

## بررسی اثر هم‌افزایی حضور نانوذرات $\text{SiO}_2$ و $\text{TiO}_2$ در نانوکامپوزیت‌های پلی‌استایرن و مقایسه خواص حرارتی و مکانیکی آنها

امید رستگار<sup>۱\*</sup>، مازیار دهقانی<sup>۲</sup>، ارجمند مهربانی زین‌آباد<sup>۲</sup> و ابوالفضل محبی<sup>۱</sup>

۱- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد داراب، گروه مهندسی پلیمر، داراب، ایران

۲- دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۸۹/۱۲/۱۵، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۰/۰۱/۱۹، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۰/۰۳/۲۷

### چکیده

در این پژوهش، بهبود خواص مکانیکی مانند ازدیاد طول تا نقطه شکست و مدول یانگ پلی‌استایرن در حضور نانوذرات تیتان و سیلیس مورد بررسی قرار گرفت. از روش محلول جهت سنتز نانوکامپوزیت‌های پلی‌استایرن/سیلیس، پلی‌استایرن/سیلیس/تیتان و پلی‌استایرن/تیتان استفاده شد. برای شکست بهتر تجمع نانوذرات در حلال، از یک همزن مکانیکی مافوق صوت استفاده گردید. مورفولوژی نمونه‌های تولیدی، توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی، میکروسکوپ الکترونی عبوری و آنالیز وزن‌سنجی حرارتی بررسی شد. خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌ها نیز با اندازه‌گیری مدول یانگ، ازدیاد طول تا نقطه شکست و استحکام ضربه‌ای مطالعه شد. نتایج نشان دادند که ازدیاد طول تا نقطه شکست پلی‌استایرن دارای هر دو نانوذره تیتان و سیلیس به طور قابل توجهی بهبود یافت. همچنین، در نمونه ۱٪ وزنی پلی‌استایرن/سیلیس/تیتان، نتایج بیانگر افزایش مدول یانگ، چقرمگی (میزان انعطاف‌پذیری نسبی) و میزان ازدیاد طول تا نقطه شکست بود. این پدیده ناشی از شکست مطلوب ساختار جمع‌ی نانوذرات و همچنین توزیع مناسب آنها در زمینه پلی‌استایرنی است. در این حالت، نانوذرات در حفره‌های کوچک جای گرفته و مانند پلی در بین لایه‌های زمینه عمل می‌کنند و سبب بهبود ازدیاد طول تا نقطه شکست پلی‌استایرن می‌شوند. همچنین، پایداری حرارتی نمونه‌ها به علت ساختار یکنواخت و همگن آنها و کاهش تعداد نقاط نقص، در مقایسه با پلی‌استایرن خالص افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: خواص مکانیکی، خواص حرارتی، پلی‌استایرن، نانوسیلیس، نانو تیتان.

### ۱- مقدمه

و چنگال‌های یکبار مصرف، الگوهای پلاستیکی، روکش‌های CD و DVD و حسگرهای دود خانگی مورد استفاده قرار گیرد. به منظور بهبود خواص انعطاف‌پذیری، سختی و سفتی آن، روش‌هایی مانند افزودن پلی‌بوتادی‌ان به آن برای تولید پلی‌استایرن با مقاومت ضربه‌ای بالا (High Impact Polystyrene, HIPS) متداول گردیده

پلی‌استایرن (Polystyrene) یکی از پرکاربردترین مواد در صنایع پلاستیک است. پلی‌استایرن یک پلیمر سخت با انعطاف‌پذیری محدود است که می‌تواند در قالب‌هایی با طرح‌های ریز و ظریف برای کاربردهای مختلف مانند قاشق

\* عهده‌دار مکاتبات: امید رستگار

نشانی: داراب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد داراب، گروه مهندسی صنایع پلیمر

تلفن: ۰۷۳۲-۶۲۳۳۹۹۱، دورنگار: ۰۷۳۲-۶۲۳۳۹۰۰، پست الکترونیکی: [Rastegar@iaudarab.ac.ir](mailto:Rastegar@iaudarab.ac.ir)

زمینه تاثیر نانوذرات بر پلیمرهایی مانند پلی استایرن وجود دارد. مینگ و همکارانش (Ming et. al.)، رفتار بلورینگی نانوکامپوزیت‌های پلی استایرن پر شده با نانوکربنات کلسیم ( $\text{CaCO}_3$ ) را بررسی کردند [۱۱]. همچنین هونجوگ و همکارانش (Hoonjung et. al.)، نانوکامپوزیت پلی استایرن/ $\text{CdS}$  را مطالعه کردند. آنها در ابتدا توده کوپلیمر قطعه‌ای پلی استایرن را با ایجاد گروه‌های عاملی قطبی اصلاح کردند و سپس نانوکامپوزیت‌های کوپلیمر پلی استایرن/ $\text{CdS}$  اصلاح شده را تولید نمودند. در نهایت، خاصیت فلورسانس نانوکامپوزیت پلی استایرن ساخته شده را بررسی نمودند [۱۲]. در مطالعه‌ای دیگر نیز نانوذرات  $\text{TiO}_2$  در فیلم‌های پلی استایرن جهت ارتقای میزان تخریب فوتوکاتالیستی استفاده شد [۱۳]. همچنین، به کمک  $\text{CO}_2$  فوق بحرانی، توزیع بهتر نانوذرات سیلیس در زمینه پلی استایرن بررسی شد [۱۴]. در خصوص تاثیر حضور نانوذرات استفاده شده در این پژوهش در دیگر زمینه‌های پلیمری نیز مطالعاتی صورت گرفته است. از جمله می‌توان به تهیه نانوکامپوزیت‌های  $\text{PMMA/SiO}_2\text{-CaO}$  با استفاده از دی‌متیل دی‌اتوکسی سیلان و تترا اتوکسی سیلان و بهبود چقرمگی زمینه پلی‌متیل متاکریلات اشاره نمود [۱۵]. در تحقیقی دیگر، با تهیه فیلم‌های نانوکامپوزیت  $\text{PI/SiO}_2$  با مقادیر مختلف سیلیس و از طریق فرآیند سل-ژل، سبب افزایش خواص مکانیکی این نانوکامپوزیت در دمای اتاق گردیدند [۱۶].

علاوه بر بررسی خصوصیات مکانیکی، در مطالعاتی رفتار حرارتی پلی استایرن خالص نیز مورد بررسی قرار گرفته است [۱۷-۲۱]. در این پژوهش، هدف بهبود چقرمگی و استحکام پلی استایرن در حضور نانوذرات نانوسیلیس و نانوتیتان است. نانوکامپوزیت‌های تهیه شده با نانو  $\text{TiO}_2$  مزایای فراوانی دارند که باعث ارتقاء سطح کیفیت، مقاومت مکانیکی و فیزیکی شبکه پلیمری می‌شود [۲۲]. به این منظور، نانوکامپوزیت‌ها به روش محلولی تهیه شدند و تاثیر حضور هر کدام از نانوذرات به تنهایی و توأم با تولید نانوکامپوزیت‌های با زمینه پلی استایرن و در، درصد‌های مختلف نانوذرات مطالعه شد. پس از تهیه، با انجام آزمون‌های مکانیکی و حرارتی، ویژگی‌های هر کدام بررسی و مقایسه شد.

است که در این ترکیب به علت تشکیل پیوندهای شیمیایی، مقاومت ضربه‌ای پلی استایرن شکننده به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. البته کوپلیمرهای دیگری از پلی استایرن مانند استایرن اکریلونیتریل (Styrene Acrylonitrile, SAN) و استایرن مالئیک اسید (Styrene Maleic Acid, SMA) نیز تولید می‌شود که دارای چقرمگی (میزان انعطاف‌پذیری نسبی) و مقاومت ضربه‌ای بالایی هستند. تولید نانوکامپوزیت روشی دیگر جهت بهبود بخشیدن به خواص مکانیکی مواد پلیمری بر حسب نوع نانوذرات مورد استفاده و شرایط فرآیندی آنهاست. خواص نهایی نانوکامپوزیت‌ها به خواص مواد ترکیب شده و نحوه پراکنش و پراکندگی نانومواد در زمینه‌ی پلیمری بستگی دارد. امروزه، مواد نانوکامپوزیتی توجه زیادی را در مجامع علمی برای کاربردهای گوناگون به خود جلب کرده‌اند [۱]. توسعه روش‌های مناسب و در دسترس جهت سنتز مواد در مقیاس نانو، مانند نانوسیلیس و نانوتیتان، فرصت‌هایی را برای محققین ایجاد نموده است تا در طراحی مواد جدید با خواصی بهبود یافته از آنها استفاده کنند. در این بین، نانوکامپوزیت‌های پلیمری با افزودنی‌هایی آلی و غیر آلی در مقیاس نانو، به عنوان گروه جدیدی از مواد برای کاربردهای گوناگون مورد توجه قرار گرفته‌اند. مبحث تاثیر حضور نانوذرات سفت و سخت دارای ابعاد مساوی بر انرژی شکست پلیمر، اغلب متضاد و بحث انگیز است. این اثرات مشاهده شده، با افزایش یا کاهش تعاملات چسبندگی در مرزهای سطحی، تغییر در ساختار کریستالی و ریزکریستالی زمینه پلیمری، یا با تغییرات در مکانیسم تغییر شکل پلیمر در حضور اجزاء نانو توجیه می‌شود. اندازه و میزان توزیع نانوذرات آلی و غیر آلی، تاثیر زیادی بر خواص نهایی پلیمر پایه دارد. در تحقیقات اخیر، مجموعه بزرگی از بهبود خواص مکانیکی نسبت به پلیمر پایه گزارش شده است. بر این اساس استفاده از ذرات معدنی یا آلی در مقیاس نانو در مقایسه با حالت میکرون به عنوان افزودنی، خواص بسیار مطلوب‌تری را برای محصول نهایی ایجاد می‌کند [۹-۲]. استفاده درصد بسیار کمی از نانوذرات به زمینه پلیمری، می‌تواند به طور قابل توجهی خواص مکانیکی محصولات مانند، استحکام، مدول یانگ و چقرمگی را بهبود بخشد [۱۰]. پژوهش‌هایی در

## ۲- فعالیت‌های تجربی

انتخاب شدند. نانوکامپوزیت‌های پلی‌استایرین- نانوتیتان و پلی‌استایرین- نانوتیتان- نانوسیلیس نیز به روش مشابه روش قبل تولید شدند. مشخصات و نام اختصاری اختصاص داده شده به نمونه‌های تهیه شده، در جدول ۱ نمایش داده شده است.

جدول ۱: مشخصات نمونه‌های نانوکامپوزیتی تهیه شده.

Sample-label	Nano filler	Contents (wt.%)
PS-S	SiO <sub>2</sub>	1, 2, 3
PS-ST	SiO <sub>2</sub> +TiO <sub>2</sub>	1, 2, 3
PS-T	TiO <sub>2</sub>	1, 2, 3

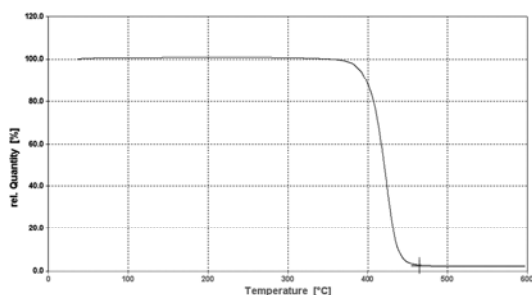


شکل ۱: مراحل مختلف تهیه نمونه‌های نانوکامپوزیتی و آزمون‌های صورت گرفته.

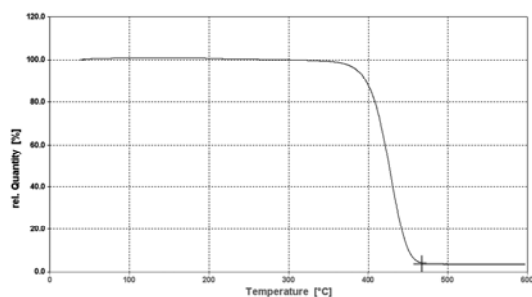
آنالیز وزن‌سنجی حرارتی (TGA) نمونه‌های نانوکامپوزیتی ۳٪ وزنی با تجهیز Dupont 2010 در محدوده دمایی، دمای محیط تا ۶۰۰ °C تحت اتمسفر نیتروژن صورت گرفت. این آزمون با نرخ ۱۰ °C بر دقیقه و با هدف بررسی مطالعه چگونگی تغییرات مقاومت حرارتی نمونه‌های

در این پژوهش، پلی‌استایرین (GPPS-1540) ساخت شرکت پتروشیمی تبریز، نانوسیلیس (SiO<sub>2</sub>-F-110) شرکت شیمیایی فدک و نانوتیتان (TiO<sub>2</sub>-P-25) شرکت Evonic آلمان، به عنوان مواد اصلی در تهیه نانوکامپوزیت مورد استفاده قرار گرفت. سیلیس و تیتان مواد معدنی هستند و تمایل زیادی به تجمع ندارند. با کاهش اندازه ذرات به مقیاس نانو، انرژی سطحی سیلیس و تیتان افزایش یافته و شروع به تجمع خواهند کرد. در نتیجه برای تهیه نانوکامپوزیت پلی‌استایرین- نانوسیلیس، پلی‌استایرین- نانوتیتان و پلی‌استایرین- نانوتیتان- نانوسیلیس نمی‌توان از روش‌های فیزیکی جهت اختلاط و تهیه نانوکامپوزیت با پراکنش بالا استفاده کرد. به همین علت، از روش محلولی استفاده شد. از حلال تولونین برای این هدف استفاده شد. مراحل مختلف تهیه نمونه‌ها و آزمون‌های صورت گرفته، به تفکیک در شکل ۱ نمایش داده شده است. به منظور تهیه نانوکامپوزیت‌ها، ابتدا ۱۶ گرم نانوسیلیس درون حلال ریخته شد و در دمای حدود ۷۰ °C بوسیله همزن مغناطیسی به طور کامل درون حلال توزیع گردید. جهت پراکندگی بهتر، ترکیب حاصل در دستگاه همزن مافوق صوت به مدت ۱۵ دقیقه و با طول موج ۵۰ مگاهرتز قرار داده شد. از سوی دیگر، پلی‌استایرین در تولونین با ترکیب درصد وزنی ۳۰٪ پلی‌استایرین در تولونین و در دمای حدود ۷۰ °C بوسیله همزن مکانیکی تهیه شد. سپس، این دو ترکیب به هم افزوده شده و در دمای ۷۰ °C به وسیله همزن مکانیکی، ترکیبی همگن با ویسکوزیته بالا تولید گردید. ترکیب نهایی، از خارج کردن حلال ترکیب حاصل از مرحله قبل به کمک آون خلا حاصل می‌شود. ترکیب درصد نانوسیلیس در ترکیب پلی‌استایرین ۱۷٪ وزنی است. در نهایت، برای تولید نانوکامپوزیت‌های ۱، ۲ و ۳٪ وزنی از اکسترودر دو مارپیچه و با رقیق‌سازی ترکیب پلی‌استایرین غنی از نانوذرات استفاده گردید. چون با افزایش ترکیب درصد به درصدی بالا، شکست تجمع ذرات و توزیع آنها با مشکل روبرو خواهد شد [۲۳]، در نتیجه حد بالایی ترکیب درصدها ۳٪ تعیین شد. همچنین به منظور مقایسه و مشاهده روند تغییرات نسبت به نمونه خالص، درصد‌های ۱٪ و ۲٪

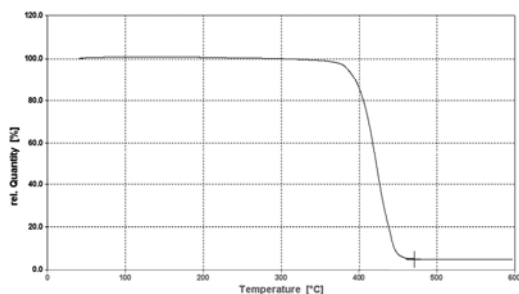
نانوسیلیس تاثیر مشهودی بر پایداری حرارتی پلی استایرن دارد. پایداری حرارتی پلی استایرن در حضور نانوتیتان یا نانوسیلیس و یا ترکیبی از آن دو حدود  $50^{\circ}\text{C}$  افزایش می یابد. در این نمونه های نانوکامپوزیتی، پایداری حرارتی به حدود  $470^{\circ}\text{C}$  رسید که این دما برای پلی استایرن خالص حدود  $420^{\circ}\text{C}$  است.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۲: منحنی های آنالیز وزن سنجی حرارتی نمونه های  
الف) PS-S3، ب) PS-S3 و ج) PS-T3.

نتایج نشان می دهد که حضور هر کدام از این دو نانوذره به تنهایی و یا به صورت توأم، تاثیر یکسانی بر پایداری حرارتی پلی استایرن دارد. این امر بیانگر حضور مفید نانوذرات پراکنده شده و همچنین پراکندگی مناسب آنها در زمینه پلی استایرن است. پلاستیک های عمومی مانند پلی استایرن در برابر حرارت مقاومت چندانی ندارند. با

نانوکامپوزیتی انجام شد. ساختار و توزیع نانوذرات نمونه ها به کمک آزمون میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مورد بررسی قرار گرفت. به منظور مقایسه میزان پراکندگی و همچنین میزان شکست تجمع نانوذرات، این تصویرها در بزرگنمایی یکسان ۲۰۰۰۰ برابر از نمونه ها تهیه شدند. استحکام کششی و مقاومت ضربه ای نمونه ها به کمک تجهیز Zwich/Roell مطالعه شد. نمونه ها بر اساس استاندارد ISO-257 قالب گیری و آنالیز شدند. آزمون های مقاومت کششی با شدت ۵ میلی متر بر دقیقه و آزمون های استحکام ضربه ای با شدت ۲/۹ متر بر ثانیه و بدون ناچ انجام پذیرفت.

### ۳- نتایج و بحث

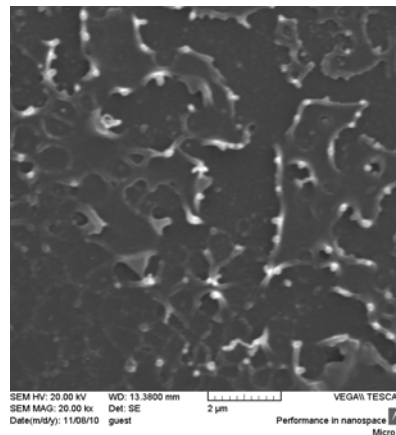
در کار حاضر، نانوپودرهای کاتالیستی تهیه شده در یک کوره تیوپی اتمسفر کنترلی انتقال داده شد. دمای کوره در یک محیط گاز خنثی تا دمای  $700^{\circ}\text{C}$  بالا برده شد. پایداری حرارتی یکی از مهمترین خواصی است که تعیین کننده شرایط فرآیندی و کاربرد مواد است. فاکتورهای فراوانی مانند ساختار واحد تکراری، کریستالینیتی و گروه های عاملی بر پایداری حرارتی موثر هستند. شکل ۲ منحنی TGA نمونه های با ۳٪ وزنی از انواع نانوذرات مورد استفاده را نشان می دهد. نرخ حرارت دهی نمونه ها  $10^{\circ}\text{C}$  بر دقیقه است.

گراف TGA بیانگر تغییرات وزن نمونه در اثر اعمال حرارت است که دو پارامتر مهم را نشان می دهد؛ یکی پایداری حرارتی و دیگری درصد یا مقدار مواد باقیمانده در دمای مورد نظر است. در حقیقت این آزمون نشانگر مقدار موادی است که در دمای مورد نظر، هنوز نسوخته و باقی مانده اند. از آنجا که مواد معدنی اغلب تا بیش از  $1200^{\circ}\text{C}$  مقاومت حرارتی دارند، با رسیدن به دمای  $420^{\circ}\text{C}$  که پلی استایرن سوخته و از بین می رود، هنوز وجود دارند. حال چون هر دو نوع نانوذره از جنس معدنی هستند و در درصد های یکسانی در یک ماتریس یکسان (پلی استایرن) مورد استفاده قرار گرفته اند، به همین علت ویژگی یکسانی را نشان داده اند که گراف های ارائه شده بیانگر این امر هستند. آنالیز TGA نانوکامپوزیت های مختلف پلی استایرن نشان می دهد که حضور مقدار اندکی نانوتیتان و

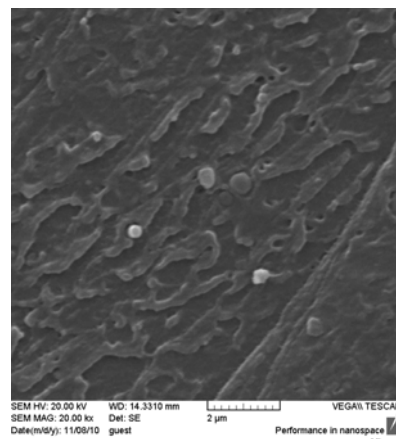
شکل ۳، نتایج آنالیز ساختار توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نانوکامپوزیت‌های بر پایه نانوذرات  $\text{TiO}_2$  و  $\text{SiO}_2$  را نشان می‌دهد. با توجه به تصویرهای ارائه شده، توزیع این نانوذرات در زمینه پلی‌استایرن بسیار خوب صورت گرفته است، به طوری که متوسط اندازه تجمع‌های شکسته نانوذرات در نمونه‌های PS-S، PS-ST و PS-T به ترتیب حدود ۳۰۷، ۲۳۰ و ۱۲۰ نانومتر است. بنابراین نتیجه می‌شود که در نمونه‌هایی که هر دو نانوذره حضور دارند، حضور نانوذرات  $\text{TiO}_2$  سبب شکسته شدن بهتر تجمع‌های نانوذره‌های  $\text{SiO}_2$  می‌گردد که این امر بیانگر اثر هم‌افزایی حضور این دو نانوذره است.

شکل ۴، نتایج آنالیز ساختار توسط میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) نانوکامپوزیت‌های بر پایه نانوذرات  $\text{TiO}_2$  و  $\text{SiO}_2$  را نشان می‌دهد. مقیاس هر سه تصویر ۲۰۰ نانومتر است که در پایین آنها نشان داده شده است. متوسط اندازه نانوذرات سیلیس ۳۰ نانومتر و تیتان کمتر از ۱۰ نانومتر است که تصویرهای ارائه شده نیز این موضوع را تایید می‌کنند. تصویر ذرات  $\text{SiO}_2$  تیره‌تر از ذرات  $\text{TiO}_2$  است. با توجه به تصویر ۴-ب، اثر هم‌افزایی حضور توام ذرات  $\text{SiO}_2$  و  $\text{TiO}_2$  به وضوح قابل بررسی است. مشاهده می‌شود که تجمع ذرات تیره‌تر و روشن، که به ترتیب نانوسیلیس و نانوتیتان هستند، بسیار خوب شکسته شده و این نانوذرات به خوبی درون یکدیگر توزیع گردیده‌اند. همچنین نتیجه می‌شود که حضور نانوذرات  $\text{TiO}_2$  سبب شکسته شدن بهتر تجمع‌های نانوذره‌های  $\text{SiO}_2$  نیز می‌گردد که این امر بیانگر اثر هم‌افزایی حضور این دو نانوذره است. تغییرات ازدیاد طول تا نقطه شکست نمونه‌ها در شکل ۵ نمایش داده شده است. نقطه شروع برای هر سه نمونه نانوکامپوزیتی، یک نمونه و در واقع همان پلی‌استایرن خالص است که بعنوان مرجع برای مقایسه همه نانوکامپوزیت‌ها استفاده شده است. به عبارتی دیگر هر سه نوع نمونه در ترکیب درصد صفر از نانوذرات، همان نمونه خالص پلی‌استایرنی می‌شوند، به همین دلیل هر سه گراف از یک نقطه شروع می‌شوند. نتایج نشان می‌دهد که حضور نانوتیتان مانند هر ذره سخت دیگر ازدیاد طول تا نقطه شکست را کاهش می‌دهد. این در حالی است که اضافه کردن نانوسیلیس، ازدیاد طول تا نقطه شکست را منجر می‌شود.

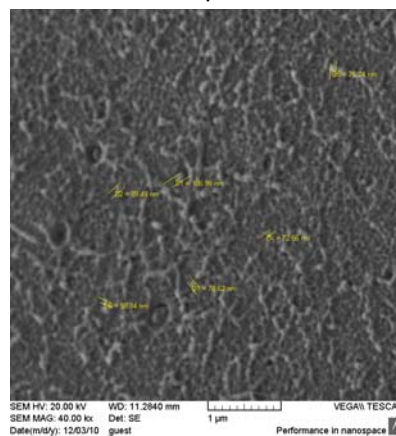
حضور نانوذرات معدنی مانند تیتان و سیلیس که مقاومت حرارتی بسیار بالایی دارند، می‌تواند به طور متوسط مقاومت نانوکامپوزیت حاصل را افزایش داد.



(الف)



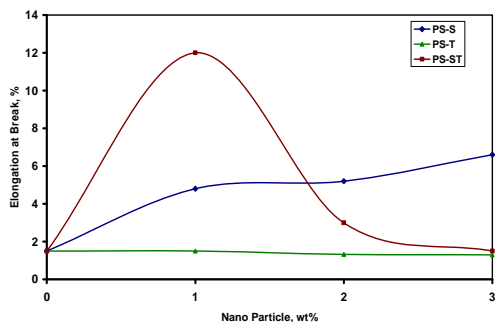
(ب)



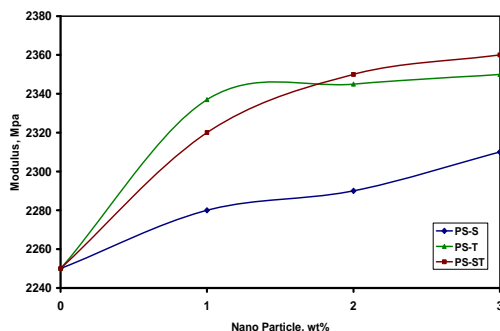
(ج)

شکل ۳: تصویرهای SEM نمونه‌های PS-S3 (الف)، PS-ST3 (ب) و PS-T3 (ج)

نانوذره و پراکندگی مناسب آنها در زمینه پلی‌استایرن در ترکیب درصد پایین ۱٪ است. در این حالت، نانوذرات با حضور در نقص‌ها و شکاف‌های زمینه پلیمری و مانند پلی با ایجاد پیوستگی مناسب، باعث افزایش خواص مکانیکی شده‌اند. این امر منجر به تحمل نیروی بالاتر، دفع انرژی بیشتر و تقویت چقرمگی پلی‌استایرن شده است. میزان بهبود خواص برای ترکیب درصدهای بالاتر نانوذرات کمتر است. دلایل اصلی این امر شامل تفکیک کمتر ساختار توده‌های نانوذرات و اثر هم‌افزایی کمتر آنها در درصدهای بالاتر و همچنین حضور مقدار اضافی نانوذرات بیش از نقص‌های موجود در زمینه نانوکامپوزیت است. شکل ۶، تغییرات مدول یانگ نمونه‌ها نسبت به تغییر ترکیب درصد نانوذرات را نشان می‌دهد.

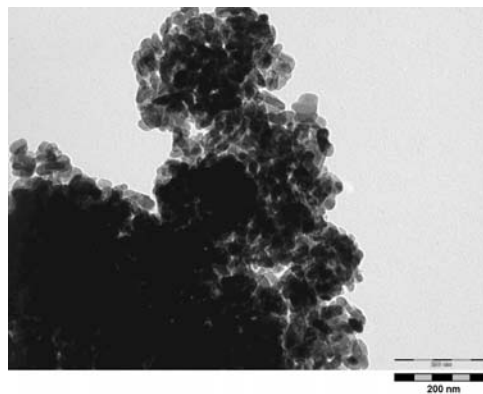


شکل ۵: تغییرات ازدیاد طول تا شکست نمونه‌های نانوکامپوزیتی با تغییر درصد نانوذرات.

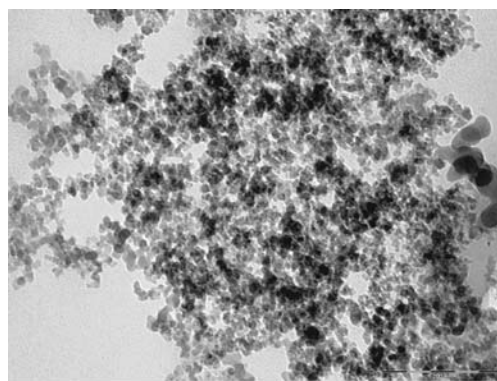


شکل ۶: تغییرات مدول یانگ نمونه‌های نانوکامپوزیتی با تغییر درصد نانوذرات.

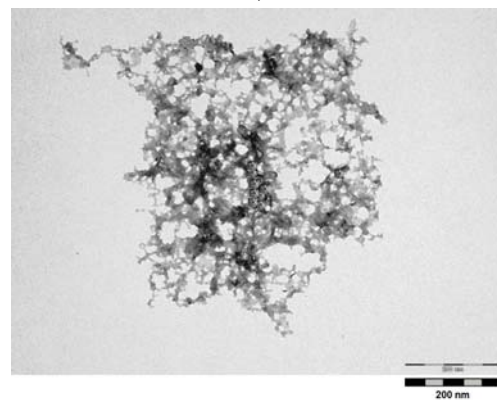
با توجه با منحنی‌ها، با حضور نانوذرات در زمینه پلی‌استایرنی، مدول یانگ نمونه‌ها بهبود می‌یابد. همچنین این میزان با افزایش درصد نانوذرات، افزایش می‌یابد. این امر بیانگر وجود توزیع و پیوند مناسب نانوذرات سخت



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۴: تصویرهای TEM نمونه‌های:

الف) PS-S3، ب) PS-ST3 و ج) PS-T3.

نمونه ۱٪ وزنی ترکیب این دو نانوذره در پلی‌استایرن، نتایج قابل توجه ازدیاد طول تا نقطه شکست را نشان داد. در این نمونه، ۱۲٪ افزایش مشاهده گردید. اما این میزان افزایش برای نمونه ۳٪ وزنی ترکیب این دو نانوذره، به ۱/۵٪ کاهش یافت. این پدیده به علت شکست خوب تجمع ساختار نانوذرات در حالت حضور همزمان این دو نوع

تیتان و سیلیس است. همچنین نتایج نشان داد که در حالت ترکیب ۱٪ وزنی تیتان و سیلیس در پلی‌استایرن، مدول یانگ و ازدیاد طول پلی‌استایرن در نقطه شکست به طور همزمان افزایش یافت. این پدیده به علت شکست خوب تجمع ساختار نانوذرات در حالت حضور همزمان این دو نوع نانوذره و پراکندگی مناسب آنها در زمینه پلی‌استایرن است. در این حالت، نانوذرات با حضور در نقص‌ها و شکاف‌های زمینه پلیمری و مانند پلی با ایجاد پیوستگی مناسب، باعث افزایش خواص مکانیکی شده‌اند. این امر منجر به تحمل نیروی بالاتر، دفع انرژی بیشتر و تقویت چقرمگی پلی‌استایرن شده است. میزان بهبود خواص برای ترکیب درصدی بالاتر نانوذرات کم‌تر است. دلایل اصلی این امر شامل تفکیک کمتر ساختار توده‌ای نانوذرات و اثر هم‌افزایی کمتر آنها در درصدی بالاتر و همچنین حضور مقدار اضافی نانوذرات بیش از نقص‌های موجود در زمینه نانوکامپوزیت است. نتایج حاصل، بیانگر روش موثر تولید نانوکامپوزیت‌ها است که توزیع و پراکندگی مناسب نانوذرات را به همراه دارد و نتیجه آن تولید پلی‌استایرن با چقرمگی بهبود یافته خواهد بود.

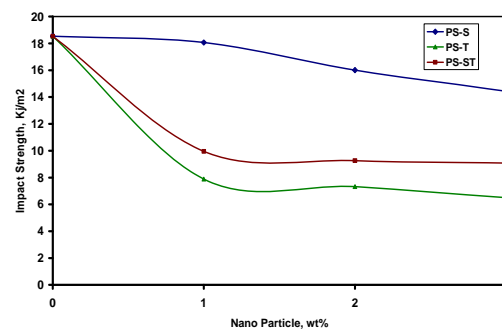
## سپاسگزاری

بدینوسیله محققان از دانشگاه آزاد اسلامی واحد داراب برای تامین اعتبار این طرح پژوهشی تشکر و قدردانی می‌نمایند.

## مراجع

- [1] W.T. Wondmagegn, S.A. Curran, *Thin Solid Films*, **515**, 2006, 2393.
- [2] Q.X. Zhanga, Z.Z. Yu, X.L. Xie, Y.W. Mai, *Polymer*, **45**, 2004, 5985.
- [3] T. Guo, L. Wang, A. Zhang, T. Cai, *Journal of Applied Polymer Science*, **97**, 2005, 1154.
- [4] A. Lazzeri, S.M. Zebarjad, M. Pracella, K. Cavalier, R. Rosa, *Polymer*, **46**, 2005, 827.
- [5] C.M. Chan, J. Wu, J.X. Li, Y.K. Cheung, *Polymer*, **43**, 2002, 2981.
- [6] S. Mishra, A. Mukherji, *Journal of Applied Polymer Science*, **103**, 2007, 670.
- [7] W. Wan, D. Yu, Y. Xie, X. Guo, W. Zhou, J. Cao, *Journal of Applied Polymer Science*, **102**, 2006, 3480.
- [8] M.A. Osman, A. Atallah, *Polymer*, **47**, 2006, 2357.
- [9] T. Ramanathan, S. Stankovich, D.A. Dikin, H. Liu, H. Shen, S.T. Nguyen, L.C. Brinson, *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, **45**, 2007, 2097.

معدنی نانوتیتان و نانوسیلیس با زمینه پلیمری است که سبب سخت‌تر شدن و افزایش مدول آن می‌گردد. کمیت دیگر مورد بررسی، مقاومت ضربه‌ای نمونه‌هاست که نتایج آن در شکل ۷ مشاهده می‌شود. این کمیت در همه نمونه‌های نانوکامپوزیتی نسبت به پلی‌استایرن خالص، دچار کاهش شده است که این افت خواص در هنگام افزودن مواد خارجی سخت به ماتریس پلیمری امری طبیعی است. قابل توجه است که این میزان کاهش، در نمونه حاوی نانوسیلیس به تنهایی، از دو نمونه دیگر کمتر است. با توجه به نمودارها، شیب افت در نمونه حاوی نانوسیلیس به تنهایی بسیار بیشتر از دو نمونه دیگر است و این در حالی است که کمترین افت و شیب کمتر کاهش روند نمودار خاصیت ضربه‌پذیری، مربوط به نمونه حاوی نانوسیلیس و نانوتیتان توأم است. در نتیجه در این ویژگی نیز اثر مطلوب حضور توأم این دو نانوذره مشهود است.



شکل ۷: تغییرات مقاومت ضربه‌ای نمونه‌های نانوکامپوزیتی با تغییر درصد نانوذرات.

## ۴- نتیجه‌گیری

پلی‌استایرن از پلیمرهای بسیار مهم است که در مصارف عمومی کاربرد فراوانی دارد. این پلیمر به دلیل شفافیت، فرآیندپذیری خوب و هزینه تولید پایین، استفاده گسترده‌ای در صنعت دارد. اما پلی‌استایرن یک ماده شکننده است و کرنش در شکست پایینی دارد که این امر استفاده پلی‌استایرن را در بسیاری از کاربردها محدود می‌سازد. بنابراین مطالعه خواص مکانیکی و به خصوص چقرمگی پلی‌استایرن از جاذبه اقتصادی مناسبی برخوردار است. نتایج حاصل از این پژوهش بیانگر افزایش مشهود کرنش در نقطه شکست پلی‌استایرن با استفاده از نانوذرات

- [18] M.T. Sousa Pessoa de Amorim, C. Bouster, P. Vermande, J. Veron, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, **3**, 1981, 19.
- [19] M. Krauze, J. Trzeszczynski, M. Dzieciol, *Polimery-W*, **48**, 2003, 701.
- [20] U.K.O. Schroeder, K.H. Ebert, A.W. Hamielec, *Makromolekulare Chemie-Macromolecular Chemistry and Physics*, **185**, 1984, 991.
- [21] I.C. McNeill, M. Zulfiqar, T. Kousar, *Polymer Degradation and Stability*, **28**, 1990, 131.
- [۲۲] صاحبعلی منافی، علی اصغر روحانی، محمود تبریزی و سید حسین بدیعی، "تهیه نانوکریستال های  $TiO_2$  با استفاده از فرآیند ژلاسیون و بررسی ریزساختارهای آن"، مجله تحقیقات مواد نانوکامپوزیتی، ۲، ۱۳۸۸، ۹۵.
- [23] L.J. Lee, C. Zeng, X. Cao, X. Han, J. Shen, G. Xu, *Composites Science and Technology*, **65**, 2005, 2344.
- [10] M. Lu, W.H. Zhou, K.C. Mai, *Key Engineering Materials*, **334-335**, 2007, 725.
- [11] H.J. Kim, M.J. Han, E. Kim, *Key Engineering Material*, **277**, 2005, 1035.
- [12] L. Zan, L. Tian, Z. Liu, Z. Peng, *Applied Catalysis A-General*, **264**, 2004, 237.
- [13] M.K. Do, H. Yuvaraj, M.H. Woo, H.G. Kim, E.D. Jeong, K.P. Johnston, K.T. Lim, *Colloid and Polymer Science*, **286**, 2008, 1343.
- [14] K.H. Lee, S.H. Rhee, *Biomaterials*, **30**, 2009, 3444.
- [15] Z.D. Wanga, J.J. Lu, Y. Li, S.Y. Fu, S.Q. Jiang, X.X. Zhao, *Composites Part A-Applied Science and Manufacturing*, **37**, 2006, 74.
- [16] T.V. Nguyen, H.C. Lee, M.A. Khan, O.B. Yang, *Solar Energy*, **81**, 2007, 529.
- [17] Z. Yang, E.S. Thian, R.A. Brooks, N. Rushton, S.M. Best, R.E. Cameron, *Key Engineering Materials*, **361-363**, 2008, 459.