



تاثیر اندازه و ساختار نانوذرات سیلیکا بر مورفولوژی و رفتار کششی اسفنج‌های منعطف نانوکامپوزیتی بر پایه پلی‌یورتان

زهره زنگی آبادی¹، محمدجعفر هادیان‌فرد^{2*}

1- دانشجوی مهندسی مواد-نانومواد، دانشگاه شیراز، شیراز

2- استاد، مهندسی مواد، دانشگاه شیراز، شیراز

* شیراز، صندوق پستی 7134851154، hadianfa@shirazu.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

تاریخ دریافت: 96/11/3

تاریخ پذیرش: 97/2/31

کلیدواژگان:

نانوکامپوزیت

خواص کششی

نانوذرات سیلیکا

نانوذرات توخالی سیلیکا

در این پژوهش به بررسی تاثیر اندازه و نوع ساختار نانوذرات سیلیکا بر مورفولوژی ساختاری نمونه‌های اسفنج منعطف پلی‌یورتان و همچنین به بررسی رفتار کششی آن‌ها پرداخته شد. بدین منظور نانوذرات سیلیکا با دو ساختار مختلف توپر و توخالی و میانگین اندازه ذرات 40 nm و 150 nm تهیه گشتند و به عنوان فاز تقویت‌کننده در زمینه اسفنج منعطف پلی‌یورتان با درصد‌های وزنی مشابه 0.1، 0.2 و 0.3 پخش گردیدند و نمونه‌های نانوکامپوزیتی ساخته شدند. در ادامه به مقایسه و بررسی ساختار این دو گروه از نانوکامپوزیت‌ها با یکدیگر و نمونه خالص توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) پرداخته شد و تاثیر ساختار نمونه بر رفتار کششی آن‌ها بررسی شد. نتایج حاصل از SEM نشان می‌داد که در درصد‌های وزنی مشابه از فاز تقویت‌کننده، اندازه و تعداد سلول‌های تشکیل شده در نانوکامپوزیت پلی‌یورتان-نانوذرات توپر سیلیکا نسبت به نانوکامپوزیت پلی‌یورتان-توخالی سیلیکا و نمونه پلی‌یورتان خالص بیشتر می‌باشد. همچنین نتایج آزمون کشش نشان داد که با افزایش درصد وزنی فاز تقویت‌کننده در زمینه اسفنج پلی‌یورتان، استحکام کششی نسبت به نمونه خالص بهبود و درصد ازدیاد طول کاهش پیدا کرده است. بعلاوه افزایش خواص کششی با تعداد و اندازه سلول‌های شکل گرفته رابطه مستقیمی دارد. به طوری که نانوکامپوزیت‌های تقویت‌شده با نانوذرات توپر و نانوذرات توخالی سیلیکا در 0.3% وزنی، استحکام کششی به ترتیب حدود 78% و 34% افزایش و درصد ازدیاد طول نیز به ترتیب حدود 44% و 30% نسبت به نمونه خالص کاهش پیدا کرد.

Effects of size and structure of silica nanoparticles on morphology and tensile behavior of flexible nanocomposite foams based on polyurethane

Zohreh Zangiabadi, Mohammad Jafar Hadianfard*

Department of the materials engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran.

* P.O.B. 7134851154 Shiraz, Iran, email hadianfa@shirazu.ac.ir

Keywords

Nano Composite
Tensile behavior
Silica nanoparticles
Hollow silica nanospheres

Abstract

In this research, the effect of size and type of silica nanoparticle structure on the morphology and tensile behavior of flexible polyurethane foams were investigated. For this purpose, silica nanoparticles were prepared with two structures rigid and hollow with average particle size of 40 and 150 nm respectively, and reinforcement phases were dispersed in the matrix of flexible polyurethane foam with weight percentages of 0.1, 0.2 and 0.3. Then, comparison and investigation of nanocomposite and pure samples were studied by scanning electron microscopy (SEM) and the effect of structure on the tensile behavior examined. The results of the SEM shown that among all of the samples, polyurethane/rigid silica nanocomposites have more than the size and number of cells. Also, the results of the tensile test shown that by increasing weight percentage of the reinforcement phase in the matrix, the tensile strength were increased and elongation at break were decreased. The addition, there was direct relationship with tensile properties and size and number of cells. So that, the nanocomposite reinforced with rigid and hollow silica nanoparticles at 0.3% wt, increased tensile strength by 78% and 34%, and decrease the elongation at break by 44% and 30%, respectively, relative to the pure sample.

1- مقدمه

بهبود بخشی برخی از خواص آن‌ها می‌گردد. در کامپوزیت‌ها، عموماً از تقویت‌کننده‌هایی با ابعاد میکرون استفاده می‌شود که استفاده از این پرکننده‌ها به علت ابعاد نسبتاً بزرگشان باعث به وجود آمدن مشکلاتی نظیر: افزایش وزن و قیمت، از بین رفتن شفافیت و مات شدن محصول نهایی و غیره می‌گردد. در

پلیمرها به علت نرمی که دارند به طور ذاتی دارای خواص مکانیکی و حرارتی پایینی می‌باشند. استفاده از پرکننده‌ها در زمینه نرم و تولید کامپوزیت سبب

Please cite this article using:

Zangiabadi, Z. and Hadianfard, M.J., "Effects of size and structure of silica nanoparticles on morphology and tensile behavior of flexible nanocomposite foams based on polyurethane", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 4, pp. 615-620, 2016.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

اشتغال ناپذیری، قیمت ارزان، دارا بودن حجم زیادی از فضای خالی درون ساختارشان و غیره در زمینه این پلیمرها می‌تواند سبب بهبود خواص جدیدی در این پلیمرها گردد [13-15].

علیرغم توجهات و تلاش‌های بی‌شماری که در زمینه ساخت نانوکامپوزیت‌های پلی‌یورتان/سیلیکا صورت گرفته است، اما تحقیقات بسیار اندکی به تأثیر همزمان اندازه و نوع ساختار فاز تقویت‌کننده در زمینه این پلیمرها پرداخته است.

هدف کلی از این پژوهش، ساخت نمونه‌های خالص و نانوکامپوزیت پلی‌یورتان تقویت‌شده با نانوذرات توپر و توخالی سیلیکا و تأثیر اندازه نانوذرات و نوع ساختار فاز تقویت‌کننده بر مورفولوژی نمونه‌های نانوکامپوزیتی و بررسی رفتار کششی نمونه‌های خالص و نانوکامپوزیتی می‌باشد.

2- بخش تجربی

2-1- مواد اولیه برای ساخت اسفنج خالص

مواد اولیه مورد استفاده در این پژوهش شامل جز اصلی پلی‌ال¹ که معروف به پلی 10% و ساخت شرکت KONIXE کره جنوبی و گروه ایزوسیانات آن تولون‌دی‌ایزوسیانات² (TDI-20/80) ساخت شرکت Air Poroducts چین می‌باشد. همچنین علاوه بر این دو جز اصلی، افزودنی‌های دیگری مانند کاتالیزور آلی - معدنی (وزن مولکولی: $\frac{g}{mol}$ 405.1، Mayrun Chemical - چین)، کاتالیزور آمینی (در نقش عامل فعال سطحی³، وزن مولکولی: $\frac{g}{mol}$ 60.1، Armen - چین)، عامل اتصالات عرضی⁴ (Silicon680، Mayrun Chemical - چین)، عامل پف‌دهنده فیزیکی - متیل کلراید⁵، وزن مولکولی: $\frac{g}{mol}$ 84.9، Konixe - کره) تهیه شده‌اند و همچنین آب مقطر نیز استفاده شده است.

ساخت نمونه‌ها به روش دو مرحله‌ای: ابتدا پلی 10% با کاتالیزور مخلوط شدند و در همین حین در ظرف جداگانه‌ای آب، عامل فعال سطحی و عامل اتصال عرضی با یکدیگر مخلوط گردیدند. سپس محتوی دو ظرف به همراه عامل پف‌دهنده فیزیکی با یکدیگر مخلوط شدند و تا این مرحله عملیات پلی‌سازی انجام شد. در ادامه ایزوسیانات به پلی‌ساخته شده افزوده شد و توسط همزن مکانیکی با سرعت 1280 rpm به مدت 8 ثانیه همزده شد و در نهایت در قالب‌های مخصوص ریخته شدند و پس از گذشت مدت زمان 20 دقیقه و اطمینان از پخت و سخت شدن، نمونه‌ها از قالب خارج شدند. مقدار مواد اولیه مورد نیاز برای ساخت اسفنج پلی‌یورتان منعطف خالص در جدول 1 آورده شده است.

جدول 1 مواد اولیه برای ساخت اسفنج منعطف پلی‌یورتان (pu-30)

Table 1 Raw materials for the preparation of flexible polyurethane foam.

ماده	مقدار (g)	ماده	مقدار (g)
کاتالیزور آمینی	0.15	پلی‌ال	100
عامل اتصالات عرضی	0.90	آب	0.13
کاتالیزور آلی-معدنی	0.13	TDI	38
عامل پف‌دهنده فیزیکی (متیل کلراید)	0.50	-	-

نانوکامپوزیت‌ها از تقویت‌کننده‌هایی نانومتری با مساحت سطحی بالا استفاده می‌شود که در مقایسه با پرکننده‌های میکرونی، مقدار کمی از نانوذرات لازم است تا تغییرات برجسته‌ای را در خصوصیات ماده ایجاد کند [21]. همچنین جنس، مورفولوژی، ساختار و اندازه فاز تقویت‌کننده در بهبود خواص نهایی نانوکامپوزیت‌ها بسیار حائز اهمیت می‌باشد. به عنوان مثال کاهش اندازه ذرات سرامیکی سیلیکا تا مقیاس نانو و استفاده در زمینه پلیمری پلی‌یورتان، تأثیر مثبتی در بهبود خواص مکانیکی آن‌ها دارند [3]. البته بایستی توجه داشت که به طور کلی در صورتی استفاده از نانوذرات در زمینه پلیمرهای آلی اثربخش است که، اولاً نانوذرات پراکندگی خوب و مناسبی در زمینه داشته باشند و دوماً، فصل مشترک بین نانوذرات و زمینه از چسبندگی بالا و قابل قبولی برخوردار باشد [4].

از جمله نانوکامپوزیت‌های زمینه پلیمری که در چند دهه اخیر بسیار مورد توجه محققین و دانشمندان قرار گرفته است، اسفنج‌های پلی‌یورتان تقویت‌شده با نانوذرات معدنی مختلف نظیر سیلیکا می‌باشند [5]. این اسفنج‌ها به طور ذاتی دارای ویژگی‌هایی چون: وزن پایین، عدم لانه‌گزینی حشرات و حیوانات موزی، قیمت مناسب، ساخت سریع و آسان و ساختار مناسب (به علت دالان‌های تودرتوی ساختاری) و غیره می‌باشند که زمینه کاربردی وسیعی در صنایعی همچون هوافضا و کشتی‌سازی، الکترونیک، تجهیزات ورزشی، عایق‌های صوت و حرارت و غیره دارند [6،7]. این ساختارها به طور خالص معمولاً توانایی تحمل تنش‌های فشاری، برشی و کششی زیادی را نداشته که عدم توانایی اسفنج در تحمل تنش‌های وارده منجر به کاهش و محدودیت کارایی آن‌ها در زمینه‌های مختلف می‌شود [8،9].

بدین منظور تاکنون تلاش‌های زیادی در جهت بهبود خواص مکانیکی این نانوکامپوزیت‌ها نظیر استحکام کششی و درصد افزایش طول قبل از شکست آنها صورت گرفته است که این گزارش‌ها همگی نشان داده‌اند که افزودن نانوذرات سیلیکا در زمینه این پلیمرها سبب بهبود خواص مورد نظر در این نانوکامپوزیت‌ها شده است. مطالعات ژانگ و همکاران [10] نشان می‌دهد که به ازای افزودن 0.75% وزنی از نانوذرات سیلیکا در زمینه اسفنج پلی‌اتیلن سبب افزایش استحکام کششی و فشاری این نانوکامپوزیت‌ها نسبت به اسفنج خالص می‌گردد. در تحقیقی مشابه [11] نیز بیان شد که با افزودن نانوذرات سیلیکا در زمینه این مواد تا درصد وزنی بهینه، خواص مکانیکی افزایش و به ازای درصد وزنی‌های بیش از آن، خواص مورد نظر افت شدیدی پیدا کرد که دلیل این پدیده را تشکیل کلوخه‌های حاصل از به هم پیوستن و چسبیدن نانوذرات به یکدیگر نسبت دادند.

گروهی از محققین [12] بر خواص و ساختار نانوکامپوزیت زمینه پلی‌یورتان با فاز تقویت‌کننده سیلیکا با اندازه قطر متفاوت، مطالعاتی انجام دادند. نتایج حاصل از داده‌های آن‌ها همانند گزارشات قبل بود. آنها همچنین اثر اندازه قطر نانوذرات را بر افزایش استحکام کششی و درصد ازدیاد طول بررسی کردند و گزارش کردند که با کاهش قطر نانوذرات استحکام کششی افزایش و درصد زیاد طول کاهش پیدا می‌کند. آنها دلیل این رفتار را به تأثیر اندازه نانوذرات بر ساختار و مورفولوژی نمونه‌های نانوکامپوزیتی نسبت دادند.

همچنین استفاده از نانو ساختارهای توخالی، نظیر نانوذرات توخالی سیلیکا می‌تواند به علت دارا بودن خصوصیات و ویژگی‌های منحصر به فرد نظیر نسبت سطح به حجم بالا، چگالی کم و وزن سبک، خنثی بودن از نظر شیمیایی،

⁴ Cross linking gent
⁵ Physical bowling agent

¹ Polyol
² Toluene Diisocyanate
³ Surfactant

نمونه‌های دمبلی شکل آزمون کشش طبق استاندارد ASTM D3574 و با بکارگیری المان حرارتی تهیه شدند. شکل 2 نمونه‌های استاندارد آماده شده برای آزمون کشش را نشان داده است.

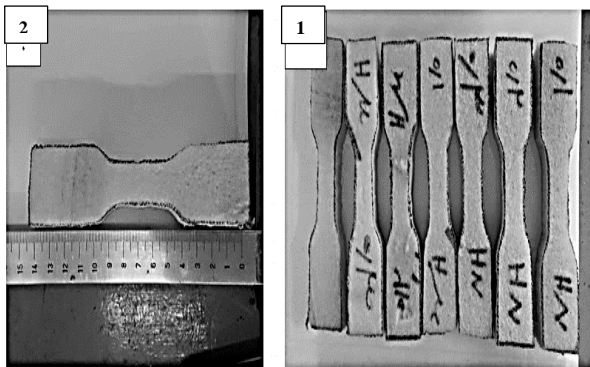


Fig. 2 1) Standard samples of tensile Test, 2) Dimensions of standard samples

شکل 2 (1) نمونه‌های استاندارد آزمون کشش، (2) ابعاد نمونه استاندارد

2-3- تجهیزات

2-3-1- ارزیابی کششی

خواص کششی نمونه‌های حاصله توسط دستگاه SANTAM STM-150 با ظرفیت Load Cell 100N و طبق استاندارد ASTM D3574 انجام شد. با متوسط گیری بین حداقل سه نمونه، خواص کششی نمونه‌های پلی‌یورتان خالص و نانوکامپوزیتی به ازای سرعت کشش 10 mm/min بر روی نمونه‌های استاندارد صورت گرفت و نتایج گزارش گردید. در این آزمایش ابتدا نمونه میان دو فک دستگاه قرار داده شد و پیش نیرو اولیه‌ای برای کشیده شدن نمونه در فک اعمال شد و پس از صفر کردن مقادیر نیرو و جابجایی، آزمون کشش شروع شده و دستگاه تا زمانی که نمونه دچار شکست شود، شروع به ثبت مقدار جابجایی برحسب نیرو می‌کند.

2-3-2- ارزیابی میکروسکوپی

تصویربرداری از وضعیت سلول‌های سازنده نمونه‌های اسفنجی، توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) ساخت شرکت Leica Cambridge کشور انگلستان و مدل S360 انجام شد. با توجه به نارسا بودن نمونه‌ها، ابتدا پوششی از طلا بر روی آنها توسط دستگاه پوشش‌دهی اسپاترینگ Polaron Sputter Coater مدل SC7640 و ساخت کشور انگلستان داده شد و سپس تصویر برداری صورت گرفت.

3- نتایج و بحث

3-1- ارزیابی ساختاری

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مربوط به نمونه‌های اسفنج پلی‌یورتان خالص و نانوکامپوزیتی با نانوذرات SiO_2 و HSNS به ترتیب در شکل‌های 3 تا 5 آورده شده است. با توجه به تصویر 4، می‌توان ساختار سلولی با پنجره‌های باز، نیمه باز و حتی بسته، همچنین وجود دالون‌های تودرتو را در نمونه خالص مشاهده کرد.

2-2- آماده سازی و ساخت نمونه‌های نانوکامپوزیتی

به منظور ساخت نمونه‌های نانوکامپوزیتی از نانوذرات سیلیکا با دو ماهیت توپر و توخالی و با میانگین اندازه ذرات به ترتیب 40 و 150 نانومتر به عنوان فاز تقویت‌کننده در زمینه پلی‌یورتان استفاده شد. نانوذرات توپر سیلیکا از شرکت پیشگامان ایرانیان خریداری شد و نانوذرات توخالی سیلیکا نیز سنتز شدند و سپس مورد استفاده قرار گرفتند. که در شکل 1 تصویر SEM این ذرات آورده شده است و توخالی بودن نانوذرات سیلیکا در شکل 2، با پیکان مشخص شده است.

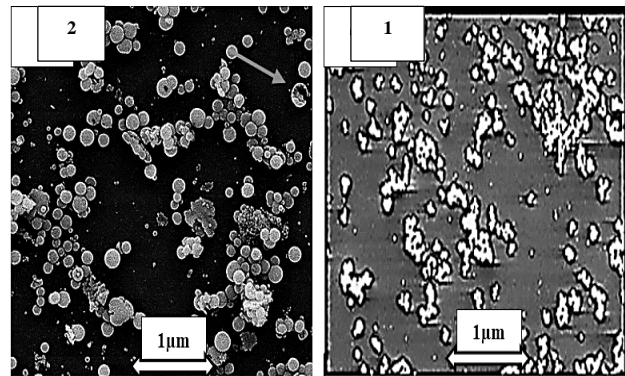


Fig. 1 SEM images 1) rigid silica nano particle, 2) hollow silica nano sphere

شکل 1 تصویر SEM (1) نانوذرات توپر سیلیکا و (2) نانوذرات توخالی سیلیکا

به منظور ساخت نمونه‌های نانوکامپوزیتی، نانوذرات در هر گروه و با درصدهای وزنی مشابه 0.1، 0.2 و 0.3 به همراه میزان مشخصی از عامل فعال کننده سطحی CTAB¹ به پلی 10% افزوده و توسط همزن مکانیکی با سرعت 140 rpm به مدت 20 دقیقه همزده شدند و پس از این مرحله به منظور حذف کلوخه‌های حاصل از تجمع نانوذرات، به مدت 15 دقیقه تحت امواج فراصوت قرار گرفتند و پس از اضافه کردن افزودنی‌های لازم به منظور پلی‌سازی، مراحل ساخت انجام شد. جدول 2 کد نمونه‌های نانوکامپوزیتی، نوع نانوذرات و درصد وزنی مورد استفاده را نشان داده است.

جدول 2 مشخصات و کد نمونه‌ها

Table 2 Specifications and sample codes

نمونه	نوع نانوذرات	درصد وزنی نانوذرات
Pu-30	-	-
Pu-0.1 SiO_2	نانوذرات سیلیکا (SiO_2)	0.1
Pu-0.2 SiO_2	نانوذرات سیلیکا (SiO_2)	0.2
Pu-0.3 SiO_2	نانوذرات سیلیکا (SiO_2)	0.3
Pu-0.1 HSNS	نانوذرات توخالی سیلیکا (HSNS)	0.1
Pu-0.2 HSNS	نانوذرات توخالی سیلیکا (HSNS)	0.2
Pu-0.3 HSNS	نانوذرات توخالی سیلیکا (HSNS)	0.3

¹ Cetyl trimethyl ammonium bromide

پنجره‌های بسته و نیمه بسته در سلول‌های سازنده اسفنج افزایش یافته است و ساختار منحصر به فردی با منافذ کوچک و نامنظم، به واسطه حضور نانوذرات، مشاهده می‌شود.

به طور کلی عامل اصلی مشخص‌کننده تعداد سلول‌ها و حفرات تولیدی در اسفنج، نرخ هسته‌گذاری می‌باشد. به طوری که نرخ هسته‌گذاری بیشتر به معنای تعداد سلول تولیدی بیشتر است. در واقع نانوذرات به مانند مواد هسته‌گذار عمل کرده و منجر به وقوع هسته‌گذاری ناهمگن می‌شوند و نرخ هسته‌گذاری در اسفنج را افزایش می‌دهند. به همین دلیل به واسطه حضور نانوذرات در زمینه وضعیت همگنی سلول‌های سازنده اسفنج تحت تاثیر قرار گرفته و سلول‌ها دچار ناهمگنی و نایکسانی می‌شوند [17,16].

همان گونه که بیان شد نانوذرات توپر سیلیکا نسبت به نانوذرات توخالی سیلیکا دارای اندازه کوچکتری می‌باشند و به همین علت در درصدهای وزنی مشابه، نسبت به نانوذرات توخالی سیلیکا سطح بیشتری از زمینه پلیمری را پوشش می‌دهند که منجر به افزایش نرخ هسته‌گذاری شده و ساختار نانوکامپوزیت پلی‌یورتان/SiO₂ دارای اندازه سلولی کوچکتر، تعداد سلول و همچنین تعداد پنجره‌های بسته و نیمه بسته بیشتری نسبت به نمونه‌های نانوکامپوزیت پلی‌یورتان/HSNS می‌باشند که در تصویر SEM شکل 4 و 5 به خوبی مشهود است.

3-2- ارزیابی کششی

نمودار تنش- کرنش نمونه پلی‌یورتان خالص و نانوکامپوزیت‌های تقویت‌شده با نانوذرات سیلیکا و نانوذرات توخالی سیلیکا به ترتیب در شکل‌های 6 تا 8 آورده شده است.

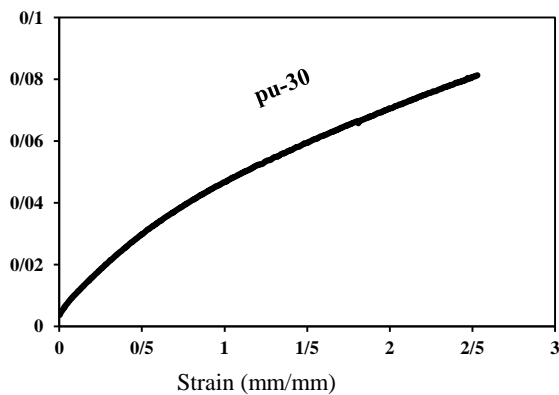


Fig. 6 Stress-strain curve of pure polyurethane

شکل 6 نمودار تنش-کرنش نمونه پلی‌یورتان خالص

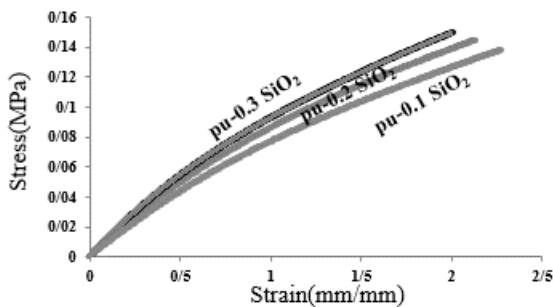


Fig. 7 Stress-strain curve of the nanocomposite polyurethane/SiO₂

شکل 7 نمودار تنش-کرنش نانوکامپوزیت پلی‌یورتان/SiO₂

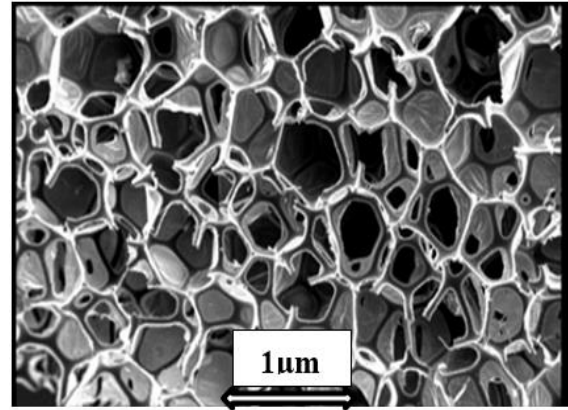


Fig. 3 SEM image pure polyurethane foam

شکل 3 تصاویر SEM اسفنج پلی‌یورتان خالص

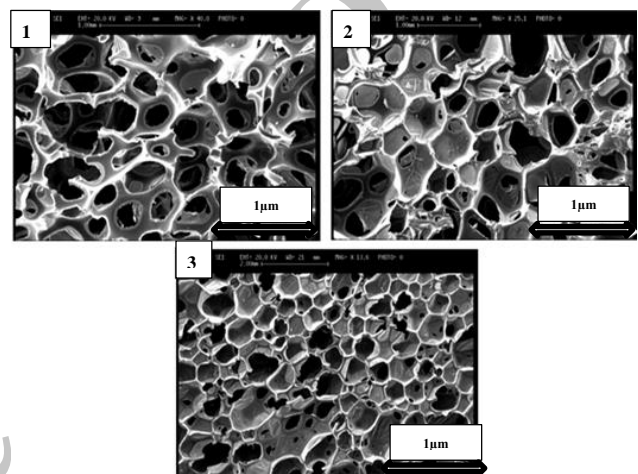


Fig. 4 SEM images 1) pu-0.1 SiO₂, 2) pu-0.2 SiO₂, 3) pu-0.3 SiO₂

شکل 4 تصاویر SEM 1) pu-0.1 SiO₂(1, pu-0.2 SiO₂(2, pu-0.3 SiO₂(3

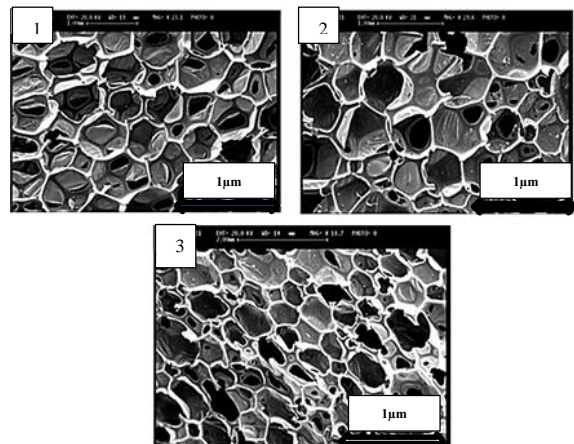


Fig. 5 SEM images 1) pu-0.1 HSNS, 2) pu-0.2 HSNS, 3) pu-0.3 HSNS

شکل 5 تصاویر SEM 1) pu-0.1 HSNS(1, pu-0.2 HSNS(2, pu-0.3 HSNS(3

شکل‌های 4 و 5، تصاویر SEM نمونه‌های نانوکامپوزیتی پلی‌یورتان را با درصدهای وزنی مختلف نانوذرات توپر و توخالی سیلیکا نشان داده است. همان گونه که مشخص است به طور کلی با افزایش درصد وزنی نانوذرات توپر و توخالی در زمینه، میزان ناهمگنی سلول‌ها و همچنین افزایش تعداد

جدول 3 داده‌های حاصل از آزمون کشش نمونه‌های خالص و نانوکامپوزیتی

Table 3 The data obtained from the tensile test for pure and nanocomposite samples

نمونه	استحکام کششی (MPa)	درصد افزایش طول قبل از شکست
Pu-30	0.0801±0.04	190.10±2.01
Pu-0.1 SiO ₂	0.136±0.02	162.5±3.9
Pu-0.2 SiO ₂	0.142±0.01	129.72±3.82
Pu-0.3 SiO ₂	0.151±0.02	105.19±2.43
Pu-0.1 HSNS	0.083±0.05	198±2.12
Pu-0.2 HSNS	0.115±0.049	150±2.05
Pu-0.3 HSNS	0.123±0.05	132±3.94

با توجه به جدول 3 افزایش استحکام کششی در نمونه‌های نانوکامپوزیتی را می‌توان به حضور نانوذرات در زمینه ربط داد. اثر وجود فصل مشترک قوی و چسبندگی سطحی مستحکم میان زمینه و نانوذرات و اثر تقویت‌کنندگی نانوذرات نامبرده نیز نقش مهمی در افزایش استحکام کششی ایفا می‌کند زیرا به واسطه حضور خود در زمینه، سبب افزایش مقاومت دیواره‌های سلولی در برابر شکست شبکه پلیمری می‌شوند [20]. همچنین استحکام نمونه‌های نانوکامپوزیتی تحت تأثیر مورفولوژی سلول‌ها و عیوب غیر قابل کنترل حین ساخت و تجمع و به هم چسبیدن نانوذرات می‌باشد که منجر به افت استحکام و شروع جوانه‌های شکست نمونه می‌شود [22، 21].

3-3- مقایسه رفتار کششی نمونه‌های pu-0.3 SiO₂، pu-0.3 و pu-0.3 HSNS

شکل 10 مقایسه استحکام کششی و درصد افزایش طول قبل از شکست به ازای سه نمونه pu-0.3 SiO₂، pu-0.3 و pu-0.3 HSNS را نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود به طور کلی با افزودن نانوذرات و نانوکامپوزیت‌ها در زمینه اسفنج پلی‌یورتان، استحکام کششی افزایش و درصد زیاد طول کاهش پیدا کرده است. به طوری که به ازای افزودن 0.3٪ وزنی از نانوذرات توپر و توخالی سیلیکا در زمینه، استحکام کششی به ترتیب 78٪ و 34٪ افزایش و زیاد طول نیز 44٪ و 30٪ نسبت به نمونه خالص کاهش داشته است.

نمونه‌های نانوکامپوزیتی پلی‌یورتان/SiO₂ به علت دارا بودن ساختار توپر و همگن و اندازه کوچکتر نسبت به نانوذرات توخالی سیلیکا از استحکام ذاتی بالاتری برخوردار هستند لذا در درصد‌های وزنی مشابه فاز تقویت‌کننده نسبت به نانوکامپوزیت‌های پلی‌یورتان/SiO₂ از توان هسته‌گذاری بیشتری برخوردار بوده که در نهایت منجر به تشکیل تعداد بیشتری از سلول‌های مستحکم در ساختار نهایی نانوکامپوزیت تشکیل شده است (شکل‌های 4 و 5) که در هنگام آزمون کشش به طور موثری از گسیخته شدن شبکه‌های پلیمری و سلول‌های اسفنج جلوگیری می‌کنند. در واقع حضور نانوذرات سیلیکا در زمینه اسفنج شیبه‌پین‌هایی است که با چسبندگی مناسب و خوب در زمینه قرار گرفته‌اند و سبب افزایش استحکام کششی در حین آزمون کشش می‌شوند. اما از طرفی با افزایش نیرو در حین کشش اطراف نانوذرات از استحکام پایین‌تری برخوردار بوده که مناطقی برای شروع جوانه‌زنی و رشد ترک در زمینه به شمار می‌آیند و اسفنج شروع به پارگی می‌کند [23-25].

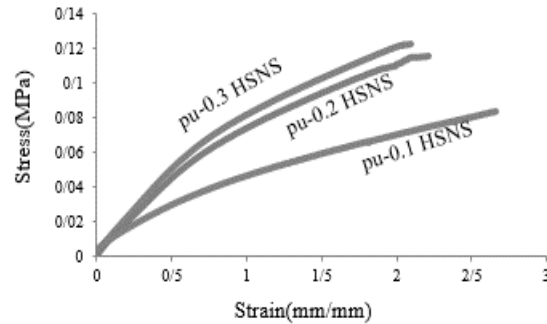


Fig 8 Stress-strain curve of the nanocomposite polyurethane/HSNS

شکل 8 نمودار تنش-کرنش نانوکامپوزیت پلی‌یورتان/HSNS

با توجه به نمودارهای تنش-کرنش شکل‌های 6 تا 8، در تمامی نمونه‌ها پدیده گلوبی شدن مشاهده نمی‌شود و نمونه‌ها قبل از رخداد گلوبی شدن دچار شکست شده‌اند، زیرا اسفنج پلی‌یورتان رفتار کاملاً الاستیک از خود نشان داده است. علت پارگی در نمونه‌های اسفنج الاستیک پلی‌یورتان را می‌توان پارگی قسمت کوچکی از دیواره سلول‌های اسفنج که در سطح خارجی قرار دارند و گسترش پارگی به سطح مقطع نمونه دانست. علت شروع پارگی از سطح خارجی نمونه را می‌توان چنین توجیه کرد که دیواره‌های سلولی در سطح خارجی، تنها بوسیله دیواره‌های سمت داخل اسفنج حمایت می‌شوند در حالی که دیواره‌های سلولی در داخل نمونه از همه طرف توسط سلول‌های مجاور مورد حمایت قرار می‌گیرند پس توزیع تنش بیشتری صورت می‌گیرد. بنابراین اولین جوانه‌های پارگی از سطح نمونه آغاز می‌شوند [18]. شکل 9 آغاز شکست نمونه و پارگی دیواره‌های سلولی از سطح نمونه را در حین انجام آزمون کشش نشان داده است.



Fig. 9 Start of failure from sample surface during tensile test

شکل 9 شروع شکست از سطح نمونه در حین آزمون کشش

به طور کلی فاکتورهایی که سبب ایجاد خطا بر نتایج حاصل از آزمون کشش می‌شوند عبارتند از: 1- ایجاد چاک‌های غیر قابل دید بر نمونه در هنگام برش و به شکل خاص در آوردن آن 2- اندازه‌گیری ضعیف در ناحیه سطح مقطع نمونه برش خورده 3- لغزش نمونه در فک دستگاه، 4- وجود پارگی‌های غیر مشخص و یا وجود سلول‌هایی با اندازه‌های غیر قابل مقایسه با سلول‌های دیگر [19]. نمونه‌های حاصل نیز مستثنا از فاکتورهای ذکر شده نبوده‌اند به همین دلیل شکست دقیقاً از وسط نمونه رخ نداده است.

داده‌های حاصل از آزمون کشش مربوط به نمونه‌های پلی‌یورتان خالص و نانوکامپوزیتی با درصد‌های وزنی مختلف در جدول 3 آمده است.

Glass-Epoxy Composites”, In Persian, Journal of Science and GTechnology of Composites, Vol. 3, No. 3, pp. 225-232, 2016.

[10] Zhang, M. Q. Rong, M. Z. Zhang, H. B. and Friedrich, K., "Mechanical Properties of Low Nano-Silica Filled High Density Polyethylene Composites," Polymer Engineering & Science, Vol. 43, No. 2, pp. 490-500, 2003.

[11] Chen, Y. S. Zhou, Yang, H. and Wu, L., "Structure and Properties of Polyurethane/Nanosilica Composites," Journal of applied polymer science, Vol. 95, No. 5, pp. 1032-1039, 2005.

[12] Saha, M. C., Kabir, M. E., & Jeelani, S." Enhancement in Thermal and Mechanical Properties of Polyurethane Foam Infused with Nanoparticles." Materials Science and Engineering: A, Vol. 479, No. 1, pp. 213-222, 2008.

[13] Rahaman, M.S. Ismail, A.F. and Mustafa A., "A Review of Heat Treatment on Polyacrylonitrile Fiber," Polymer Degradation and Stability, Vol. 92, No. 8, pp. 1421-1432, 2007.

[14] Sun, Z., Lu, C., Fan, J., & Yuan, F. "Porous silica ceramics with closedcell structure prepared by inactive hollow spheres for heat insulation," Journal of Alloys and Compounds, Vol. 662, pp. 157-164, 2016.

[15] L. Feng, Experimental Study of Nucleation in Polystyrene/Carbon Dioxide System. The Ohio State University, 2012.

[16] Edoga M. and Egila, E., "Development and characterization of flexible polyurethane foam: part I–physicochemical and mechanochemical properties," J. Eng. Applied Sci, Vol. 3, No. 8, pp. 647-650, 2008.

[17] ACCOUNTANCY, B. O., "Iregulatory AGENCY ACTION," The California Regulatory Law Reporter, Vol. 4, No. 2, 1984.

[18] Cao, X. Lee, L. J. Widya, T. and Macosko, C., "Polyurethane/Clay Nanocomposites Foams: Processing, Structure and Properties," Polymer, Vol. 46, No. 3, pp. 775-783, 2005.

[19] Sung C. H. et al., "Sound Damping of a Polyurethane Foam Nanocomposite," Macromolecular research, Vol. 15, No. 5, pp. 443-448, 2007.

[20] Gayathri, R. Vasanthakumari, R. and Padmanabhan, C., "Sound Absorption, Thermal and Mechanical Behavior of Polyurethane Foam Modified with Nano Silica, Nano Clay and Crumb Rubber Fillers," Int J Sci Eng Res, Vol. 4, pp. 301-308, 2013.

[21] Montazeri, A. and Naghdabadi, R., "Investigation of the Interphase Effects on the Mechanical Behavior of Carbon 61–367, 2010.

[22] NIGJEH, M. TEHRANI, Z. M. HAGHSHENAS, M. and SHAKHESI, S., "Polyurethane Rigid Foam/Organically Modified Nano Silica Composites," in The NANOCON Conference Proceedings, 2009.

[23] Shadlou, S. Ahmadi-Moghadam, B. and Taheri, F., "The Effect of Strain-Rate on The Tensile and Compressive Behavior of Graphene Reinforced Epoxy/Nanocomposites", Materials and Design, Vol. 59, pp. 439-447, 2014.

[24] Ebrahimzhad Khaljiri, H. Eslami Farsani, R. khorsand, H. and Abbas Banaie, K., "Hybridization Effect of Fibers Reinforcement on Tensile Properties of Epoxy Composites" Journal of Science and Technology of Composite, Vol. 1, No. 2, pp. 21-28, 2015.

[25] Sasidharan, M. Liu, D. Gunawardhana, N. Yoshio, M. and Nakashima, K., "Synthesis, Characterization and Application for Lithium-Ion Rechargeable Batteries of Hollow Silica Nanospheres," Journal of Materials Chemistry, Vol. 21, No. 36, pp. 13881-13888, 2011.

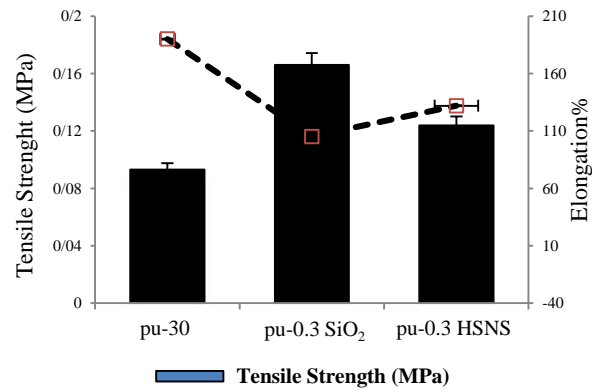


Fig. 10 Comparison of tensile strength and elongation percentage for the different

شکل 10 مقایسه استحکام کششی و درصد افزایش طول برای نمونه‌های مختلف

4- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از آزمون کشش بر روی نمونه‌های خالص و نانوکامپوزیتی نشان داد که به طور کلی حضور نانوذرات توپور و توخالی سیلیکا سبب افزایش استحکام کششی و کاهش درصد از یاد طول در شکست نسبت به نمونه اسفنج پلی‌یورتان خالص شده است. همچنین مشاهده شد که با کاهش میانگین اندازه نانوذرات و افزایش استحکام نانوذرات زنجیره‌های پلیمری قوی‌تر و سلول‌هایی با ابعاد کوچکتر و پنجره‌های بسته و نیمه بسته شکل می‌گیرد که سبب افزایش استحکام کششی و کاهش از یاد طول در نمونه‌های حاصله می‌گردد.

5- مراجع

[1] Chen, Z. Xu, C. Ma, C. Ren, W. and Cheng, H. M., "Lightweight and Flexible Graphene Foam Composites for High-Performance Electromagnetic Interference Shielding," Advanced materials, Vol. 25, No. 9, pp. 1296-1300, 2013.

[2] Gupta, N. Pinisetty, D. and Shunmugasamy, V. C., Reinforced Polymer Matrix Syntactic Foams: Effect of Nano and Micro-Scale Reinforcement. Springer Science & Business Media, 2013.

[3] Javni, I., Zhang, W., Karajkov, V., Petrovic, Z. S., & Divjakovic, V. Effect of Nano-And Micro-Silica Fillers on Polyurethane Foam Properties. Journal of cellular plastics, Vol. 38, No. 3, pp. 229-239, 2002.

[4] Kango, S. Kalia, S. Celli, A. Njuguna, J. Habibi, Y. and Kumar, R., "Surface Modification of Inorganic Nanoparticles for Development of Organic-Inorganic Nanocomposites a Review," Progress in Polymer Science, Vol. 38, No. 8, pp. 1232-1261, 2013.

[5] Goren, K. Chen, L. Schadler, L. S. and Ozisik, R., "Influence of Nanoparticle surface chemistry and size on supercritical carbon dioxide processed nanocomposite foam morphology," The Journal of Supercritical Fluids, Vol. 51, No. 3, pp. 420-427, 2010.

[6] Khosravi, H. and Eslami-Farsani, R., "An experimental investigation into the effect of surface-modified silica nanoparticles on the mechanical behavior of E-glass/epoxy grid composite panels under transverse loading", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 3, No. 1, pp. 11-20, 2016.

[7] Sedghi, A. Eslami Farsani, R. and Shokuhfar, A., "The Effect of Commercial Polyacrylonitrile Fibers Characterizations on the Produced Carbon Fibers Properties," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 198, No. 1-3, pp. 60-67, 2008.

[8] Akherati, S.F, S. R. Mortezaei, M. and Amiri Amraei, I., The Effect of Curing Temperature on Fracture Energy of Nanosilica Filled Epoxy with Different Particle Sizes, In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 3, No. 4, pp. 389-396, 2017.

[9] Abasi, R. Heidary, H. and Pol, M. H., "Experimental Investigation of Carbon Nanotube Addition on Delamination Induced Drilling of