

ISME2014-0909

## بررسی فروپاشی سازه های جدار نازک ساخته شده از نانوکامپوزیت های اپوکسی / سیلیکا

محمود شریعتی<sup>۱</sup>، غلامعلی فرزی<sup>۲</sup>، علی دادرسی<sup>۳</sup>، محمد امیری محمود حق<sup>۴</sup>

استاد- دانشگاه صنعتی شاهرود / mshariati44@gmail.com

استادیار- دانشگاه حکیم سبزواری / Alifarzi@yahoo.com

دانشجوی دکتری- دانشگاه صنعتی شاهرود / Ali.dadrasi@gmail.com

دانشجوی کارشناسی ارشد- دانشگاه حکیم سبزواری / Mohammad.amiri2012@yahoo.com

### چکیده

اثر افزودن نانوذرات کروی سیلیکا با اندازه ذرات متوسط ۱۷ nm و ۶۵ nm بر رزین اپوکسی و تأثیر آن بر قابلیت جذب انرژی سازه های کامپوزیتی بررسی شده است. در این تحقیق فروپاشی شبه استاتیکی سازه هایی به شکل مخروط ناقص<sup>۱</sup> مورد بررسی قرار گرفته و سطح شکست توسط یک میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی شده است. نتایج نشان می دهد که افزودن نانوذرات سیلیکا باعث کاهش قابلیت جذب انرژی مخروطها شده و سازه ها تحت یک مود ناپایدار و خطرناک دچار فروپاشی می شوند. همچنین نتایج نشان می دهد که اندازه ی نانوذرات تأثیر قابل توجهی بر قابلیت جذب انرژی ندارد.

### واژه های کلیدی

فروپاشی، سازه های جدار نازک، نانوکامپوزیت، سیلیکا، قابلیت جذب انرژی.

### مقدمه

پلیمرها بخاطر خواص یکتایی نظیر سادگی تولید، وزن سبک و غالباً طبیعت انعطاف پذیری که دارند، نقش مهمی را در زندگی روزمره ایفا می کنند. اما نیاز است که برخی خواص آنها نظیر استحکام، چقرمگی شکست و قابلیت جذب انرژی را با افزودن برخی نانوذرات بهبود بخشید. تقویت پلیمرها با استفاده از مواد آلی و معدنی بسیار مرسوم می باشد [۵-۱]. از دیرباز در بحث قابلیت جذب انرژی، فلزات بخاطر تغییر شکل پلاستیکشان مورد توجه قرار گرفته اند [۶ و ۷]. کامپوزیتها بخاطر طبیعت شکننده ای که دارند کمتر به عنوان جاذب انرژی مورد توجه قرار گرفته اند ولی چنانچه بتوان آنها را به گونه ای مناسب تقویت کرد، می توانند مقادیر زیادی از انرژی برخورد را از طریق خورد شدن<sup>۲</sup> و یا لایه لایه شدن<sup>۳</sup> جذب کنند [۸]. پلیمرهایی نظیر پلی پروپیلن و پلی آمید بخاطر رفتارهای مکانیکی و فیزیکی مناسب و هزینه اندک، بطور گسترده ای در صنایعی نظیر خودروسازی بکار گرفته می شوند اما مقاومت به ضربه و قابلیت جذب انرژی آنها پایین است، از این رو می توان با افزودن تقویت کننده هایی

<sup>۱</sup> Frusta

<sup>۲</sup> Crashing

<sup>۳</sup> Delamination

نظیر نانوذرات  $\text{SiO}_2$ ،  $\text{TiO}_2$ ،  $\text{CaSiO}_3$  و یا نانولوله های کربنی و یا نانولایه های رس و گرافن، تا حدودی این مشکل را برطرف نمود [۹ و ۱۰]. در میان ساختارهای سبک ساخته شده از کامپوزیت های پلیمری، نانوذره سیلیکا بخاطر خواص مکانیکی خوب و پایداری حرارتی بالا، بیشتر مورد توجه قرار گرفته است [۱۱-۱۳].

تحقیقات بسیاری در زمینه تأثیر نانوذرات بر رفتار مکانیکی نانوکامپوزیت های پلیمری و پارامترهای مؤثر در بالا بردن قابلیت آنها، انجام شده است. بصورت کلی می توان این پارامترها را در دسته های، شکل ذرات [۱۴]، اندازه ذرات [۶ و ۱]، ماده زمینه و تقویت کننده [۱۵]، استحکامات فصل مشترک و مشخصات فازهای میانی [۲ و ۱۴]، کسر حجمی و کیفیت توزیع تقویت کننده درون ماتریس [۱۶] تقسیم بندی کرد. به منظور بررسی میزان جذب انرژی در سازه های کامپوزیتی، آزمایش فروپاشی لوله ها بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. توانایی سازه های کامپوزیتی برای جذب انرژی به مود شکست بستگی دارد. موادی که بصورت پیش رونده دچار فروپاشی شده و در حین شکست دچار پارگی و تکه تکه شدن می شوند، انرژی بیشتری را نسبت به مواد ترد و شکننده، جذب می کنند [۱۷-۱۹].

با یک بررسی دقیق ملاحظه می شود که تاکنون تحقیق چندانی روی قابلیت جذب انرژی نانوکامپوزیت های به شکل مخروط ناقص انجام نشده است. بنابراین، احتمالاً مقاله ی حاضر، جزو اولین گزارشات در مورد قابلیت جذب انرژی نانوکامپوزیت های مخروطی پایه اپوکسی تقویت شده با نانوذرات سیلیس است.

### جزئیات آزمایش

#### ۱. مواد

رزین اپوکسی آزمایش شده، بر پایه ی بیسفنول A و با نام تجاری ML-504 بوده که از شرکت مواد مهندسی مکرر تهیه شده است. همچنین نانوذرات کروی سیلیکا ( $\text{SiO}_2$ ) با اندازه ذرات متوسط ۱۷ nm و ۶۵ نانومتر از شرکت US-nano تهیه شده که دارای خلوص بالای ۹۹/۵ درصد است و به شکل پودر سفید رنگ می باشد. لازم به ذکر است که بازه اندازه ذرات با اندازه متوسط ۱۷ nm، ۶۵ nm و ۱۵-۲۰ nm بازه ذرات با اندازه متوسط ۶۵ nm، ۶۰-۷۰ nm می باشد. هاردنر تهیه شده، هاردنر پلی آمینی HA-12 است. چگالی رزین بکار رفته  $1110 \text{ kg/m}^3$  و چگالی نانوذرات سیلیکا  $2400 \text{ kg/m}^3$  است.

## ۲. آماده سازی نانوکامپوزیت

در این تحقیق، پلیمر ترموست بر پایه‌ی بیسفنول A، با افزودن صفر تا ۶ درصد وزنی نانوذرات کروی SiO<sub>2</sub> تقویت شده است. رزین اپوکسی از نوع ML-504 بوده که از شرکت مواد مهندسی مکرر تهیه شده است. علت انتخاب این رزین، پایین بودن نسبی ویسکوزیته‌ی آن نسبت به سایر موارد موجود است که این امر به محققین این امکان را داد تا به راحتی بتوانند از آن در سیستم‌های قالبگیری حساس و ظریف استفاده نموده بدون آنکه در مدل بدست آمده اشکال و وضعی به جای بماند. همچنین با توجه به غلظت پایین محصول، امکان استفاده‌ی آن به همراه انواع پرکننده‌های معدنی فراهم است.

رزین و نانوذرات سیلیکا با درصد وزنی مورد نظر، توسط یک همزن مکانیکی به مدت حدوداً یک ساعت با یکدیگر ترکیب شده است. در ضمن ترکیب مواد، جهت توزیع بهتر ذرات در زمینه پلیمری، از سوبالستین<sup>۴</sup> به عنوان عامل توزیع به میزان یک درصد وزنی نانوذرات استفاده شده است. سپس ترکیب به مدت دو ساعت درون پمپ خلاء دسیکاتور قرار گرفته تا گازهای احتمالی که در مرحله هم‌زدن مواد وارد ترکیب شده، خارج گردد. در ادامه، هاردنر پلی آمینی HA-12 را به ترکیب اضافه کرده و اجازه داده شد تا ترکیب بصورت مکانیکی تحت خلأ به مدت پنج دقیقه هم زده شود. سرانجام، ترکیب را در قالب‌های فلزی که از پیش ساخته شده و واکس قالب نیز به عنوان عامل رها ساز به آن زده شده بود، قالب‌گیری کردیم. مدت زمان پخت اولیه نمونه‌ها در دمای محیط ۲۴ ساعت است که بعد از آن می‌توان آنها را از قالب خارج کرده و جهت پخت نهایی محصول، می‌بایست به آنها هفت روز فرصت داد.

نمونه‌های ساخته شده همگی دارای مشخصات یکسانی به شرح زیر هستند: ارتفاع ۱۰۹ mm، قطر کوچک داخلی ۴۴ mm، قطر بزرگ داخلی ۶۰ mm، ضخامت پوسته ۲/۵ mm.

کدگذاری نمونه‌ها به این ترتیب است که کامپوزیت‌های حاوی نانوذرات با اندازه متوسط ۱۷ nm، با حرف S و کامپوزیت‌های حاوی نانوذرات با اندازه متوسط ۶۵ nm، با حرف L نشان داده شده‌اند؛ همچنین، عدد نشان داده شده در پشت این حروف، مبین درصد وزنی نانوذرات سیلیس بکار رفته در ترکیب است. کد NE نیز معرف اپوکسی خالص است.

## ۳. آزمایش جذب انرژی

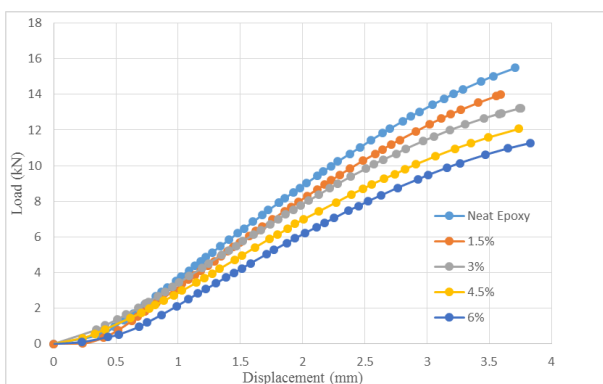
این آزمایش توسط یک دستگاه سروهیدرولیک اینسترون ۸۸۰۲ انجام شده است. نمونه‌ها همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده‌اند، بین دو صفحه فولادی قرار گرفته و با نرخ ۵ mm/min تحت فشار شبه استاتیکی قرار می‌گیرند. تکرارپذیری برای هر نمونه چهار مرتبه است.



شکل ۱: نمونه کامپوزیتی تحت آزمایش جذب انرژی.

## بحث و نتیجه‌گیری

رفتار شکست و قابلیت جذب انرژی پوسته‌های مخروطی ساخته شده از کامپوزیت پایه پلیمری تقویت شده با نانوذرات سیلیکا، در این بخش مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. همانطور که در شکل ۲ ملاحظه می‌شود، قابلیت جذب انرژی با افزایش محتوای نانوذرات دچار افت شده است که این امر می‌تواند به چند دلیل باشد؛ نخست اینکه نانوذرات سیلیس، علی‌رغم اینکه باعث افزایش مدول یانگ و چقرمگی شکست می‌شوند [۱۶ و ۲۰]، ولی بخاطر اینکه ذاتاً صلب هستند، طبیعی است که در فشار نتوانند رفتار انعطاف‌پذیری از خود نشان داده و در نتیجه باعث تردی نمونه‌ها می‌شوند و همانطور که در این شکل ملاحظه می‌شود، روند نمودار کاملاً یکنواخت و صاف است که تأییدی بر صلبیت نانوکامپوزیت مورد بررسی دارد.



شکل ۲: نمودار بار-جابجایی برای کامپوزیت تقویت شده با نانوذراتی به قطر ۱۷ nm (سری S)

ثانیاً این موضوع را می‌توان به مکانیزم رشد ترک موجود مربوط دانست. چنانچه ترک‌های محوری در مراحل ابتدایی آزمایش شکل گیرد و در امتداد ارتفاع سازه گسترش یابد، باعث ضعف آن می‌شود، در نتیجه بار مورد نیاز برای فروپاشی نمونه‌های کامپوزیتی، کمتر از بار مورد نیاز برای فروپاشی اپوکسی خالص خواهد شد. این در حالیست که اگر در همان مراحل اول بارگذاری، تغییر شکل پلاستیک در نمونه ایجاد شده و نمونه بر اثر ایجاد لولاهای پلاستیک دچار چین خوردگی شود، نمودار بار-جابجایی نمونه‌ها دیگر یکنواخت نبوده و دارای قله و دره‌های متعدد خواهد بود که ناشی از چین خوردگی نمونه است و لذا میزان جذب انرژی کامپوزیت نسبت به نمونه اپوکسی خالص، افزایش خواهد یافت [۲۱ و ۲۲]. بنا به همین دلایل، طول جذب انرژی سازه (میزان کوتاه شدن نمونه) زیاد نیست. این موضوع را می‌توان به خوبی در شکل ۳ مشاهده کرد که نمونه بر اثر رشد ترک‌های محوری دچار فروپاشی شده است. در این شکل ترک‌های محوری با بیضی‌های سفید رنگ مشخص شده‌اند.



شکل ۳: شکست ترد نمونه بر اثر ترک‌های محوری.

از آن جدا شود و به اطراف بریزد. بنابراین مود مذکور، یک حالت مناسب برای جذب انرژی در سازه‌های ساخته شده از کامپوزیت‌های پلیمری است.

مود ۲: مود شکست ترد و ایجاد تکه‌های بزرگ. این شکست منطبق بر یک حالت ناپایدار و خطرناک از شکست است. در این حالت بر اثر ایجاد ترک در مراحل اولیه بارگذاری و رشد محوری آن (گسترش ترک در امتداد ارتفاع سازه)، بصورت ناگهانی تکه‌های بزرگی از سازه جدا شده و بطور چشمگیری استحکام و قابلیت جذب انرژی سازه را کاهش می‌دهد. این مود شکست همان مودیست که در نمونه‌های مورد بررسی ملاحظه شده است. همانطور که در شکل ۴ ملاحظه می‌شود، بر اثر ترک‌های محوری نمونه دچار شکست شده و تکه‌های بزرگی از آن جدا شده است.

در این مود، به علت رشد سریع ترک‌ها در امتداد ارتفاع، پیوندها بصورت ناگهانی شکسته شده و صدای ناهنجار ترکیدن و از هم پاشیدن سازه به گوش می‌رسد و همانطور که در شکل ۴ ملاحظه می‌شود، در این نمونه‌ها، تکه‌هایی که از نمونه جدا می‌شود، عمدتاً تکه‌هایی هستند که در راستای ارتفاع جدا شده‌اند. بنابراین باید این آزمایش با رعایت جوانب احتیاط انجام شود، زیرا تکه‌های سازه که بصورت ترکش از آن جدا می‌شوند لبه‌هایی بسیار تیز دارند که با نیروی زیادی به اطراف پرتاب می‌شوند.



شکل ۴: جدا شدن تکه‌های بزرگ در راستای ارتفاع بر اثر رشد ترک‌های محوری.

### قابلیت جذب انرژی

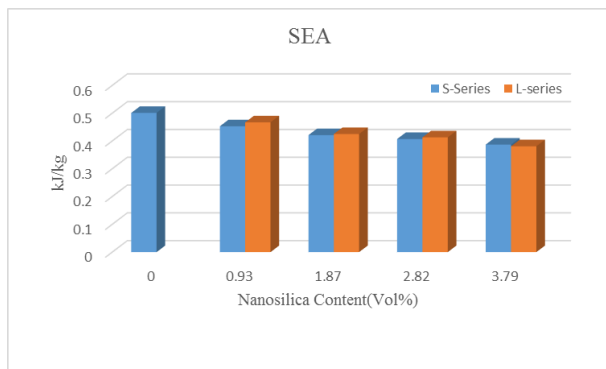
برای بررسی قابلیت جذب انرژی سازه‌ها پارامترهایی وجود دارد که مهمترین آنها جذب انرژی ویژه<sup>۵</sup> (SEA) است. که این پارامتر بصورت انرژی جذب شده کل (سطح زیر نمودار بار-جابجایی) تقسیم بر وزن سازه بدست می‌آید:

$$SEA = \frac{\int pds}{m} \quad (1)$$

Specific Energy Absorption °

مکانیزم رشد و گسترش ترک به مود شکستی که به سازه القاء می‌شود بستگی دارد. مودهای مختلف شکست در نمونه‌های مختلف، از طریق مشاهده نحوه شکست نمونه و تصاویر میکروسکوپی گرفته شده از سطح شکست قابل تشخیص است. با این توضیح، مودهای شکست زیر قابل بیان است [۲۳].

مود ۱: مود فروپاشی پیش‌رونده با ایجاد ترک‌های ریز و لایه لایه شدن اندک. این مود شکست منطبق بر چین خوردگی پیش‌رونده و پایدار دیواره نمونه‌هاست که در این مود انرژی از طریق لایه لایه شدن گسترده و شکسته شدن پیوندهای موجود هدر می‌رود و در نتیجه باعث بوجود آمدن ترک‌های محلی و ریز در ناحیه‌ی در حال فروپاشی شده و باعث می‌شود تکه‌های کوچکی از سازه در هر مرحله



شکل ۵: مقایسه قابلیت جذب انرژی بین دو سری S و L.

جدول ۱: مشخصات جذب انرژی نمونه‌ها.

تغییرات (%SEA)	SEA (kJ/kg)	انرژی جذب شده (J)	بیشینه نیرو (kN)	کد نمونه
-	۰/۵۰۱	۲۸/۷۱	۱۵/۴۸	NE
-۹/۵۸	۰/۴۵۳	۲۵/۰۷	۱۳/۹۷	۱/۵ % S
-۱۵/۹۶	۰/۴۲۱	۲۴/۷۸	۱۳/۲۲	۳/۰ % S
-۱۸/۷۶	۰/۴۰۷	۲۲/۵۴	۱۲/۰۶	۴/۵ % S
-۲۲/۷۵	۰/۳۸۷	۲۱/۴۷	۱۱/۲۶	۶/۰ % S
-۶/۷۸	۰/۴۶۷	۲۵/۴۳	۱۴/۰۹	۱/۵ % L
-۱۵/۱۶	۰/۴۲۵	۲۴/۴۹	۱۳/۳۱	۳/۰ % L
-۱۷/۵۶	۰/۴۱۳	۲۲/۶۱	۱۲/۱۴	۴/۵ % L
-۲۳/۹۵	۰/۳۸۱	۲۱/۶۰	۱۱/۲۳	۶/۰ % L

### ریخت شناسی شکست

در شکل ۶، میکروگراف های SEM شامل اپوکسی خالص و نانوکامپوزیت‌های تقویت شده با ۶ درصد وزنی از ذرات سیلیکا با اندازه ذرات ۱۷ و ۶۵ نانومتر نشان داده شده است که مبین یک توزیع خوب در ۶ درصد وزنی بوده و هیچ کلوخه شدنی دیده نمی‌شود. از سطح شکست پلیمر خالص در شکل ۶-الف مشاهده می‌شود که جهت گسترش ترک از سمت راست به چپ بوده و سطح شکست، نسبتاً صاف و شیشه‌ای است و نمونه‌ای از پلیمر ترموست شکننده را نشان می‌دهد و بیانگر این است که در حین شکست، تغییر شکل پلاستیک در مقیاس وسیع روی نداده است. به علاوه گام‌ها و تغییراتی آشکار در سطح ترک دیده می‌شود که شبیه بال هستند، که این بخاطر چند شاخه شدن ترک<sup>۶</sup> و به علت انرژی اضافی موجود در حین رشد سریع ترک است. تکرار چند شاخه شدن ترک و طبیعت چند صفحه‌ای سطح ترک، راه‌هایی برای جذب انرژی در مواد شکننده هستند [۳۱].

این پارامتر توسط پژوهشگران زیادی جهت ارزیابی قابلیت جذب انرژی مورد استفاده قرار گرفته است [۲۴-۲۶].

SEA مربوط به هر نمونه در جدول ۱ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که بنا به دلایلی که در بخش قبل بیان شد، SEA مربوط به اپوکسی خالص بیش از سایر سازه‌های کامپوزیت تقویت شده با سیلیسیم است و هر چه محتوای ذرات افزایش می‌یابد، بر صلبیت سازه افزوده شده و پیوندها شکننده‌تر می‌شوند. مطالعات پیشین نیز نشان می‌دهد که هرچه سازه در هنگام فروپاشی بیشتر دچار چین‌خوردگی و لایه‌لایه شدن شود، قابلیت جذب انرژی بیشتری نسبت به سازه‌های ترد دارند که در هنگام فروپاشی، ترک به سرعت در آنها رشد کرده و تکه‌های بزرگ از آنها جدا می‌شوند. بر طبق مشاهدات هال [۲۷]، عامل اینگونه شکست‌های ترد تحت فشار، تنش برشی بالاست که منجر به شکسته شدن پیوندها می‌شود و یکی دیگر از دلایل رشد ترک را می‌توان به پیوندهای میان تقویت کننده و ماتریس ربط داد. فصل مشترک قوی مانع از این می‌شود که نیروهای برشی موجب شکسته شدن پیوندها شوند. بنابراین نیروی اعمالی یک تنش شعاعی عمده را القا می‌کند که به دیواره سازه منتقل می‌شود و منجر به ایجاد ترک‌های محوری شده و قابلیت جذب انرژی را کاهش می‌دهد.

در شکل ۵ مقایسه‌ای بین دو سری از نانوکامپوزیت‌های تقویت شده با نانوذرات به قطر متوسط ۱۷ nm (سری S) و نانوکامپوزیت‌های تقویت شده با نانوذرات به قطر متوسط ۶۵ nm (سری L)، نشان داده شده است. همانطور که از این شکل پیداست اندازه ذرات تأثیری در قابلیت جذب انرژی ندارند. پی‌یرسون [۲۸] نیز در گزارش خود به این نکته اشاره کرده بود که اندازه ذرات سیلیکا تأثیری در مدول یانگ و چقرمگی شکست نانوکامپوزیت ندارد. در جدول ۱، تغییرات پارامترهایی نظیر بیشینه بار، انرژی جذب شده، انرژی جذب شده ویژه و درصد تغییرات انرژی جذب شده ویژه، برای نانوکامپوزیت‌هایی با محتوای مختلف نانوذرات سیلیکا آورده شده است.

نکته‌ای که باید به آن توجه داشت، توزیع نانوذرات داخل رزین است. چنانچه این توزیع به گونه‌ای باشد که ذرات در بعضی نقاط کلوخه شوند، این نقاط به عنوان یک عیب مکانیکی باعث کاهش پیوند شده و در نتیجه زمینه را برای رشد سریع ترک فراهم کرده و به موازات آن قابلیت جذب انرژی را کاهش می‌دهد [۲۹].

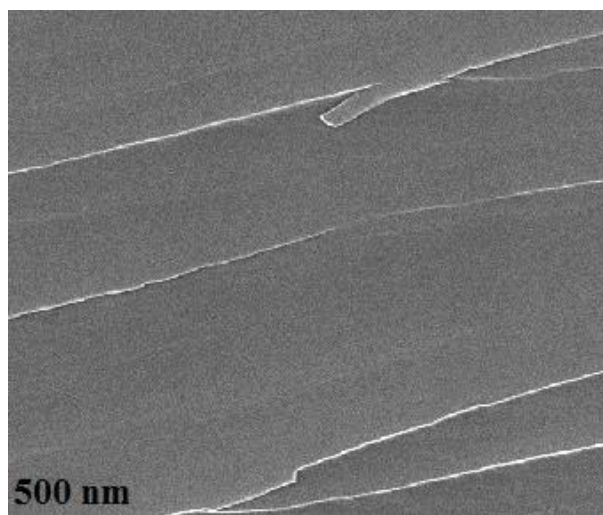
البته پیشتر نیز توسط محققین گزارش شده است که بعضاً با افزایش محتوای نانوذرات به رزین، برخی خواص دچار افت شده است که این موضوع را می‌توان به تمرکز تنش در مجاورت نانوذرات بر اثر کاهش فاصله‌ی ذرات و یا افزایش کلوخه‌ها مرتبط دانست [۳۰].

## نتایج

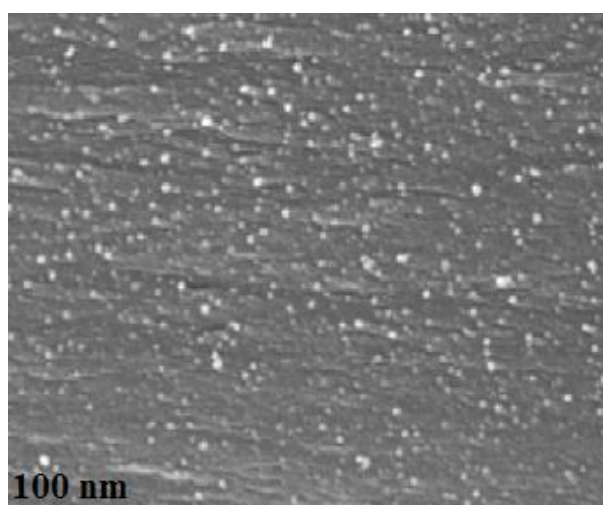
در این تحقیق قابلیت جذب انرژی پوسته‌های جدار نازک مخروطی ساخته شده از نانوکامپوزیت‌های پایه اپوکسی تقویت شده با دو قطر متفاوت از نانوذرات سیلیکا مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که افزودن نانوذرات صلب سیلیکا باعث تردی سازه و در نتیجه افت قابلیت جذب انرژی آن می‌شود و هرچه محتوای ذرات بیشتر می‌شود، این قضیه مشهودتر است. همچنین ایجاد ترک در مراحل اولیه بارگذاری و رشد محوری آن، باعث ضعف سازه شده و بصورت ناگهانی تکه‌های بزرگی از سازه جدا شده و باعث از هم پاشیدن سازه می‌شود. علت رشد سریع ترک‌ها در امتداد ارتفاع، شکسته شدن ناگهانی پیوندها بر اثر تنش‌های برشی بوجود آمده است که منجر به یک شکست فاجعه‌بار می‌شود. همچنین این بررسی نشان می‌دهد که اندازه ذرات تأثیری در قابلیت جذب انرژی این قسم سازه‌های جدار نازک ندارد.

## مراجع

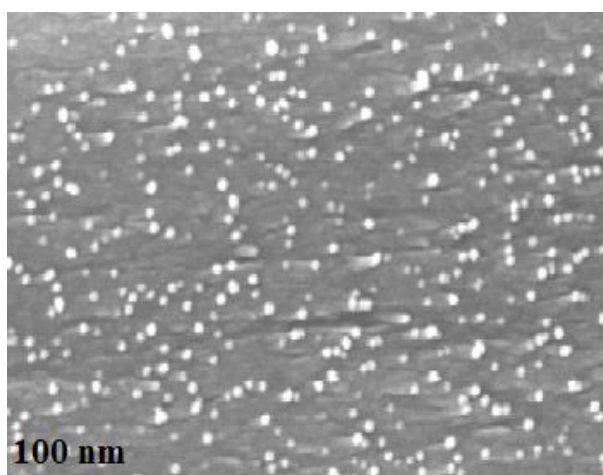
- [1] Ohnoa, T., Tagawa, SH., Itoh, H., Suzuki, H., and Matsuda, T., 2009. "Size effect of TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> nano-hybrid particle". *Materials Chemistry and Physics*, 113, July, pp. 119-123.
- [2] Fukuda, H., Kondoh, K., Umeda, J., and Fugetsu, B., 2011. "Interfacial analysis between Mg matrix and carbon nanotubes in Mg-6 wt.% Al alloy matrix composites reinforced with carbon nanotubes". *Composites Science and Technology*, 71, January, pp. 705-709.
- [3] Arora, R., Srivastav, A., and Mandal, U., 2012. "Polyaniline Based Polymeric Nano composite Containing TiO<sub>2</sub> and SnO<sub>2</sub> for Environmental and Energy Applications". *International Journal of Modern Engineering Research*, 2(4), July, pp. 2384-2395.
- [4] Jiao, J., Sun, X., and Pinnavaia, T.J. 2009. "Mesosstructured silica for the reinforcement and toughening of rubbery and glassy epoxy polymers". *Polymer*, 50, December, pp. 983-989.
- [5] Zhang, L., Pan, K., and Lin, j., 2013. "Fracture toughness and fracture mechanisms in Mo<sub>5</sub>SiB<sub>2</sub> at ambient to elevated temperatures". *Intermetallics*, 38, March, pp. 49-54.
- [6] Mamalis, A., Manolakos, D., Ioannidis, M., and Papapostolou, D., 2005. "On the response of thin-walled CFRP composite tubular components subjected to static and dynamic axial compressive loading". *experimental Composite Structure*, 69(4), August, pp.407-20.
- [7] Shariati, M., Allahbakhsh, H.R., and Saemi, J., 2010. "An experimental and numerical crashworthiness investigation of crash columns assembled by spot-weld". *MECHANIKA*, 2(82), May, pp.21-26.
- [8] Yuan, Q., Misra, R., 2006. "Impact fracture behavior of clay-reinforced polypropylene nanocomposites". *Polymer*, 47(12), October, pp.4421-33.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۶: تصاویر SEM گرفته شده از سطح شکست نمونه‌ها (الف) اپوکسی خالص. (ب) کامپوزیت S/۶. (ج) کامپوزیت L/۶.

- [20] Liu, H.Y., Wang, G.T., Mai, Y.W., and Zeng, Y., 2011. "On fracture toughness of nano-particle modified epoxy". *Composites: Part B*, 42, Sep, pp. 2170–2175.
- [21] Hamada, H., Ramakrishna, S., Sato, H. 1995. "Crushing mechanism of carbon-fiber peck composite tubes". *Composites*, 26(11), November, pp. 749–55.
- [22] Gan, C., Gibson, R.F., and Newaz, G.M. 2004. "Analytical/experimental investigation of energy absorption in grid-stiffened composite structures under transverse loading". *Exp Mech*, 44(2), February, pp. 185–94.
- [23] Silva, F., Njuguna, J., Sachse, S., Pielichowski, K., Leszczynska, A., and Giacomelli, M., 2013. "The influence of multiscale fillers reinforcement into impact resistance and energy absorption properties of polyamide 6 and polypropylene nanocomposite structures". *Materials and Design*, 50, May, pp. 244–252.
- [24] Gan, C., Gibson, R.F., and Newaz, G.M., 2004. "Analytical/experimental investigation of energy absorption in grid-stiffened composite structures under transverse loading". *Exp Mech*, 44(2), Oct, pp. 185–94.
- [25] Nakatani, T., Kameo, K., and Hamada, H., 1999. "Development of energy absorption parts with FRP tubes". *Adv Compos Mater*, 8(4), pp. March, 345–54.
- [26] Warrior, N.A., Turner, T.A., Robitaille, F., and Rudd, C.D., 2003. "Effect of resin properties and processing parameters on crash energy absorbing composite structures made by RTM". *Compos: Part A Appl Sci Manuf*, 34(6), Nov, pp. 543–50.
- [27] Hull, D. A., 1991. "unified approach to progressive crushing of fibre-reinforced composite tubes". *Compos Sci Technol*, 40(4), September, pp. 377–421.
- [28] Dittanet, P., and Pearson, R.A., 2012. "Effect of silica nanoparticle size on toughening mechanisms of filled epoxy". *Polymer*, 53, June, pp. 1890-1905.
- [29] Zoukrami, F., Haddaoui, N., Vanzeveren, C., Sclavons, M., and Devaux, J. 2008. "Effect of compatibilizer on the dispersion of untreated silica in a polypropylene matrix". *Polym Int*, 57(5), April, pp. 756–63.
- [30] Njuguna, J., Silva, F., and Sachse, S., 2011. "Nanocomposites for vehicle structural applications". In: *Lin T, (editor). Nanofibers – production, properties and functional applications, InTech*, pp. 401–34.
- [31] Andrews, E.H., 1968. *Fracture in polymers*. 1st ed. Edinburgh: Oliver & Boyd.
- [9] Sun, L., Gibson, R.F., Gordaninejad, F., and Suhr, J., 2009. "Energy absorption capability of nanocomposites". a review. *Compos Sci Technol*, 69(14), April, pp. 2392–409.
- [10] Njuguna, J., Michałowski, S., Pielichowski, K., Kayvantash, K., and Walton, A.C. 2011. "Fabrication, characterization and low-velocity impact testing of hybrid sandwich composites with polyurethane/layered silicate foam cores". *Polym Compos*, 32(1), May, pp. 6–13.
- [11] Yun Fu, Sh., Feng, X., Lauke, B., and Mai, Y.W., 2008. "Effects of particle size, particle/matrix interface adhesion and particle loading on mechanical properties of particulate-polymer composites". *Composites: Part B*, 39, pp. 933–961.
- [12] Kitey, R., and Tippur, H.V., 2005. "Role of particle size and filler-matrix adhesion on dynamic fracture of glass-filled epoxy. I. Macromechanisms", *Acta Materialia*, 53, February, pp. 1153–1165.
- [13] Streckov, M., Sopcka, T. Medvecký, L., Bures, R., Fberov, M. Batkob, I. and Briancin, J., 2012. "Preparation, chemical and mechanical properties of microcomposite materials based on Fe powder and phenol-formaldehyde resin". *Chemical Engineering Journal*, 180, August, pp. 343–353.
- [14] Crosby, A.J., and Lee, J.Y., 2007 "Polymer nanocomposites: The nano effect on mechanical properties". *Polym Rev*, 47(2), pp. 217–29.
- [15] Tang, X.G., Bao, R.Y., Yang, W., Xie, B.H., Yang, M.B., and Hou, M. 2009. "Effect of  $\beta$ -phase on the fracture behavior of dynamically vulcanized PP/EPDM blends studied by the essential work of fracture approach". *Eur Polym J*; 45(5), April, pp. 1448-1453.
- [16] Johnsen, B.B., Kinloch, A.J. Mohammed, R.D., Taylor, A.C., and Sprenger. S., 2006. "Toughening mechanisms of nanoparticle-modified epoxy polymers". *Polymer*, 48, June, pp. 530-541.
- [17] Farley, G.L., 1991. "The effects of crushing speed on the energy-absorption capability of composite tubes". *J Compos Mater*, 25(10), May, pp. 1314-1320.
- [18] Farley, G.L., 1987. "Energy absorption in composite materials for crashworthy structures. In: Sixth international conference on composite materials and second European conference on composite materials" (ICCM & CCM). vol. 3.
- [19] Mamalis, A., Manolakos, D., Ioannidis, M., and Papapostolou, D., 2004. "Crashworthy characteristics of axially statically compressed thin-walled square CFRP composite tubes: experimental". *Compos Struct*, 63(3), July, pp. 347–60.