



Research Article

Sound Absorption of Low-Frequency Acoustic Waves by Polyurethane Foam/MOF Nanoparticle Nanocomposites

Gholamhossein Shahmohammadi, Mohammad Jafari[✉], Kamal Ghani^{*✉}, Mehran Hayati

Faculty of Applied Sciences, Malek Ashtar University of Technology, Shahin-shahr, Esfahan, Iran

PAPER INFO

Article history:

Received: 11/May/2026

Revised: 16/Jul/2026

Accepted: 17/Aug/2026

Keywords:

Sound-absorbing coatings,
Metal-Organic Frameworks,
Polyurethane Foam,
UiO-66.

ABSTRACT

Among a wide range of sound-absorbing materials, porous materials exhibit high sound absorption coefficients. Metal-organic frameworks (MOFs) are novel materials that, due to their porous structure, are expected to be effective in reducing acoustic noise. On the other hand, polyurethane foams are porous materials capable of absorbing sound waves. However, these porous foams have poor sound absorption in the low-frequency range (below 2000 Hz). Given the powder-like nature of MOF compounds, they can be used as additives in polyurethane foams to achieve sound-absorbing composites with performance over a wide frequency range. In this paper, polyurethane foam is used as the sound-absorbing substrate, and UiO-66 Metal-organic framework is employed as a low-frequency (below 2000 Hz) sound absorption enhancer. The results show that the sound absorption coefficient of the composite containing an optimal 0.2 wt% of UiO-66 nanoparticles in the frequency range of 750-2000 Hz is approximately 50% higher than that of pure polyurethane foam.

DOI: <https://doi.org/10.22075/chem.2026.41185.2448>

© 2026 Semnan University.

This is an open access article under the CC-BY-SA 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)

*.Corresponding author: Associate Professor of Inorganic Chemistry. E-mail address: kamal.ghani@gmail.com

How to cite this article: Shahmohammadi, Gh., Jafari, M., Ghani, K. & Hayati, M. (2026). Sound Absorption of Low-Frequency Acoustic Waves by Polyurethane Foam/MOF Nanoparticle Nanocomposites. *Applied Chemistry Today*, 21(79), 119-134. (in Persian)

جذب امواج صوتی در فرکانس های پایین به وسیله نانوکامپوزیت های

فوم پلی یورتان /نانوذرات MOF

غلامحسین شاه محمدی، محمد جعفری، کمال قانی*، مهران حیاتی

مجتمع دانشگاهی علوم کاربردی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر، اصفهان، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۵/۰۲/۲۱ بازنگری مقاله: ۱۴۰۵/۰۴/۲۵ پذیرش مقاله: ۱۴۰۵/۰۵/۲۶	در میان طیف وسیعی از مواد جاذب صوت، مواد متخلخل از ضریب جذب صوت بالایی برخوردارند. ساختارهای فلز-آلی (MOFs)، مواد نوبنی هستند که انتظار می رود به دلیل داشتن ساختار متخلخل، در کاهش نویزهای صوتی مؤثر واقع شوند. از طرفی، فوم های پلی یورتان از جمله مواد متخلخلی هستند که توانایی جذب امواج صوتی را دارا می باشند. اما این فوم های متخلخل در محدوده فرکانسی پایین (کمتر از ۲۰۰۰ هرتز) جذب صوت ضعیفی دارند. با توجه به ماهیت پودری ترکیبات MOF، می توان از این مواد به عنوان افزودنی در فوم های پلی یورتان استفاده نمود و به کامپوزیت های جاذب صوت با عملکرد در محدوده فرکانسی وسیع دست یافت. در این مقاله، از فوم پلی یورتان به عنوان بستر جاذب صوت و از چارچوب فلز - آلی UiO-66 به عنوان بهبود دهنده جذب صوت در محدوده فرکانسی پایین (کمتر از ۲۰۰۰ هرتز) استفاده شده است. نتایج نشان داد که ضریب جذب صوت کامپوزیت حاوی مقدار بهینه ۰/۲ درصدوزنی از نانوذرات UiO-66، در محدوده فرکانسی ۲۰۰۰-۷۵۰ هرتز، تقریباً ۵۰ درصد بیشتر از ضریب جذب صوت فوم پلی یورتان خالص است.

DOI: <https://doi.org/10.22075/chem.2026.41185.2448>This is an open access article under the CC-BY-SA 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)

۱- مقدمه

امواج صوتی و نویز ناشی از آن، یکی از مهم ترین چالش های زیست محیطی در جوامع صنعتی محسوب می شود و قرار گرفتن طولانی مدت در معرض آن می تواند پیامدهایی نظیر کاهش شنوایی، اختلالات خواب، کاهش تمرکز و افزایش تنش های روانی را به همراه داشته باشد. معمولاً برای مقابله با آلودگی صوتی از مواد جاذب و عایق صوت استفاده می شود. عملکرد متفاوت این دو گروه از مواد، ناشی از تطابق یا عدم تطابق ایمپدانس آکوستیک این مواد با امواج صوتی ورودی می باشد. از نظر مفهوم ریاضی، ایمپدانس آکوستیک یک ماده برابر با حاصلضرب چگالی آن ماده در سرعت صوت درون آن ماده است. چنانچه ایمپدانس آکوستیک ماده با ایمپدانس موج صوتی ورودی همخوانی داشته باشد، موج صوتی به درون ماده نفوذ کرده و جذب می شود؛ به چنین موادی جاذب صوت گفته می شود و در صورتی که ایمپدانس آکوستیک ماده با موج صوتی ورودی متفاوت باشد، بخش عمده ای از انرژی موج صوتی از سطح ماده بازتاب شده و آن ماده به عنوان عایق صوت در نظر گرفته می شود [۴-۱]. با توجه به عملکرد موثرتر مواد جاذب صوت، این گروه از مواد به طور گسترده تری جهت کاهش آلودگی صوتی در صنایع مختلف مورد

استفاده قرار می‌گیرند [۶ و ۵]. پوشش‌های جاذب صوت می‌توانند در نزدیکی منبع صوت، نزدیک گیرنده نویز و یا در فواصل مختلف بین آنها قرار گیرند [۷].

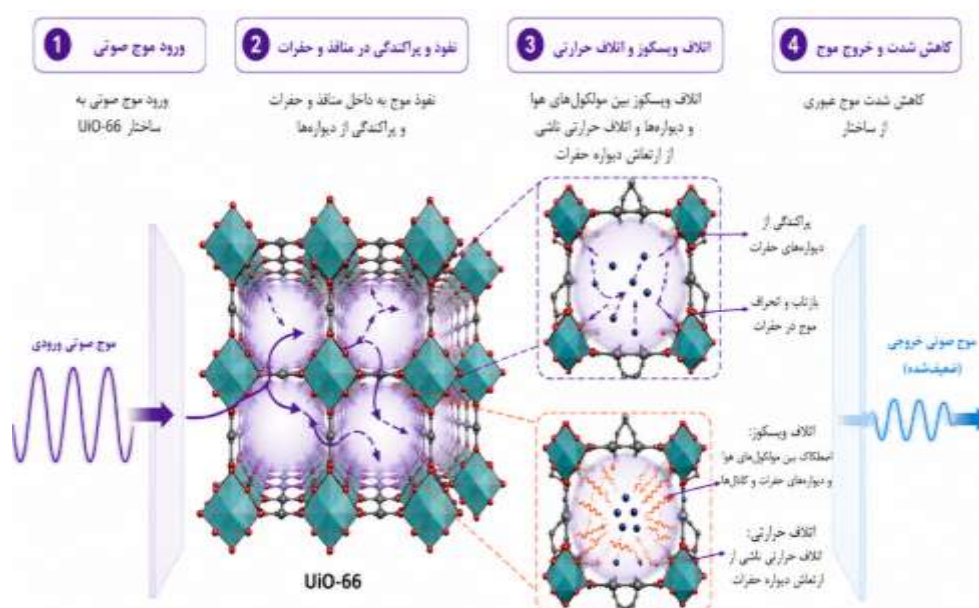
تاکنون پیشرفت‌های قابل توجهی در طراحی و ساخت مواد جاذب صوت حاصل شده است و پژوهشگران موفق به توسعه پوشش‌هایی با ضخامت کم و عملکرد آکوستیکی مطلوب شده‌اند. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که مواد متخلخل از مؤثرترین مواد جاذب صوت محسوب می‌شوند، زیرا ساختار متخلخل آن‌ها امکان نفوذ موج صوتی به درون ماده و اتلاف تدریجی انرژی آن را فراهم می‌کند. در این مواد، امواج صوتی پس از ورود به شبکه متخلخل، در اثر بازتاب‌های متوالی از دیواره حفرات، افزایش طول مسیر انتشار و اصطکاک میان مولکول‌های هوا و دیواره منافذ، بخش عمده‌ای از انرژی خود را به صورت گرما از دست می‌دهند. این فرآیند که به اتلاف ویسکوز-حرارتی معروف است، مهم‌ترین مکانیسم جذب صوت در مواد متخلخل به شمار می‌رود [۸].

اخیراً چارچوب‌های فلز-آلی (MOF = Metal-organic framework) به عنوان نسل جدیدی از مواد متخلخل مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته‌اند. این ترکیبات از اتصال یون‌های فلزی به لیگاند‌های آلی تشکیل شده و دارای ساختارهای بلوری بسیار متخلخل (سطح ویژه زیاد) و با قابلیت تنظیم اندازه و شکل حفرات هستند [۳]. وجود این ویژگی‌ها سبب شده است که MOFها علاوه بر کاربردهای متداول در ذخیره‌سازی گاز، کاتالیز، حسگرها و جداسازی مواد، در سال‌های اخیر به عنوان گزینه‌ای امیدبخش برای توسعه جاذب‌های صوتی پیشرفته نیز مطرح شوند [۹ و ۱۰ و ۱-۵]. مطالعات انجام‌شده نشان داده‌اند که تخلخل زیاد، سطح ویژه بالا و شبکه پیچیده منافذ در MOFها موجب افزایش مسیر حرکت امواج صوتی، افزایش تعداد بازتاب‌های داخلی و در نهایت افزایش اتلاف انرژی موج صوتی می‌شود. در نتیجه، بخش قابل توجهی از انرژی موج صوتی از طریق اتلاف ویسکوز-حرارتی به گرما تبدیل شده و ضریب جذب صوت افزایش می‌یابد. به بیان دیگر، ساختار سه‌بعدی و به هم پیوسته منافذ در این مواد، مقاومت جریان هوا و پیچیدگی مسیر انتشار موج صوتی را افزایش داده و این عوامل نقش تعیین‌کننده‌ای در بهبود عملکرد آکوستیکی آن‌ها دارند [۶].

از سوی دیگر، فوم‌های پلی‌یورتان به دلیل وزن کم، انعطاف‌پذیری زیاد، تخلخل مناسب و قابلیت میرایی مطلوب، از پرکاربردترین جاذب‌های صوتی در صنایع مختلف به شمار می‌روند. با این حال عملکرد جذب صوت این مواد در محدوده فرکانسی پایین (کمتر از ۲۰۰۰ هرتز) به شدت پایین است. با توجه به اینکه کنترل نویز و آلودگی صوتی در فرکانس‌های پایین از اهمیت بالایی برخوردار است، در سال‌های اخیر استفاده از نانوذرات مختلف به عنوان افزودنی برای اصلاح ساختار فوم‌های پلی‌یورتان و افزایش راندمان جذب صوت آنها مورد توجه قرار گرفته است. نانوذراتی نظیر Al_2O_3 ، گرافن اکسید (GO)، SiO_2 ، Fe_3O_4 و نانولوله‌های کربنی (CNTs) از جمله موادی هستند که توانسته‌اند عملکرد آکوستیکی فوم‌های متخلخل را بهبود دهند. اگرچه استفاده از این نانوذرات به منظور بهبود عملکرد آکوستیکی فوم‌های پلی‌یورتان در مطالعات پیشین گزارش شده است، این افزودنی‌ها عمدتاً

از طریق افزایش زبری سطح، تغییر مورفولوژی حفرات یا بهبود خواص مکانیکی موجب افزایش جذب صوت شده‌اند و معمولاً از ساختار متخلخل در مقیاس نانومتری برخوردار نیستند [۱۱-۱۵]. در مقابل، MOFها علاوه بر پایداری حرارتی و شیمیایی مطلوب، دارای سطح ویژه بسیار زیاد، حجم تخلخل بالا و شبکه سه‌بعدی پیوسته‌ای از حفرات نانومتری هستند که می‌تواند مسیر انتشار امواج صوتی را پیچیده‌تر کرده و مقاومت جریان هوا و طول انتشار حرکت موج را افزایش دهد. انتظار می‌رود که این ویژگی‌ها، اتلاف ویسکوز-حرارتی امواج صوتی را تقویت کرده و ضریب جذب صوت فوم‌های پلی‌یورتان معمولی را (که در فرکانس‌های پایین عملکرد ضعیفی دارند) ارتقاء دهند.

تاکنون مطالعاتی درباره استفاده از MOFها به‌عنوان اصلاح‌کننده ویژگی آکوستیک فوم پلی‌یورتان، به‌ویژه در محدوده فرکانس‌های پایین، گزارش نشده است. از این‌رو، هنوز شناخت دقیقی از نقش این نانوذرات در بهبود مکانیزم جذب صوت و ارتباط میان ویژگی‌های ساختاری آن‌ها و عملکرد آکوستیکی کامپوزیت حاصل وجود ندارد. بر این اساس، هدف اصلی این پژوهش سنتز نوعی MOF با نام UiO-66، بارگذاری آن‌ها بر روی فوم پلی‌یورتان به روش غوطه‌وری و در نهایت ارزیابی اثر این نانوذرات بر ضریب جذب صوت کامپوزیت نهایی در محدوده فرکانسی کمتر از ۲۰۰۰ هرتز است. انتظار می‌رود استفاده از نانوذره UiO-66 به دلیل ساختار متخلخل و سطح ویژه بالای آن، باعث افزایش مقاومت جریان هوا، افزایش پیچیدگی مسیر انتشار موج صوتی و تقویت اتلاف ویسکوز-حرارتی شود و عملکرد جذب صوت کامپوزیت تهیه‌شده را بهبود دهد. ترکیب UiO-66، دارای ساختار مکعبی بوده و مرکز فلزی و لیگاندهای آلی در این ترکیب به ترتیب زیرکونیوم و ۱-۴-بنزن‌دی‌کربوکسیلیک اسید (BDC) می‌باشد. همچنین فرمول تجربی آن به صورت $Zr_6O_4(OH)_4(BDC)_6$ است [۱۰ و ۲۰]. در شکل ۱ مکانیسم جذب امواج صوتی در ساختار متخلخل نانوذره UiO-66 شرح داده شده است.



شکل ۱: مکانیسم جذب صوت توسط نانوذرات UiO-66

۲- بخش آزمایشگاهی

۲-۱- مواد و روش‌ها

در این تحقیق از موادی شامل زیرکونیوم تتراکلراید ($ZrCl_4$)، ۱ و ۴- بنزن دی‌کربوکسیلیک اسید (BDC)، دی‌متیل‌فرم‌آمید (DMF)، استن، اتانول و فوم پلی‌یورتان با چگالی ۱۲ کیلوگرم بر مترمکعب استفاده شد. پس از سنتز ترکیب UiO-66، سوسپانسیونی از این نانوذرات تهیه و برای غوطه‌وری فوم‌های پلی‌یورتان (جهت ساخت کامپوزیت نهایی) مورد استفاده قرار گرفت.

۲-۱-۱- تهیه پودر UiO-66

نانوذرات UiO-66 با استفاده از روش هیدروترمال سنتز شدند. این سنتز بر مبنای واکنش بین یک پیش‌ماده فلزی و لیگاند آلی در حلال DMF استوار است. مقدار ۱/۵ گرم از زیرکونیوم تتراکلراید ($ZrCl_4$) به عنوان منبع یون‌های فلزی، در ۶۰ میلی‌لیتر از حلال دی‌متیل‌فرم‌آمید (DMF) در یک ارلن شیشه‌ای حل گردید. این مرحله در محیطی عاری از رطوبت و تحت هم‌زدن مداوم انجام شد تا محلولی شفاف و همگن حاصل شود. در مرحله بعد، مقدار ۱/۵ گرم از ترفتالیک اسید (H_2BDC) به عنوان لیگاند آلی به محلول فوق اضافه شد و مخلوط حاصل به مدت ۳۰ دقیقه تحت عمل اولتراسونیک قرار گرفت. محتویات بشر به یک اتوکلاو تفلونی با ظرفیت ۱۰۰ میلی‌لیتر منتقل و اتوکلاو به مدت ۲۴ ساعت در داخل آون با دمای $120^\circ C$ قرار داده شد [۱]. برای جدا کردن محصول (پودر سفیدرنگ) از حلال واکنش، از دستگاه سانتریفیوژ با سرعت ۸۰۰۰ دور بر دقیقه و به مدت ۱۰ دقیقه استفاده شد. جهت شست‌شو و حذف کامل پیش‌ماده‌های واکنش نداده و همچنین حلال DMF باقی‌مانده در حفره‌های ساختار این نانوذره، پودر به دست آمده در سه مرحله متوالی و هر بار با ۴۰ میلی‌لیتر از حلال اتانول شست‌شو و مجدداً سانتریفیوژ گردید. در نهایت پودر بدست آمده با ۲۰ میلی‌لیتر استن شست‌شو و سانتریفیوژ شد. این فرآیند شست‌شو نقش حیاتی در دستیابی به نانوذرات با خلوص و فعالیت بهینه را ایفا می‌کند. سپس پودر خالص شده به مدت ۱۲ ساعت در یک آون خلأ با دمای $80^\circ C$ قرار داده شد تا حلال‌های باقی‌مانده به‌طور کامل حذف شوند.

۲-۱-۲- تهیه سوسپانسیون‌های حاوی نانوذرات UiO-66

جهت آماده‌سازی کامپوزیت‌های فوم پلی‌یورتان/نانوذره، یک سوسپانسیون پایدار و همگن از نانوذرات UiO-66 مورد نیاز است. نانوذرات خشک UiO-66 به عنوان فاز جامد و اتانول به عنوان فاز مایع پایه انتخاب شدند. فرآیند پراکنده کردن^۱ نانوذرات در اتانول به وسیله دستگاه اولتراسونیک انجام شد تا از کلوخه شدن^۲ نانوذرات در سوسپانسیون جلوگیری شود. برای بررسی تأثیر

1 Disperse

2 Agglomeration

غلظت نانوذره بر مورفولوژی و خواص آکوستیک فوم پلی یورتان، سوسپانسیون‌هایی با چهار غلظت وزنی مختلف ۰/۱۲۵، ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ درصد از نانوذرات UiO-66 تهیه گردید.

۲-۱-۳- ساخت کامپوزیت فوم پلی یورتان / UiO-66

در این مرحله به منظور بارگذاری نانوذرات UiO-66 بر روی دیواره حفرات موجود در فوم پلی یورتان و ایجاد یک ساختار کامپوزیتی یکپارچه، از روش غوطه وری استفاده شد. این روش به دلیل سادگی و اثربخشی بالا در بارگذاری یکنواخت نانوذرات بر روی دیواره حفرات فوم متخلخل، انتخاب شد.

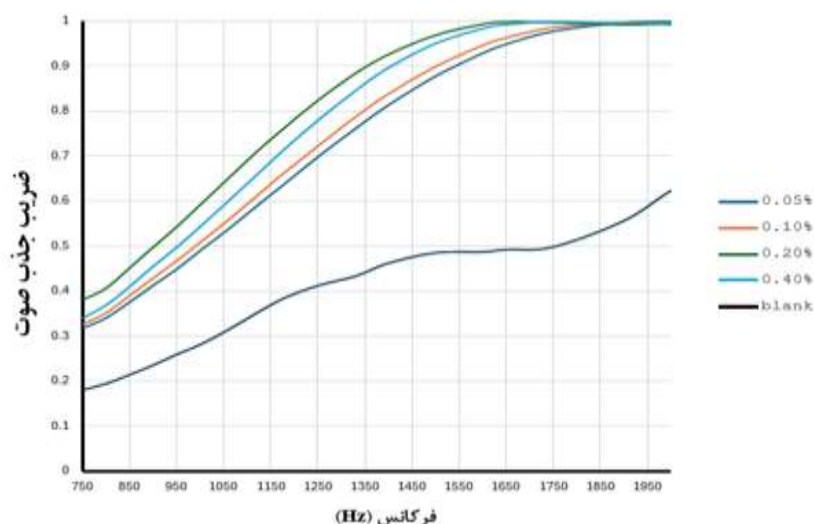
فوم پلی یورتان به عنوان نمونه شاهد انتخاب شد. فوم‌ها به شکل استوانه و با ابعاد استاندارد (قطر ۳۰ میلی‌متر و ضخامت ۲۴ میلی‌متر) برش داده شدند. پیش از فرآیند غوطه‌وری، فوم‌ها با اتانول شسته و به مدت ۲۴ ساعت در دمای 60°C در آون قرار داده شدند تا چربی، گرد و غبار و رطوبت جذب‌شده احتمالی حذف گردد.

نمونه‌های خشک فوم پلی یورتان به طور کامل در داخل سوسپانسیون‌های UiO-66 با غلظت‌های مختلف ۰/۱۲۵، ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ درصدوزنی غوطه‌ور گردیدند. پس از پایان ۲۴ ساعت غوطه‌وری، نمونه‌ها به آرامی از سوسپانسیون خارج شده و به صورت عمودی آویزان گردیدند تا فاز مایع اضافی خارج شود. نمونه‌های آغشته شده، به منظور حذف نهایی حلال (اتانول) و تثبیت نانوذرات بر روی دیواره‌های حفرات، به مدت ۴۸ ساعت در یک آون خلأ با دمای 70°C قرار داده شدند. در پایان با توجه به اختلاف وزن فوم قبل و بعد از اعمال نانوذرات، مشاهده شد که میزان بارگذاری نانوذرات در فوم پلی یورتان در سوسپانسیون‌های مختلف به ترتیب برابر با ۰/۵، ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۴ درصدوزنی است. یک نمونه فوم خالص نیز تحت همان فرآیند حرارتی (بدون غوطه‌وری در سوسپانسیون) قرار گرفت تا به عنوان نمونه شاهد در تمامی آزمون‌های مقایسه‌ای استفاده شود.

۳- نتایج و تحلیل

۳-۱- آنالیز جذب صوت با دستگاه لوله ایمپدانس و تصاویر FESEM

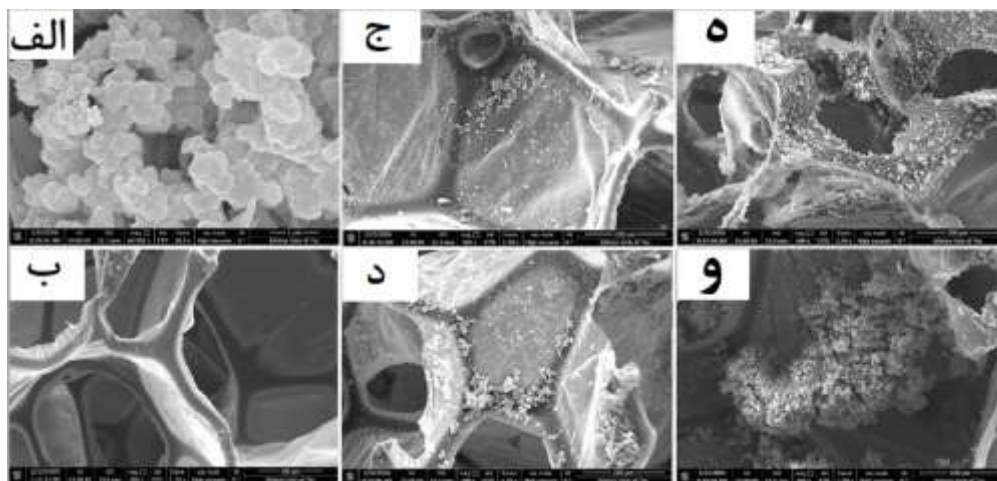
ارزیابی عملکرد جذب صوت نمونه‌ها با استفاده از دستگاه لوله ایمپدانس صوتی مدل BSWA SW422 600011 انجام شد. در این روش، موج صوتی توسط بلندگوی انتهایی تولید شده و به نمونه که دقیقاً در انتهای لوله قرار دارد برخورد می‌کند. سپس ضریب جذب صوت در هر فرکانس ثبت می‌گردد. اندازه‌گیری برای هر نمونه سه بار تکرار شد و میانگین نتایج گزارش گردید. نتایج حاصل از این اندازه‌گیری به صورت منحنی‌های ضریب جذب صوت در برابر فرکانس در شکل ۲ آورده شده است.



شکل ۲: نمودار ضریب جذب صوت فوم پلی یورتان و کامپوزیت های ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۴ درصدوزنی از نانوذره UiO-66

مقایسه منحنی ها به وضوح نشان می دهد که تمامی نمونه های کامپوزیتی حاوی نانوذرات UiO-66 در سرتاسر محدوده فرکانسی مورد مطالعه، عملکرد جذب صوت بهتری نسبت به نمونه فوم پلی یورتان خالص (شاهد) از خود نشان می دهند. این عملکرد برتر را می توان با مورفولوژی مشاهده شده در تصاویر FESEM (شکل ۳) مرتبط دانست.

مطالعه و بررسی مورفولوژی نانوذرات سنتز شده، ساختار حفرات فوم خالص و همچنین ارزیابی نحوه استقرار و بارگذاری نانوذرات UiO-66 بر روی دیواره های کامپوزیت، با استفاده از دستگاه FESEM مدل Quanta 450 FEG انجام شد که در شکل ۳ قابل مشاهده است. مشاهدات FESEM به وضوح نشان داد که نانوذرات سنتز شده از مورفولوژی بلوری منظم و نسبتاً یکنواختی برخوردارند که با هندسه کریستالی گزارش شده در مراجع برای UiO-66 مطابقت دارد (شکل ۳ الف). در شکل ۳ ج-د، تصاویر FESEM مربوط به کامپوزیت های تهیه شده از فوم پلی یورتان و نانوذرات UiO-66 آورده شده است. بسته به غلظت نانوذرات موجود در کامپوزیت های تهیه شده، پراکندگی نانوذرات بر روی دیواره حفرات موجود در فوم پلی یورتان متفاوت است و هرچه درصدوزنی نانوذره بیشتر باشد، تراکم ذرات مستقر بر روی دیواره حفرات بیشتر می شود. همانطور که مشاهده می شود، در کامپوزیت حاوی ۰/۰۵ درصدوزنی از نانوذرات UiO-66، این نانوذرات با فاصله زیاد از یکدیگر بر روی دیواره حفرات قرار گرفته اند. در صورتی که در کامپوزیت ۰/۴ درصدوزنی، نانوذرات بسیار متراکم بوده و به صورت کلوخه (آگلومره) باعث بسته شدن منافذ باز موجود در فوم پلی یورتان شده اند.



شکل ۳: تصاویر FESEM مربوط به الف) پودر UiO-66 ستر شده، ب) فوم خالص پلی‌یورتان و کامپوزیت‌های پلی‌یورتان/نانوذرات UiO-66 با درصدهای متفاوت وزنی ج) ۰/۵ درصدوزنی د) ۰/۱ درصدوزنی ه) ۰/۲ درصدوزنی و) ۰/۴ درصدوزنی

شکل ۳ب، ساختار فوم پلی‌یورتان خالص را نشان می‌دهد. این فوم دارای ساختاری متخلخل با سلول‌های نیمه‌باز است که با ایجاد مقاومت مناسب در برابر جریان هوا، موجب جذب صوت می‌شود. با وجود این، چنین فومی در فرکانس‌های کمتر از ۲۰۰۰ هرتز عملکرد مناسبی از نظر جذب صوت ندارد و ضریب جذب صوت آن در این محدوده فرکانسی به‌طور قابل توجهی پایین است. با توجه به منحنی‌های رسم شده در شکل ۲، فوم خالص (شاهد) در محدوده فرکانسی ۲۰۰۰-۷۵۰ هرتز جذب صوت ضعیفی دارد. ضریب جذب صوت این نمونه که در فرکانس ۷۵۰ هرتز برابر با ۰/۱۸ می‌باشد، با یک شیب ملایم افزایش یافته و به مقدار ۰/۶۳ در فرکانس ۲۰۰۰ هرتز می‌رسد. همانطور که در بخش مقدمه اشاره شد، این عملکرد ضعیف جذب صوت در محدوده فرکانسی مورد ارزیابی، مشخصه ذاتی فوم‌های پلی‌یورتان است.

عملکرد بهتر جذب صوت کامپوزیت‌های تهیه شده، با توجه به تصاویر FESEM مربوط به آنها قابل توجیه است. با توجه به منحنی‌های شکل ۲، کامپوزیت حاوی ۰/۲ درصدوزنی از نانوذره UiO-66 به عنوان بهترین جاذب صوت عمل می‌کند. این نمونه دارای ضریب جذب صوت ۰/۹۹ در محدوده فرکانسی ۲۰۰۰-۱۷۰۰ هرتز می‌باشد که افزایش ۵۰ درصدی ضریب جذب صوت را نسبت به نمونه شاهد (در این محدوده فرکانسی) از خود نشان می‌دهد. در این غلظت نانوذرات بدون کلوخه‌شدن بر روی اسکلت فوم پلی‌یورتان مستقر شده‌اند، در حالی که ساختار متخلخل باز و پیوسته فوم پلی‌یورتان حفظ شده است. این ساختار، موجب هم‌افزایی مکانیسم اتلاف انرژی صوتی (اتلاف ویسکوز - حرارتی) در حفرات میکرومتری فوم پلی‌یورتان و حفرات نانومتری نانوذره می‌گردد. حضور نانوذرات با سطح ویژه بسیار بالا، مسیر موج صوتی را پیچیده‌تر کرده و از اینرو سطح تماس و اصطکاک مؤثر بین سیال (هوا) و فاز جامد (دیواره حفرات موجود در نانوذرات) را به شدت افزایش می‌دهد. این اصطکاک انرژی صوتی را به گرما تبدیل کرده و باعث اتلاف موج صوتی می‌شود.

با توجه به شکل ۲، کامپوزیت‌هایی با غلظت پایین‌تر (۰/۵ و ۰/۱ درصد وزنی)، نسبت به فوم خالص بهبود نشان می‌دهند اما عملکرد آن‌ها کمتر از نمونه بهینه است. دلیل این امر را می‌توان تعداد ناکافی نانوذرات بر روی اسکلت فوم پلیمری دانست. در این غلظت‌ها، سطح کافی برای ایجاد مسیرهای پرپیچ و خم در برابر موج صوتی و اتلاف موج صوتی به اندازه نمونه بهینه فراهم نمی‌شود.

برخلاف انتظار، افزایش غلظت نانوذره به ۰/۴ درصدوزنی منجر به بهبود بیشتر نشد؛ بلکه منحنی جذب صوت نسبت به نمونه بهینه افت محسوسی را نشان داد. با توجه به تصاویر FESEM در این غلظت، به دلیل ازدیاد تعداد نانوذرات، پدیده آگلومره شدن (کلوخه‌ای شدن) رخ می‌دهد. این کلوخه‌ها می‌توانند منافذ و مجاری اصلی فوم پلی‌یورتان را مسدود یا باریک کنند، که این امر از هم‌افزایی مکانیسم اتلاف ویسکوز - حرارتی حفرات میکرومتری فوم و حفرات نانومتری نانوذره می‌کاهد و به همین دلیل جذب صوت کامپوزیت را کاهش می‌دهد.

به‌منظور ارزیابی کمی عملکرد جذب صوت کامپوزیت تهیه‌شده و مقایسه آن با پژوهش‌های پیشین، جدول ۱ پارامترهای کلیدی شامل ضخامت نمونه، محدوده فرکانسی، حداکثر ضریب جذب صوت و میزان بارگذاری را برای مطالعات معتبر در زمینه بهبود جذب صوت فوم پلی‌یورتان و پژوهش حاضر ارائه می‌کند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، کامپوزیت حاوی ۰/۲ درصدوزنی از نانوذرات UiO-66 با ضخامت ۲۴ میلی‌متر، به ضریب جذب ۰/۹۹ در محدوده ۱۷۰۰-۲۰۰۰ هرتز دست یافته است که در مقایسه با سایر مطالعات، بیانگر برتری عملکرد، کاهش چشمگیر میزان بارگذاری و سادگی روش ساخت می‌باشد.

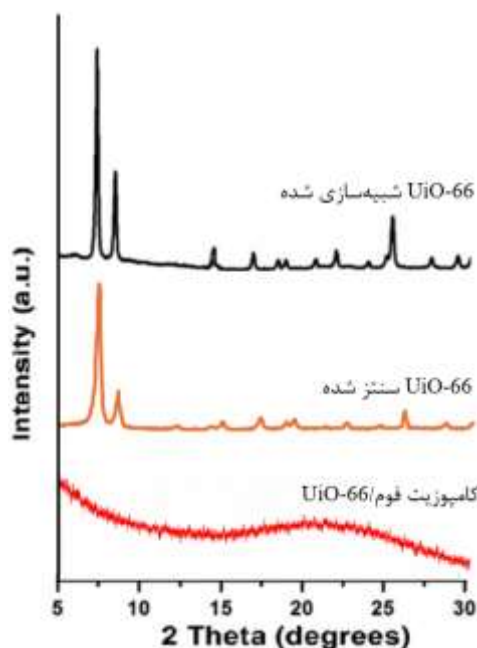
جدول ۱: مقایسه عملکرد جذب صوت کامپوزیت فوم پلی‌یورتان/نانوذرات UiO-66 با مطالعات مشابه

ردیف	ماده افزودنی	ضخامت نمونه (میلی‌متر)	محدوده فرکانسی (هرتز)	بهترین ضریب جذب (α)	میزان بارگذاری	رفرنس
۱	Al ₂ O ₃	۲۰	۵۰-۱۲۵۰	۰/۴۵ در ۱۲۵۰ هرتز	۰/۰۵ درصد	۱۲
۲	SiO ₂ / Fe ₃ O ₄	۲۰	۵۰۰-۱۶۰۰	۰/۷ در ۱۶۰۰ هرتز	۱۰-۲ درصد	۱۱
۳	UiO-66	۲۴	۷۵۰-۲۰۰۰	حداکثر ۰/۹۹ در ۱۷۰۰ تا ۲۰۰۰ هرتز	۰/۲ درصد	پژوهش حاضر

۳-۲- الگوی XRD

بررسی ساختار کریستالی پودر سنتز شده UiO-66، با استفاده از دستگاه پراش‌سنج پرتو ایکس ASENWARE مدل AW-XDM300 انجام شد. منبع تابش Cu-K α با طول موج ۱/۵۴ آنگستروم و محدوده زاویه پراش بین ۳۰-۵ درجه انتخاب و در نهایت الگوهای حاصل با الگوهای استاندارد موجود در مطالعات قبلی مقایسه گردید. آنالیز دقیق الگوی به‌دست‌آمده، انطباق قابل‌توجهی را با الگوهای استاندارد گزارش‌شده برای فاز بلوری UiO-66 نشان می‌دهد (شکل ۴) که مؤید سنتز موفقیت‌آمیز این MOF است. پیک‌های اصلی و شاخص مشاهده شده، بیانگر صفحات کریستالی این ساختار است. مهم‌ترین پیک‌ها در زوایای

تقریبی ۷/۴ و ۸/۵ درجه ظاهر شدند که به ترتیب مربوط به بازتاب از صفحات کریستالی (۱۱۱) و (۲۰۰) در ساختار مکعبی UiO-66 می‌باشند [۱۶]. به منظور تعیین دقیق اندازه کریستالیت (بلورک) نانوذرات سنتز شده، داده‌های پراش پرتو ایکس با استفاده از نرم‌افزار X Pert High Score Plus و رابطه دبای شرر پردازش شد و اندازه‌ی ۲۰ نانومتر برای کریستالیت‌ها محاسبه گردید.

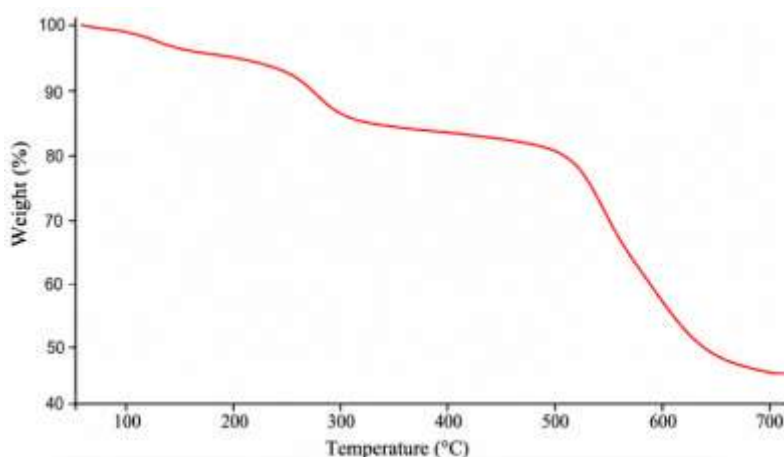


شکل ۴: الگوی XRD از UiO-66 سنتزی، شبیه‌سازی شده موجود در مراجع و کامپوزیت بهینه

همچنین الگوی XRD از کامپوزیت بهینه (حاوی ۰/۲ درصد وزنی UiO-66) نیز گرفته شد (شکل ۴). همان‌گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، الگوی XRD مربوط به کامپوزیت بهینه، فاقد پیک‌های مشخص و شاخص مربوط به فاز بلوری UiO-66 است و تنها یک پهن‌شدگی زمینه در زوایای حدودی ۱۵ تا ۲۵ درجه قابل مشاهده است که ناشی از ساختار آمورف و غیربلوری بستر پلی‌یورتان می‌باشد. این رفتار کاملاً قابل‌پیش‌بینی است. درصد وزنی نانوذرات UiO-66 در کامپوزیت نهایی بسیار ناچیز است (تنها ۰/۲ درصد وزنی)، در چنین غلظت‌های پایینی فاز کریستالی در مقایسه با فاز آمورف پلیمری، به‌شدت پایین بوده و شدت پراش مربوط به فاز بلوری UiO-66، در محدوده تشخیص دستگاه پراش‌سنج XRD قرار نمی‌گیرد. همچنین همان‌گونه که در تصاویر FESEM (شکل ۳) به‌خوبی مشهود است، نانوذرات UiO-66 به‌صورت مجزا و با فاصله از یکدیگر بر روی دیواره‌های حفرات فوم توزیع شده‌اند و یک لایه پیوسته یا شبکه بلوری گسترده در سطح فوم تشکیل نداده‌اند.

۳-۳- آنالیز TGA

برای اطمینان از اینکه نانوذره سنتزی در حین تهیه کامپوزیت نهایی پایدار بوده و تخریب نمی‌شود، از نانوذره UiO-66، آزمون TGA تا دمای ۷۰۰ درجه سانتیگراد با نرخ گرمایش ۱۰°C/min تحت اتمسفر نیتروژن گرفته شد (شکل ۵). نتایج حاصل از آنالیز TGA نشان می‌دهد که تجزیه حرارتی این ترکیب طی ۳ مرحله انجام می‌شود [۱۷].

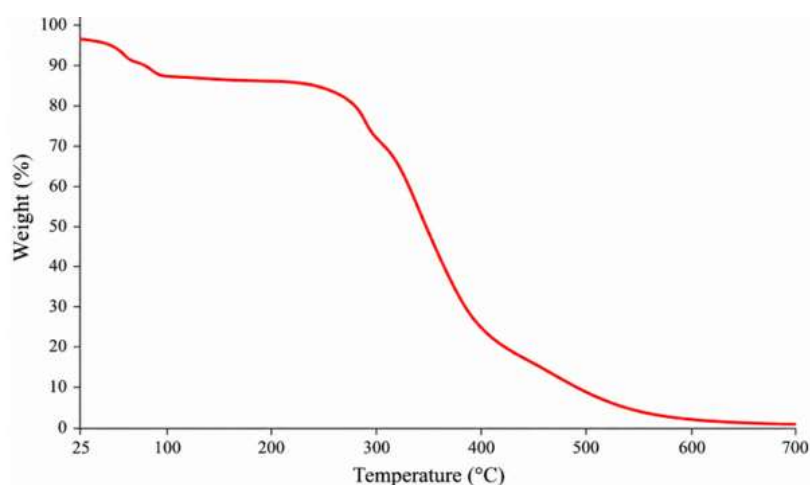


شکل ۵: نمودار TGA مربوط به UiO-66 سنتزی

مرحله اول تجزیه که در دمایی نزدیک به 60°C اتفاق می افتد، مربوط به جدا شدن مولکول های حلال (استن) موجود در ساختار متخلخل این ترکیب است. در این مرحله، پودر UiO-66 ساختار کریستالی خود را حفظ کرده است. مرحله دوم شامل از دست دادن مولکول های حلال DMF در دمای 130°C و مرحله سوم تجزیه که در دمای 520°C مشاهده می شود، مربوط به شکسته شدن پیوند فلز Zr و مولکول های BDC کئوردینه شده می باشد. در این مرحله، ساختار کریستالی UiO-66 شکسته می شود [۱۷]. در دماهای بالاتر از 520°C ، تجزیه اجزای سازنده UiO-66 رخ می دهد و این ترکیب به طور کامل تخریب می شود. در مراجع مختلف نیز دمای تخریب ساختار UiO-66 بیشتر از 500°C ذکر شده است [۱۸-۲۰]. از اینرو دمای تخریب بدست آمده در این آزمون، دلیل بر سنتز صحیح این ترکیب می باشد.

آزمون TGA بر روی کامپوزیت بهینه (حاوی ۰/۲ درصد وزنی UiO-66) تا دمای 700°C درجه سانتیگراد، با نرخ گرمایش $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ و تحت اتمسفر هوا انجام گردید. نتیجه حاصل از این آنالیز در شکل ۶ ارائه شده است. بررسی منحنی TGA مربوط به کامپوزیت، نشان دهنده رفتار حرارتی مشخصی است که می توان آن را به چند مرحله مجزا تقسیم نمود. نخستین افت وزنی قابل مشاهده در دمای کمتر از 100°C درجه سانتیگراد رخ می دهد که به وضوح قابل تشخیص است. این کاهش وزن، ناشی از خروج مولکول های حلال اتانول و همچنین رطوبت جذب شده درون کامپوزیت نهایی می باشد. مرحله دوم کاهش وزن، در محدوده دمایی 260°C تا 400°C درجه سانتیگراد مشاهده می شود که عمدتاً به تخریب زنجیره های پلیمری فوم پلی یورتان و تجزیه بخش های آلی آن نسبت داده می شود. این افت وزنی شدید، نشان دهنده غالب بودن فاز پلیمری در ترکیب کامپوزیت نهایی است. منحنی TGA کامپوزیت در محدوده دمایی 400°C تا 700°C ، کاهش وزن تدریجی و ممتدی داشته و در نهایت با پیشروی دما به سمت 700°C درجه سانتیگراد، باقیمانده وزنی آن به صفر (یا مقادیر بسیار ناچیز) میل می کند. این رفتار به دلیل غلظت بسیار پایین نانوذره می باشد. با توجه به اینکه درصد وزنی UiO-66 در کامپوزیت نهایی تنها ۰/۲ درصد است، باقیمانده نهایی به شدت

ناچیز بوده و با دستگاه TGA قابل تشخیص و اندازه‌گیری دقیق نیست. در چنین غلظت‌هایی، باقیمانده وزنی حاصل از تجزیه کامل نانوذره، به‌حدی کم است که به‌نظر می‌رسد منحنی به سمت صفر میل می‌کند.



شکل ۶: نمودار TGA مربوط به کامپوزیت نهایی

۴- بحث و نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، نانوذرات UiO-66 با موفقیت به روش هیدروترمال سنتز و با استفاده از روش غوطه‌وری در غلظت‌های مختلف بر روی اسکلت فوم پلی‌یورتان بارگذاری شدند. هدف اصلی این تحقیق، بهبود ضریب جذب صوت فوم پلی‌یورتان در محدوده فرکانسی پایین (زیر ۲۰۰۰ هرتز) با بهره‌گیری از ساختار متخلخل و سطح ویژه بالای نانوذرات UiO-66 بود. بررسی‌های انجام‌شده با استفاده از آنالیزهای XRD، TGA، FESEM و لوله ایمپدانس، نشان‌دهنده تأثیر قابل‌توجه این نانوذرات بر عملکرد آکوستیکی فوم پلی‌یورتان است.

آنالیز XRD (شکل ۴) سنتز موفقیت‌آمیز نانوذرات UiO-66 را با تطابق کامل پیک‌های اصلی در زوایای حدودی ۷/۴ و ۸/۵ درجه با الگوی استاندارد تأیید کرد. همچنین، الگوی XRD کامپوزیت بهینه، فاقد پیک‌های مشخصی از فاز بلوری UiO-66 بود که به دلیل غلظت بسیار پایین نانوذره (۰/۲ درصد وزنی) و ماهیت آمورف بستر پلی‌یورتان است. با این حال، حضور نانوذرات در ساختار کامپوزیت به‌واسطه تصاویر FESEM به‌خوبی تأیید شد.

تصاویر FESEM (شکل ۳) نشان دادند که نانوذرات سنتز شده دارای مورفولوژی بلوری منظم و با ابعاد نانومتری هستند. به‌منظور تخمین دقیق ابعاد نانوذرات، اندازه بلورک‌ها با استفاده از معادله دبی-شرر (Debye-Scherrer) محاسبه گردید. برای این منظور، داده‌های پراش پرتو ایکس با استفاده از نرم‌افزار X Pert High Score Plus پردازش و تعیین شد. نتایج این محاسبات نشان داد که میانگین اندازه بلورک‌های سنتز شده برابر با ۲۰ نانومتر است. بررسی مورفولوژی کامپوزیت‌ها نشان داد که در غلظت بهینه (۰/۲ درصد وزنی)، نانوذرات به‌صورت همگن و بدون تشکیل آگلومره بر روی دیواره حفرات فوم توزیع شده‌اند، در

حالی که در غلظت‌های بالاتر (۰/۴ درصد وزنی)، تجمع ذرات و مسدود شدن منافذ، تأثیر منفی بر عملکرد جذب صوت داشته است.

آنالیز TGA نانوذره خالص (شکل ۵) پایداری حرارتی UiO-66 را تا دمای حدود ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد تأیید کرد و نشان داد که این نانوذرات در فرآیند ساخت کامپوزیت (که در دماهای پایین‌تر از ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام می‌شود)، کاملاً پایدار باقی می‌مانند. همچنین، منحنی TGA کامپوزیت بهینه (شکل ۶) وجود یک افت وزنی اولیه در دمای کمتر از ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد را نشان داد که به خروج حلال و رطوبت جذب شده در کامپوزیت و حفرات نانومتری UiO-66 نسبت داده شد.

نتایج حاصل از اندازه‌گیری ضریب جذب صوت با استفاده از لوله ایمپدانس (شکل ۲) به‌وضوح نشان داد که تمامی نمونه‌های کامپوزیتی حاوی نانوذرات UiO-66، عملکرد جذب صوت بهتری نسبت به فوم خالص در محدوده فرکانسی ۷۵۰ تا ۲۰۰۰ هرتز دارند. فوم پلی‌یورتان خالص، ضریب جذب صوت پایینی در این محدوده فرکانسی نشان داد (۰/۶۳ در ۲۰۰۰ هرتز)، در حالی که نمونه کامپوزیتی حاوی ۰/۲ درصد وزنی UiO-66 به ضریب جذب ۰/۹۹ در محدوده ۲۰۰۰ هرتز دست یافت که نشان‌دهنده افزایش حدود ۵۰ درصدی نسبت به نمونه شاهد است. این بهبود چشمگیر را می‌توان به چند عامل اساسی نسبت داد. حضور نانوذرات، منجر به افزایش مقاومت جریان هوا در ساختار فوم شده و مسیر انتشار موج صوتی را پیچیده‌تر می‌سازد. از طرفی شبکه سه‌بعدی از حفرات نانومتری UiO-66، مکانیسم اتلاف ویسکوز-حرارتی را تقویت کرده و سطح تماس مؤثر بین سیال (هوا) و فاز جامد را افزایش می‌دهد. همچنین در غلظت بهینه، نانوذرات بدون ایجاد آگلومره بر روی دیواره حفرات توزیع می‌شوند و ساختار باز و به‌هم‌پیوسته فوم حفظ می‌گردد که این امر، هم‌افزایی مکانیسم‌های جذب صوت در دو مقیاس میکرومتری فوم و نانومتری UiO-66 را به همراه دارد. این رفتار نشان می‌دهد که انتخاب غلظت بهینه این نانوذره، نقش کلیدی در دستیابی به بیشترین راندمان جذب صوت دارد.

از مجموع مشاهدات فوق، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده هدفمند از نانوذرات MOF متخلخل نظیر UiO-66، راهبردی کارآمد و مؤثر برای بهبود عملکرد آکوستیکی فوم‌های پلی‌یورتان، به‌ویژه در محدوده فرکانس‌های پایین (زیر ۲۰۰۰ هرتز) محسوب می‌شود. این کامپوزیت‌ها با حفظ ضخامت کم، قابلیت بالایی برای کاربردهای صنعتی در زمینه کنترل نویز و آلودگی صوتی دارند.

۵- تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله بابت حمایت‌های مادی و معنوی، از مسئولین مرتبط در دانشگاه صنعتی مالک اشتر تشکر و قدردانی می‌کنند.

۶-مراجع

- [1] DeCoste, J. B., Demasky, T. J., Katz, M. J., Farha, O. K., & Hupp, J. T. (2015). A UiO-66 analogue with uncoordinated carboxylic acids for the broad-spectrum removal of toxic chemicals. *New Journal of Chemistry*, 4(39), 2396-2399.
- [2] Cavka, J. H., Jakobsen, S., Olsbye, U., Guillou, N., Lamberti, C., Bordiga, S., & Lillerud, K. P. (2008). A new zirconium inorganic building brick forming metal organic frameworks with exceptional stability. *Journal of the American Chemical Society*, 130(42), 13850-13851.
- [3] Sumida, K., Stück, D., Mino, L., Chai, J. D., Bloch, E. D., Zavorotynska, O., & Long, J. R. (2013). Impact of metal and anion substitutions on the hydrogen storage properties of M-BTT metal-organic frameworks. *Journal of the American Chemical Society*, 135(3), 1083-1091.
- [4] Prokofyeva, A., Laurenzen, H., Dijkstra, D. J., Frick, E., Schmidt, A. M., Guertler, C., & Wolf, A. (2017). Poly-2-oxazolidones with tailored physical properties synthesized by catalyzed polyaddition of 2, 4-toluene diisocyanate and different bisphenol-based diepoxides. *Polymer International*, 66(3), 399-404.
- [5] Li, Z. G., Li, K., Dong, L. Y., Guo, T. M., Azeem, M., Li, W., & Bu, X. H. (2021). Acoustic properties of metal-organic frameworks. *Research*.
- [6] Nune, S., Miller, Q., Schaef, H. T., Denslow, K., Martin, P., & McGrail, B. P. (2019). Metal Organic Framework Materials for Sound Attenuation Applications: AIChE Annual Meeting.
- [7] Tao, Y., Ren, M., Zhang, H., & Peijs, T. (2021). Recent progress in acoustic materials and noise control strategies—A review. *Applied Materials Today*, (24), 101141.
- [8] Li, J., Jiang, Z., Gan, L., Qiu, H., Yang, G., & Yang, J. (2018). Functionalized graphene/polymer composite coatings for autonomous early-warning of steel corrosion. *Composites Communications*, (9), 6-10.
- [9] Zhou, H. C., Long, J. R., & Yaghi, O. M. (2012). Introduction to metal-organic frameworks. *Chemical reviews*, 112(2), 673-674.
- [10] Kaskel, S. (2016). *The Chemistry of metal-organic frameworks, 2 volume set: synthesis, characterization, and applications* (Vol. 1). John Wiley & Sons.
- [11] Bardakhanov, S.P., Lee, C.M., Goverdovskiy, V.N., Zavjalov, A.P., Zobov, K.V., Chen, M., Xu, Z.H., Chakin, I.K. and Trufanov, D.Y., 2018. Hybrid sound-absorbing foam materials with nanostructured grit-impregnated pores. *Applied Acoustics*, 139, pp.69-74.2
- [12] Yuan, B., Fang, X., Liu, J., Liu, Y. and Zhu, R., 2021. Improved sound absorption properties in polyurethane foams by the inclusion of Al₂O₃ nanoparticles. *Shock and Vibration*, 2021(1), p.8010391.
- [13] Lee, J., & Jung, I. (2019). Tuning sound absorbing properties of open cell polyurethane foam by impregnating graphene oxide. *Applied Acoustics*, 2(151), 10-21.
- [14] Verdejo, R., et al. (2009). Enhanced acoustic damping in flexible polyurethane foams filled with carbon nanotubes. *Composites Science and Technology*, 69(10), 1564-1569.

- [15] Gayathri, R., Vasanthakumari, R., & Padmanabhan, C. (2013). Sound absorption, thermal and mechanical behavior of polyurethane foam modified with nano silica, nano clay and crumb rubber fillers. *Int. J. Sci. Eng. Res*, 4(5), 301-308.
- [16] Researchgate (2018). Typical PXRD pattern of UiO-66 and its simulated file. Available at: https://search.eitaa.com/?url=https://www.researchgate.net/figure/Typical-PXRD-pattern-of-UiO-66-and-its-simulated-file-Reproduced-with-permission-from_fig10_341938322
- [17] Makal, T. A., Wang, X., & Zhou, H. C. (2013). Tuning the moisture and thermal stability of metal–organic frameworks through incorporation of pendant hydrophobic groups. *Crystal growth & design*, 13(11), 4760-4768.
- [18] Kandiah, M., Nilsen, M. H., Usseglio, S., Jakobsen, S., Olsbye, U., Tilset, M., & Lillerud, K. P. (2010). Synthesis and stability of tagged UiO-66 Zr-MOFs. *Chemistry of Materials*, 22(24), 6632-6640.
- [19] DeCoste, J. B., Peterson, G. W., Schindler, B. J., Killops, K. L., Browe, M. A., & Mahle, J. J. (2013). The effect of water adsorption on the structure of the carboxylate containing metal–organic frameworks Cu-BTC, Mg-MOF-74, and UiO-66. *Journal of Materials Chemistry A*, 1(38), 11922-11932.
- [20] Yang, J. M. (2017). A facile approach to fabricate an immobilized-phosphate zirconium-based metal-organic framework composite (UiO-66-P) and its activity in the adsorption and separation of organic dyes. *Journal of colloid and interface science*, 505, 178-185.

