اثر نانوذره سیلیکا بر چگالی و استحکام فشاری فوم پلی‌یورتان انعطاف‌پذیر

دانیال ابراهیم‌زاده[۱]، غلامحسین ظهوری[۱*]، محمد نورمحمدی[۲]، امید جاوید[۲]

۱- گروه شیمی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

۲- شرکت عایق خودروتوس (گروه صنعتی پارت لاستیک)، مشهد، ایران.

چکیده

به منظور بررسی تاثیر افزودن نانوذره سیلیکا با درصد وزنی متفاوت (۰، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸) در فوم‌های پلی‌یورتان انعطاف‌پذیر چگالی و استحکام فشاری فوم‌های نانو کامپوزیت مورد آزمون قرار گرفت. بررسی‌ها نشان داد که با افزایش درصد نانوذره سیلیکا (از ۰٪ تا ۰/۸٪) که منجر به افزایش نرخ هسته‌زایی شده و در نتیجه چگالی فوم‌ها به ترتیب از ۷۸ تا ۸۷ کیلوگرم بر متر مکعب افزایش یافته است. همچنین با افزایش چگالی که باعث کاهش اندازه و افزایش تعداد و ضخامت دیواره سلول‌ها می‌شود، فوم‌های نانو کامپوزیت استحکام فشاری بیشتری را با افزایش نانوذره سیلیکا (از ۰٪ تا ۰/۶٪) به دست آوردند. فوم پلی‌یورتان انعطاف‌پذیر با مقدار ۰/۶ درصد وزنی نانو سیلیکا بیشترین استحکام فشاری را از خود نشان داده است.

کلمات کلیدی: فوم پلی‌یورتان، نانوذره، چگالی، سیلیکا، انعطاف‌پذیری، استحکام فشاری.

۱. مقدمه

فوم‌های پلیمری مواد چند فازی هستند که از یک ماتریس پلیمری تشکیل شده‌اند که مقدار زیادی سلول را در خود جای داده است و به عنوان پلیمرهای متخلخل شناخته می‌شوند. فوم‌های پلیمری در هر جنبه‌ای از زندگی روزمره ما به دلیل خواص ویژه آن‌ها از نظر وزن کم (چگالی کم)، عایق خوب (صوتی، الکتریکی، حرارتی)، انعطاف‌پذیری، استحکام نسبتاً بالا در واحد وزن، سهولت قالبگیری و همچنین مقاومت در برابر ضربه و خوردگی در مقایسه با پلیمرهای فشرده و سایر مواد (سرامیک، بتن، فلز و غیره) اهمیت فزاینده‌ای پیدا نموده‌اند. در نتیجه فوم‌های پلیمری برای کاربردهای عمرانی، صنعتی و خانگی بسیار جذاب شدند [۱]. فوم‌های پلیمری را می‌توان از نظر چگالی سلولی، اندازه و ضخامت دیواره آن شناسایی نمود که به دو دسته فوم سلول باز و فوم سلول بسته

* نویسنده مسئول: zohuri@um.ac.ir

تقسیم می‌شوند. فوم‌های سلول باز دارای سلول‌های به هم پیوسته هستند (دیواره‌های سلولی شکسته) که به سیالات اجازه نفوذ می‌دهند، در حالی که فوم‌های سلول بسته نسبتاً غیر قابل نفوذ هستند. به همین دلیل فوم‌های سلول باز نسبت به نمونه‌های سلول بسته خود مقاومت مکانیکی کمتری دارند. این همچنین نشان می‌دهد که خواص مکانیکی فوم‌های پلیمری نه تنها تابع خود ماتریس (نوع پلیمر)، بلکه بر روی خواص ذاتی ساختار سلولی (مورفولوژی فوم) تاثیرگذار است [۲].

پلی‌یورتان‌ها (PU) از متنوع‌ترین خانواده‌های پلیمری هستند که با تغییر پارامترهای کنترلی در هنگام تولید PU می‌تواند منجر به طیف وسیعی از مواد شوند که در میان آن‌ها فوم‌های PU بیشترین بازار را دارند. فوم‌های PU سخت یا انعطاف‌پذیر هستند. فوم‌های سخت بیشتر برای خواص عایقی خود استفاده می‌شوند، در حالی که فوم‌های انعطاف‌پذیر برای بسته‌بندی، بالشتک، مواد حمل و نقل، عایق صوت و تجهیزات محافظ ورزشی و بسیاری از کاربردهای دیگر استفاده می‌شوند [۳]. فوم‌های PU از پلی‌ال‌ها و ایزوسیانات‌ها با افزودنی‌های مختلف تولید می‌شوند و ساختار حاصل ترکیبی از ساختار متقابل حفره‌ها و بخش‌های جامد است. بخش جامد از قطعات سختی که از جزء ایزوسیانات ساخته شده‌اند و بخش‌های نرم توسط پلی‌ال‌ها ساخته می‌شوند [۴].

پلیمرها به علت نرمی ذاتی خود دارای خواص مکانیکی و حرارتی پایینی هستند. برای بهبود این خواص در تولید کامپوزیت‌ها اغلب از پرکننده‌ها استفاده می‌شود. با این حال، استفاده از پرکننده‌های میکرونی می‌تواند با مشکلاتی از جمله افزایش وزن و قیمت، از بین رفتن شفافیت و مات شدن محصول نهایی و غیره همراه باشد. خواص سطحی، مورفولوژی، شکل، اندازه و سایر ویژگی‌های پرکننده‌ها به طور مستقیم بر عملکرد فوم تأثیر می‌گذارد. در نانوکامپوزیت‌ها، به جای پرکننده‌های میکرونی، از تقویت‌کننده‌هایی با ابعاد نانومتری استفاده می‌شود. به علت سطح بالای تقویت‌کننده‌ها نانومتری مقادیر کمی از آن‌ها کافی است تا به طور چشمگیری خواص مکانیکی و حرارتی و چگالی کامپوزیت‌ها را بهبود بخشند [۶،۵،۳].

فوم‌های پلی‌یورتان تقویت‌شده با نانوذرات سیلیکا یک نوع نانوکامپوزیت پلیمری هستند که در دهه‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. این فوم‌ها به طور خالص معمولاً توانایی تحمل تنش‌های فشاری، برشی و کششی زیادی را ندارند و عدم توانایی فوم در تحمل تنش‌های وارده منجر به کاهش و محدودیت کارایی آن‌ها در زمینه‌های مختلف می‌شود. سیلیکا یک نانوذره معدنی است که به دلیل ویژگی‌های خاص خود، می‌تواند بهبود طیف وسیعی از خواص فوم‌های پلی‌یورتان را فراهم نماید. با افزودن نانوذرات سیلیکا در زمینه این پلیمرها، خواص مکانیکی این نانوکامپوزیت‌ها بهبود می‌یابد و کارایی آن‌ها را در زمینه‌های مختلف افزایش دهد. این پیشرفت‌ها می‌توانند به دستاوردهای جدید در صنایع مختلف از جمله خودروسازی، مبلمان و ساختمان‌سازی منجر شوند [۷].

۲. بخش تجربی

۲-۱. مواد مورد استفاده

از پلی‌ال پلی‌اتری و تولوئن دی‌ایزوسیانات (Toluene diisocyanate,TDI) به عنوان دو جز اصلی در ساخت فوم پلی‌یورتان انعطاف‌پذیر استفاده شد. افزودنی‌هایی مثل عامل فعال سطحی سیلیکونی، عامل گسترش‌دهنده زنجیر پلیمری، کاتالیست آلی-فلزی (Dibutyltin dilaurate,DBTDL)، کاتالیست آمینی (1,4-diazabicyclo[2.2.2]octane,DABCO)، دوده

به عنوان رنگدانه و پر کننده، آب دیونیزه شده به عنوان عامل فومزا شیمیایی و نانوذره سیلیکا (XYSIL-200) به عنوان پر کننده استفاده شد.

۲-۲. روش آماده‌سازی

به منظور ساخت فوم‌های پلی‌یورتان نانوکامپوزیتی منعطف از ۲ جز استفاده شد. پلی‌ال پلی‌اتری همراه با دیگر افزودنی‌ها از جمله عامل فعال سطحی سیلیکونی، عامل گسترش‌دهنده زنجیر پلیمری، کاتالیست آلی-فلزی (DBTDL)، کاتالیست آمینی (DABCO)، دوده، آب دیونیزه شده و همچنین نانوذرات سیلیکا با درصد وزنی‌های متفاوت (۰، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸) به عنوان جز A مخلوط نموده و توسط همزن مکانیکی به مدت ۱۵ دقیقه همزده شدند و به مدت ۲۰ دقیقه تحت حمام فراصوت قرار گرفتند. در ادامه دی‌ایزوسیانات (TDI) به عنوان جز B با جز A که پلی‌ال آماده شده می‌باشد، ترکیب نموده و به مدت ۱۰ ثانیه توسط همزن مکانیکی با دور ۱۵۰۰ rpm همزده شد و در قالب مورد نظر قرار داده شدند. پس از گذشت چند دقیقه فوم پلی‌یورتان بالا آمده و پس از پخت و خشک شدن فوم آن را برش زده و آزمون‌های مورد نظر انجام شدند. فرمولاسیون مواد استفاده شده برای ساخت فوم پلی‌یورتان در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- فرمولاسیون استفاده شده برای ساخت فوم پلی‌یورتان انعطاف‌پذیر.

مواد	مقدار (g)
پلی‌ال	۱۰۰
عامل گسترش‌دهنده زنجیر	۱/۸
کاتالیست آلی-فلزی	۰/۱۱
کاتالیست آمینی	۰/۶
دوده	۰/۲
آب مقطر	۱/۵
ایزوسیانات	۳۹
نانوذرات سیلیکا	۰، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸ (درصد وزنی)

۲-۳. چگالی فوم‌ها

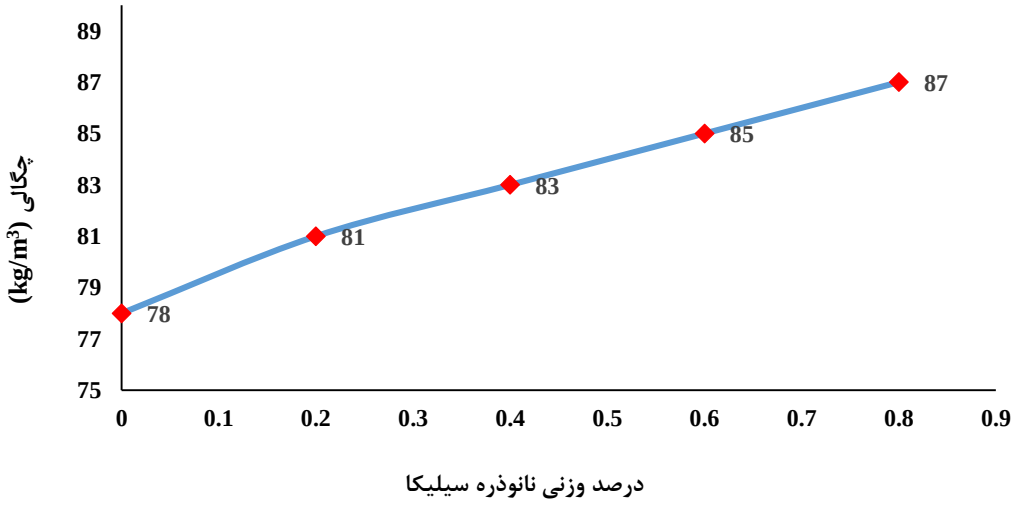
به منظور اندازه‌گیری چگالی فوم‌های نانوکامپوزیت بر طبق استاندارد ASTM D-3574 مکعب‌هایی با ابعاد ۳۰×۵۰×۵۰ میلی‌متر برش داده شد و با کمک ترازویی با دقت ۴ رقم اعشار چگالی نمونه‌ها محاسبه گردید.

۴-۲. استحکام فشاری

به منظور اندازه‌گیری استحکام فشاری فوم‌های نانوکامپوزیت بر طبق استاندارد ASTM D-3574 نمونه‌ها با ابعاد ۳۰×۵۰×۵۰ میلی‌متر در دستگاه SANTAM STM-5 قرار داده شد و با سرعت ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه تحت فشار قرار گرفتند.

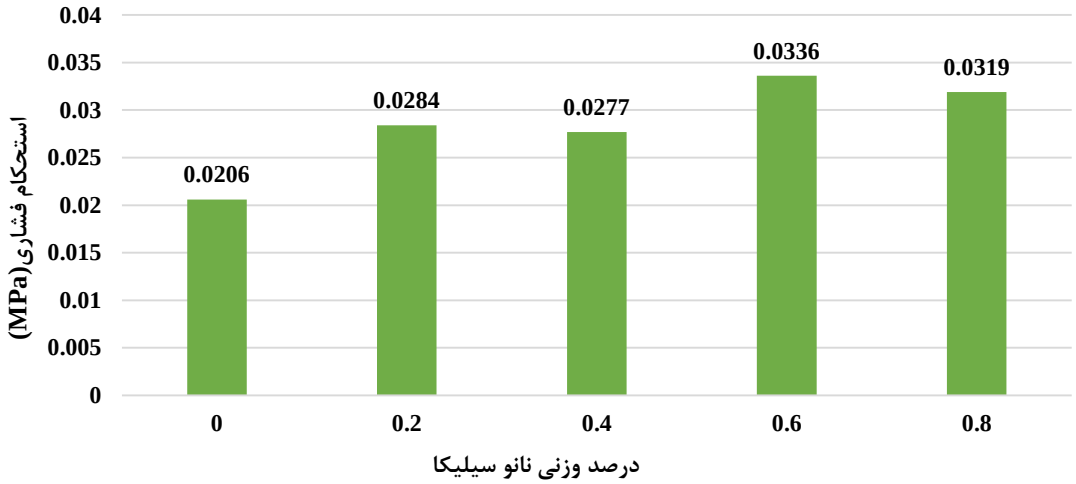
۳. نتایج و بحث

تاثیر نانوذره سیلیکا بر چگالی فوم‌های پلی‌یورتان انعطاف‌پذیر مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۱). مشاهده شد که با افزایش درصد نانوذره سیلیکا به فرمولاسیون، چگالی فوم‌های کامپوزیتی روند افزایشی بطور خطی پیدا نموده‌اند که این پیشرفت مربوط به تغییرات ساختار سلولی فوم‌ها می‌باشد. با توجه به اینکه یکی از عوامل مهم و مشخص کننده تعداد سلولی و حفرات تولید شده در فوم نرخ هسته‌زایی می‌باشد، می‌توان اظهار نمود که در واقع نانوذرات سیلیکا پرکننده به عنوان مواد هسته‌زا عمل نموده و منجر به هسته‌زایی در ماتریس پلیمری شده و در نتیجه با افزایش درصد نانو پرکننده‌ها، نرخ هسته‌زایی و چگالی فوم‌ها را افزایش می‌دهد. هر چه نرخ هسته‌گذاری بیشتر باشد در نتیجه فوم نهایی دارای تعداد سلول‌های در واحد حجم بیشتر و با ابعاد کوچکتر هستند که این روند منجر به افزایش چگالی می‌شود.



شکل ۱- تاثیر نانوذره سیلیکا بر چگالی فوم‌های پلی‌یورتان انعطاف‌پذیر.

حضور نانوذرات سیلیکا در فوم‌های پلی‌یورتانی انعطاف‌پذیر علاوه بر افزایش چگالی می‌تواند منجر به بهبود خواص مکانیکی فوم شود که در شکل ۲ نتایج بدست آمده از آزمون استحکام فشاری می‌توان مشاهد نمود که بطور کلی با افزایش درصد نانو پرکننده استحکام فشاری فوم‌ها روند افزایشی داشته‌اند. نمونه با ۰/۶ درصد وزنی نانو سیلیکا بیشترین استحکام فشاری را از خود نشان داد. با توجه به اینکه استحکام فوم تحت تاثیر مورفولوژی سلول‌ها است و همچنین با استفاده از نانوذره چگالی افزایش یافته است می‌توان گفت تعداد سلول‌ها در واحد حجم و ضخامت دیواره سلولی افزایش یافته و فوم سخت‌تر شده در نتیجه استحکام فوم نانوکامپوزیت در برابر تنش فشاری افزایش می‌یابد.



شکل ۲- تاثیر نانوذره سیلیکا بر استحکام فشاری فوم‌های پلی‌یورتان انعطاف‌پذیر.

۴. نتیجه‌گیری

فوم‌های پلی‌یورتانی نانو کامپوزیت با درصد وزنی (۰، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸) نانو سیلیکا تهیه شد. چگالی نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد با افزایش درصد وزنی نانوذرات به دلیل هسته‌زایی، چگالی فوم‌ها روند افزایشی داشته است. همچنین استحکام فشاری فوم‌های نانو کامپوزیت مورد بررسی قرار گرفت و با توجه اینکه با افزایش درصد وزنی نانوذره سیلیکا چگالی افزایش یافته در نتیجه با کاهش اندازه سلول و افزایش ضخامت دیواره و تعداد سلول‌ها در واحد حجم به طور کلی خواص مکانیکی و استحکام فشاری نمونه‌ها بهبود یافت.

۵. قدردانی

از گروه شیمی دانشکده علوم دانشگاه فردوسی مشهد (کد طرح: ۵۹۲۶۴) و شرکت عایق خودرو توس (گروه صنعتی پارت لاستیک) مشهد جهت همکاری و پشتیبانی فنی و مالی در انجام پژوهش تشکر و قدردانی می‌گردد.

۶. مراجع

[1] Zhang, J., Hirschberg, V., & Rodrigue, D. (2023). Mechanical fatigue of polymer foams-a review. *Polymer Reviews*, 1-29.

[2] Saha, M. C., Mahfuz, H., Chakravarty, U. K., Uddin, M., Kabir, M. E., & Jeelani, S. (2005). Effect of density, microstructure, and strain rate on compression behavior of polymeric foams. *Materials Science and Engineering: A*, *406*(1-2), 328-336.

[3] Ghasemi, S., Amini, E. N., Tajvidi, M., Kiziltas, A., Mielewski, D. F., & Gardner, D. J. (2021). Flexible polyurethane foams reinforced with organic and inorganic nanofillers. *Journal of Applied Polymer Science*, *138*(10), 49983.

[4] Cordero, A. I., Amalvy, J. I., Fortunati, E., Kenny, J. M., & Chiacchiarelli, L. M. (2015). The role of nanocrystalline cellulose on the microstructure of foamed castor-oil polyurethane nanocomposites. *Carbohydrate polymers*, *134*, 110-118.

[5] Chen, Z., Xu, C., Ma, C., Ren, W., & Cheng, H. M. (2013). Lightweight and flexible graphene foam composites for high-performance electromagnetic interference shielding. *Advanced materials*, *25*(9), 1296-1300.

[6] Gupta, N., Pinisetty, D., & Shunmugasamy, V. C. (2013). *Reinforced polymer matrix syntactic foams: effect of nano and micro-scale reinforcement*. Springer Science & Business Media.

[7] Zangiabadi, Z., & Hadianfard, M. J. (2016). Effects of size and structure of silica nanoparticles on morphology and tensile behavior of flexible nanocomposite foams based on polyurethane. *Persian, Journal of Science and Technology of Composites*, *5*(4), 615-620.