

تأثیر نانوذرات صلب سیلیس بر قابلیت جذب انرژی سازه‌های قوطی شکل جدار نازک

محمود شریعتی^۱، غلامعلی فرزی^۲، علی دادرسی^۳، محمد امیری محمود حق^۴، کمال کلاسنیانی^۵

۱ و ۵- دانشگاه فردوسی مشهد

۲ و ۴- دانشگاه حکیم سبزواری

۳- دانشگاه صنعتی شاهرود

چکیده

هنگامیکه ابعاد ذرات تقویت کننده به مقیاس نانو نزدیک می شود، نسبت به زمانیکه پرکننده ها در مقیاس ماکرو هستند، برخی خواص کامپوزیت متفاوت می شود. پارامترهای اساسی مؤثر بر خواص نانوکامپوزیت‌ها شامل توزیع، اندازه و کسر حجمی نانوذرات، خواص ماتریکس، اثرات موجود در فصل مشترک تقویت کننده و ماتریکس و پروسه ساخت است [۳-۵].

به منظور بررسی میزان جذب انرژی در سازه‌های کامپوزیتی، آزمایش فروپاشی لوله بیشتر مورد توجه قرار گرفته است [۶ و ۷]. همچنین، از دیرباز فلزات بخاطر تغییر شکل پلاستیکشان بیشتر در این حوزه مورد توجه بوده در حالیکه کامپوزیت‌ها بخاطر طبیعت شکننده‌ای که دارند کمتر به عنوان جاذب انرژی مطرح بوده‌اند ولی چنانچه بتوان آنها را به گونه‌ای مناسب تقویت کرد، می‌توانند مقادیر زیادی از انرژی برخورد را از طریق خورد شدن و یا لایه لایه شدن جذب کنند [۴].

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 [۱۰-۱۸].

تحقیقات متعددی در مورد قابلیت جذب انرژی پوسته‌هایی با مقطع مربع انجام شده است [۱۱-۱۳] 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 به طور کامل شناخته نشده است. بنابراین با توجه به مطالعه‌ای که ما در ادبیات داشتیم، این تحقیق، اولین گزارش را در مورد قابلیت جذب انرژی قوطی‌های ساخته شده از نانوکامپوزیت‌های پلیمری ارائه می‌دهد.

مشخصه‌های جذب انرژی نانوکامپوزیت‌ها می‌تواند به وسیله آزمایش فشار [۱۴]، پیچش [۱۵] و آزمایش ضربه آیزود یا شاری [۱۶] مورد ارزیابی قرار گیرد.

در این مقاله اثر افزودن نانوذرات صلب سیلیس با سه قطر متفاوت بر قابلیت جذب انرژی سازه‌های قوطی شکل جدار نازک تحت بارگذاری شبه استاتیکی مورد بررسی قرار گرفته است. بارگذاری‌ها توسط یک دستگاه سروهیدرولیک اینسترون ۸۸۰۲ اعمال شده است.

سازه‌های جدار نازک از جمله اولویت‌های طراحی در بخش جاذب‌های انرژی هستند. یکی از این نوع سازه‌ها، قوطی‌ها هستند. در این مقاله قابلیت جذب انرژی قوطی‌های ساخته شده از نانوکامپوزیت‌های پایه اپوکسی که با نانوذرات سیلیس با سه قطر متفاوت ۱۷، ۲۵ و ۶۵ نانومتر تقویت شده‌اند، مورد بررسی قرار گرفته 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 سیلیس باعث کاهش قابلیت جذب انرژی سازه‌ها شده و سازه‌ها تحت یک مود ناپایدار و خطرناک دچار فروپاشی می‌شوند. همچنین اندازه‌ی نانوذرات بکار رفته برای تقویت اپوکسی، تأثیر قابل توجهی را بر قابلیت جذب انرژی نشان نداده است.

واژه های کلیدی: قوطی، قابلیت جذب انرژی، نانوکامپوزیت، اپوکسی، سیلیس.

مقدمه

جذب انرژی، امروزه یک نیاز ضروری در طراحی بسیاری از تجهیزات و وسایل نظیر اتومبیل، ریل خط آهن و هواپیما است. 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 فلزات پرکاربردترین مواد در سازه‌های جذب انرژی هستند، و این بخاطر مشخصه‌های تغییر شکل پلاستیکشان است که آنها را قادر به جذب انرژی در حالات کنترل شده می‌کند [۱]. برخلاف فلزات، کامپوزیت‌های پلیمری، نوعاً این تغییر شکل پلاستیک را از خودشان نشان نمی‌دهند، هرچند که روابط تنش-کرنششان ممکن است علائمی از انواع دیگر رفتارهای غیر خطی را نشان دهد، اما آنها در جذب انرژی فراتر از فلزات عمل می‌کنند. نانوکامپوزیت‌های پلیمری، پتانسیل بهبود همزمان چندین خاصیت شامل سفتی را داراست [۲].

بررسی‌های تجربی نشان می‌دهد که برخی از نانوکامپوزیت‌ها با ماتریکس‌ها و پرکننده‌های خاص، به بهبودهای مهم و هم زمانی در سفتی، چقرمگی شکست، جذب انرژی ضربه‌ای و مستهلک کردن ارتعاشات دست یافته‌اند که این مشخصه‌ها، می‌توانند از ویژگی‌های مهم در ساختار اتومبیل یا هواپیما باشند.

۱- استاد

۲- دانشیار

۳- دانشجوی دکتری- ۰۹۱۵۵۷۱۷۵۱۰ - ali.dadrasi@gmail.com

۴- کارشناس ارشد

رزین اپوکسی آزمایش شده، بر پایه‌ی بیسفنول A و با نام تجاری ML-504 بوده که از شرکت مواد مهندسی مکرر تهیه شده است. همچنین نانوذرات کروی سیلیکا (SiO₂) با اندازه ذرات متوسط ۱۷، ۲۵ و ۶۵ نانومتر از شرکت US-nano تهیه شده که دارای خلوص بالای ۹۹/۵ درصد است و به شکل پودر سفید رنگ می‌باشد. لازم به ذکر است که بازه اندازه ذرات با اندازه متوسط ۱۷ nm، ۲۰-۱۵ و بازه ذرات با اندازه متوسط ۲۵ nm، ۳۰-۲۰ و نهایتاً بازه ذرات با اندازه متوسط ۶۵ nm، ۷۰-۶۰ می‌باشد. هاردنر تهیه شده، هاردنر پلی آمینی HA-12 است. چگالی رزین بکار رفته ۱۱۱۰ kg/m³ و چگالی نانوذرات سیلیکا ۲۴۰۰ kg/m³ است.

آماده سازی نانوکامپوزیت

در این تحقیق، پلیمر ترموست بر پایه‌ی بیسفنول A، با افزودن صفر تا ۴/۵ درصد وزنی نانوذرات کروی SiO₂ تقویت شده است. رزین اپوکسی از نوع ML-504 بوده و 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 ضعفی 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 سویالستین^۱ 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 رهاساز 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 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، کامپوزیت‌های حاوی نانوذرات با اندازه متوسط ۲۵ nm، با حرف M و نهایتاً 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.

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.

بحث و نتیجه‌گیری

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. همانطور که در شکل ۲ ملاحظه می‌شود، قابلیت جذب انرژی با افزایش 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 [۱۷ و ۱۸]، 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 صلیبیت نانوکامپوزیت مورد بررسی دارد.

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 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 [۱۹ و ۲۰]. 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 بیضی سفید رنگ مشخص شده‌اند.

همچنین در شکل ۲ ملاحظه می‌شود که اندازه نانوذرات تأثیری در قابلیت جذب انرژی ندارد.

مکانیزم رشد و گسترش ترک به مود شکستی که به سازه‌ی القاء می‌شود بستگی دارد. مدهای 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، مدهای شکست زیر قابل بیان است [۲۱].

مود ۱: مود فروپاشی پیش‌رونده^۲ با ایجاد ترک‌های ریز و لایه لایه شدن اندک. این مود شکست منطبق بر چین‌خوردگی 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 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

² Progressive Failure Mode

¹ Soya Lecithin

چشمگیری استحکام و قابلیت جذب انرژی سازه را کاهش می‌دهد. این مود شکست همان مودیست 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 بصورت ترکش از آن جدا می‌شوند لبه‌هایی بسیار تیز دارند که با نیروی زیادی به اطراف پرتاب می‌شوند.

قابلیت جذب انرژی

برای بررسی قابلیت جذب انرژی سازه‌ها پارامترهایی وجود دارد که مهمترین آنها جذب انرژی ویژه^۳ (SEA) است. که این پارامتر بصورت انرژی جذب شده کل (سطح زیرنمودار بار-جابجایی) تقسیم بر وزن 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 [۲۲ و ۲۳].

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 کامپوزیت تقویت شده با سیلیسیم است و هر چه محتوای ذرات افزایش می‌یابد، بر صلیبیت سازه افزوده شده و پیوندها شکننده تر می‌شوند. مطالعات پیشین نیز نشان می‌دهد که هرچه 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 [۲۴]، 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 محوری عمده را القا می‌کند که به دیواره سازه منتقل می‌شود و منجر به ایجاد ترک‌های محوری شده و قابلیت جذب انرژی را کاهش می‌دهد که به این موضوع در بحث ریخت شناسی شکست مفصل پرداخته شده است. در شکل ۴ مقایسه‌ای بین SEA مربوط به نانوکامپوزیت‌های تقویت شده با محتوای مختلف نانوذرات، در سه سری S، M و L نشان داده شده است. همانطور که از این شکل پیداست اندازه ذرات تأثیر قابل توجهی در قابلیت جذب انرژی ندارند و علت اینکه در محتوای ذرات یکسان، SEA اندکی در سری S از سری M، و در سری M از سری L بیشتر است، به خاطر این است که ذرات ریزتر، بهتر با ماده زمینه پیوند برقرار می‌کنند. پی‌یرسون [۲۵] در گزارش خود به این نکته اشاره کرده بود که اندازه ذرات سیلیکا تأثیری 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.

نکته‌ای که باید به آن توجه داشت، توزیع نانوذرات داخل رزین است. چنانچه این توزیع به گونه‌ای باشد که ذرات در بعضی نقاط انباشته^۴ 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 [۲۶].

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 [۲۷].

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	۱۲/۰۲	۴/۵ % S
-۱۵/۶۵	۱/۱۵۳	۴۱/۹۳	۱۴/۴۷	۱/۵ % M
-۲۹/۵۵	۰/۹۶۶	۳۵/۲۵	۱۳/۳۵	۳/۰ % M
-۴۴/۰۳	۰/۷۶۵	۲۷/۰۹	۱۲/۵۱	۴/۵ % M
-۲۰/۷۰	۱/۰۸۴	۳۸/۶۴	۱۴/۰۹	۱/۵ % L
-۳۶/۶۴	۰/۸۶۶	۳۰/۳۷	۱۳/۲۳	۳/۰ % L
-۴۹/۱۵	۰/۶۹۵	۲۴/۵۶	۱۲/۳۸	۴/۵ % L

ریخت شناسی شکست

سطح شکست نمونه توسط یک میکروسکوپ الکترونی روبشی VEGA3 TESCAN، مورد بررسی قرار گرفته است. تمام نمونه‌ها پیش از تحلیل توسط یک لایه نازک طلا به ضخامت حدوداً ۵ نانومتر، روکش داده شده‌اند تا امکان تصویربرداری بهتر فراهم شود. ولتاژ به کار رفته ۳۰ kV است. در شکل ۵ و ۶ به ترتیب 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؛ 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.

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. همچنین مشاهده می‌شود که

⁴ Agglomeration

³ Specific Energy Absorption

using a die. *International Journal of Plasticity*, v. 20, 2004, pp. 1931-1946.

7. Hosseinipour S.J., and Daneshi G.H., Energy absorption and mean crushing load of thin-walled grooved tubes under axial compression. *Thin-Walled Structures*, v. 41, 2003, pp. 31-46.

8. Farley, G.L., The effects of crushing speed on the energy-absorption capability of composite tubes. *J Compos Mater*, v. 25, n. 10, 1991, pp.1314-1320.

9. Farley, G.L., Energy absorption in composite materials for crashworthy structures. In: *Sixth international conference on composite materials and second European conference on composite materials* (ICCM & CCM). v. 3.

10. Mamalis, A., Manolakos, D., Ioannidis, M., and Papapostolou, D., Crashworthy characteristics of axially statically compressed thin-walled square CFRP composite tubes: experimental. *Compos Struct*, v. 63, n. 3, 2004, pp. 347-60.

11. Allahbakhsh H. R., Shariati M., and Sedighi M. Effect of stiffeners on crashworthiness of square aluminium columns considering damage evolution, *Journal of Central South University*, v. 20. N. 2. 2013. Pp. 599-607.

12. Peroni L., Avalle M., Belingardi G., Comparison of the energy absorption capability of crash boxes assembled by spot-weld and continuous joining techniques. *International Journal of Impact Engineering*. V. 36, 2009, pp. 498-511.

13. Zhang X., and Cheng G., A comparative study of energy absorption characteristics of foam-filled and multi-cell square columns. *International Journal of Impact Engineering*, v. 34, 2007, pp. 1739-1752.

14. Guo Y., and Li Y. Quasi-static/dynamic response of SiO₂-epoxy nanocomposites. *Mater Sci Eng: A*, v. 458, n. 1, 2007, pp. 330-5.

15. Han J., Cho K. Nanoparticle-induced enhancement in fracture toughness of highly loaded epoxy composites over a wide temperature range. *J Mater Sci*, v. 41, n. 13, 2006, pp. 4239-45.

16. Viana J. Polymeric materials for impact and energy dissipation. *Plast, Rubber Compos*, v. 6, n. 7, 2006, pp.260-267.

17. Liu H.Y., Wang G.T., and Mai Y.W., Cyclic fatigue crack propagation of nanoparticle modified epoxy. *Composites Science and Technology*, v. 72, 2012, pp. 1530-1538.

18. Mollazadeh S., Eftekhari Yekta B., Javadpour J., Yusefi A., and Jafarzadeh T.S. The role of TiO₂, ZrO₂, BaO and SiO₂ on the mechanical properties and crystallization behavior of fluorapatite-mullite glass-ceramics, *Journal of Non-Crystalline Solids*, v. 361, 2012, pp. 70-78.

19. Hamada H., Ramakrishna S., and Sato, H. Crushing mechanism of carbon-fiber peek composite tubes. *Composites*, v. 26, n. 11, 1995, pp. 749-55.

20. Gan C., Gibson R.F., and Newaz, G.M. Analytical/experimental investigation of energy absorption in grid-stiffened composite structures under transverse loading. *Exp Mech*, v. 44, n. 2, 2004, pp. 185-94.

21. Silva F., Njuguna J., Sachse S., Pielichowski K., Leszczynska A., and Giacomelli M., The influence of multiscale fillers reinforcement into impact resistance and energy absorption properties of polyamide 6 and polypropylene nanocomposite structures. *Materials and Design*, v. 50, 2013, pp. 244-252.

22. Gan C., Gibson R.F., and Newaz G.M., Analytical/experimental investigation of energy absorption in grid-stiffened composite structures under transverse loading. *Exp Mech*, v. 44, n. 2, 2004, pp. 185-94.

از برخی از این لایه‌ها، لایه‌هایی دیگری منشعب شده که این پدیده در سطح شکست نانوکامپوزیت‌ها واضح‌تر است. دلیل این موضوع چند شاخه شدن ترک^۵ به خاطر 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].

با توجه به شکل‌های ۷ و ۸، این موضوع را می‌توان با مقایسه زبری سطح شکست اپوکسی دو نمونه مذکور نیز بررسی کرد. در بررسی دیگری که از سطح شکست نمونه توسط یک میکروسکوپ الکترونی روبشی Phenom pro X ساخت کشور هلند، مورد بررسی گرفته است، زبری بدست آمده از توپوگرافی سه بعدی این سطوح که در دو مسیر انتخابی دلخواه بدست آمده است، نشان می‌دهد که اختلاف سطح بین بالاترین و پایین‌ترین نقطه در این مسیر انتخابی در نمونه اپوکسی خالص، $65 \mu\text{m}$ و در نانوکامپوزیت تقویت شده با ۳ درصد وزنی از ذرات سیلیکا به قطر 65 nm ، $119/71 \mu\text{m}$ است. این مسیرهای انتخابی در شکل‌های مذکور با رنگ سبز نشان داده شده‌اند. توپوگرافی سطح شکست نمونه‌ها نشان می‌دهد که هرچه محتوای نانوذرات افزایش می‌یابد، زبری سطح افزوده می‌گردد.

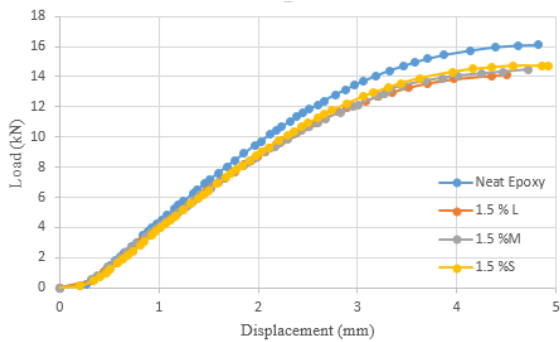
نتایج

در این تحقیق قابلیت جذب انرژی پوسته‌های جدار نازک قوطی شکل ساخته شده از نانوکامپوزیت‌های پایه اپوکسی تقویت شده با سه 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.

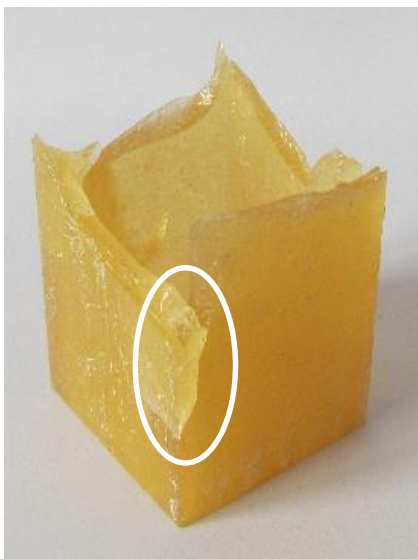
مراجع

1. Ramakrishna S. Microstructural design of composite materials for crashworthy structural applications. *Mater Des* v. 18, n.3, 1997, pp.167-73.
2. Viana JC. Polymeric materials for impact and energy dissipation. *Plast Rubber Compos*, v.35, n.6, 2006, pp. 260-7.
3. Zhang J, Wang X, Lu L, Li D., and Yang X. Preparation and performance of high impact polystyrene (HIPS)/Nano-TiO₂ nanocomposites. *J Appl Polym Sci*, v.87, n.3, 2003, pp. 381-5.
4. Tang W, Santare MH., and Advani SG. Melt processing and mechanical property characterization of multi-walled carbon nanotube/ high density polyethylene (MWNT/HDPE) composite films. *Carbon*, v.41, n.14, 2003, pp. 2779-85.
5. Bartczak Z, Argon AS, Cohen RE., and Weinberg M. Toughness mechanism in semicrystalline polymer blends: II high-density polyethylene toughened with calcium carbonate filler particles. *Polymer*, v.40, n.9, pp. 2347-65.
6. Rosa A., Baptista M.O., Rodrigues M.C., Martins A.F., An investigation on the external inversion of thin-walled tubes

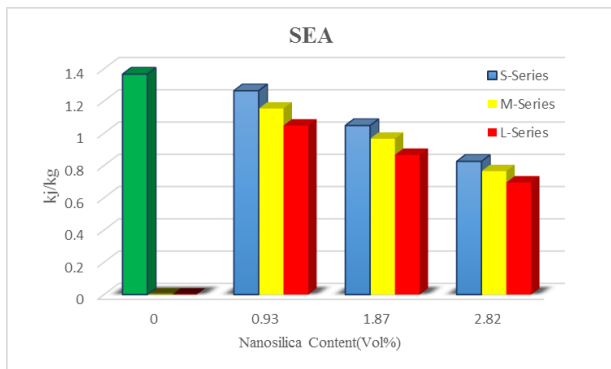
⁵ Crack Forking



شکل ۲- نمودار بار-جابجایی برای کامپوزیت تقویت شده با نانوذراتی به قطرهای ۱۷ nm (سری S)، ۲۵ nm (سری M)، ۶۵ nm (سری L) و مقایسه آن با اپوکسی خالص.



شکل ۳- شکست ترد نمونه و ایجاد لبه های تیز بر اثر گسترش ترک های محوری



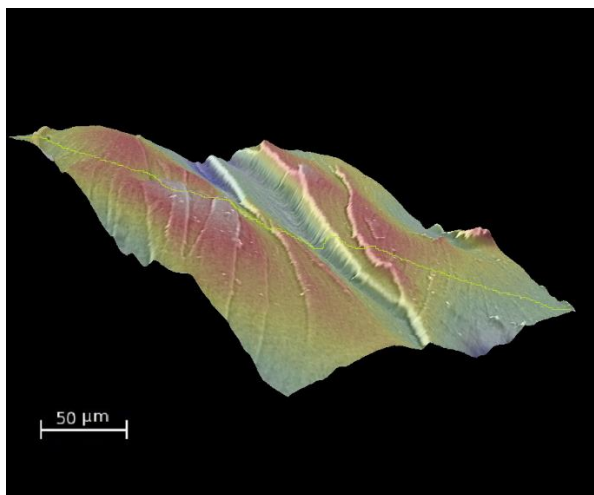
شکل ۴- مقایسه قابلیت جذب انرژی ویژه بین سه سری S, M, و L.

23. Warrior N.A., Turner T.A., Robitaille F., and Rudd C.D., Effect of resin properties and processing parameters on crash energy absorbing composite structures made by RTM. *Compos: Part A Appl Sci Manuf*, v. 34, n. 6, 2003, pp. 543-50.
24. Hull D. A., unified approach to progressive crushing of fibre-reinforced composite tubes. *Compos Sci Technol*, v. 40, n. 4, 1991, pp. 377-421.
25. Dittanet P., and Pearson R.A., Effect of silica nanoparticle size on toughening mechanisms of filled epoxy. *Polymer*, v.53, 2012, pp.1890-1905.
26. Zoukrami F., Haddaoui N., Vanzeveren C., Sclavons M., and Devaux J. Effect of compatibilizer on the dispersion of untreated silica in a polypropylene matrix. *Polym Int*, v. 57, n.5, 2008, pp.756-63.
27. Njuguna J., Silva F., and Sachse S., Nanocomposites for vehicle structural applications. *Nanofibers – production, properties and functional applications*, *InTech*, 2011, pp. 401-34.
28. Andrews E.H., Fracture in polymers. 1st ed, Oliver & Boyd, Edinburgh, 1968.

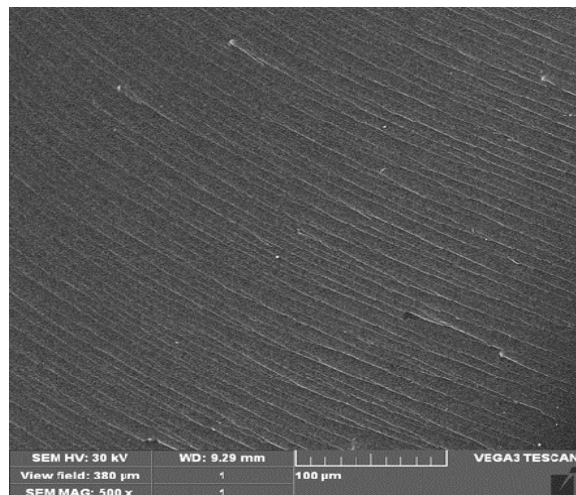
شکل ها و نمودارها



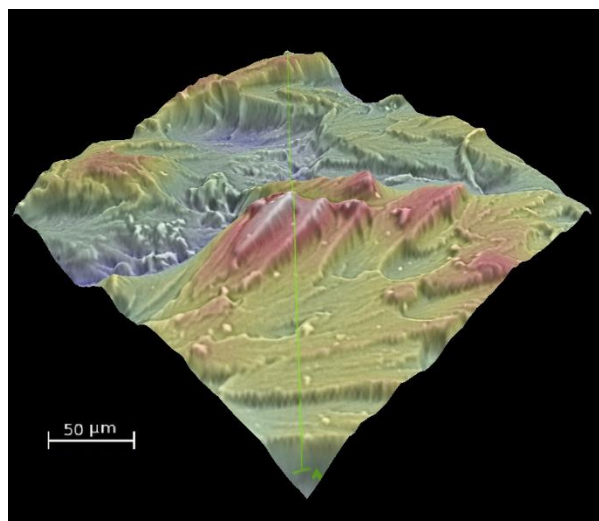
شکل ۱- نمونه کامپوزیتی تحت آزمایش جذب انرژی.



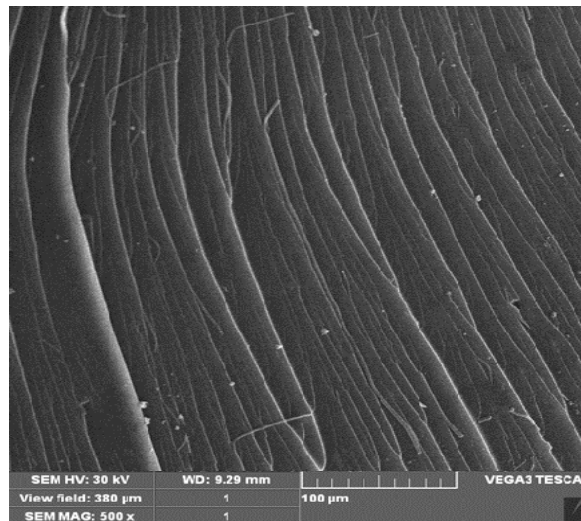
شکل ۷- توپوگرافی سطح شکست اپوکسی خالص. اختلاف سطح بالاترین و پایین‌ترین نقطه در مسیر انتخابی نشان داده شده، $21/81 \mu m$



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



شکل ۸- توپوگرافی سطح شکست کامپوزیت تقویت شده با ۳ درصد وزنی از ذرات سیلیکا با اندازه ذرات 65 nm . اختلاف سطح بین بالاترین و پایین‌ترین نقطه در مسیر انتخابی نشان داده شده $119/71 \mu m$



شکل ۶- میکروگراف SEM از سطح شکست کامپوزیت تقویت شده با ۳ درصد وزنی از ذرات سیلیکا با اندازه ذرات 65 nm و بزرگنمایی ۵۰۰ برابر