

بررسی خواص مکانیکی مواد مدرج پله‌ای پایه پلیمری تقویت شده با نانو لوله کربن با استفاده از آزمون خمش سه نقطه‌ای

سحر محررزاده کرد^۱، آیدا شهریاری^۲، اشکان سپهر افغان^۳

۱ دکتری مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، s.moharrerzadeh@tabrizu.ac.ir

۲ دکتری مهندسی مواد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

۳ عضو هیات علمی، گروه مهندسی مکانیک، جهاد دانشگاهی صنعتی شریف، تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۱۲

چکیده

هدف از این مقاله، بررسی خواص مکانیکی مواد مدرج پله‌ای پایه اپوکسی تقویت شده با نانو لوله‌های کربنیاست. در این مطالعه، خواص مکانیکی با آزمون خمش سه نقطه بررسی شده است. روشی که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است روش های محاسبه مقدار چقرمگی شکست است. نمونه‌ها با شش درصد جرمی مختلف از نانو لوله‌های کربنی ساخته شده‌اند. درصدهای جرمی نانو لوله‌های کربنی عبارتند از ۰٪، ۰/۰۱٪، ۰/۰۵٪، ۰/۱٪، ۰/۲٪، ۰/۳٪. از دستگاه اولتراسونیک برای توزیع یکنواخت و کاهش آگلومره شدن نانو لوله های کربن در زمینه اپوکسی استفاده شد. به منظور بررسی چقرمگی شکست، ترک های یکسان در دو جهت مختلف بر روی نمونه‌ها یکبار در سمت با درصد پایین نانو لوله کربن و بار دیگر در سمت با درصد بالای نانو لوله کربن ایجاد شد. آزمایش خمش سه نقطه حداقل سه بار برای هر نمونه تکرار شد. برای هر ترک، مقادیر مختلف چقرمگی شکست و نیروهای شکست وجود دارد. علاوه بر این، سطح شکست نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که جهت ترک، درصد ذرات نانو لوله کربنی و پراکندگی نانو لوله‌های کربن پارامترهای مهم هستند به طوری که در مواد کامپوزیتی با تعداد لایه‌های بیشتر، چقرمگی شکست بالاتر بود و حضور درصد جرمی بالاتر از ذرات نانو لوله کربنی تنها منجر به بهبود استحکام تک لایه می‌شود و در افزایش چقرمگی کل ماده اثرگذار نیست. همچنین در این تحقیق، مدول الاستیسیته خمشی که متفاوت از مدول الاستیسیته کششی است، بررسی گردید.

واژگان کلیدی

مواد مدرج پله‌ای، کامپوزیت‌های پایه پلیمری، نانولوله‌های کربن، خواص مکانیکی، چقرمگی شکست؛ آزمون خمش سه نقطه‌ای.

۱. مقدمه

بهبود کامپوزیت‌های زمینه پلیمری با افزودن نانو لوله کربنی در بسیاری از تحقیقات، موضوع مهمی است. برخی از تحقیقات مواد پلیمری تقویت شده با نانو لوله های کربن که تحت تنش های کششی قرار دارند را مورد بررسی قرار داده اند [۱]، برخی تاثیر ذرات نانو لوله کربنی بر مقاومت مکانیکی این مواد [۲] و همچنین نقش نانو لوله کربنی در مواد الکترونیکی [۳] و نانو دستگاه‌های الکترونیکی را مورد مطالعه قرار دادند [۴]. کامپوزیت پلیمری ممکن است خواص مکانیکی بهتری در مقایسه با پلیمرهای غیر تقویت شده داشته باشند [۵، ۶]. اخیراً کامپوزیت‌های پلیمری در بیوتکنولوژی، صنایع خودرو و هوا فضا مورد توجه قرار گرفته‌اند [۷-۹]. نانو لوله های کربن می‌توانند خواص مکانیکی پلیمر را بهبود دهند [۱۰ و ۱۱]. علاوه بر این، نانو لوله کربنی ها می توانند با پل زدن در اپوکسی ها مواد را مستحکم تر کنند. اضافه کردن نانو لوله‌های کربنی باعث افزایش مقاومت کششی، [۱۰، ۱۲، ۱۳]، استحکام خمشی و مدول خمشی اپوکسی [۱۴] و چقرمگی شکست می‌شود [۱۵، ۱۶]. ذرات نانو لوله کربنی، پرکننده‌های خوبی برای بهبود عملکرد مواد هستند [۱۷]. استفاده از رزین‌های اپوکسی در کاربردهای مختلف مانند بخش های پیچیده هواپیما [۱۸، ۱۹]، الکترونیک [۱۲، ۲۰] و غیره بسیار رایج می باشد. توزیع یکنواخت ذرات نانو لوله کربنی در زمینه پلیمری بسیار مهم است، چنانچه توزیع این ذرات در زمینه به صورت همگن باشد، می‌توانند منجر به بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت شوند [۲۱-۲۳]. نوع نانولوله های کربن در قابلیت پراکندگی مناسب در زمینه پلیمری بسیار مهم است. به عنوان مثال نانو لوله‌های کربنی چند دیواره همراه با توزیع همگن عملکرد خوبی در بهبود خواص مکانیکی زمینه پلیمری داشته‌اند [۲۴، ۲۵].

جلوگیری از اختلال در پراکندگی یکنواخت ذرات نانو لوله کربنی در زمینه کامپوزیت مهم است [۲۶]. برخی روشها مانند همزدن مکانیکی، آلتراسونیک، مخلوط کردن با استفاده از سانتریفیوژ، اصلاح شیمیایی سطح ذرات نانو لوله کربنی و اضافه کردن سورفکتانت‌ها^۱ (عامل آلی برای فعال کردن سطح) پراکندگی ذرات را در زمینه پلیمری بهبود می‌بخشد [۲۷ و ۲۸]. پراکندگی و ساختار ذرات نانو در زمینه پلیمری همان طور که در تحقیقات قبل توسط محققین انجام شده است می‌تواند توسط

میکروسکوپ الکترونی روبشی^۲ (SEM) مورد بررسی قرار گیرد [۱۷، ۲۹]. برخی از مطالعات برای بررسی خواص مکانیکی مانند مقدار چقرمگی شکست در مواد غیر مدرج و مدرج انجام شده است [۲۹-۳۱]. روش های کاربردی عبارتند از آزمایش کشش [۳۲]، آزمایش خمش سه نقطه ای و آزمون خمش چهار نقطه ای [۳۳]. همچنین مطالعات انجام شده با استفاده از ذرات تقویت کننده همراه با پوشش نیز بررسی شده است که تحقیقات نشان دهنده آن است که حضور ذرات تقویت شده پوشش‌دار می‌تواند منجر به بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت شود، به طوری که در مطالعه انجام شده بر روی کامپوزیت تولید شده همراه با ذرات فایبر گلاس پوشش داده شده با گرافن، بهبود در چقرمگی شکست مشاهده شد [۳۴]. مطالعه دیگر در زمینه استفاده از نانو لوله‌های کربنی چند دیواره به همراه مونت مرلینت نشان داد که حضور این دو ماده تقویت کننده در زمینه اپوکسی منجر به افزایش استحکام کششی و مدول الاستیک کامپوزیت در مقایسه با اپوکسی خالص به میزان قابل توجهی می‌شود [۳۵].

همچنین یکی دیگر از تحقیقات نشان داد که افزودن تنها درصد وزنی بسیار کمی از نانو ذرات گرافن منجر به بهبود قابل توجه چقرمگی شکست اپوکسی می‌شود [۳۶]. نوآوری کار تحقیقاتی حاضر، ساخت مواد تابعی است که به صورت پله‌ای و با درجات مختلف از ذرات نانو لوله کربنی ایجاد شده‌اند، همچنین مقایسه خواص مکانیکی آنها با کامپوزیت‌های متداول است که تابعی نیستند. در این مطالعه تاثیرات ذرات نانو لوله کربنی بر چقرمگی شکست و مدول الاستیسیته خمشی در مواد مدرج پله ای پایه پلیمری تقویت شده بررسی شده است. علاوه بر این، سطح شکست این مواد مورد مطالعه قرار گرفت و رابطه بین خواص مکانیکی و ریزساختار مورد بررسی قرار گرفت. این کار با دو جهت مختلف ترک انجام شد.

۲. مواد و روش آزمایش

نانو لوله‌های کربنی که در این تحقیق استفاده شدند، نانو لوله‌های کربنی نازک چند دیواره، سری Nanocyl (NC7000) (Nanocyl Company, Belgium) هستند. مطابق اطلاعاتی که سازنده در بروشور این مواد اشاره کرده است، این ذرات نانو لوله کربنی با روش CVD (رسوب نشانی شیمیایی فاز بخار) با خلوص کربن

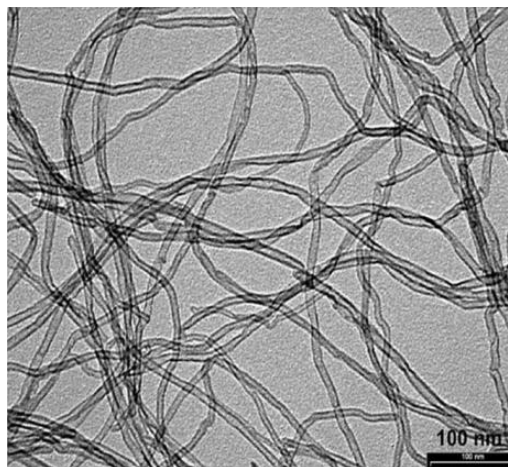
مخلوط شدند و سپس توسط دستگاه اولتراسوند (Hielscher UP200S، آلمان) تنظیم شده با دامنه ۵۰٪ و نیم سیکل پراکنده شدند. همچنین از ماشین مغناطیسی (Heidolph MH 3001K، آلمان) با سرعت چرخش ۲۰۰ rpm استفاده شد که به طور همزمان مخلوط کردن به صورت برشی را انجام داد. در این شرایط برای آماده سازی هر صد گرم از مخلوط ذرات نانو لوله کربنی و رزین، بیست و پنج دقیقه زمان لازم بود. پس از خنک شدن مخلوط، ماده سخت کننده ابتدا با روش دستی و سپس توسط دستگاه سانتریفیوژ تحت خلا (Thinky، ایالات متحده آمریکا) به مدت سه دقیقه با مواد پلیمری مخلوط شد [۳۸].

برای جلوگیری از تشکیل حباب های هوا، از دستگاه سانتریفیوژ تحت خلاء استفاده شد. حباب های هوا با ایجاد حفره ها بر خصوصیات محصول نهایی تأثیر می گذارد. پس از اختلاط در سانتریفیوژ، مخلوط به قالب ریخته شد و با آب سرد خنک شد. این قالب ها قبل از ریختن مواد، با واکس LOCTITE700-NC شرکت Henkel آلمان در دو مرحله به فاصله پنج دقیقه طبق دستورالعمل واکس مذکور صیقل داده شدند. برای ساخت ماده مدرج پله ای چند لایه، مخلوط دوم در قالب در زمان ژل شدن مخلوط اول ریخته شد و برای ریختن مخلوط سوم در مورد نمونه های سه لایه و چهار لایه، به طور مشابه، فرآیند در زمان ژل شدن لایه های قبلی انجام شد. به عنوان مثال برای ماده مدرج سه لایه ۰، ۱/۸ و ۰/۲ ابتدا اپوکسی، سپس لایه با ۱/۸ درصد نانولوله کربن و پس از آن لایه با ۰/۲ درصد نانولوله کربن در قالب ریخته شد. در مراحل ساخت لایه های اول، دوم و سوم نیازی به پخت نمونه های کامپوزیتی نیست، زیرا با استفاده از آب سرد که بر روی قالب ریخته می شود عملیات ژل شدن ماده کامپوزیتی حاوی هاردنر صورت می گیرد [۶]. پس از آماده شدن تمام لایه ها، نمونه های کامپوزیتی به مدت ۲۴ ساعت در هوا خنک شدند و سپس در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد به مدت ۳ ساعت و سپس ۸۰ درجه سانتی گراد به مدت دو ساعت در کوره حرارت دهی و پخته شدند. مشخصات نمونه های ساخت شده در جدول ۱ نشان داده شده است.

۲-۲. تست چقرمگی شکست

برای بررسی چقرمگی شکست مواد بر اساس روش ارائه شده در استاندارد ASTM D5045، هر نمونه توسط دستگاه تست

۹۰٪ ساخته شده اند. قطر متوسط NC7000 ۹/۵ نانومتر و طول متوسط آنها ۱/۵ میکرومتر بود. شکل ۱ تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) از مورفولوژی ذرات نانو لوله کربنی که توسط شرکت نانوسیل ساخته شده است را نشان می دهد [۳۷].



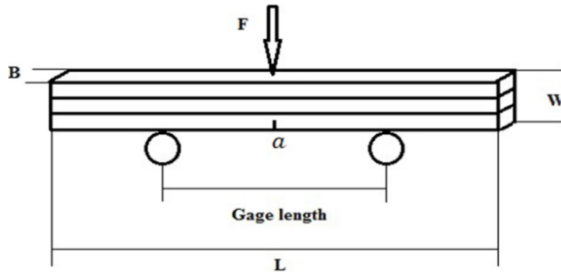
شکل ۱. تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری از نانو لوله های کربنی تهیه شده توسط شرکت نانوسیل [۳۷].

NC7000 یک کربن آمورف ۲۵۰ تا ۳۰۰ متر مربع بر گرم است. این نوع ذرات نانو لوله کربنی به صورت ویسکر (رشته ای) است که بر شدت تنش و خواص مقاومتی ماده تأثیر می گذارد. در این تحقیق از رزین مشخص تحت عنوان Resin MGSTM RIMR 135 و ماده سخت کننده (هاردنر) EPIKURETM Curing Agent MGSTM RIMH 134 شرکت HEXION مورد تایید Llyod آلمان استفاده شده است. در این تحقیق نمونه ها با درصدهای مختلف از نانو لوله های کربنی تهیه شده اند که این درصدها شامل ۰٪، ۰/۱٪، ۰/۰۵٪، ۱/۸٪، ۰/۲٪، ۰/۳٪ است که انتخاب این درصدها براساس توانایی پراکندگی ذرات نانو لوله کربنی در اپوکسی بر اساس تحقیقات گذشته و تجهیزات قابل دسترسی در شرایط آزمایشگاهی بوده است.

۲-۱. آماده سازی

برای ساخت نمونه ها در ابتدا ابعاد قالب بر اساس استاندارد ASTM D-5045 انتخاب شد. پس از اندازه گیری حجم قالب ها، مقدار رزین، هاردنر و ذرات نانو لوله کربنی محاسبه شدند. سپس در مرحله اول رزین و ذرات نانو لوله کربنی به همراه همزن دستی

در سطح مقابل لایه ترک دار بر لایه ترک دار اعمال شد به گونه‌ای که شکل ۳ تصویر نمونه‌های آماده شده برای تست خمش سه نقطه‌ای و اعمال بار بر آنها را نشان می‌دهد.



شکل ۳. شماتیکی از نمونه‌ها تحت آزمون خمش سه نقطه‌ای.

مطابق شکل ۳، ابعاد نمونه‌های تست به شرح زیر است:

ضخامت نمونه‌ها ۵ میلی متر $B=$

پهنای نمونه‌ها با توجه به اندازه قالب بین ۵ تا ۱۰ میلی‌متر

$W=$

طول ترک حدود ۱ میلی متر $a=$

طول نمونه ۱۰۰ میلی متر $L=$

طول گیج نمونه ۵۰ میلی متر $gage\ length=$

شکل ۴ برخی از نمونه‌های مورد استفاده در آزمون خمش سه

نقطه را نشان می‌دهد. استحکام شکست مستقل از ضخامت مواد

است [۳۳].



شکل ۴. نمونه‌های تابعی با جهت مختلف ترک.

مقدار چقرمگی شکست، KIC، توسط معادلات بر اساس

کرنش الاستیک محاسبه شد [۳۱].

محاسبه مقدار چقرمگی شکست با این روش تست وابسته به

حضور ترک تیز در نمونه است.

یونیورسال کشش (Santam, Universal Testing Machine) تحت تست خمش سه نقطه‌ای قرار گرفت. با توجه به الزامات موجود در استاندارد ASTM D5045، برای اطمینان از تکرارپذیری نتایج مربوط به تست خمش و محاسبه چقرمگی شکست، حداقل ۳ نمونه از مواد مدرج کامپوزیتی می‌بایست آماده شوند و مورد تست قرار گیرند که بر این اساس از هر نمونه کامپوزیتی مدرج، ۳ نمونه دیگر تهیه شد و تحت تست خمش سه نقطه‌ای قرار گرفت. تصویر دستگاه کشش که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفت، در شکل ۲ نشان داده شده است [۳۹].

جدول ۱. مشخصات نمونه‌های پلیمری

شماره	نوع نمونه
۱	Epoxy/Epoxy+0.01wt % نانو لوله کربنی
۲	Epoxy/Epoxy+0.1wt % نانو لوله کربنی
۳	Epoxy+0.05wt%/Epoxy+0.1wt % نانو لوله کربنی
۴	Epoxy+0.1wt%/Epoxy+0.2wt % نانو لوله کربنی
۵	Epoxy+0.2wt%/Epoxy+0.3wt % نانو لوله کربنی
۶	Epoxy+0.1wt%/Epoxy+0.2wt % نانو لوله کربنی
۷	Epoxy/Epoxy+0.1wt%/Epoxy+0.2wt % نانو لوله کربنی
	Epoxy+0.3wt/ % نانو لوله کربنی



شکل ۲. دستگاه تست خمش سه نقطه‌ای.

تست خمش سه نقطه‌ای با روش کنترل جابجایی با سرعت

جابجایی ۰/۰۱ میلی متر بر ثانیه انجام شد. آزمایش‌ها بر روی

نمونه‌ها طبق استاندارد ASTM 5045 با جهات مختلف ترک

خوردگی سه مرحله تکرار شد. ترکها در دو لایه از نمونه‌های چند

لایه‌ای ایجاد شدند، ترکها بر روی لایه با کمترین درصد ذرات

نانو لوله کربنی و بیشترین درصد ذرات نانو لوله کربنی ایجاد

شدند. ترک تیز با استفاده از تیغه ساخته شد. سپس نیروی خمشی

محاسبه KIC:

چقرمگی شکست، P، مقدار باری است که با آن ترک شروع به رشد می‌کند.

با استفاده از معادله ۱ فاکتور شدت تمرکز تنش با مشخص بودن اندازه ترک تیز در لبه نمونه قابل محاسبه است [۴۰]:

$$K_I = \frac{4P}{B} \sqrt{\frac{\pi}{W}} \left[1.6 \left(\frac{a}{W}\right)^{1/2} - 2.6 \left(\frac{a}{W}\right)^{3/2} + 12.3 \left(\frac{a}{W}\right)^{5/2} - 21.2 \left(\frac{a}{W}\right)^{7/2} + 21.8 \left(\frac{a}{W}\right)^{9/2} \right] \quad (1)$$

این معادله روش محاسبه Bower است که در آن P، B، W و a به ترتیب مقدار نیرو، ضخامت، پهنا نمونه و طول ترک است. روش دیگر مطابق با استاندارد ASTM D 5045-99 به شرح زیر است [۴۰]:

$$K_I = \frac{P}{BW} f(x) \quad (2)$$

$$f(x) = 6 \left(\frac{a}{W}\right)^{1/2} \left[\frac{1.99 - \frac{a}{W} \left(1 - \frac{a}{W}\right) \left(2.15 - 3.93 \frac{a}{W} + 2.7 \left(\frac{a}{W}\right)^2\right)}{\left(1 + 2 \frac{a}{W}\right) \left(1 - \frac{a}{W}\right)^{3/2}} \right] \quad (3)$$

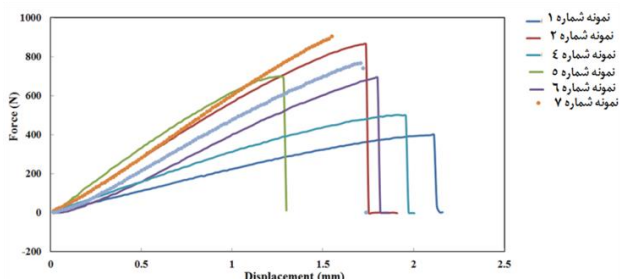
مقدار چقرمگی شکست در دو روش برای ترک‌های با ابعاد کمتر از ۰/۶ برابر اندازه پهنای نمونه یکسان است. محاسبه مقدار

۳-۲. بررسی سطح شکست

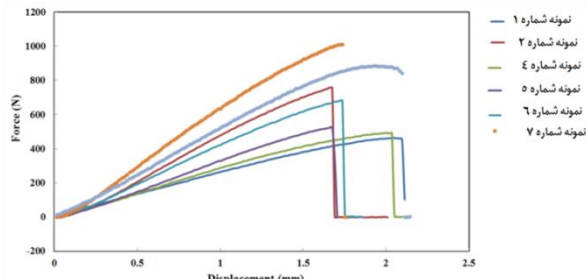
پس از آزمون خمش، سطح شکست نمونه‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (Netherlands, X130 Philips) مورد بررسی قرار گرفت. سطوح شکست برای بررسی اثر پراکندگی ذرات نانو لوله کربنی بر رفتار شکست در مواد کامپوزیتی مورد مطالعه قرار گرفت.

۳. نتایج و بحث

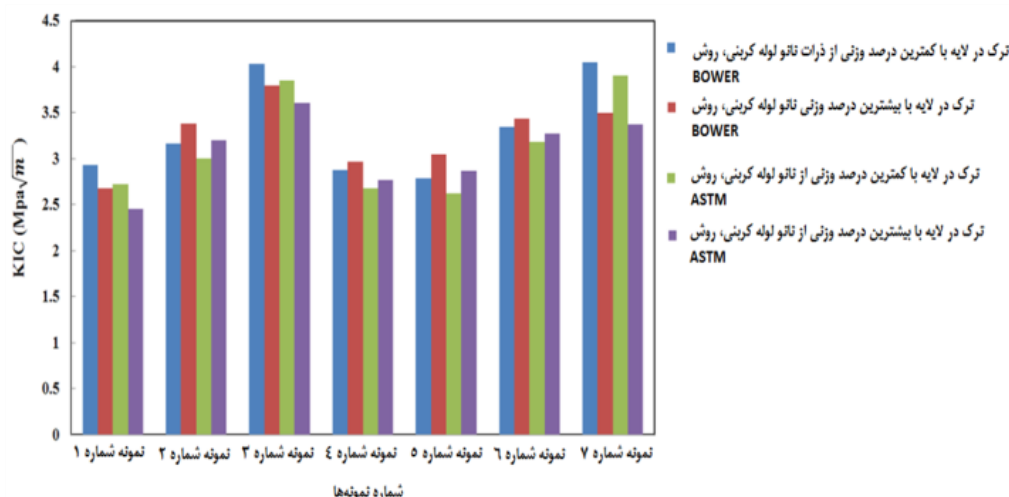
نمودارهای نیرو-جابجایی در شکل ۵ و ۶ نشان داده شده است. شکل ۷ مقادیر چقرمگی شکست نمونه را که با روش Bower و ASTM محاسبه شده است، نشان می‌دهد.



شکل ۵. نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌ها با ترک در لایه با درصد بالا از نانو لوله کربنی



شکل ۶. نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌ها با ترک در لایه با درصد کم از نانو لوله کربنی



شکل ۷. چقرمگی شکست نمونه‌ها با درصد مختلف نانو لوله کربنی محاسبه شده با دو روش مختلف شامل Bower و ASTM

مقادیر چقرمگی شکست پایین مربوط به نمونه‌های شماره ۴ و ۵ بود که ترک در لایه‌ها با غلظت پایین تر از نانو لوله کربنی در آنها ایجاد شده بود. بالاترین مقدار چقرمگی شکست مربوط به نمونه شماره ۳ و نمونه‌های چهار لایه‌ای است. بنابراین، مشاهده شد که اضافه کردن مقدار بیشتر از نانو لوله کربنی نمی تواند مقادیر چقرمگی شکست را بهبود بخشد. میزان چقرمگی شکست وابسته به پراکندگی ذرات نانو لوله کربنی در زمینه اپوکسی، تاریخچه عملیات ساخت نمونه (مربوط به قالبگیری)، جهت گیری ترک در نمونه و غیره است. بر اساس مکانیزم استحکام بخشی در مواد، پراکندگی همگن ذرات کوچک در زمینه باعث افزایش مقاومت کامپوزیت می‌شود [۴۱ و ۴۲]. مقادیر بالای چقرمگی شکست نشان داد که وقتی ترک از لایه‌ها با مقادیر کمتر نانو لوله کربنی شروع به رشد می‌کند، لایه‌ها با درصد بالاتر از نانو لوله کربنی در مقابل افزایش رشد ترک مقاومت می‌کنند.

گسترش ترک از لایه اپوکسی خالص به لایه تقویت شده قابل توجه است. هنگامی که ترک از لایه درصد بالا از ذرات نانو لوله کربنی شروع می‌شود، مقدار بالای چقرمگی شکست در نمونه شماره ۳، نمونه سه لایه و چهار لایه مشاهده می‌شود. مقادیر کمتر چقرمگی شکست مربوط به نمونه‌های شماره ۱، ۴ و ۵ بود. همچنین تفاوت قابل توجهی در مقدار چقرمگی شکست برای نمونه‌های ۴ و ۵ در هر دو جهت ترک مشاهده نشد. به طوری که می‌توان نتیجه گرفت که رفتار مکانیکی نمونه‌ها با 0.01% نانو لوله کربنی مشابه نمونه‌ها با 0.02% و 0.03% نانو لوله کربنی است. همچنین نمونه با 0.01% نانو لوله کربنی، بالاترین مقاومت در برابر ترکی زنی را در مقایسه با سایر کامپوزیت‌ها نشان داد که علت آن، توزیع و پخش مناسب ذرات نانو لوله کربنی در اپوکسی است که منجر به افزایش چقرمگی شکست شده است. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که نسبت پهنای لایه‌ها حاوی مقادیر نانو لوله کربنی به عرض اپوکسی مهم است زیرا این مقدار بر میزان چقرمگی شکست در هر دو جهت رشد ترک تاثیر می‌گذارد، مقادیر مدول الاستیسیته انعطاف پذیر E_f از معادله ۴، محاسبه می‌شود [۴۳ و ۴۴].

$$E_f = L^3 m / (4WB^3) \quad (4)$$

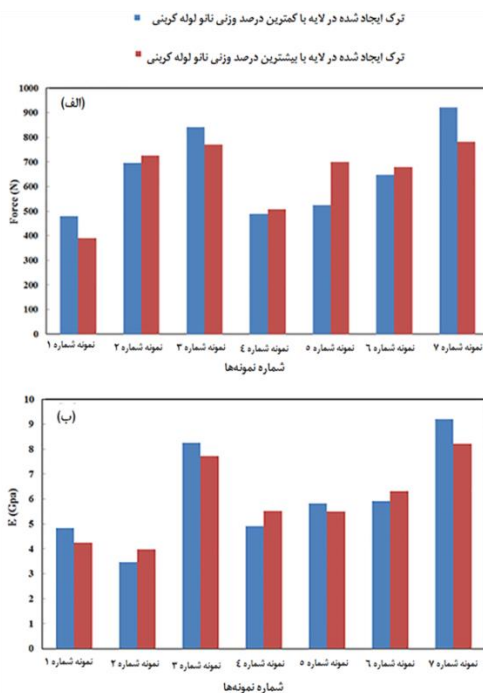
L = طول ساپورت بر حسب میلی متر

W = پهنای نمونه بر حسب میلی متر

B = ضخامت نمونه بر حسب میلی متر

شیب بخش اولیه خط مستقیم انحراف بار m شکل ۸-الف) و ۸-ب) مقایسه بین نیروهای شکست و مقادیر مدول الاستیسیته خمشی به دست آمده برای دو جهت مختلف انتشار ترک را نشان می‌دهد. مقادیر بالاتر نیروهای شکست مربوط به مواد سه و چهار لایه است.

بنابراین، این دو نمونه، در هر دو جهت ترک، چقرمگی شکست بالاتری را نسبت به سایر مواد نشان می‌دهند. همانطور که مشاهده شد، در هر دو جهت انتشار ترک، نیروی شکست و مدول الاستیسیته خمشی در مواد سه و چهار لایه درجه بندی شده بیشتر از سایر مواد است. در مواد کامپوزیتی چهار لایه، با توجه به معادله Bower، تفاوت بین مقادیر KIC، نیروی شکست و مدول الاستیسیته خمشی در هر دو جهت رشد ترک به ترتیب حدود 15% ، 17% و 12% است. این درصدها برای نمونه شماره ۳ حدود 6% ، 9% و 6% است. بدین ترتیب بهبود خواص مکانیکی در مواد چهار لایه کامپوزیتی قابل توجه است. در مورد نمونه ۵، با توجه به روش Bower، تفاوت بین مقادیر KIC، نیروی شکست و مدول الاستیک کششی در جهت رشد مختلف ترک به ترتیب 9% ، 33% و 6% است. در اینجا مقدار نیروی شکستن قابل توجه است. این درصد برای نمونه ۴، 3% ، 3% و 12% است. بنابراین برای ماده ۴، مدول الاستیسیته خمشی قابل توجه است.

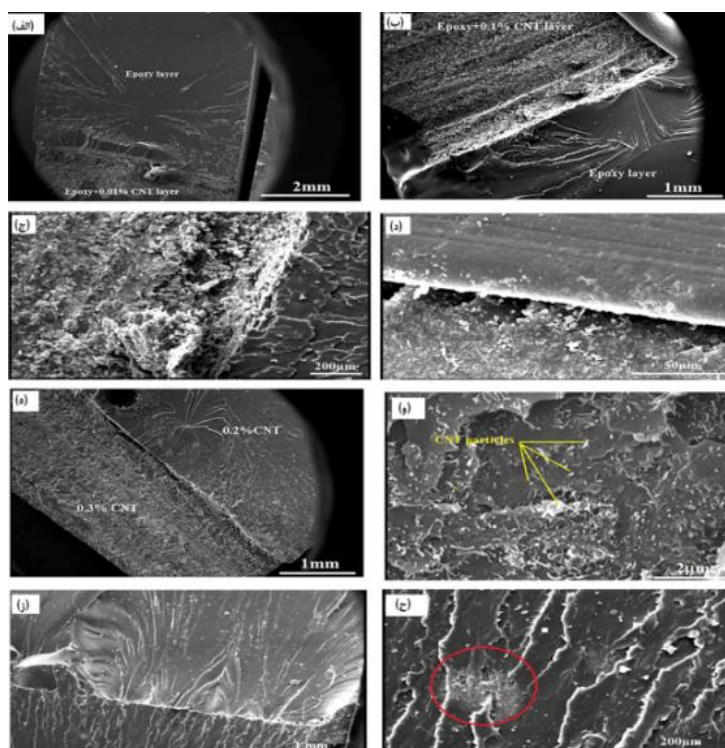


شکل ۸ الف) نیروهای شکست، ب) مدول الاستیسیته انعطاف پذیر.

است که بر مقاومت در برابر شکست اثر می گذارد. هنگامی که این ذرات به خوبی پراکنده شده باشند، می توانند چقرمگی شکست و مقاومت مکانیکی را بهبود بخشند اما ذرات آگلومره شده مقاومت در برابر ترک زنی در زمینه پلیمری را کاهش می دهند. ذرات نانو لوله کربنی آگلومره شده باعث ایجاد مناطق تمرکز تنش می شوند که محل مناسب برای جوانه زنی ترک است. علاوه بر این، شکل ۹- (ز) و ۹- (ح) سطح نمونه ۷ را که یک نمونه چهار لایه ای است را نشان می دهد، در این ماده، برخی از ذرات نانو لوله کربنی به صورت آگلومره شده با دایره قرمز در شکل ۹- (ح) نشان داده شده است. که حضور این ذرات چقرمگی و استحکام نمونه را کاهش می دهد.

بررسی سطوح شکست

سطوح شکست نمونه ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) پس از انجام آزمون خمش سه نقطه مورد ارزیابی قرار گرفت. این کار برای بررسی تاثیر پراکندگی نانولوله های کربن در زمینه اپوکسی بر رفتار و خواص مکانیکی ایجاد شده در مواد مدرج پله ای مورد مطالعه انجام گرفت. شکل ۹ مورفولوژی سطوح شکست مواد دو و سه لایه را نشان می دهد. همانطور که از این شکل دیده می شود، می توان نتیجه گیری کرد که شکست لایه های اپوکسی ساده تر از شکست لایه ها با ذرات نانو لوله کربنی است. شکست لایه ها با درصد بیشتری از ذرات نانو لوله کربنی تردتر از لایه اپوکسی بدون ذرات نانو لوله کربنی است. قابل توجه است که پراکندگی ذرات نانو لوله کربنی پارامتر مهمی



شکل ۹. تصویر میکروسکوپ SEM از سطح شکست نمونه های درجه بندی شده: (الف) نمونه شماره ۱، (ب) نمونه شماره ۲، (ج) نمونه شماره ۳، (د) نمونه شماره ۴، (ه) نمونه شماره ۵، (و) نمونه شماره ۶، (ز) نمونه شماره ۷ و (ح) نمونه شماره ۷ با بزرگنمایی بالاتر.

مهم است که می تواند بر چقرمگی شکست تاثیر بگذارد، به طوری که افزایش میزان ذرات نانو لوله کربنی می تواند چقرمگی شکست را در لایه ها افزایش دهد. همچنین جهت ترک بر میزان چقرمگی شکست اثر می گذارد. به طوری که بیشترین چقرمگی شکست مربوط به نمونه شماره ۳ و نمونه ۴ لایه ای است که مقادیر KIC آنها در محدوده $3-4 \text{ Mpa.m}^{-1/2}$ است و در نمونه های چند لایه

۴. نتیجه گیری

هفت نمونه از مواد مدرج کامپوزیتی پایه پلیمری مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. چقرمگی شکست و مدول الاستیسیته خمشی آنها با استفاده از روش ASTM و Bower تعیین شد. نتایج نشان داد که چقرمگی شکست بالا مربوط به کامپوزیت چهار لایه ای است. پراکندگی ذرات نانو لوله کربنی یک پارامتر

درصد ذرات نانو لوله کربنی است که می‌تواند خواص مکانیکی هر لایه از کامپوزیت را بهبود بخشد. برعکس، افزایش ذرات نانو لوله کربنی در مواد چند لایه‌ای، چقرمگی شکست کامپوزیت را بهبود نمی‌دهد، به طوری که ماده ۵ بالاترین مقدار چقرمگی شکست را نشان نداد. تصویر برداری SEM از سطوح شکست نشان داد که پراکندگی خوب ذرات نانو لوله کربنی منجر به افزایش مقاومت در برابر شکست می‌شود در حالی که آگلومره شدن می‌تواند مکان‌های ترجیحی برای رشد ترک را ایجاد کند.

که ترک در لایه با درصد بالاتر از ذرات نانو لوله کربنی ایجاد شده است، بیشترین چقرمگی شکست مربوط به نمونه دو لایه (نمونه شماره ۳) و نمونه چهار لایه (نمونه شماره ۷) بود. همچنین مقادیر مربوط به مدول الاستیسیته خمشی برای نمونه دو لایه، حاوی ۰/۵ و ۰/۱ درصد وزنی نانو لوله کربنی و نمونه چهار لایه بیشتر از سایر نمونه‌ها است که علت آن می‌تواند همگن پخش شدن ذرات نانو لوله کربنی در نمونه دو لایه باشد که این مقادیر به ترتیب در محدوده ۸ و ۹ گیگاپاسکال قرار دارند. پارامتر کلیدی

۵. مآخذ

- [1]. H. Wagner, O. Lourie, O. Y. Feldman, R. Tenne, Stress-induced fragmentation of multiwall carbon nanotubes in a polymer matrix, *Applied physics letters*, Vol. 72, No. 2, pp. 188-190, 1998.
- [2]. P.M. Ajayan, L.S. Schadler, C. Giannaris, A. Rubio, Single-walled carbon nanotube-polymer composites: strength and weakness, *Advanced materials*, Vol. 12, No.10, pp. 750-753, 2000.
- [3]. A.B. Dalton, S. Collins, E. Muñoz, J.M. Razal, V.H. Ebron, J.P. Ferraris, J.N. Coleman, B.G. Kim, R.H. Baughman, Super-tough carbon-nanotube fibres, *Nature*, Vol. 423, No. 6941, pp. 703-703, 2003.
- [4]. M. Terrones, Science and technology of the twenty-first century: synthesis, properties, and applications of carbon nanotubes, *Annual review of materials research*, Vol. 33, No. 1, pp. 419-501, 2003.
- [5]. X. Li, L. Shao, N. Song, L. Shi, P. Ding, Enhanced thermal-conductive and anti-dripping properties of polyamide composites by 3D graphene structures at low filler content, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 88, pp. 305-314, 2016.
- [6]. F. Wang, L.T. Drzal, Y. Qin, Z. Huang, Enhancement of fracture toughness, mechanical and thermal properties of rubber/epoxy composites by incorporation of graphene nanoplatelets, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 87, pp. 10-22, 2016.
- [7]. D.C. Davis, B.D. Whelan, An experimental study of interlaminar shear fracture toughness of a nanotube reinforced composite, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 42, No. 1, pp. 105-116, 2011.
- [8]. G. Lubineau, A. Rahaman, A review of strategies for improving the degradation properties of laminated continuous-fiber/epoxy composites with carbon-based nanoreinforcements, *Carbon*, Vol. 50, No. 7, pp. 2377-2395, 2012.
- [9]. M.H. Gabr, M.A. Elrahman, K. Okubo, T. Fujii, Effect of microfibrillated cellulose on mechanical properties of plain-woven CFRP reinforced epoxy, *Composite Structures*, Vol.92, No. 9, pp. 1999-2006, 2010.
- [10]. M. Li, Y. Gu, Y. Liu, Y. Li, Z. Zhang, Interfacial improvement of carbon fiber/epoxy composites using a simple process for depositing commercially functionalized carbon nanotubes on the fibers, *Carbon*, Vol. 52, pp. 109-121, 2013.
- [11]. K. Sharma, M. Shukla, Three-phase carbon fiber amine functionalized carbon nanotubes epoxy composite: processing, characterisation, and multiscale modeling, *Journal of Nanomaterials*, Vol. 2014, No. 2, pp. 1-11, 2014.
- [12]. C.-H. Tseng, C.-C. Wang, C.-Y. Chen, Functionalizing carbon nanotubes by plasma modification for the preparation of covalent-integrated epoxy composites, *Chemistry of Materials*, Vol. 19, No. 2, pp. 308-315, 2007.
- [13]. J.-M. Park, D.-S. Kim, J.-R. Lee, T.-W. Kim, Nondestructive damage sensitivity and reinforcing effect of carbon nanotube/epoxy composites using electro-micromechanical

- technique, *Materials Science and Engineering: C*, Vol. 23, No. 6, pp. 971-975, 2003.
- [14]. F.Inam, D.W. Wong, M. Kuwata, T. Peijs, Multiscale hybrid micro-nanocomposites based on carbon nanotubes and carbon fibers, *Journal of Nanomaterials*, Vol. 2010, No. 9, 2010.
- [15]. M. Ayatollahi, S. Shadlou, M. Shokrieh, Mixed mode brittle fracture in epoxy/multi-walled carbon nanotube nanocomposites, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 78, No. 14, pp. 2620-2632, 2011.
- [16]. A. Patra, N. Mitra, Interface fracture of sandwich composites: Influence of MWCNT sonicated epoxy resin, *Composites Science and Technology*, Vol. 101, pp. 94-101, 2014.
- [17]. S.-H. Jang, S. Kawashima, H. Yin, Influence of carbon nanotube clustering on mechanical and electrical properties of cement pastes, *Materials*, Vol. 9, No. 4, pp. 220, 2016.
- [18]. J. Tsai, B. Huang, Y. Cheng, Enhancing fracture toughness of glass/epoxy composites for wind blades using silica nanoparticles and rubber particles, *Procedia Engineering*, Vol. 14, pp. 1982-1987, 2011.
- [19]. J. Sandler, M. Shaffer, T. Prasse, W. Bauhofer, K. Schulte, A. Windle, Development of a dispersion process for carbon nanotubes in an epoxy matrix and the resulting electrical properties, *Polymer*, Vol. 40, No. 21, pp. 5967-5971, 1999.
- [20]. L. Sun, G. Warren, J. O'reilly, W. Everett, S. Lee, D. Davis, D. Lagoudas, H.-J. Sue, Mechanical properties of surface-functionalized SWCNT /epoxy composites, *Carbon*, Vol. 46, No. 2, pp. 320-328, 2008.
- [21]. R. Andrews, M. Weisenberger, Carbon nanotube polymer composites, *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, Vol. 8, No. 1, pp. 31-37, 2004.
- [22]. J.N. Coleman, U. Khan, Y.K. Gun'ko, Mechanical reinforcement of polymers using carbon nanotubes, *Advanced materials*, Vol. 18, No. 6, pp. 689-706, 2006.
- [23]. M. Moniruzzaman, K.I. Winey, Polymer nanocomposites containing carbon nanotubes, *Macromolecules*, Vol. 39, No. 16, pp. 5194-5205, 2006.
- [24]. Y.-P. Sun, K. Fu, Y. Lin, W. Huang, Functionalized carbon nanotubes: properties and applications, *Accounts of chemical research*, Vol. 35, No. 12, pp. 1096-1104, 2002.
- [25]. J.A. Kim, D.G. Seong, T.J. Kang, J.R. Youn, Effects of surface modification on rheological and mechanical properties of CNT /epoxy composites, *Carbon*, Vol. 44, No. 10, pp. 1898-1905, 2006.
- [26]. L.-c. Tang, H. Zhang, J.-h. Han, X.-p. Wu, Z. Zhang, Fracture mechanisms of epoxy filled with ozone functionalized multi-wall carbon nanotubes, *Composites Science and Technology*, Vol. 72, No. 1, pp. 7-13, 2011.
- [27]. L. Esposito, J. Ramos, G. Kortaberria, Dispersion of carbon nanotubes in nanostructured epoxy systems for coating application, *Progress in organic coatings*, Vol. 77, No. 9, pp. 1452-1458, 2014.
- [28]. H. Mahmood, L. Vanzetti, M. Bersani, A: Effect of sonication on the mechanical response of graphene nanoplatelets/ glass fabric/epoxy laminated nanocomposites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 107, pp. 112-123, 2018.
- [29]. F. Li, B. Tang, J. Xiu, S. Zhang, Hydrophilic Modification of Multi-Walled Carbon Nanotube for Building Photonic Crystals with Enhanced Color Visibility and Mechanical Strength, *Molecules*, Vol. 21, No. 5, pp. 547, 2016.
- [30]. E. Borowski, E. Soliman, U.F. Kandil, M.R. Taha, Interlaminar fracture toughness of CFRP laminates incorporating multi-walled carbon nanotubes, *Polymers*, Vol. 7, No. 6, pp. 1020-1045, 2015.
- [31]. D. Quan, D. Carolan, C. Rouge, N. Murphy, A. Ivankovic, Mechanical response of carbon/epoxy composite sandwich structures with three-dimensional corrugated cores, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 81, pp. 21-29, 2018.
- [32]. S.M. Kurd, S. Hassanifard, S. Hartmann, Fracture toughness of epoxy-based stepped functionally graded materials reinforced with carbon nanotubes, *Iranian Polymer Journal*, Vol. 4, No. 26, pp. 253-260, 2017.

- [33]. J.-H. Kim, G.H. Paulino, On fracture criteria for mixed-mode crack propagation in functionally graded materials, *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, Vol. 14, No. 4, pp. 227-244, 2007.
- [34]. G. Seretis, I. Theodorakopoulos, D. Manolacos, C. Provatidis, Mechanical properties and strain monitoring of glass-epoxy composites with graphene-coated fibers, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 147, pp. 33-41, 2018.
- [35]. G.-d. Xu, Z.-h. Wang, T. Zeng, S. Cheng, D.-n. Fang, Self-assembled montmorillonite-carbon nanotube for epoxy composites with superior mechanical and thermal properties, *Composites Science and Technology*, Vol. 156, pp. 296-304, 2018.
- [36]. S. Zeng, M. Shen, L. Yang, Y. Xue, F. Lu, S. Chen, Mechanical and fracture properties of epoxy adhesives modified with graphene nanoplatelets and rubber particles, *Composites Science and Technology*, Vol. 162, pp. 131-139, 2018.
- [37]. <https://www.nanocyl.com/product/nc7000>.
- [38] F.R. Tomas, K. H. Finn, O. Torbjørn, The Optimum Dispersion of Carbon Nanotubes for Epoxy Nanocomposites: Evolution of the Particle Size Distribution by Ultrasonic Treatment, *Journal of Nanotechnology*, Vol. 2012, pp. 1-14, 2012.
- [39]. A. Standard, D5045-99 (2007) e1, Standard Test Methods for Plane-Strain Fracture Toughness and Strain Energy Release Rate of Plastic Materials, *Annual Book of ASTM Standards* 8.
- [40]. A.F. Bower, *Applied mechanics of solids*. CRC press, 2009.
- [41]. R. Rother, Particulate-filled polymer composites, *Smithers Rapra Publishing*, 2003.
- [42]. E. Orowan, Fracture and strength of solids, *Reports on progress in physics*, Vol. 12, No. 1, pp. 185, 1949.
- [43]. C. Zweben, W. Smith, M. Wardle, Test methods for fiber tensile strength, composite flexural modulus, and properties of fabric-reinforced laminates, *In: Composite Materials: Testing and Design (Fifth Conference) 1979, ASTM International*.
- [44]. A.S.D.o.M. Properties, test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials, *In: 1997. American Society for Testing Materials*.

پی نوشت

-
1. Surfactant
 2. Scanning electron microscopy