



## بررسی اثر اندازه ذرات پرکننده و ترکیبات مختلف آنها بر قابلیت جذب انرژی سازه‌های جدار نازک قوطی شکل ساخته شده از نانوکامپوزیت‌های اپوکسی/سیلیکا

محمود شریعتی<sup>۱</sup>، غلامعلی فرزی<sup>۲</sup> و علی دادرسی<sup>۳\*</sup>

- ۱- گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
- ۲- گروه مهندسی مواد و پلیمر، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران
- ۳- دانشکده مکانیک، دانشگاه شاهرود، شاهرود، ایران

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۲/۱۲/۱۸، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۳/۰۳/۲۴، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۳/۰۴/۰۹

### چکیده

در این مقاله قابلیت جذب انرژی سازه‌های جدار نازک قوطی شکل، ساخته شده از نانوکامپوزیت‌های پایه اپوکسی که با نانوذرات سیلیس تقویت شده‌اند، مورد بررسی قرار گرفته است. در این بررسی از دو نوع نانوذره با قطرهای متوسط ۱۷ و ۶۵ نانومتر در سه سری از نانوکامپوزیت‌ها، تا ۴/۵ درصد وزنی استفاده شده است. سری اول نانوکامپوزیت‌های تقویت شده با نانوذرات با قطر متوسط ۱۷ نانومتر، سری دوم نانوکامپوزیت‌های تقویت شده با نانوذرات با قطر متوسط ۶۵ نانومتر و سری سوم نانوکامپوزیت‌های تقویت شده با ترکیبی از نانوذرات با قطر متوسط ۱۷ و ۶۵ نانومتر است. نمونه‌ها به کمک یک دستگاه سروهیدرولیک اینسترون، تحت بارگذاری شبه استاتیکی قرار گرفته و فروپاشی آنها مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین سطح شکست نمونه‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که افزودن نانوذرات سیلیکا باعث کاهش قابلیت جذب انرژی سازه‌ها شده و سازه‌ها تحت یک مود ناپایدار و خطرناک دچار فروپاشی می‌شوند. همچنین مشاهده شد که اندازه ذرات تاثیر قابل توجهی بر قابلیت جذب انرژی نداشته ولی استفاده ترکیبی از هر دو نوع نانوذره هم‌افزایی اندکی را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: قوطی، قابلیت جذب انرژی، نانوکامپوزیت، اپوکسی، سیلیکا.

### ۱- مقدمه

فلزات پرکاربردترین مواد در سازه‌های جذب انرژی هستند، و این بخاطر مشخصه‌های تغییر شکل پلاستیک آنها است که آنها را قادر به جذب انرژی در حالات کنترل شده می‌کند [۳-۵]. به همین دلیل، جهت بررسی میزان جذب انرژی در سازه‌های کامپوزیتی، آزمایش فروپاشی لوله بیشتر مورد توجه قرار گرفته است [۶،۷]. اپوکسی‌ها بخاطر ارزانی و خواص خوب مکانیکی، در بسیاری از صنایع مورد استفاده قرار می‌گیرند. اما کاربرد آنها در

سازه‌های پوسته‌ای امروزه بطور گسترده در بسیاری از صنایع نظیر خطوط لوله‌ها، صنایع هوافضا، مخازن بزرگ و برج‌های خنک کننده بکار می‌روند [۱،۲]. سازه‌های جذب انرژی طوری طراحی می‌شوند که در هنگام برخورد، در یک حالت کنترل شده، انرژی برخورد را پیش از آنکه به قسمت سرنشین‌ها منتقل شود، جذب می‌کنند. عمدتاً

\* عهده‌دار مکاتبات: علی دادرسی

نشانی: شاهرود، بلوار دانشگاه، دانشگاه شاهرود، دانشکده مکانیک

تلفن: ۰۲۳-۲۲۳۶۵۷۲۶-۰۲۳، دورنگار: ۰۲۳-۲۲۳۰۰۲۵۸، پست الکترونیکی: ali.dadrasi@gmail.com

بسیاری از موارد نظیر ساخت سازه‌هایی به منظور جذب انرژی و یا سازه‌هایی مقاوم در برابر ضربه، به تنهایی جوابگوی نیاز صنایع نیست. لذا می‌بایست آنها را توسط تقویت کننده‌هایی در مقیاس میکرو و نانو جهت مصارف مورد نظر ارتقاء داد. بررسی‌های تجربی نشان می‌دهد که برخی از نانوکامپوزیت‌ها با ماتریس‌ها و پرکننده‌های خاص، به بهبودهای مهم و همزمانی در سفتی، چقرمگی شکست، جذب انرژی ضربه‌ای و مستهلک کردن ارتعاشات دست یافته‌اند. پارامترهای اساسی مؤثر بر خواص نانوکامپوزیت‌ها، شامل توزیع، اندازه و کسر حجمی نانوذرات، خواص ماتریس، اثرات موجود در فصل مشترک تقویت کننده و ماتریس و پروسه ساخت است [۸-۱۰]. همانطور که اشاره شد، اپوکسی‌ها بخاطر طبیعت شکننده‌ای که دارند کمتر به عنوان جاذب انرژی مطرح بوده‌اند ولی چنانچه بتوان آنها را بگونه‌ای مناسب تقویت کرد، می‌توانند مقادیر زیادی از انرژی برخورد را از طریق خرد شدن و یا لایه لایه شدن جذب کنند [۹]. پرامانیک و همکاران [۱۱]، تاثیر افزودن نانورس و صفحات گرافن را در قابلیت جذب انرژی پنل‌های ساندویچی، در سرعت‌های برخورد بالا و پایین مورد بررسی قرار دادند. روی و همکاران [۱۲]، اثر افزودن اشکال مختلف کربن نظیر نانولوله‌های کربنی، نانوفیبر، گرافن و فلورن را به روی خواص مختلف فیزیکی و مکانیکی نانوکامپوزیت‌های پایه اپوکسی بررسی کردند. بالگانسن و همکاران [۱۳]، قابلیت جذب انرژی صفحات ساخته شده از کامپوزیت اپوکسی را که با ذرات شیشه تقویت شده و در ضخامت‌های مختلف ساخته شده بودند را تحت بارگذاری ضربه‌ای مورد بررسی قرار دادند. در ضمن تاثیر افزودن نانوذرات رس را نیز به آنها بررسی کردند. سایر محققین نیز تغییرات جذب انرژی سازه‌های کامپوزیتی تقویت شده با نانوذراتی نظیر سیلیس را در برخورد‌های با سرعت‌های مختلف بررسی کردند [۱۴]. توانایی سازه‌های کامپوزیتی برای جذب انرژی به مود شکست بستگی دارد. موادی که بصورت پیش‌رونده دچار فروپاشی شده و در حین شکست دچار پارگی و تکه تکه شدن می‌شوند، انرژی بیشتری را نسبت به مواد ترد و شکننده، جذب می‌کنند [۱۵-۱۷]. تحقیقات متعددی در مورد قابلیت جذب انرژی پوسته‌هایی با مقطع مربع انجام

شده است [۲۰-۱۸] ولی در مورد جاذب‌های انرژی ساخته شده از نانوکامپوزیت‌ها، تحقیقات کمی وجود دارد و این امر عمدتاً می‌تواند به این دلیل باشد که تولید اینگونه از جاذب‌ها نسبتاً مشکل است. به همین خاطر است که ارتباط بین خواص مکانیکی یک نانوکامپوزیت با قابلیت‌های جذب انرژی آن، هنوز بطور کامل شناخته نشده است. بنابراین با توجه به مطالعات این تحقیق، اولین گزارش را در مورد قابلیت جذب انرژی قوطی‌های ساخته شده از نانوکامپوزیت‌های پلیمری ارائه می‌دهد. مشخصه‌های جذب انرژی نانوکامپوزیت‌ها می‌تواند بوسیله آزمایش فشار [۲۱]، پیچش [۲۲] و آزمایش ضربه آیزود یا شاری [۲۳] مورد ارزیابی قرار گیرد. در این مقاله اثر افزودن نانوذرات صلب سیلیس با دو قطر متفاوت ۱۷ و ۶۵ نانومتر، در سه ترکیب مختلف از نانوکامپوزیت‌ها، بر قابلیت جذب انرژی سازه‌های قوطی شکل جدار نازک مورد بررسی قرار گرفته است. اثر اندازه ذرات و همچنین اثر استفاده ترکیبی از نانوذرات نیز بر قابلیت جذب انرژی بررسی شده است.

بارگذاری‌ها به صورت شبه استاتیکی توسط یک دستگاه سروهیدرولیک اینسترون ۸۸۰۲ اعمال شده است. سطح شکست نمونه‌ها توسط یک میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی شده و در مورد زبری سطح نمونه‌ها نیز بحث شده است.

## ۲- فعالیت‌های تجربی

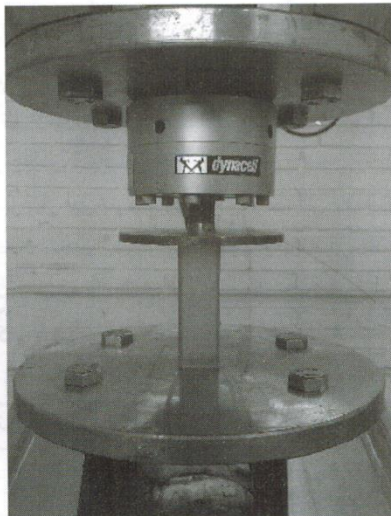
### ۲-۱- مواد

رزین اپوکسی آزمایش شده، بر پایه 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 و ۶۵ نانومتر از شرکت US-nano تهیه شده که دارای خلوص بالای ۹۹/۵ درصد است و به شکل پودر سفید رنگ می‌باشند. لازم بذکر است که بازه اندازه ذرات با اندازه متوسط ۱۷، ۲۰-۱۵ و بازه اندازه ذرات با اندازه متوسط ۶۵، ۷۰-۶۰ nm می‌باشد. هاردنر تهیه شده، هاردنر پلی‌آمین HA-12 است. چگالی رزین بکار رفته  $1110 \text{ kg/m}^3$  و چگالی نانوذرات سیلیکا  $2400 \text{ kg/m}^3$  است.

پشت این حروف، مبین درصد وزنی نانوذرات سیلیس بکار رفته در ترکیب است. کد NE نیز معرف اپوکسی خالص است.

### ۲-۳- آزمایش جذب انرژی

این آزمایش توسط یک دستگاه سروویدرولیک 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.

### ۳- نتایج و بحث

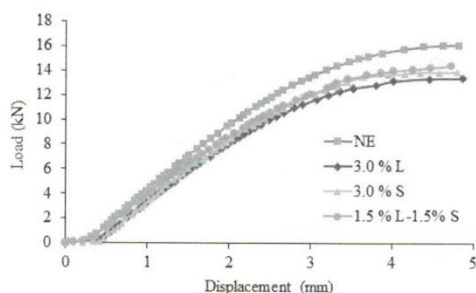
#### ۳-۱- رفتار شکست

رفتار شکست و قابلیت جذب انرژی پوسته‌های قوطی شکل ساخته شده از کامپوزیت پایه پلیمری تقویت شده با نانوذرات سیلیکا، در این بخش مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. در شکل ۲ نمودار بار-جابجایی برای کامپوزیت‌هایی تقویت شده با ۳ درصد وزنی از نانوذرات، از سه سری S، L و سری ترکیبی، با اپوکسی خالص مقایسه شده است. همانطور که در شکل ۲ ملاحظه می‌شود، قابلیت جذب انرژی با افزایش نانوذرات در هر سه سری دچار افت شده است که این امر می‌تواند به چند دلیل باشد. نخست اینکه، در یک نگاه کلی مشهود است که

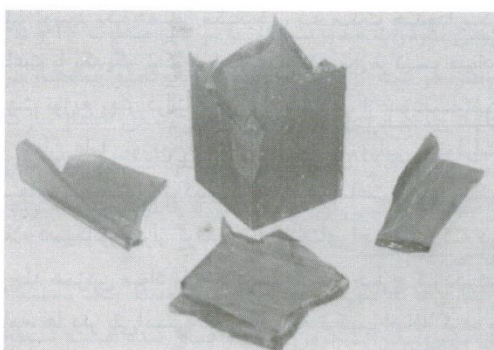
#### ۲-۲- آماده‌سازی نانوکامپوزیت

در این تحقیق، پلیمر ترموست بر پایه بیسفنول A، با افزودن نانوذرات کروی  $SiO_2$  تا ۴/۵ درصد وزنی، تقویت شده است. رزین اپوکسی از نوع ML-504 بوده و علت انتخاب این رزین، پایین بودن نسبی ویسکوزیته 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 ضعفی بجای بماند. همچنین با توجه به غلظت پایین محصول، امکان استفاده آن به همراه انواع پرکننده‌های معدنی فراهم است. جهت تهیه کامپوزیت، رزین و نانوذرات سیلیکا با درصد وزنی مورد نظر، توسط یک همزن مکانیکی، به مدت حدوداً یک ساعت با یکدیگر ترکیب شدند. در ضمن ترکیب مواد، جهت توزیع بهتر ذرات در زمینه پلیمری، از سوبالسیتین به عنوان عامل توزیع به میزان یک درصد وزنی نانوذرات استفاده شد. 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 پلی‌آمینی HA-12 را به ترکیب اضافه کرده و اجازه داده شد تا ترکیب بصورت مکانیکی تحت خلاء به مدت پنج دقیقه همزده شود. سرانجام، ترکیب در قالب‌های فلزی که از پیش ساخته شده و واکس قالب نیز به عنوان عامل رهاساز به آن زده شده بود، قالبگیری شد. 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 یکسان ارتفاع ۹۰ mm، ضلع داخلی مقطع ۲۰ mm و ضخامت پوسته ۳ mm می‌باشند. 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 و در کامپوزیت‌هایی که با ترکیبی از ۱/۵ درصد وزنی نانوذرات ۶۵ نانومتری به اضافه درصدی از نانوذرات ۱۷ نانومتری تقویت شده‌اند، از هر دوی این حروف استفاده شده است. همچنین، عدد نشان داده شده در

قابل تشخیص است. با این توضیح، موده‌های شکست زیر قابل بیان است [۲۸].



شکل ۲: نمودار بار-جابجایی برای کامپوزیت تقویت شده با نانوذراتی به قطرهای ۰.۱۷، ۰.۲۵، ۰.۶۵ nm و مقایسه آن با اپوکسی خالص.



شکل ۳: شکست ترد نمونه و ایجاد لبه‌های تیز بر اثر گسترش ترک‌های محوری و جدا شدن تکه‌های بزرگ در حین فروپاشی.

مود ۱، مود فروپاشی پیش‌رونده با ایجاد ترک‌های ریز و لایه لایه شدن اندک می‌باشد. 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 ناحیه در حال فروپاشی شده و باعث می‌شود تکه‌های کوچکی از سازه در هر مرحله 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 می‌باشد. 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

قابلیت جذب انرژی یک سازه کامپوزیتی به ماده زمینه و تقویت کننده آن بستگی دارد و علیرغم اینکه نانوذرات سیلیس باعث افزایش مدول یانگ و چقرمگی شکست می‌شوند [۲۴، ۲۵]، ولی بخاطر اینکه ذاتاً صلب هستند، این طبیعت خود را به کامپوزیت حاصل نیز منتقل کرده و در نتیجه باعث تردی نمونه‌ها می‌شوند و همانطور که در شکل مذکور ملاحظه می‌شود، روند نمودار نیرو-جابجایی کاملاً یکنواخت و صاف است که تاییدی بر صلبیت نانوکامپوزیت مورد بررسی دارد. ثانیاً، این موضوع را می‌توان به مکانیزم رشد ترک موجود مرتبط 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 حالی است 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 [۲۶، ۲۷]. بنا به همین دلایل، طول جذب انرژی سازه (میزان کوتاه شدن نمونه) زیاد نیست و همانطور که در شکل ۲ ملاحظه می‌شود، برای نمونه‌های مورد بررسی، در حدود ۵ میلی‌متر است. همچنین در شکل ۲ ملاحظه می‌شود که اندازه نانوذرات تاثیر قابل توجهی در قابلیت جذب انرژی ندارد و اختلاف چندانی بین نمودار بار-جابجایی کامپوزیت تقویت شده با ۳ درصد وزنی از نانوذرات ۶۵ و ۱۷ نانومتری ملاحظه نمی‌شود. اما قابلیت جذب انرژی در سری ترکیبی، اندکی از دو سری دیگر بیشتر است. در شکل ۳، نمونه‌ای مشاهده می‌شود که بر اثر رشد ترک‌های محوری دچار فروپاشی شده است. در این شکل ترک‌های محوری با بیضی سفید رنگ مشخص شده‌اند. مکانیزم رشد و گسترش ترک، به مود شکستی که به سازه القاء می‌شود نیز بستگی دارد. موده‌های مختلف شکست در نمونه‌های مختلف، با مشاهده نحوه شکست نمونه و تصاویر میکروسکوپی گرفته شده از سطح شکست

فشار، تنش برشی بالاست که منجر به شکسته شدن پیوندها می‌شود. 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.

جدول ۱: مشخصات جذب انرژی نمونه‌ها.

تغییرات (%) SEA	SEA (kJ/kg)	انرژی جذب شده (J)	بیشینه نیرو (kN)	کد نمونه
-	۱/۳۶۷	۴۸/۹۲	۱۶/۰۹	NE
-۷/۵۳	۱/۲۶۴	۴۴/۵۹	۱۴/۷۳	۱/۵ S
-۲۳/۳۳	۱/۰۴۸	۳۶/۸۳	۱۳/۸۶	۳/۰ S
-۳۹/۵۷	۰/۸۲۶	۲۹/۱۲	۱۳/۰۲	۴/۵ S
-۵۰/۶۹	۰/۶۷۴	۲۳/۶۹	۱۲/۳۵	۶/۰ S
-۱۷/۴۱	۱/۱۲۹	۴۰/۲۶	۱۴/۰۹	۱/۵ L
-۳۰/۸۲	۰/۹۴۵	۳۳/۱۶	۱۳/۳۷	۳/۰ L
-۴۴/۴۷	۰/۷۵۹	۲۶/۸۳	۱۲/۳۸	۴/۵ L
-۵۵/۴۴	۰/۶۰۹	۲۱/۴۸	۱۱/۸۳	۶/۰ L
-۲۰/۹۲	۱/۰۸۱	۳۷/۹۵	۱۴/۳۷	S-۱/۵ L/۱/۵
-۳۶/۵۰	۰/۸۶۸	۳۰/۶۴	۱۳/۴۵	S-۳ L ۱/۵
-۵۰/۴۷	۰/۶۷۷	۲۳/۹۵	۱۲/۸۳	S-۴/۵ L ۱/۵

نیروی اعمالی یک تنش محوری عمده را القاء می‌کند که به دیواره سازه منتقل می‌شود و منجر به ایجاد ترک‌های محوری شده و قابلیت جذب انرژی را کاهش می‌دهد. در شکل ۴ مقایسه‌ای بین SEA مربوط به نانوکامپوزیت‌های تقویت شده با محتوای مختلف نانوذرات، از هر سه سری داده شده است. همانطور که از این شکل پیدا است اندازه ذرات تاثیر قابل توجهی در قابلیت جذب انرژی ندارند و علت اینکه در محتوای ذرات یکسان، SEA در سری S اندکی از سری L بیشتر است، به خاطر این است که ذرات ریزتر، بدلیل سطح تعاملی بیشتر، پیوند بهتری با ماده زمینه برقرار می‌کنند [۳۱]. البته محققین در این گزارش [۳۱] به این نکته نیز اشاره کرده‌اند که اندازه ذرات سیلیکا تاثیری در مدول یانگ و چقرمگی شکست نانوکامپوزیت ندارد. همچنین از این نمودار ملاحظه می‌شود که با افزایش محتوای ذرات، از این قابلیت کاسته شده است که علت آن را می‌توان بدلیل افزایش پیوندهایی دانست که در مقابل تنش‌های برشی وارده، تحمل چندانی ندارند.

امتداد ارتفاع سازه، بصورت ناگهانی تکه‌های بزرگی از سازه جدا شده (شکل ۳) و بطور چشمگیری استحکام و قابلیت جذب انرژی سازه را کاهش می‌دهد. این مود شکست همان مودی است که در نمونه‌های مورد بررسی ملاحظه 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. بنابراین باید این آزمایش با رعایت جوانب احتیاط انجام شود، زیرا تکه‌های سازه که به صورت ترکش از آن جدا می‌شوند لبه‌هایی بسیار تیز دارند که با نیروی زیادی به اطراف پرتاب می‌شوند.

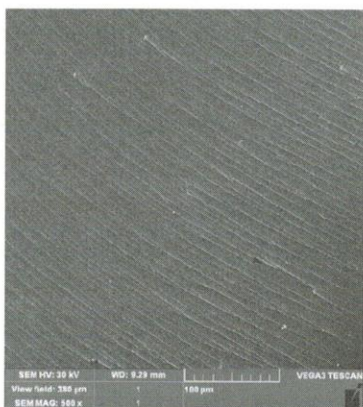
### ۳-۲- قابلیت جذب انرژی

برای بررسی قابلیت جذب انرژی سازه‌ها پارامترهایی وجود دارد که مهمترین آنها جذب انرژی ویژه (SEA) است. که این پارامتر به صورت انرژی جذب شده کل (سطح زیر نمودار بار-جابجایی) تقسیم بر جرم سازه بدست می‌آید:

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

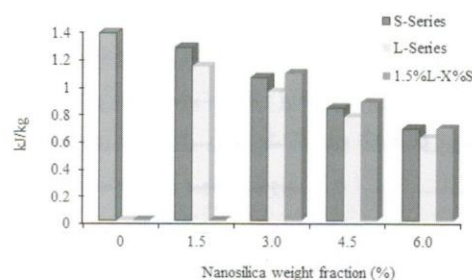
این پارامتر توسط پژوهشگران زیادی جهت ارزیابی قابلیت جذب انرژی مورد استفاده قرار گرفته است [۲۷،۲۹]. در جدول ۱، تغییرات پارامترهایی نظیر بیشینه بار، انرژی جذب شده، انرژی جذب شده ویژه و درصد تغییرات انرژی جذب شده ویژه، برای نانوکامپوزیت‌هایی با محتوای مختلف نانوذرات سیلیکا و برای هر سه سری آورده شده است. ملاحظه می‌شود که بنا به دلایلی که در بخش قبل بیان شد، SEA مربوط به اپوکسی خالص بیش از سایر سازه‌های کامپوزیتی تقویت شده با سیلیسیم است و هر چه محتوای ذرات افزایش می‌یابد، بر صلبیت سازه افزوده شده و پیوندها شکننده‌تر می‌شوند. مطالعات پیشین [۲۸،۲۹] نیز نشان می‌دهد که هر چه سازه در هنگام فروپاشی بیشتر دچار چین خوردگی و لایه لایه 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 [۳۰]، عامل اینگونه شکست‌های ترد تحت

میکروگراف‌های SEM از سطح شکست اپوکسی خالص و نانوکامپوزیت تقویت شده با ۳ درصد وزنی از ذرات سیلیکا با اندازه ذرات ۶۵ نانومتر نشان داده شده است. این تصاویر برای هر دو نمونه مذکور در بزرگنمایی ۵۰۰ برابر نشان داده شده است. پیشتر اشاره شد که عامل شکست‌های ترد تحت فشار، تنش برشی بالاست که منجر به شکسته شدن پیوندها می‌شود. همانطور که در شکل‌های ۵ و ۶ ملاحظه می‌شود، در اپوکسی خالص تنش برشی به نرمی از یک لایه به لایه دیگر منتقل شده است و اختلاف ارتفاع لایه‌ها نسبت به یکدیگر زیاد نیست و لایه‌ها تقریباً لایه‌هایی ریز و مشابه هستند در حالیکه در نانوکامپوزیت تقویت شده با ۳ درصد وزنی از ذرات سیلیکا، نانوذرات باعث انحراف مسیر ترک شده و سطح پیشروی ترک را تغییر داده‌اند.



شکل ۵: میکروگراف SEM از سطح شکست نمونه اپوکسی خالص و بزرگنمایی ۵۰۰ برابر.

بدین ترتیب که پیشانی ترک پس از برخورد به نانوذرات مجبور می‌شود آن را به سمت بالا و یا پایین نانوذره دور بزند، لذا سطح شکست دارای برآمدگی‌ها و فرورفتگی‌های مشهودتری نسبت به نمونه اپوکسی خالص بوده و همین امر باعث بالا رفتن زبری سطح می‌شود که این موضوع به خوبی در تصاویر مشهود است و البته لایه‌های با اختلاف ارتفاع بیشتر، لبه‌های سفیدتری دارند (شکل ۶). از طرف دیگر، همانطور که در سطح شکست شکل‌های ۵ و ۶ دیده می‌شود، لایه‌ها به شکل منحنی هستند، که این موضوع با پیشروی جبهه ترک که به صورت هلالی است، تطابق دارد.



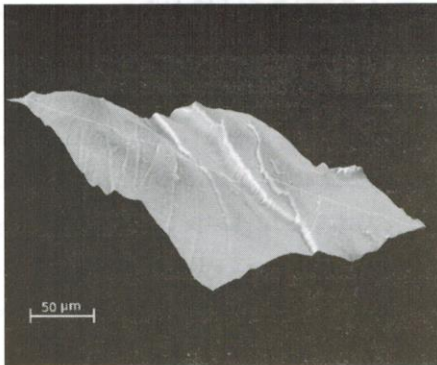
شکل ۴: مقایسه قابلیت جذب انرژی ویژه بین سه سری S، L و M.

نکته‌ای که باید به آن توجه داشت، توزیع نانوذرات داخل رزین است. چنانچه این توزیع بگونه‌ای باشد که ذرات در بعضی نقاط انباشته 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 [۳۲]. 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 فاصله ذرات و یا افزایش کلوخه‌ها مرتبط دانست [۳۳]. قبلاً اشاره شد که قابلیت جذب انرژی در سری ترکیبی، اندکی از دو سری دیگر بیشتر است. همینطور از جدول ۱ و شکل ۴ می‌توان دریافت که استفاده ترکیبی از نانوذرات ۱۷ و ۶۵ نانومتری، باعث اندکی بهبود در مقدار SEA شده است. در توضیح این موضوع می‌توان به این نکته اشاره کرد که ذرات بزرگتر جریان تنش بوجود آمده را طوری تغییر می‌دهند که ذرات بیشتری دچار شکستگی پیوند شده و در نتیجه انرژی بیشتر، برای شکستن پیوندهای بیشتر باید صرف شود که این موضوع باعث اندکی افزایش در SEA می‌شود.

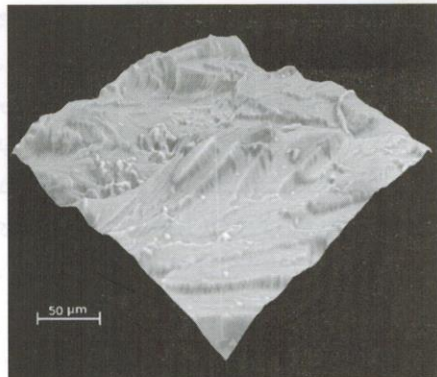
### ۳-۳- ریخت شناسی شکست

سطح شکست نمونه‌ها توسط یک میکروسکوپ الکترونی روبشی TESCAN VEGA 3، مورد بررسی قرار گرفته است. تمام نمونه‌ها پیش از تحلیل توسط یک لایه نازک طلا به ضخامت حدوداً ۵ نانومتر، روکش داده شدند تا امکان تصویربرداری بهتر فراهم شود. ولتاژ بکار رفته ۳۰ kV است. در شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب

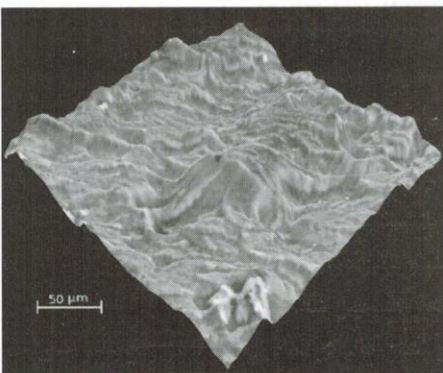
پیشانی ترک با نانوذرات و انحراف مسیر ترک است. لازم بذکر است که این مکانیزم، باعث افزایش سطح شکست شده و موجب می‌شود که ترک تحت مود ترکیبی I/II رشد کند [۳۵].



شکل ۷: توپوگرافی سطح شکست اپوکسی خالص، اختلاف سطح بالاترین و پایین‌ترین نقطه در مسیر انتخابی  $21/81 \mu\text{m}$ .

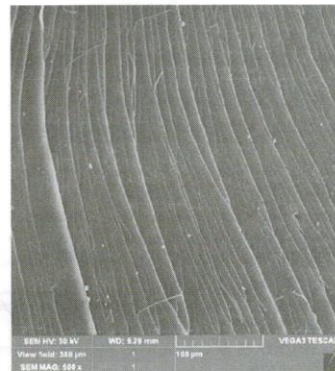


شکل ۸: توپوگرافی سطح شکست کامپوزیت L3، اختلاف سطح بین بالاترین و پایین‌ترین نقطه در مسیر انتخابی  $119/71 \mu\text{m}$ .



شکل ۹: توپوگرافی سطح شکست کامپوزیت S1/5-L1/5، اختلاف سطح بین بالاترین و پایین‌ترین نقطه  $92/86 \mu\text{m}$ .

همچنین مشاهده می‌شود که از برخی از این لایه‌ها، لایه‌های دیگری منشعب شده که این پدیده در سطح شکست نانوکامپوزیت‌ها واضح‌تر است. دلیل این موضوع چند شاخه شدن ترک بدلیل 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 [۳۴].



شکل ۶: میکروگراف SEM از سطح شکست کامپوزیت L3 و بزرگنمایی ۵۰۰ برابر.

با توجه به شکل‌های ۷ تا ۹، این موضوع را می‌توان با مقایسه زبری سطح شکسته نمونه از سه سری مختلف نیز، بررسی کرد.

در این بررسی که از سطح شکست نمونه‌ها توسط یک میکروسکوپ الکترونی روبشی Phenom pro X ساخت کشور هلند، بعمل آمده است، توپوگرافی سطح شکست، به ترتیب، برای نمونه اپوکسی خالص، در شکل ۷، برای کامپوزیت L3، در شکل ۸ و نهایتاً برای کامپوزیت S1/5-L1/5، در شکل ۹ نشان داده شده است. زبری بدست آمده از توپوگرافی سه بعدی در هر یک از این سطوح در مسیرهای انتخابی دلخواه که به رنگ سبز نشان داده شده، توسط دستگاه محاسبه شده است. اختلاف سطح بین بالاترین و پایین‌ترین نقطه در مسیر انتخابی در نمونه اپوکسی خالص،  $21/81 \mu\text{m}$  و در کامپوزیت L3،  $119/71 \mu\text{m}$  میکرون و در کامپوزیت S1/5-L1/5،  $92/86 \mu\text{m}$  است. توپوگرافی سطح شکست نمونه‌ها نشان می‌دهد که هر چه محتوای نانوذرات افزایش می‌یابد، بر زبری سطح افزوده می‌گردد که علت اصلی، همان برخورد

## ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق قابلیت جذب انرژی پوسته‌های جدار نازک قوطی شکل ساخته شده از نانوکامپوزیت‌های پایه اپوکسی تقویت شده با دو نوع نانوذره با قطرهای متوسط ۱۷ و ۶۵ نانومتر، در سه سری از نانوکامپوزیت‌ها با ترکیبات مختلف، 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 هر چه محتوای ذرات بیشتر می‌شود، این قضیه مشهودتر است. همچنین ایجاد ترک در مراحل اولیه بارگذاری و رشد محوری آن، باعث ضعف سازه شده و به صورت ناگهانی تکه‌های بزرگی از سازه جدا شده و باعث از هم پاشیدن آن می‌شود. علت رشد سریع ترک‌ها در امتداد ارتفاع، شکسته شدن ناگهانی پیوندها بر اثر تنش‌های برشی بوجود آمده است که منجر به یک شکست فاجعه بار می‌شود. همچنین، این بررسی نشان می‌دهد که اندازه ذرات تاثیر قابل توجهی در قابلیت جذب انرژی این قسم سازه‌های جدار نازک ندارد. در یک محتوای ذرات یکسان، قابلیت جذب انرژی در نانوکامپوزیت‌هایی که با ترکیبی از دو اندازه ذره مختلف تقویت شده‌اند، نسبت به نانوکامپوزیت‌هایی که فقط از یک اندازه ذره جهت تقویت بهره برده‌اند، اندکی بیشتر است.

## مراجع

- [6] A. Rosa, M.O. Baptista, M.C. Rodrigues, A.F. Martins, *International Journal of Plasticity*, **20**, 2004, 1931.
- [7] S.J. Hosseinipour, G.H. Daneshi, *Thin-Walled Structures*, **41**, 2003, 31.
- [8] J. Zhang, X. Wang, L. Lu, D. Li, X. Yang, *J. Appl. Polym. Sci.*, **87**, 2003, 381.
- [9] W. Tang, M.H. Santare, S.G. Advani, *Carbon*, **41**, 2003, 2779.
- [10] Z. Bartczak, A.S. Argon, R.E. Cohen, M. Weinberg, *Polymer*, **40**, 1999, 2347.
- [11] B. Pramanik, P.R. Mantena, *Open Journal of Composite Materials*, **2**, 2012, 87.
- [12] N. Roy, R. Sengupta, A.K. Bhowmick, *Progress in Polymer Science*, **37**, 2012, 781.
- [13] G. Balaganesan, R. Velmurugan, M. Srinivasan, N.K. Gupta, K. Kanny, *International Journal of Impact Engineering*, **21**, 2014, 715.
- [14] J. Njuguna, S. Michałowski, K. Pielichowski, K. Kayvantash, A.C. Walton, *Polym. Compos.*, **32**, 2011, 6.
- [15] G.L. Farley, *J. Compos. Mater.*, **25**, 1991, 1314.
- [16] G.L. Farley, "Energy absorption in composite materials for crashworthy structures", *6<sup>th</sup> International Conference on Composite Materials (ICCM & CCM)*, 1987.
- [17] A. Mamalis, D. Manolakos, M. Ioannidis, D. Papapostolou, *Compos. Struct.*, **63**, 2004, 347.
- [18] H.R. Allahbakhsh, M. Shariati, M. Sedighi, *Journal of Central South University*, **20**, 2013, 599.
- [19] L. Peroni, M. Avalle, G. Belingardi, *International Journal of Impact Engineering*, **36**, 2009, 498.
- [20] X. Zhang, G. Cheng, *International Journal of Impact Engineering*, **34**, 2007, 1739.
- [21] Y. Guo, Y. Li, *Mater. Sci. Eng. A*, **458**, 2007, 330.
- [22] J. Han, K. Cho, *J. Mater. Sci.*, **41**, 2006, 4239.
- [23] J.C. Viana, *Plast. Rubber. Compos.*, **35**, 2006, 260.
- [24] H.Y. Liu, G.T. Wang, Y.W. Mai, *Composites Science and Technology*, **72**, 2012, 1530.
- [25] S. Mollazadeh, B. Eftekhari-Yekta, J. Javadpour, A. Yusefi, T.S. Jafarzadeh, *Journal of Non-Crystalline Solids*, **361**, 2012, 70.
- [26] H. Hamada, S. Ramakrishna, H. Sato, *Composites*, **26**, 1995, 749.
- [27] C. Gan, R.F. Gibson, G.M. Newaz, *Exp. Mech.*, **44**, 2004, 185.
- [28] F. Silva, J. Njuguna, S. Sachse, K. Pielichowski, A. Leszczynska, M. Giacomelli, *Materials and Design*, **50**, 2013, 244.
- [29] N.A. Warrior, T.A. Turner, F. Robitaille, C.D. Rudd, *Compos.: Part A Appl. Sci. Manuf.*, **34**, 2003, 543.
- [30] D.A. Hull, *Compos. Sci. Technol.*, **40**, 1991, 377.
- [31] P. Dittanet, R.A. Pearson, *Polymer*, **53**, 2012, 1890.
- [32] F. Zoukrami, N. Haddaoui, C. Vanzeveren, M. Sclavons, J. Devaux, *Polym. Int.*, **57**, 2008, 756.
- [33] J. Njuguna, F. Silva, S. Sachse, *Nanofibers Production, Properties and Functional Applications, InTech*, 2011, 401.
- [34] E.H. Andrews, "Fracture in Polymers", Oliver & Boyd, Edinburgh, 1968.
- [35] A.J. Kinloch, A.C. Taylor, *J. Mater. Sci.*, **37**, 2002, 433.
- [1] M. Farshad, "Design and analysis of shell structures", Dordrecht, Kluwer, 1992.
- [2] J.G. De Oliveira, T. Wierzbicki, *Journal of Strain Analysis*, **17**, 1982, 229.
- [3] P.K. Gupta, N.K. Gupta, *Journal of Materials Processing Technology*, **209**, 2009, 2175.
- [4] M. Shariati, H. Hatami, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, **58**, 2012, 35.
- [5] A. Dadrasi, M. Shariati, *Energy Science and Technology*, **2**, 2011, 51.