

مقاله پژوهشی

بررسی تجربی خواص مکانیکی لوله‌های نانوکامپوزیتی پلی اتیلن پرچگال/الیاف شیشه/نانولوله کربنی تولید شده به روش اکستروژن به منظور کاربرد در خطوط لوله نفت و گاز

محمد کیانی، ولی پروانه*، علی دادرسی و محمد عباسی

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران

تاریخ ثبت اولیه: ۱۴۰۰/۰۷/۱۰، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۴۰۰/۱۰/۰۵، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۴۰۰/۱۰/۱۵

چکیده

در این پژوهش، لوله‌های پلی اتیلن پرچگال (HDPE) توسط الیاف شیشه (GF) و نانولوله‌های کربنی (CNTs) به روش اکستروژن به منظور کاربرد در خطوط لوله نفت و گاز تقویت شده‌اند. برای این منظور از یک دستگاه اکستروژر جدید با قابلیت بازفرآوری و ترکیب مذاب HDPE با نانولوله‌های کربنی در قسمت سیلندر و ماردون دستگاه استفاده شده است. لوله‌های نانوکامپوزیتی برای درصد وزنی ثابت از الیاف شیشه و درصد‌های وزنی مختلف از نانولوله کربنی چند دیواره (۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲) تهیه شده‌اند. خواص مکانیکی لوله‌های نانوکامپوزیتی تولیدی توسط آزمایش استاندارد کشش ASTM-D3039 مورد مطالعه قرار گرفته است. در بهترین حالت با افزودن ۲٪ وزنی نانولوله کربنی به همراه الیاف شیشه و همچنین دو بار تکرار بازفرآوری، مدول یانگ و استحکام کششی نهایی لوله نانوکامپوزیتی به ترتیب حدود ۱۵۰٪ و ۱۶۳٪ افزایش می‌یابند. همچنین تجزیه و تحلیل گرمایی DSC بر روی نمونه‌های نانوکامپوزیت نیز برای بررسی ارتباط مناسب میان ماتریس HDPE و نانولوله‌های کربنی نشان می‌دهد که آنتالپی تبلور از ۱۰۶/۳۳ J/g برای پلی اتیلن خالص تا ۲۱۰/۶۵ J/g برای پلی اتیلن با ۲٪ وزنی نانولوله کربنی افزایش یافته است. مورفولوژی سطح مقاطع شکست با استفاده از SEM به منظور بررسی پراکندگی CNTs و بررسی مکانیسم شکست در ماتریس انجام شده است. نتایج نشان می‌دهند که لوله‌های نانوکامپوزیتی پلی اتیلن پرچگال/الیاف شیشه/نانولوله کربنی می‌توانند در خطوط لوله نفت و گاز جایگزین مناسبی برای لوله‌های فولادی API 5L گرید A با استحکام کششی نهایی حدود ۳۳۵ MPa باشند.

واژه‌های کلیدی: پلی اتیلن پرچگال، نانوکامپوزیت، نانولوله کربنی، الیاف شیشه، خواص مکانیکی.

۱- مقدمه

توجه بسیاری قرار گرفته‌اند. تاثیر افزودن بسیاری از نانومواد در پلیمرهای مختلف بر روی خواص مکانیکی و حرارتی نانوکامپوزیت‌های پایه پلیمری بررسی شده است [۴-۱]. لوله‌های فولادی به علت استحکام مکانیکی و حرارتی بالا و

در ساله‌های اخیر، نانوکامپوزیت‌های پایه پلیمری بدلیل کاربرد فراوان و روش‌های تولید آسان‌تر و کم هزینه‌تر مورد

* عهده‌دار مکاتبات: ولی پروانه

می توان مقدار مدول یانگ را تا ۱۰۰٪ نیز افزایش داد [۱۱]. فواد و همکاران خواص مکانیکی و ویسکوالاستیک نانوکامپوزیت های پلی اتیلن/نانولوله کربنی ساخته شده به روش ترکیب مذاب را بررسی کردند و نشان دادند که در بهترین حالت با افزودن ۴ درصد وزنی نانولوله کربنی به پلی اتیلن، مدول یانگ و استحکام کششی نهایی آن را به ترتیب ۴۶٪ و ۱۰٪ افزایش داد [۱۲].

در سال های اخیر روش ساخت اکسترژن به عنوان یک روش کاربردی برای ترکیب مذاب نانوکامپوزیت های پلی اتیلن/نانولوله کربنی مورد استفاده قرار گرفته است. اکولو و همکاران با استفاده از روش اکسترژن و افزودن ۶٪ وزنی نانولوله کربنی، مقدار مدول یانگ و استحکام کششی نهایی پلی اتیلن را به ترتیب ۸۱٪ و ۱۷٪ افزایش دادند [۱۳]. امینالی و همکارانش خواص مکانیکی نانوکامپوزیت پلی اتیلن/نانولوله کربنی تولید شده توسط یک مینی اکسترودر دو مارپیچه را با افزودن نانولوله کربنی از ۱ تا ۱۰٪ وزنی، بررسی کردند. آن ها در بهترین حالت با افزودن ۷٪ وزنی نانولوله کربنی به پلیمر پلی اتیلن، استحکام تسلیم آن را تا حدود ۴۰٪ افزایش دادند [۱۴]. اکسترودر دو مارپیچه توسط آشوری و همکاران نیز برای تقویت HDPE توسط نانولوله کربنی مورد استفاده قرار گرفت. آن ها با افزودن ۱/۵ درصد وزنی نانولوله کربنی، مدول یانگ و استحکام کششی نهایی پلی اتیلن را به ترتیب ۱۸٪ و ۲۲٪ افزایش دادند [۱۵]. ژو و همکاران پراکندگی نانولوله های کربنی را توسط روش اکسترژن در پلیمر پلی اتیلن بررسی کردند و نشان دادند که در سرعت های بالای ماردون، پراکندگی نانولوله های کربنی بهتر می شود [۱۶].

یوان و همکاران از الیاف شیشه به تنهایی برای تقویت مکانیکی لوله های HDPE به روش اکسترژن استفاده کردند و نشان دادند که تبلور پلی اتیلن تقویت شده از ۵۴/۹۱٪ تا ۵۷/۶۸٪ نسبت به لوله های پلی اتیلن مرسوم افزایش می یابد [۱۷]. آن ها همچنین با استفاده از ۳۰٪ وزنی الیاف شیشه توانستند استحکام کششی نهایی لوله های کامپوزیتی را تا

همچنین قیمت پایین در ساخت، سالهاست که برای انتقال گاز و نفت استفاده می شوند. اما هزینه بالای نگهداری این لوله ها در مقابل خوردگی و نیاز به تعویض آن ها به مرور زمان، از معایب لوله های فولادی بشمار می رود. در سال های اخیر تلاش های بسیاری برای استفاده از پوشش های نانوکامپوزیتی به منظور جلوگیری از خوردگی در صنایع نفت و گاز در حال انجام است [۸-۴]. این پوشش های نانوکامپوزیتی فقط قادر به مقاوم سازی قسمت بیرونی لوله در مقابل خوردگی هستند در حالیکه قسمت داخلی لوله نیز تحت خوردگی می باشد. بنابراین استفاده از لوله هایی که به صورت یکپارچه نانوکامپوزیتی ساخته شده باشند، می تواند مشکلات ناشی از خوردگی و هزینه بالای استفاده از پوشش های مقاوم را به کلی رفع کند. برای دستیابی به این هدف، لوله های نانوکامپوزیتی باید دارای خواص مکانیکی و حرارتی مناسب مشابه لوله های فولادی باشند.

HDPE یک از متداول ترین پلاستیک های کاربردی است که امروزه در برخی از خطوط لوله آب که نیاز به استحکام خیلی بالا نباشد، مورد استفاده قرار می گیرد. اما برای ورود لوله های پلی اتیلن به صنایع نفت و گاز، نیاز به افزایش خواص مکانیکی آن ها می باشد. سامسودین و همکاران عملکرد ممانعتی و گرمایی نانوکامپوزیت های پلی اتیلن/گرافن را که به روش ترکیب مذاب قالب ریزی شده بودند را برای کاربرد در خطوط لوله بررسی کردند [۹]. آن ها نشان دادند که درجه تبلور با افزایش گرافن تا ۰/۱٪ وزنی به میزان ۱۵٪ افزایش می یابد اما بهبودی در عملکرد گرمایی نانوکامپوزیت مشاهده نکردند. پرمور و همکاران از نانوذرات مس و نانورس برای تقویت HDPE به منظور کاربرد در خطوط لوله گاز طبیعی استفاده کردند [۱۰]. آن ها با افزودن ۳ درصد وزنی کلوزیت 20A و ۱ درصد وزنی نانومس، مدول یانگ و استحکام نهایی پلی اتیلن خالص را به ترتیب ۱۱۷٪ و ۱۳٪ افزایش دادند. کاناگراج و همکاران توانستند مدول یانگ پلی اتیلن را با افزودن ۴۴٪ حجمی نانولوله کربنی تا ۲۲٪ افزایش دهند و تخمین زدند که با افزایش نانولوله کربنی تا ۲٪ وزنی

روش‌های مختلف برای رهایی از فرآیند کلوخگی نانومواد استفاده کرده‌اند. به عنوان مثال براندربرگ و همکاران تاثیر دو روش ترکیب مذاب و محلول را بر روی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های پلی اتیلن با تقویت کننده‌های نانولوله کربنی چند دیواره و صفحات گرافن مقایسه کردند [۲۵]. آن‌ها نتیجه گرفتند که در نانوکامپوزیت‌های تهیه شده به روش ترکیب مذاب، نانولوله‌های کربنی پراکندگی بهتری را نشان می‌دهند در حالیکه صفحات گرافن، کلوخگی کمتری را در نمونه‌های تهیه شده به روش محلول نشان می‌دهند. الدجاج و همکاران با استفاده از یک میدان مغناطیسی نانولوله‌های کربنی را در کامپوزیت‌های تقویت شده توسط ایساف کربن جهت داده و خواص مکانیکی عرضی نانوکامپوزیت را مورد مطالعه قرار دادند [۲۶]. نتایج آن‌ها نشان داد که سختی خمشی نانوکامپوزیت در حالت نانولوله کربنی جهت گیری شده ۳۳٪ و در حالت نانولوله کربنی غیر جهت گیری شده ۱۵٪ افزایش می‌یابد.

اخیرا روش‌های بازفراوری نیز برای بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. البته در بسیاری از این روش‌ها، هدف از بازفراوری، استفاده مجدد از تولیدات کامپوزیتی است و بیشتر به منظور بازیافت انجام شده است. کادام و مهاسکه از سه بار تکرار فرآیند اکستروژن برای بهبود خواص ساختاری نانوکامپوزیت‌های نایلون ۶/تالک استفاده کردند [۲۷]. نتایج آن‌ها نشان داد که در اولین تکرار اکستروژن مدول یانگ و استحکام نهایی نمونه به ترتیب ۳۶/۷ و ۱۶۹/۷ درصد افزایش می‌یابد؛ اما در سومین تکرار فرآیند به علت گرما و برش در اکسترودر، خواص مکانیکی دچار افت شدید می‌شود. تاثیر رفتار جریان مذاب ماتریس پلیمری نیز بر روی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های پلی اتیلن با چگالی بالا و چوب-پلاستیک طی بازفراوری توسط تبخیز سرابی و همکارانش مورد مطالعه قرار گرفت [۲۸]. آن‌ها در شاخص‌های پایین و متوسط جریان مذاب، بهبود مناسبی در خواص مکانیکی نمونه‌های بازفراوری شده مشاهده کردند. حتی بهبود در خواص مکانیکی ناشی از

۳۵/۵۷٪ افزایش دهند. سعید و همکاران نیز با استفاده از یک اکسترودر دو ماریچه استحکام کششی نهایی HDPE را به کمک ایساف شیشه از ۲۱/۵ MPa به ۲۴ MPa (۱٪ وزنی) و ۳۶ MPa (۹٪ وزنی) رساندند [۱۸]. برخی گزارش‌ها نشان می‌دهند که نانومواد می‌توانند باعث چسبندگی بیشتر ایساف و پلیمر و در نتیجه خواص مکانیکی بهتر پوشش‌های کامپوزیتی شوند [۱۹]. بنابراین اخیرا مطالعاتی بر روی استفاده همزمان از نانولوله‌های کربنی و ایساف شیشه در ماتریس‌های پلیمری مختلف انجام شده است. کارسلی و همکاران تاثیر اصلاح سطحی نانولوله‌های کربنی را بر روی خواص مکانیکی و الکتریکی کامپوزیت پلی پروپیلن/ایساف شیشه کوتاه بررسی کردند [۲۰]. آن‌ها از آمینو پروپیل تری اتوکسی سیلان ۳ (APTES) برای اصلاح سطح نانولوله کربنی و از روش‌های اکستروژن و تزریق قالب برای تهیه نانوکامپوزیت استفاده کردند. نتایج آن‌ها مدول و استحکام نهایی کششی بالاتری را در حالت ترکیب ایساف شیشه و نانولوله کربنی نسبت به حالتی که هر یک از ایساف شیشه و نانولوله کربنی به تنهایی استفاده شوند برای نانوکامپوزیت نشان می‌دهد. پانچانگولا و همکاران با افزودن ۰/۳٪ وزنی نانولوله کربنی در نانوکامپوزیت اپوکسی/ایساف شیشه به بالاترین مقدار استحکام کششی نهایی (۳۶/۲۲-۲۴۲٪) و استحکام خمشی (۴/۵۳-۳۹/۳۳۲٪) دست یافتند [۲۱]. پیپ و همکاران نشان دادند که نانولوله‌های کربنی تاثیر به سزایی در تقویت خواص مکانیکی کامپوزیت اپوکسی/ایساف شیشه دارند [۲۲]. آن‌ها گزارش دادند که با افزایش ۰/۷۵٪ وزنی نانولوله کربنی به کامپوزیت، استحکام برشی بین لایه‌ای به اندازه ۱۵/۷٪ و استحکام خمشی به اندازه ۹/۲٪ افزایش می‌یابند. در بسیاری از این مطالعات، کلوخگی نانومواد حتی با وجود عامل دار کردن آن‌ها، به عنوان یک معضل در ساخت نانوکامپوزیت‌ها مطرح شده است. تلاش‌های زیادی برای جلوگیری از کلوخه شدن نانومواد درون ماتریس پلیمر انجام شده است اما کلوخه شدن حتی در درصد‌های پایین مانند ۰/۳٪ نیز گزارش شده است [۲۳، ۲۴]. محققان از

از نظر اقتصادی و مشکلات ساخت، امکان‌پذیر و مقرون به صرفه نیست. در این مقاله یک دستگاه اکسترودر جدید ساخته و طراحی شده است که قابلیت تولید انبوه و صنعتی لوله‌های نانو کامپوزیتی پلی اتیلن/الیاف شیشه/نانولوله کربنی را دارد. برای ترکیب مناسب نانو لوله‌های کربنی با پلی اتیلن بدون افزایش طول محفظه سیلندر و ماردون، از بازفرآوری ترکیب مذاب استفاده شده است؛ بطوریکه مواد مذاب در محفظه سیلندر و ماردون چندین بار تحت تکرار سیکل فرآیند قرار می‌گیرند. در ادامه یک قالب اکسترودر نیز بگونه‌ای طراحی شده است که قابلیت جایگذاری الیاف شیشه در بدنه لوله را ضمن عبور مواد مذاب از درون آن دارد. آزمایش مکانیکی کشش محوری مطابق با استاندارد ASTM به منظور بررسی میزان بهبود خواص مکانیکی لوله‌های نانو کامپوزیتی با افزودن درصد‌های وزنی مختلف نانو لوله کربنی انجام شده است. تجزیه و تحلیل گرمایی DSC نیز برای بررسی تبلور پلی اتیلن و تشکیل ارتباط سطحی مناسب میان نانو لوله کربنی و ماتریس پلیمر صورت گرفته است. در ادامه عکس‌برداری SEM از نمونه‌های مختلف انجام شده و مورفولوژی سطوح شکست مورد مطالعه قرار گرفته است. در نهایت جایگزینی نانو کامپوزیت پلی اتیلن/الیاف شیشه/نانولوله کربنی در خطوط لوله نفت و گاز در مقایسه با لوله‌های فولادی استاندارد بررسی شده است.

۲- فعالیت‌های تجربی

در تزریق پلاستیک ابتدا گرانول‌های پلیمر ذوب می‌شوند و سپس تحت فشار به درون یک قالب تزریق می‌شوند. مواد اولیه در تزریق پلاستیک، پلیمرهای ترموپلاستیکی هستند که قابلیت رنگ آمیزی و پر شدن توسط افزودنی‌های دیگر را دارند. در واقع مشکل فنی موجود برای تولید قطعات نانو کامپوزیتی پایه پلیمری، کلوخگی و انباشته شدن نانوذرات بکار رفته در نانو کامپوزیت می‌باشد. برای رفع این مشکل می‌بایست دستگاهی باشد که حین عملیات ذوب پلیمر و ترکیب با نانوذرات به توزیع یکنواخت نانوذرات در

باز یافت مواد کامپوزیتی پلیمری که شامل الیاف شیشه بودند نیز گزارش شده است [۲۹].

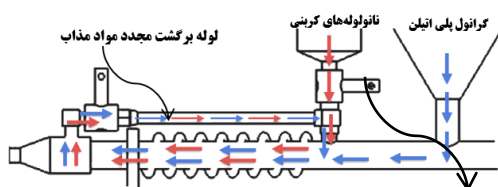
بازفرآوری مکانیکی پلی اتیلن با جزئیات در مقالات مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است [۳۰-۳۲]. تعداد دفعاتی که پلی اتیلن می‌تواند بازفرآوری شود به شرایط و پایداری پلیمر بستگی دارد؛ اما معمولاً پلی اتیلن نسبت به تخریب در طول تکرار فرآیند پایدار است. به عنوان مثال اوبلاک و همکاران پلیمر HDPE را تا ۱۰۰ سیکل اکسترود کردند [۳۲]. نتایج آن‌ها نشان داد که تا ۱۰ سیکل اکستروژن، سختی پلی اتیلن تحت تاثیر قرار نمی‌گیرد اما بعد از آن تا ۲۰٪ از خواص اولیه خود را از دست می‌دهد. اسونسون و همکاران نیز نانو کامپوزیت پلی اتیلن/نانولوله کربنی را تا ۱۰ سیکل توسط روش اکستروژن تحت بازفرآوری قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که بهترین نتایج با افزایش در مدول یانگ تا ۵۴٪ با تکرار دو سیکل فرآیند اکستروژن بدست می‌آید [۳۳]. تکرار فرآیند بر روی پلی اتیلن تقویت شده با الیاف طبیعی [۳۴]، آرد چوب [۳۵] و الیاف شیشه [۳۶] نیز گزارش شده است. همانطور که در بالا اشاره شد، محققان تاکنون روش‌های مختلفی را برای تولید نانو کامپوزیت‌های پایه پلیمری گزارش داده‌اند. یکی از این روش‌های متداول و اقتصادی که به دلیل آسانی و قابلیت صنعتی شدن مورد توجه است، روش ذوب کردن و فرآیند اکستروژن می‌باشد. روش ترکیب مذاب معمولاً به علت عدم نیاز به تغییرات اساسی در فرآیندها و دستگاه‌های موجود، برای تولید صنعتی مناسب می‌باشند. اما گزارش‌ها نشان می‌دهند که روش‌های متداول ترکیب مذاب قادر به توزیع مناسب نانومواد به اندازه روش‌های ترکیب محلول و پلیمریزاسیون نمی‌باشند [۳۷-۳۹].

برای تولید لوله‌های نانو کامپوزیتی پلی اتیلن/نانولوله کربنی نمی‌توان بطور مستقیم از دستگاه‌های صنعتی اکسترودر لوله استفاده کرد. علت آن است که طول محفظه سیلندر و ماردون دستگاه اکسترودر برای ترکیب مناسب نانو لوله‌های کربنی با پلی اتیلن کافی نمی‌باشد. بنابراین نیاز به یک دستگاه اکسترودر با طول سیلندر و ماردون بیشتر می‌باشد که

نانوکامپوزیت به ابتدای نازل، لوله‌ای برای بازگرداندن مواد مذاب بر روی سیلندر تعبیه شده است که باعث برگشتن مواد به سیلندر و اختلاط مجدد پلی اتیلن با نانولوله‌های کربنی می‌گردد. بعد از اینکه مواد مذاب بخوبی با یکدیگر ترکیب شدند، برای تولید لوله وارد قالب اکسترودر می‌شوند. قالب اکسترودر طراحی شده قابلیت جای دادن الیاف بصورت تک لایه ضمن عبور مواد مذاب از داخل آن را دارد (شکل ۲). این الیاف به صورت پارچه‌ای بوده و با حرکت مواد مذاب از درون قالب اکسترودر در بدنه لوله قرار می‌گیرد. عبور مواد از میان قالب اکسترودر موجب جهت‌گیری بهتر CNTs در جهت راستای محور لوله نیز می‌گردد. لوله پس از قرارگیری الیاف در میان آن و خروج از قالب اکسترودر، وارد محفظه خنک‌کننده شده و از طریق پاشش آب به اطراف آن سرد می‌شود.



(a)



(b)

شکل ۱: (a) نمای کلی دستگاه اکسترودر و (b) شماتیک بازفرآوری مواد مذاب در محفظه سیلندر و ماردون.



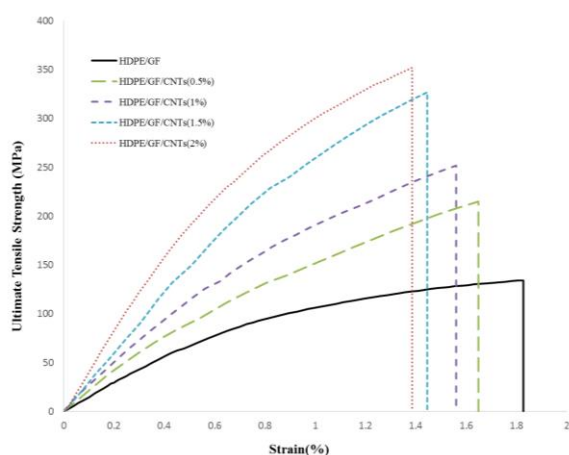
شکل ۲: قالب اکسترودر طراحی شده برای جایگذاری الیاف شیشه در میان بدنه لوله.

نانوکامپوزیت توجه داشته باشد. برای این منظور یک دستگاه اکسترودر جدید با قابلیت برگشت و ترکیب مجدد مواد طراحی و ساخته شده است (شکل ۱a). این دستگاه شامل یک سیلندر و ماردون است که قسمت اصلی دستگاه اکسترودر می‌باشد. چرخش ماردون باعث راندن مواد خشک و مذاب به سمت جلو و همچنین ایجاد نیروی برشی جهت ترکیب مواد با نانوذرات می‌باشد. برای چرخش این ماردون یک موتور الکتریکی با تعداد دور و سرعت قابل تنظیم بکار گرفته شده است و همچنین برای تامین نیروی مورد نیاز برای پیشرانی مواد مذاب و نانوذرات از یک گیربکس کتایی استفاده شده است. بر روی بدنه سیلندر دو ورودی تعبیه شده است؛ قیف اول در واقع منبع تغذیه اصلی دستگاه بوده و مواد اولیه پلی اتیلن از این قسمت وارد دستگاه می‌شوند. قیف دوم به منظور اضافه کردن نانولوله‌های کربنی به پلی اتیلن در زمان مناسب تعبیه شده است.

بر روی بدنه سیلندر بعد از ورودی نانومواد، از المنت‌های حرارتی استفاده شده است که توسط سنسورهای دما و دیمتر در جعبه کنترل، دمای آن در قسمت‌های مختلف تنظیم می‌گردد. کنترل دقیق دمای این قسمت از سیلندر تا سر نازل می‌تواند به بهبود خواص مکانیکی نانوکامپوزیت تولیدی کمک کند. تفاوت اصلی دستگاه طراحی شده با سایر دستگاه‌های اکسترودر موجود در قابلیت بازفرآوری مذاب آن برای ترکیب و اختلاط بهتر نانومواد است. این دستگاه به گونه‌ای طراحی شده است که بعد از اختلاط و رسیدن مواد مذاب به انتهای سیلندر و قبل از ورود به درون اکسترودر، از طریق لوله‌ای که بر روی سیلندر تعبیه شده است مواد دوباره به درون سیلندر بازگردانده شده و تحت اختلاط مجدد قرار می‌گیرند (شکل ۱b). هر بار برگشت مواد مذاب در محفظه سیلندر و ماردون، یک سیکل بازفرآوری را تشکیل می‌دهد. در این مقاله برای پراکندگی یکنواخت تر نانولوله‌های کربنی در لوله‌های نانوکامپوزیتی، حداکثر تا سه سیکل بازفرآوری در ضمن تولید انجام شده است. قبل از رسیدن مواد مذاب



شکل ۳: آزمایش کشش محوری توسط دستگاه SANTAM 400.



شکل ۴: نمودار تنش-کرنش نانوکامپوزیت پلی اتیلن/الیاف شیشه/نانولوله کربنی برای درصد‌های وزنی مختلف نانولوله کربنی.

مقدار مدول یانگ از شیب قسمت خطی نمودارهای تنش-کرنش بدست آمده است. برای بررسی تاثیر افزودن نانولوله‌های کربنی و عملکرد دستگاه اکسترودر (تکرار بازفرآوری)، دو پارامتر مهم در خواص مکانیکی مواد یعنی مدول یانگ و استحکام کششی نهایی برای نانوکامپوزیت‌ها با شرایط مختلف در جدول ۱ آورده شده‌اند. همانگونه که مشاهده می‌شود با افزایش هر دوی درصد وزنی نانولوله کربنی و تکرار بازفرآوری، مقدار مدول یانگ و استحکام کششی نهایی افزایش یافته و کرنش شکست کاهش می‌یابد. بطوریکه مدول یانگ و استحکام کششی نهایی نانوکامپوزیت در بیشترین حالت (یعنی با افزودن ۲ درصد وزنی نانولوله

نانولوله‌های کربنی چند دیواره (MWCNTs) عامل دار شده توسط گروه‌های عاملی هیدروکسیل OH و تولید شده توسط Research Nanomaterials, Inc از شرکت مهرگان شیمی خریداری شده‌اند. طبق تاییدیه شرکت، این نانولوله‌ها دارای طول $10\text{--}30\ \mu\text{m}$ و قطر $10\text{--}30\ \text{nm}$ تهیه شده به روش CVD می‌باشند. درصد خلوص این نانولوله‌ها ۹۹٪ و سطح مخصوص آن $270\ \text{m}^2/\text{g}$ است. پلیمر پلی اتیلن پرچگال (HDPE) با چگالی حجمی $0.94\ \text{g}/\text{cm}^3$ که مناسب برای تولید لوله‌های گاز به روش اکستروژن می‌باشد، از شرکت Aldrich خریداری شده‌اند [۱۷]. الیاف شیشه ۳۰۰ گرمی با بافت ریز توسط شرکت ایران کامپوزیت تولید شده است. این الیاف دو جهته بوده و در راستای صفر و 90° بافته شده‌اند. طبق کاتالوگ شرکت، مدول کششی و استحکام نهایی الیاف شیشه به ترتیب $72\ \text{GPa}$ و $1950\ \text{MPa}$ می‌باشد.

۳- نتایج و بحث

لوله‌های تولیدی مشابه با لوله‌های فولادی استاندارد API با قطر داخلی $56/1\ \text{mm}$ و قطر خارجی $60/3\ \text{mm}$ ساخته شده‌اند. نمونه‌ها پس از ساخت توسط دستگاه اکسترودر مطابق با استاندارد ASTM D3039 از لوله بریده شده و برای نانوکامپوزیت پلی اتیلن/الیاف شیشه/نانولوله کربنی با درصد وزنی‌های مختلف نانولوله کربنی ($0/5$ ، 1 ، $1/5$ و 2) آماده شده‌اند. با توجه به اینکه رفتار مکانیکی پلیمرها تحت تاثیر فشار و مخصوصا تغییرات دما متفاوت است، بنابراین سعی شده است که شرایط آزمایشگاهی طبق استاندارد صورت گیرد. نمونه‌های آماده شده توسط دستگاه تست کشش SANTAM 400 و با سرعت خطی $2\ \text{mm}/\text{min}$ تحت کشش قرار گرفته‌اند (شکل ۳). به منظور اطمینان از صحت نتایج، آزمایش‌ها ۵ بار مطابق با استاندارد تکرار شده‌اند و متوسط نتایج ارائه شده است.

مودار تنش-کرنش برای درصد‌های مختلف نانولوله کربنی با دو بار تکرار بازفرآوری (بهترین حالت) ترسیم شده است (شکل ۴).

نانولوله‌های کربنی به عنوان مکان‌های هسته‌زایی برای تبلور پلیمر عمل می‌کنند [۴۰، ۴۱].

جدول ۱: مدول یانگ و استحکام کششی نهایی لوله نانوکامپوزیتی پلی اتیلن/الیاف شیشه/نانولوله کربنی.

نمونه	مدول یانگ (GPa)	استحکام کششی نهایی (MPa)	کرنش کششی نهایی (%)	تکرار بازفرآوری
HDPE-GF	14.9±0.5	134.2±6.8	1.828	0
0.5%CNTs	16.7±0.8	178.2±5.5	1.732	0
	18.1±0.3	200.4±7.3	1.69	1
	20.2±0.7	214.7±4.9	1.647	2
	20.3±0.4	213.8±10.5	1.645	3
1%CNTs	19.5±1.1	186.4±8.3	1.591	0
	22.5±0.9	218.7±8.1	1.564	1
	25.1±0.5	251.7±11.6	1.56	2
	24.8±0.6	249.3±5.9	1.554	3
1.5%CNTs	23.7±0.3	232.6±7.5	1.49	0
	27.6±0.7	278.1±10.4	1.462	1
	29.9±0.5	307±12.8	1.443	2
	29.8±0.9	306.6±11.2	1.445	3
2%CNTs	28.4±1.2	280.2±9.5	1.416	0
	33.7±0.6	328.9±5.7	1.394	1
	37.3±1.3	351.7±13.4	1.335	2
	37.1±0.8	350.4±10.8	1.331	3

افزایش قابل توجه در تبلور پلیمر نشان می‌دهد که سطح نانولوله‌های کربنی دارای یک پوشش پلیمری بلورین با ضخامت مشخص بر روی هر نانولوله است. این نشان می‌دهد که نمونه‌های نانوکامپوزیتی ساخته شده دارای یک سطح ارتباطی قوی میان نانولوله‌های کربنی و پلی اتیلن می‌باشند که باعث افزایش انرژی کل اتصال و در نهایت منجر به افزایش انتقال تنش بین سطحی می‌شود. کلمن [۴۰] و فراکلند [۴۲] نیز هر دو نشان دادند که تبلور سطح رابط میان نانولوله کربنی

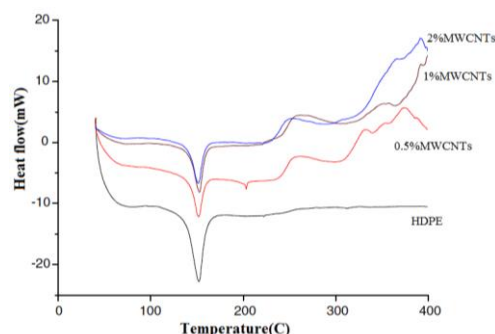
کربنی و دو بار بازفرآوری) به ترتیب از ۱۴/۹ به ۳۷/۳ GPa و از ۱۳۴/۲ MPa به ۳۵۱/۷ MPa افزایش یافته است و مقدار کشیدگی نانوکامپوزیت نیز ۳۴٪ کاهش یافته است. هر چند با افزایش تعداد تکرار بازفرآوری، مقادیر مدول یانگ و استحکام کششی نهایی نانوکامپوزیت به علت ترکیب بهتر مواد و کاهش میزان کلوخگی افزایش می‌یابد اما شیب این روند افزایشی از دو تکرار بازفرآوری به بعد کاهش یافته و تقریباً به مقدار ثابتی می‌رسد. متوسط درصد افزایش مدول یانگ و استحکام کششی نهایی نانوکامپوزیت در بار اول بازفرآوری حدود ۲۸٪ و در بار دوم تقریباً ۳۵٪ می‌باشد. بنابراین با بکارگیری روش تزریق پلاستیک و تکرار بازفرآوری می‌توان میزان کلوخگی نانولوله‌های کربنی را در ماتریس پلی اتیلن کاهش داد و از پتانسیل بالای آن‌ها در تقویت مکانیکی نانوکامپوزیت‌های الیاف دار استفاده کرد.

از آنجا که تبلور نانوکامپوزیت‌های پلیمری بر روی مدول یانگ و مقاومت آن‌ها تاثیر می‌گذارد، تجزیه و تحلیل DSC بر روی آن‌ها انجام شده است. با توجه به منحنی‌های DSC، که در شکل ۵ نشان داده شده است، افزودن نانولوله‌های کربنی به پلی اتیلن باعث افزایش آنتالپی کلی تبلور می‌شود. نقطه ذوب نانوکامپوزیت‌ها در حدود ۱۶۰ °C رخ داده است که نشان دهنده درجه تبلور پلیمر در آن‌ها است. همانطور که مشاهده می‌شود، تقویت نانولوله‌های کربنی در ماتریس پلی اتیلن باعث تغییر در نقطه ذوب آن نمی‌شود. آنتالپی تبلور معادل ۲۱۰/۶۵ J/g و ۱۸۵/۱۳ J/g، ۱۴۸/۵۲ J/g، ۱۰۶/۳۳ J/g به ترتیب برای نانوکامپوزیت‌های با صفر، ۰/۵٪، ۱٪ و ۲٪ وزنی نانولوله کربنی است، در حالیکه از تبلور ۱۰۰٪ پلی اتیلن خالص به اندازه ۲۹۳ J/g آنتالپی حاصل می‌شود. هسته‌زایی و رشد بلورهای مجزا به قدری سریع است که هنگام تبلور پلی اتیلن با اضافه کردن نانولوله کربنی، تعداد زیادی از بلورها با هم تشکیل شده و باعث آزاد شدن مقدار زیادی گرما می‌شوند. مشاهده می‌شود که تبلور نانوکامپوزیت بطور قابل ملاحظه‌ای با اضافه کردن نانولوله‌های کربنی افزایش می‌یابد که نشان می‌دهند که

خطوط طولانی نفت و گاز، استفاده از درصد وزنی کمتر نانومواد می‌تواند باعث صرفه جویی قابل توجه در هزینه‌ها شود.

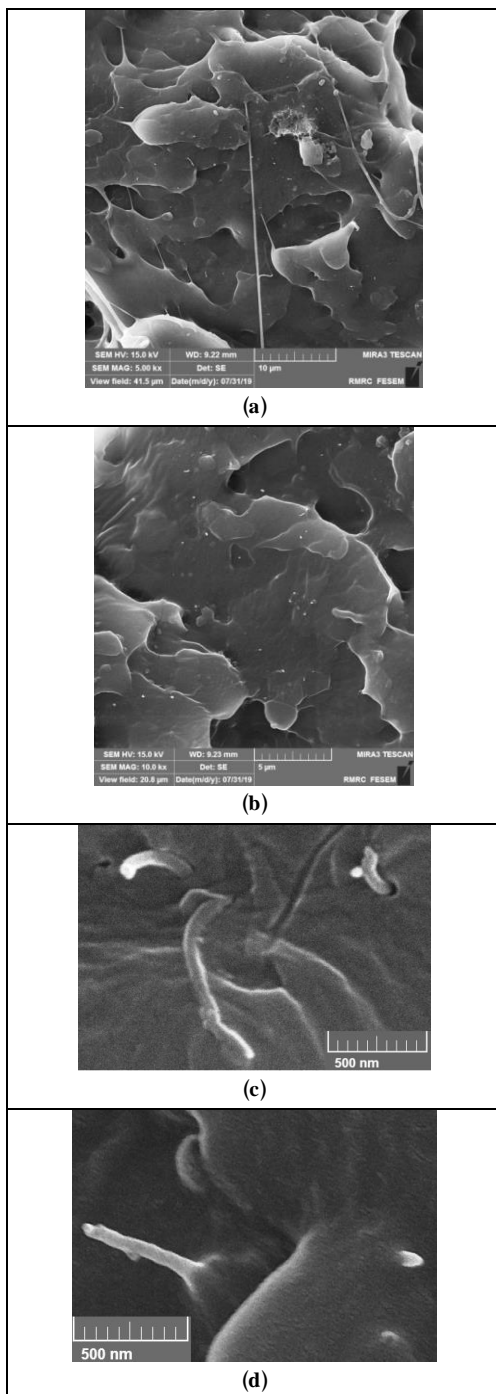
به منظور مطالعه سطوح شکست نمونه‌ها و تشخیص مکانیزم‌های غالب در شکست، عکسبرداری توسط SEM انجام شده است. سطح شکست نانوکامپوزیت HDPE/GF/CNTs با ۲ درصد وزنی نانولوله کربنی برای دو حالت بدون بازفرآوری و با دو بار تکرار بازفرآوری نشان داده شده است (شکل ۶). همانگونه که مشاهده می‌شود، با انجام دو بار بازفرآوری (شکل ۶b)، پراکندگی نانولوله کربنی در زمینه ماتریس پلیمر به خوبی صورت گرفته است در حالیکه که در نمونه‌های بدون بازفرآوری (شکل ۶a)، فرآیند کلوخگی رخ داده است. نانولوله‌های کربنی به علت مساحت سطح و انرژی سطحی بالا، تمایل زیادی به کلوخه شدن دارند. کلوخه‌ها به عنوان مناطق تمرکز تنش عمل می‌کنند و همین عامل باعث افت استحکام مکانیکی نانوکامپوزیت در حالت ۲٪ وزنی نانولوله کربنی می‌باشد. عمل بازفرآوری علاوه بر بهبود پراکندگی نانولوله‌های کربنی درون ماتریس باعث بهبود خواص فصل مشترک نانولوله‌های کربنی و ماتریس نیز می‌شود (شکل ۶d). در این حالت به علت بالا بودن نسبت طول به قطر نانولوله‌های کربنی، بصورت پلی مانع از رشد ترک در ماتریس می‌شوند. مناطق تیره در اطراف نانولوله کربنی در محل اتصال آن به ماتریس و همچنین حفره‌های خالی درون ماتریس نشان دهنده پیوند نامناسب نانولوله کربنی به ماتریس است (شکل ۶c). همین امر باعث خارج شدن نانولوله کربنی از درون ماتریس و عدم انتقال بار مناسب از ماتریس به نانولوله کربنی می‌گردد. چسبندگی سطحی الیاف شیشه و ماتریس پلی اتیلن در انتقال تنش بین سطحی کامپوزیت بسیار مهم است. سطح الیاف شیشه به تنهایی دارای انرژی سطحی پایین و صاف هستند. بنابراین ارتباط آنها با پلیمر ضعیف است. در ضمن الیاف شیشه قطبی هستند و ماتریس پلی اتیلن غیرقطبی است. بنا به این دلایل، چسبندگی پلیمر و الیاف شیشه در حالت

و پلی اتیلن، باعث بهبود خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌ها می‌شود.



شکل ۵: منحنی‌های DSC برای نانوکامپوزیت با درصدهای وزنی مختلف نانولوله کربنی.

استفاده از درصد بالاتری از نانولوله کربنی در ماتریس پلی اتیلن نیز گزارش شده است. امسینالی و همکارانش خواص مکانیکی نانوکامپوزیت پلی اتیلن/نانولوله کربنی را با افزودن نانولوله کربنی را از ۱ تا ۱۰٪ وزنی بررسی کردند. آن‌ها در بهترین حالت با افزودن ۷٪ وزنی نانولوله کربنی به پلیمر پلی اتیلن، استحکام تسلیم نانوکامپوزیت بدست آمده را فقط تا حدود ۴۰٪ افزایش دادند [۱۴]. در آخرین گزارشات سال ۲۰۲۰ نیز مدول یانگ و استحکام کششی نهایی پلی اتیلن با افزودن ۶٪ وزنی نانولوله کربنی و استفاده از روش فرآوری مذاب به ترتیب تا ۸۱٪ و ۱۷٪ افزایش یافته است [۳۳]. اما استفاده از این درصد بالای وزنی نانولوله کربنی از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست. نتایج محققان نشان می‌دهد که با درصدهای پایین‌تر وزنی و پراکندگی مناسب‌تر نانولوله‌های کربنی می‌توان خواص مکانیکی نانوکامپوزیت را بیشتر افزایش داد. علاوه بر این، به دلیل تجمع نانولوله کربنی در درصد وزنی بالا، کیفیت نانوکامپوزیت تولید شده کاهش می‌یابد و نمی‌توان از آن به صورت صنعتی استفاده کرد. در این مقاله، با استفاده از ۲ درصد وزنی نانولوله کربنی، مقادیر مدول یانگ و استحکام کششی نهایی به ترتیب ۱۵۰ و ۱۶۳٪ افزایش یافته‌اند. دستیابی به خصوصیات مکانیکی قابل توجه با درصد کمتری از وزن نانولوله کربنی می‌تواند منجر به استفاده صنعتی از این لوله‌های نانوکامپوزیتی شود. با توجه به



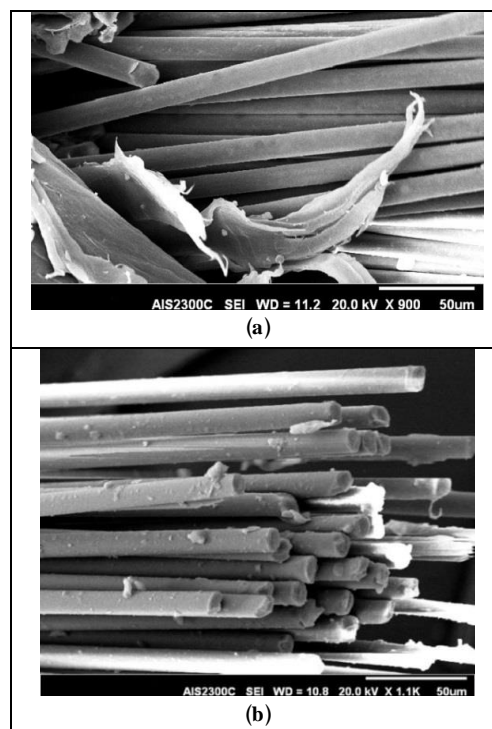
شکل ۶: سطح شکست نانوکامپوزیت HDPE/GF/CNTs با ۲ درصد وزنی نانولوله کربنی، (a) پراکندگی نانولوله‌های کربنی (بدون بازفرآوری)، (b) پراکندگی نانولوله‌های کربنی (با دو بار تکرار بازفرآوری)، (c) پیوند ماتریس و نانولوله کربنی (بدون بازفرآوری) و (d) پیوند ماتریس و نانولوله کربنی (با دو بار تکرار بازفرآوری).

ایده آل نیست و عملکرد کلی کامپوزیت را محدود می‌کند. بنابراین الیاف شیشه نیاز به بهبود دارند. شکل ۷ مقایسه‌ای را بین تصویر سطح شکست الیاف شیشه در نمونه بدون نانولوله کربنی و نمونه‌ای که دارای ۲ درصد وزنی نانولوله کربنی می‌باشد نشان می‌دهد. الیاف شیشه در حالت بدون نانولوله کربنی دارای سطحی صاف و هموار می‌باشند (شکل ۷a) در حالی که در نمونه نانو کامپوزیتی، به سطح الیاف مقداری فاز ماتریس چسبیده است (شکل ۷b). بنابراین مکانیزم شکست در نمونه نانو کامپوزیتی از طریق شکست در ماتریس و در نمونه بدون نانولوله کربنی از طریق جدایش الیاف از درون ماتریس اتفاق می‌افتد. در نتیجه، ایجاد ترک در ماتریس، مکانیزم شکست اولیه در نانو کامپوزیت می‌باشد [۳۸]. از طرف دیگر، برای کامپوزیت‌های فاقد نانولوله‌های کربنی، سطوح خرابی الیاف نسبتاً صاف هستند (شکل ۷a)، که نشانه‌ای از جدا شدن پیوند بین سطحی می‌باشد و در نتیجه جدا شدن الیاف از ماتریس به عنوان مکانیزم اصلی شکست می‌باشد [۳۸]. این مسئله در برخی از تحقیقات قبلی نیز گزارش شده است [۳۹]. در اطراف محل اتصال الیاف و ماتریس پلیمر، مناطق تیره‌ای مشاهده می‌شود که محل بیرون آمدن الیاف از درون ماتریس می‌باشد (شکل ۸a). این مناطق نشان می‌دهند که پیوند خوبی میان الیاف شیشه و پلی اتیلن برقرار نشده است. معمولاً به علت چسبندگی ضعیف میان الیاف و ماتریس پلیمری، یک فاصله خالی اطراف الیاف در سطوح شکست مشاهده می‌شود. این حفره‌های خالی خود باعث تمرکز تنش در نانو کامپوزیت می‌شوند. تقویت ماتریس پلیمری توسط نانولوله‌های کربنی باعث می‌شود تا چسبندگی میان الیاف و ماتریس بیشتر شده و این حفره‌های خالی پر شوند (شکل ۸b). بنابراین تمرکز تنش در نانو کامپوزیت کاهش می‌یابد و بار به خوبی از ماتریس به الیاف منتقل می‌شود.

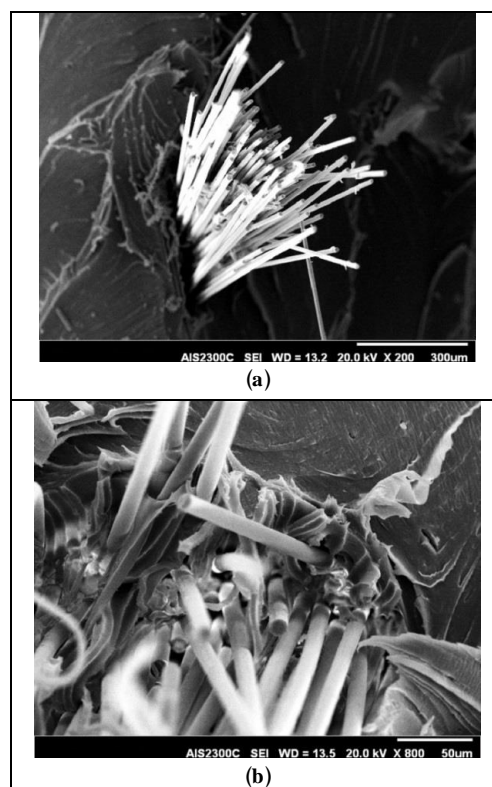
لوله‌های استاندارد API 5L از جمله مهمترین لوله‌های فولادی مورد استفاده در خطوط لوله نفت و گاز و صنایع پتروشیمی می‌باشند. این لوله‌ها با گریدهای مختلف که از لحاظ خواص مکانیکی متغیر هستند تولید می‌شوند؛ از گریدهای A که دارای پایین‌ترین خواص مکانیکی هستند تا گریدهای X که دارای خواص مکانیکی بالایی هستند. لوله‌های فولادی گرید A دارای استحکام کششی نهایی حدود ۳۳۵ MPa می‌باشند در حالیکه لوله‌های کامپوزیتی پلی اتیلن/الیاف شیشه دارای استحکام کششی نهایی حدود ۱۳۴ MPa هستند. بنابراین کامپوزیت‌های الیاف دار به تنهایی قادر به رقابت با لوله‌های فولادی نمی‌باشند. حتی با وجود نانولوله‌های کربنی و بدون بازفرآوری نیز استحکام نهایی با ۲ درصد وزنی نانولوله کربنی (CNTs) حداکثر به مقدار حدود ۲۸۰ MPa می‌رسد. اما با افزودن نانولوله کربنی و استفاده از روش بازفرآوری ارائه شده در این مقاله و با دستیابی به استحکام کششی نهایی ۳۵۲ MPa برای لوله‌های نانو کامپوزیتی می‌توان از این لوله‌ها در خطوط لوله نفت و گاز استفاده کرد. هر چند از لحاظ مکانیکی نمی‌توان از این لوله‌ها به عنوان جایگزین برای لوله‌های فولادی گرید X که دارای استحکام کششی نهایی حدود ۶۲۰ MPa هستند استفاده کرد، اما ورود لوله‌های نانو کامپوزیتی به صنایع نفت و گاز که در آن لوله‌های فولادی بسیار درگیر مباحث خوردگی هستند، می‌تواند نقطه عطفی در مسیر جایگزینی این لوله‌ها به جای لوله‌های فولادی باشد. آنچه مسلم است با استفاده از روش‌ها و مواد جدیدتر در ساخت لوله‌های نانو کامپوزیتی که امکان استفاده از پتانسیل بالای نانولوله‌های کربنی را میسر سازد، می‌تواند منجر به توسعه این لوله‌ها در بخش گسترده‌تری از خطوط لوله نفت و گاز شود.

۴- نتیجه‌گیری

لوله نانو کامپوزیتی پلی اتیلن/گرافن/الیاف شیشه توسط یک روش جدید تزریق پلاستیک با قابلیت بازفرآوری مواد مذاب



شکل ۷: تصویر سطح شکست الیاف شیشه در نمونه، (a) بدون نانولوله کربنی و (b) با ۲ درصد وزنی نانولوله کربنی.



شکل ۸: اتصال بین لایه ای میان الیاف شیشه و ماتریس در نمونه، (a) بدون نانولوله کربنی و (b) با ۲ درصد وزنی نانولوله کربنی.

- for Pipeline Liner Application, *SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference, SPE*, 2019.
- [10] S. Parmoor, M. Sirousazar, F. Kheiri, M. Kokabi, *Journal of Macromolecular Science: Part B*, **55**, 2016, 331.
- [11] S. Kanagaraj, F. R. Varanda, T.V. Zhiltsova, M.S.A. Oliveira, J.A.O. Simoes, *Composites Science and Technology*, **67**, 2007, 3071.
- [12] H. Fouad, R. Elleithy, S.M. Al-Zahrani, M.A. Ali, *Materials Design*, **32**, 2011, 1974.
- [13] C. Okolo, R. Rafique, S.S. Iqbal, M.S. Saharudin, F. Inam, *Molecules*, **25**, 2020, 2960.
- [14] T. McNally, P. Potschke, P. Halley, M. Murphy, D. Martin, S.E.J. Belld, G.P. Brenneke, D. Beinf, P. Lemoineg, J. Paul Quinng, *Polymer*, **46**, 2005, 8222.
- [15] A. Ashori, S. Sheshmani, F. Farhani, *Carbohydrate Polymers*, **92**, 2013, 865.
- [16] Y. Zou, Y. Feng, L. Wang, X. Liu, *Carbon*, **42**, 2004, 271.
- [17] Y. Yuan, C. Liu, M. Huang, *Materials*, **12**, 2019, 1323.
- [18] U. Saeed, K. Hussain, G. Rizvi, *Polymer Composites*, **35**, 2014, 2159.
- [19] N.A. Siddiqui, M.L. Sham, B.Z. Tang, A. Munir, J.K. Kim, *Composites: Part A*, **40**, 2009, 1606.
- [20] N.G. Karsli, S. Yesil, A. Aytac, *Composites: Part B*, **63**, 2014, 154.
- [21] K.K. Panchagnula, P. Kuppan, *Journal of Materials Science and Technology*, **8**, 2019, 366.
- [22] M.C. Yip, Y.C. Lin, C.L. Wu, *Polymers & Polymer Composites*, **19**, 2011, 131.
- [23] S. Pourhashem, A. Rashidi, M.R. Vaezi, M.R. Bagherzadeh, *Surface and Coatings Technology*, **317**, 2017, 1.
- [24] M. Rajabi, G.R. Rashed, D. Zaarei, *Corrosion Engineering, Science and Technology*, **50**, 2015, 509.
- [25] R.F. Brandenburg, C.M. Lepienski, D. Becker, L.A.F. Coelho, *Revista Materia*, **22**, 2017, 11888.
- [26] S. Aldajah, Y. Haik, *Materials & Design*, **34**, 2012, 379.
- [27] P.G. Kadam, S.T. Mhaske, *Journal of Thermoplastic Composites*, **29**, 2016, 960.
- [28] M. Tabkhpaz Sarabi, A.H. Behraves, P. Shahi, Y. Daryabari, *Journal of Thermoplastic Composites*, **27**, 2014, 881.
- [29] E. Kuram, B. Ozcelik, F. Yilmaz, *Journal of Thermoplastic Composites*, **29**, 2016, 1443.
- [30] M.J. Abad, A. Ares, L. Barral, J. Cano, F.J. Diez, S. Garcia-Garabal, J. Lopez, C. Ramirez, *Journal of Applied Polymer Science*, **92**, 2004, 3910.
- [31] A.A. Mendes, A.M. Cunha, C.A. Bernardo, *Polymer Degradation and Stability*, **96**, 2011, 1125.
- [32] P. Oblak, J. Gonzalez-Gutierrez, B. Zupancic, A. Aulova, I. Emri, *Polymer Degradation and Stability*, **114**, 2015, 133.
- [33] S. Svensson, D. Akesson, M. Bohlen, *Journal of Polymers and the Environment*, **28**, 2020, 1967.
- [34] M. Tajvidi, A. Takemura, *Journal of Applied Polymer Science*, **122**, 2011, 1258.
- [35] D. Akesson, T. Fuchs, M. Stoss, A. Root, E. Stenvall, M. Skrifvars, *Journal of Applied Polymer Science*, **133**, 2016, 43877.
- [36] A. Ayadi, D. Kraiem, C. Bradai, S. Pimbert, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, **25**, 2011, 523.
- [37] H. Kim, Y. Miura, C.W. Macosko, *Chemistry of Materials*, **22**, 2010, 3441.
- [38] B.D. Agarwal, L.J. Broutman, "Analysis and performance of fiber composites", Wiley, New York, 1990.
- [39] R. Eslami-Farsani, S.M.R. Khalili, Z. Hedayatnasab, N. Soleimani, *Materials and Design*, **53**, 2014, 540.
- [40] J.N. Coleman, M. Cadec, R. Blake, V. Nicolosi, K.P. Ryan, C. Belton, *Advanced Functional Materials*, **14**, 2004, 791.
- [41] E. Assouline, A. Lustiger, A.H. Barber, C.A. Cooper, E. Klein, E. Wachtel, *Journal of Polymer Science, Part B*, **41**, 2003, 520.
- [42] S.J. Frankland, A. Caglar, D.W. Brenner, M. Griebel, *Journal of Physical Chemistry B*, **106**, 2002, 3046.
- [43] R. Eslami-Farsani, S.M.R. Khalili, Z. Hedayatnasab, N. Soleimani, *Materials & Design*, **53**, 2014, 540.

در محفظه سیلندر و ماردون ساخته شده و خواص مکانیکی آن به منظور کاربرد در خطوط لوله نفت و گاز مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که دستگاه اکسترودر جدید به علت ترکیب مجدد مواد و اختلاط بهتر CNTs با پلی اتیلن پرچگال، قابلیت تولید لوله‌های نانوکامپوزیتی با کیفیت بالاتر را دارا می‌باشد. فرآیند بازآوری تا سه بار تکرار سیکل انجام شد اما از دو بار تکرار سیکل به بعد افزایش قابل ملاحظه‌ای در خواص مکانیکی مشاهده نشد. نتایج بدست آمده از آزمایش کشش محوری تک جهته بر روی لوله‌های نانوکامپوزیتی به ترتیب افزایش در مدول یانگ از ۱۴/۹ GPa تا ۳۷/۳ GPa و در استحکام کششی نهایی از ۱۳۴/۲ MPa تا ۳۵۱/۷ MPa را با ۲٪ وزنی نانولوله کربنی و دو بار تکرار بازآوری نشان داد. تجزیه و تحلیل گرمایی DSC بر روی نانوکامپوزیت و عکس‌های SEM از مقاطع شکست نشان دادند که خواص فصل مشترک نانولوله‌های کربنی و پلی اتیلن با انجام بازآوری بهبود یافته‌اند. با مقایسه استحکام کششی نهایی لوله‌های نانوکامپوزیتی و لوله‌های فولادی استاندارد API 5L، به نظر می‌رسد که می‌توان از این لوله‌های نانوکامپوزیتی به عنوان جایگزین مناسب بجای لوله‌های فولادی با گرید A استفاده کرد.

مراجع

- [1] A. Patil, A. Patel, P.K. Sharma, *Materials Today: Proceedings*, **5**, 2018, 6401.
- [2] N.H. Othman, M.C. Ismail, M. Mustapha, N. Sallih, K.E. Kee, R.A. Jaal, *Progress in Organic Coatings*, **135**, 2019, 82.
- [3] H.D. Nguyen-Tran, V.T. Hoang, V.T. Do, D.M. Chun, Y.J. Yum, *Materials*, **11**, 2018, 429.
- [4] M. Nawaz, N. Yusuf, S. Habib, R.A. Shakoor, F. Ubaid, Z. Ahmad, R. Kahraman, S. Mansour, W. Gao, *Polymers*, **11**, 2019, 852.
- [5] A.V. Radhamani, H.C. Lau, S. Ramakrishna, *Journal of Composite Materials*, **54**, 2020, 681.
- [6] A.V. Radhamani, H.C. Lau, S. Ramakrishna, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **114**, 2018, 170.
- [7] V. Valencia-Goujon, Electrochemical characterization in CO₂ saturated environment of Zn-rich epoxy nanocoatings on API X52 pipeline grade steel substrate under flow conditions, *National Association of Corrosion Engineers Conference, NACE*, 2015.
- [8] M. Tabkhpaz, D.Y. Park, P.C. Lee, *Journal of Composite Materials*, **52**, 2018, 1045.
- [9] M.S.F. Samsudin, M.A. Mahtar, K.H. Leong, Barrier and Thermal Performance of Graphene-HDPE Nanocomposites