technology, CRC press, 2006.

[5] A.M. Willemsen, M.D. Rao, Sound absorption characteristics of nanocomposite polyurethane foams, Noise Control Eng. J. 63 (2015) 424–438.

[6] H. Bahrambeygi, N. Sabetzadeh, A. Rabbi, Nanofibers (PU and PAN) and nanoparticles (Nanoclay and MWNTs) simultaneous effects on polyurethane foam sound absorption, J. Polym. Res. 20 (2013) 72.

[7] M. Mohammad, A. Nikje, S.T. Moghaddam, M. Noruzian, Preparation and characterization of flexible polyurethane foam nanocomposites reinforced by magnetic core-shell Fe3O4@APTS nanoparticles, Colloid Polym. Sci. 292 (2014) 627–633.

[8] A.H. Baferani, A.A. Katbab, A.R. Ohadi, The role of sonication time upon acoustic wave absorption efficiency, microstructure, and viscoelastic behavior of flexible polyurethane/CNT nanocomposite foam, Eur. Polym. J. 90 (2017) 383–391.

[9] R. Verdejo, R. Stämpfli, M. Alvarez-lainez, S. Mourad, M.A. Rodriguez-perez, P.A. Brühwiler, Enhanced acoustic damping in flexible polyurethane foams filled with carbon nanotubes, Compos. Sci. Technol. 69 (2009) 1564–1569.

[10] M. Bandarian, A. Shojaei, A.M. Rashidi, Thermal , mechanical and acoustic damping properties of flexible open-cell polyurethane / multi-walled carbon nanotube foams : effect of surface functionality of nanotubes, Polym. Int. (2011) 475–482.

[11] S.F. Dehghan, F. Golbabaei, B. Maddah, M. Latifi, H. Pezeshk, M. Hasanzadeh, F. Akbar-Khanzadeh, Optimization of electrospinning parameters for polyacrylonitrile-MgO nanofibers applied in air filtration, J. Air Waste Manag. Assoc. 66 (2016).

[12] B.H. Moghadam, A.K. Haghi, S. Kasaei, M. Hasanzadeh, Computational-based approach for predicting porosity of electrospun nanofiber mats using response surface methodology and artificial neural network methods, J. Macromol. Sci. Part B Phys. 54 (2015).

[13] M. Hasanzadeh, B. Hadavi Moghadam, M.H. Moghadam Abatari, A.K. Haghi, On the production optimization of polyacrylonitrile electrospun nanofiber, Bulg. Chem. Commun. 45 (2013).

[14] A. Rabbi, H. Bahrambeygi, A.M. Shoushtari, K. Nasouri, Incorporation of Nanofiber Layers in Nonwoven Materials for Improving Their Acoustic Properties, J. Eng. Fiber. Fabr. 8 (2013).
[15] H. Seddeq, Factors influencing acoustic performance of sound absorptive materials, Aust. J. Basic Appl. Sci. 3 (2009) 4610–4617.
[16] C. Zhang, J. Li, Z. Hu, F. Zhu, Y. Huang, Correlation between the acoustic and porous cell morphology of polyurethane foam: Effect of interconnected porosity, Materials & Design, 41, (2012) 319-325.
[17] M.M. Gojani, A.A. Gharehaghaji, Sound absorbing structure including nanofibers. U.S. Patent Application 15/473,069 (2017).