

Mechanical and Morphological Properties of Short Nylon Fibers and Carbon Nanotubes Reinforced NR/SBR Nanocomposites

Sedigheh Soltani, Ghasem Naderi*, Mir Hamid Reza Ghoreishy, Akram Shokrzadeh, and Faezeh Razmjoo

Department of Rubber, Faculty of Polymer Processing, Iran Polymer and Petrochemical Institute, P.O. Box: 14975-112, Tehran, Iran

Received: 10 January 2018, accepted: 5 October 2018

ABSTRACT

Hypothesis: Short fibers can be incorporated directly into the rubber compound along with other nanoparticles. The state of filler dispersion and orientation in the matrix, their size and aspect ratio as well as the interactions with the rubber chains have been shown to be crucial parameters that determine the reinforcing ability of these fillers. These nanocomposites are light weight and there is tremendous potential in stiffness/weight ratios over conventional materials. In this study, nanocomposites of (NR/SBR) elastomer/short nylon fiber with different amounts of carbon nanotubes were prepared in the presence of hexamethylenetetramine, resorcinol and silica (HRH) as bonding agent.

Methods: Natural rubber and styrene butadiene rubber (NR/SBR), reinforced with short nylon fibers and carbon nanotubes, were prepared in a two-roll mill mixer. The effect of different amounts of modified and unmodified multiwall carbon nanotubes (MCNTs) between 0 and 3 phr on the mechanical properties, structure and morphology of nanocomposite samples were investigated. The adhesion of the fiber to the rubber matrix was enhanced by the addition of a dry bonding system consisting of HRH. The structure of nanocomposites was studied by scanning electron microscopy (SEM).

Findings: By enhancing the amount of modified carbon nanotube and unmodified carbon nanotube, the curing time and the swelling index decreased, while the curing rate and maximum torque increased. The mechanical properties, tear strength, hardness and compressibility were increased as the content of modified and unmodified multi-wall carbon nanotubes increased in both directions of longitudinal (L) and transverse (T) in the nanocomposite. The resilience of nanocomposites was reduced by increasing the carbon nanotube content, and there was a further decrease in the modified nanotube. The microscopy results indicated that by adding carbon nanotubes, specially modified carbon nanotube in longitudinal direction, the fibers pull out and hollow holes decreased at the fracture surface due to the strong bond between the rubber matrix and the fibers and carbon nanotubes. In transverse direction, there was increased pull out and weak bonding.

Keywords:

nanocomposite,
short nylon fibers,
carbon nanotube,
NR/SBR rubber,
mechanical and
morphology properties

(*)To whom correspondence should be addressed.

E-mail: g.naderi@ippi.ac.ir

Please cite this article using:

Soltani S., Naderi G., Ghoreishy M.H.R., Shokrzadeh A., and Razmjoo F., Mechanical and Morphological Properties of Short Nylon Fibers and Carbon Nanotubes Reinforced NR/SBR Nanocomposites, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **31**, 345-357, 2018.

خواص مکانیکی و شکل‌شناسی نانوکامپوزیت‌های NR/SBR

تقویت‌شده با الیاف کوتاه نایلون و نانولوله‌های کربن

صدیقه سلطانی، قاسم نادری*، میرحمیدرضا قریشی، اکرم شکرزاده، فائزه رزمجو

تهران، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، پژوهشکده فرایند پلیمر، گروه لاستیک، صندوق پستی ۱۱۲-۱۴۹۷۵

دریافت: ۱۳۹۶/۱۰/۲۰، پذیرش: ۱۳۹۷/۷/۱۳

چکیده

نانوکامپوزیت‌های هیبریدی لاستیک طبیعی و لاستیک استیرن-بوتادی‌ان (NR/SBR) تقویت‌شده با الیاف کوتاه نایلون و نانولوله‌های کربن در غلظت آزمایشگاهی تهیه شدند. اثر مقادیر مختلف نانولوله‌های کربن چنددیواره (MWCNT) اصلاح‌شده و نشده در مقادیر مختلف وزنی ۰ phr تا ۳ phr بر خواص مکانیکی، ساختاری و شکل‌شناسی آمیزه‌های تهیه شده بررسی شد. نتایج نشان داد، چسبندگی الیاف به ماتریس لاستیکی با افزودن عامل سازگارکننده هگزامتیلن تتراآمین، رزورسینول و سیلیکای آبدار (HRH) افزایش یافت. با افزایش مقدار نانولوله کربن چنددیواره اصلاح‌شده و نشده زمان پخت و شاخص تورم کاهش یافت، در حالی که سرعت پخت و بیشینه گشتاور افزایش یافت. خواص مکانیکی، استحکام پارگی، سختی و مانایی فشاری آمیزه‌های مزبور با افزایش ترکیب درصد نانولوله‌های کربن چنددیواره اصلاح‌شده و نشده در دو جهت طولی (L) و عرضی (T) افزایش نشان داد. جهندگی نانوکامپوزیت‌های تهیه‌شده با افزایش ترکیب درصد نانولوله کاهش یافت و در نانولوله اصلاح‌شده کاهش بیشتری مشاهده شد. ساختار نانوکامپوزیت‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی پویشی (SEM) مطالعه شد. نتایج حاکی از آن است که با افزودن نانولوله کربن به‌ویژه اصلاح‌شده در جهت طولی بیرون‌زدگی الیاف و حفره‌های توخالی کمتر است. بدین معنا که چسبندگی قوی‌تری بین ماتریس و الیاف با وجود نانولوله اصلاح‌شده به‌وجود آمده است. برای نمونه‌ها در جهت عرضی، بیرون‌زدگی الیاف بیشتر و چسبندگی ضعیف‌تری مشاهده شد.

واژه‌های کلیدی

نانوکامپوزیت،
الیاف کوتاه نایلون،
نانولوله کربن،
لاستیک NR/SBR،
خواص مکانیکی و شکل‌شناسی

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:

g.naderi@ippi.ac.ir

مقدمه

در سال‌های اخیر خواص مکانیکی منحصر به فرد آمیخته لاستیکی، توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده است [۱-۳]. آمیخته فیزیکی لاستیک طبیعی (NR) و لاستیک استیرن-بوتادیان (SBR) در صنعت تایر خودرو به‌طور گسترده استفاده می‌شود و حدود ۷۰٪ لاستیک مصرف شده در صنعت تایر NR است [۴،۵]. برای بهبود خواص سایشی و پایداری اکسایشی تایرها، لاستیک NR با لاستیک SBR یا BR آمیخته می‌شود. آمیخته NR/SBR افزون بر آج تایر خودرو، در تسمه نقاله، واشرها، لوله‌های خرطومی و سایر محصولات متنوع خودرو کاربرد دارد [۶-۸]. برای افزایش کارایی نهایی لاستیک‌ها به‌ویژه تایر از پرکننده‌های تقویت‌کننده متداول نظیر دوده، سیلیکا و الیاف به مقدار زیاد استفاده می‌شود. دوده و سیلیکا برای دستیابی به خواص چنگ‌زنی و مقاومت سایشی زیاد، مقاومت غلتشی کم و دوام بلندمدت تایر از اهمیت زیادی برخوردارند. لاستیک‌های تقویت‌شده با الیاف کوتاه به دلیل فراورش پذیری آسان، ناهمسانگردی در خواص مکانیکی، دوام و مقاومت به شکست مورد توجه بسیاری از پژوهشگران بوده‌اند [۹-۱۱]. استفاده از الیاف کوتاه شیشه، ریون، آرامید، آزبست و سلولوز به‌عنوان پرکننده تقویت‌کننده در لاستیک طبیعی و نیز لاستیک مصنوعی را بسیاری از پژوهشگران بررسی کرده‌اند [۱۲،۱۳]. در الیاف کوتاه اثر چسبندگی بین ماتریس و الیاف، نسبت منظر، پراکنش، آرایش طبیعی و نوع الیاف بر مقدار تقویت‌کنندگی نیز مطالعه شده است [۱۴،۱۵]. Varghese و همکاران چسبندگی الیاف کوتاه به لاستیک را در مجاورت سازگارکننده هگزامتیلن تترآمین-رزورسینول-سیلیکای آبدار (HRH) بررسی کردند و دریافتند، با افزایش مقدار الیاف در مجاورت سازگارکننده HRH خواص مکانیکی آمیزه افزایش می‌یابد [۱۶-۱۸]. Kumar و همکاران [۱۹] مطالعاتی درباره کامپوزیت‌های لاستیک SBR تقویت‌شده با الیاف کوتاه سلولوزی انجام دادند و مشاهده کردند، طول الیاف، جهت‌گیری آن و عامل سازگارکننده پارامترهای تعیین‌کننده در تقویت خواص این کامپوزیت‌ها هستند. رزاقی [۲۰] نیز کاربرد الیاف کوتاه آرامید در ماتریس آمیزه رویه تایر را بررسی کرده و بهبود خواص چنگ‌زنی و کاهش مقاومت غلتشی آمیزه مزبور را گزارش کرده است. در سال‌های اخیر استفاده از نانوپرکننده‌ها به دلیل اندازه کوچک و در پی آن افزایش مساحت سطح پرکننده گسترش یافته به‌طوری که با استفاده از شکل‌شناسی‌های گوناگون نانوذرات (کروی، صفحه‌ای، لایه‌ای و لوله‌ای) سامانه‌های جدید از نانوکامپوزیت‌های لاستیکی با خواص عالی قابل دسترس است [۲۱،۲۲]. پژوهش‌هایی درباره بهبود خواص مکانیکی و گرمایی نانوکامپوزیت‌های لاستیکی بر پایه NR/SBR

با استفاده از نانولایه‌های خاک‌رس گزارش شده است [۲۳-۲۶]. با کشف نانولوله‌های کربن (CNTs) در سال ۱۹۹۱ رفتار اساسی این پرکننده‌ها در تجهیزات نانوالکترونی، خودرو و صنایع هوافضا به‌منظور دفع شارژهای الکتروستاتیک و خواص عالی مکانیکی، گرمایی و الکتریکی باعث شده است، از CNTs به‌طور گسترده به‌عنوان تقویت‌کننده در ماتریس‌های پلیمری استفاده شود [۲۷،۲۸]. استفاده از CNTs در داخل ماتریس‌های لاستیکی موجب بهبود خواصی چون دوام، استحکام، سبکی وزن افزون بر طراحی و انعطاف‌پذیری فرایند در مقایسه با پرکننده‌های متداول مانند دوده‌ها می‌شود. Bokobza به بهبود عالی خواص مکانیکی، گرمایی و الکتریکی پرکننده نانولوله کربن نسبت به سایر نانوپرکننده‌ها اشاره کرده است. وی، علت را مقدار کمتر افزودن این پرکننده به ماتریس نسبت به ذرات دوده در آستانه نفوذ (percolation) برای دستیابی به خواص رسانندگی گرمایی بیان کرده است [۲۹،۳۰]. Mensah و همکاران [۳۱] افزایش خواص مکانیکی ماتریس لاستیکی دارای CNT را قابلیت انتقال بار زیاد CNTs به شکل لیفچه‌مانند و نسبت منظر زیاد آن‌ها عنوان کردند. احمدی و همکاران [۳۲] ویژگی‌های پخت ماتریس لاستیکی NR/SBR تقویت‌شده با دوده معمولی، دوده با ساختار بالا و CNT را در چهار دمای مختلف به‌کمک رئومتر پخت بررسی کردند. آن‌ها اختلاف در نتایج به‌دست آمده را به چگالی شبکه‌ای شدن ماتریس و برهم‌کنش ذرات پرکننده با ماتریس لاستیکی نسبت دادند.

Boonmahitthisud و همکاران به اثر پرکننده هیبریدی CNT/CB بر خواص مکانیکی و رفتار گرمایی آمیخته SBR/NR اشاره کردند که استحکام کششی و مدول کامپوزیت نسبت به دوده تنها، افزایش نشان داده است [۳۳،۳۴]. خواص میرایی و سفتی نیز افزون بر پایداری گرمایی آمیخته با پرکننده هیبریدی بهتر از آمیخته‌هایی است که فقط با دوده تقویت شدند. مشکل اصلی در ساخت کامپوزیت تقویت‌شده با CNT تجمع و کلوخگی نانولوله‌ها و برهم‌کنش ضعیف بین سطحی بین CNT و ماتریس پلیمری است. عامل دارکردن شیمیایی سطح نانولوله‌های کربن، افزون بر افزایش برهم‌کنش فصل مشترک بین CNT و ماتریس پلیمری، سبب افزایش چسبندگی نانولوله‌ها در حلال‌های معدنی و پلیمرها شده [۳۵،۳۶]. تمایل نانولوله‌ها به تجمع را کاهش داده و در نتیجه پراکنش بهبود یافته است. سازگارکردن کامپوزیت‌های پلیمر-نانولوله با استفاده از عامل جفت‌کننده مناسب نیز روشی برای تغییر انرژی سطحی نانولوله‌هاست که سبب افزایش خاصیت ترشدگی آن‌ها می‌شود و تمایل به کلوخه‌شدن در ماتریس پلیمری را کاهش می‌دهد [۳۷].

در این پژوهش که در راستای تکمیل فعالیت‌های پیشین [۳۸-۴۲]

جهت طولی و عرضی با دستگاه کشش مدل HIWA 200 مطابق با استاندارد ASTM D412 در سرعت کشش 500 mm/min به دست آمد. استحکام پارگی نمونه‌ها نیز به کمک همان دستگاه آزمون کشش در جهت طولی الیاف و با تغییر فک‌های گیرنده دمبل‌ها مطابق با استاندارد ASTM D624 در سرعت جدایی فک‌ها به مقدار 500 mm/min به دست آمد. برای مطالعه مقدار تورم، نمونه‌ها به شکل مستطیل با ابعاد $10 \times 25 \times 2 \text{ mm}^3$ در جهت طولی تهیه و توزین شدند. سپس، طبق استاندارد ASTM D3616 به مدت 48 h در دمای محیط درون تولون قرار گرفتند تا مقدار درصد حلال نفوذ کرده با توجه به وزن اولیه و وزن ثانویه نمونه‌ها به دست آید. شکل‌شناسی سطح شکست نمونه‌ها درون نیتروژن مایع به وسیله میکروسکوپ الکترونی پویشی (SEM) Stereoscan 360 مدل Tescan-Vaga ساخت کشور چک بررسی شد. برای اندازه‌گیری مقدار جهندگی آمیخته‌های پخت‌شده، دستگاه Resilience Tester Frank ساخت آلمان مطابق استاندارد ASTM D1054 به کار گرفته شد. اندازه‌گیری مانایی فشاری طبق استاندارد ASTM D 395 انجام شد.

روش‌ها

آمیخته‌سازی

آمیزه‌ها با استفاده از غلتک آزمایشگاهی براساس فرمول‌بندی جدول ۱ تهیه شدند. سرعت غلتک‌ها 20 rpm و فاصله بین آن‌ها 2 mm در نظر گرفته شد. برای تهیه آمیزه، ابتدا NR با سرعت کم 10 rpm به مدت 2 min غلتک‌کاری شد. سپس، به طور جداگانه SBR به مدت 1 min و هر دو با هم به مدت 2 min به حالت مخلوط غلتک‌کاری شدند. سپس، فاصله بین دو غلتک کاهش داده شد و سامانه اتصال خشک (HRH) به مدت 1 min اضافه شد. نانولوله کربن به مدت 2 min ، روی اکسید و استتاریک اسید نیز به مدت 2 min غلتک‌کاری شدند. در این حالت فاصله بین دو غلتک به 0.6 mm کاهش یافت و الیاف طی $4-6 \text{ min}$ به مقدار 20 phr اضافه شد تا به طور کامل جهت‌گیری شوند. سپس به آن، سامانه پخت شامل شتاب‌دهنده (CBS) و گوگرد طی 1 min اضافه شد. در نهایت، نمونه با ضخامت $2/5 \text{ mm}$ خارج شد. در تمام مدت فرایند، دما روی 50°C تنظیم شد.

نتایج و بحث

مشخصات پخت

شکل ۱ تغییرات گشتاور کمینه با تغییرات مقدار نانولوله کربن

انجام شده است، برای اولین بار اثر نانولوله‌های کربن اصلاح‌شده و نشده بر خواص مکانیکی و شکل‌شناسی کامپوزیت NR/SBR تقویت‌شده با 20 phr الیاف کوتاه نایلون 66 و سازگار شده با HRH بررسی شده است. یادآور می‌شود، از انواع مختلف سازگارکننده شامل رزورسینول، هگزامتوکسی متیل ملامین (HMMM)، فرمالدهید (RFL)، هگزامتیلن تترآمین-رزورسینول-سیلیکای آب‌دار (HRH) و رزین اپوکسی می‌توان در این کامپوزیت‌ها استفاده کرد که در این مطالعه نوع HRH انتخاب شده است [۵].

تجربی

مواد

از لاستیک طبیعی SMR-20 با گراندروی مونی ML(1+4) در دمای 100°C برابر 65 ، تولید مالزی، لاستیک استیرن-بوتادیان (SBR 1502) با گراندروی مونی ML(1+4) در دمای 100°C برابر 54 ، تولید شرکت پتروشیمی بندر امام و الیاف نایلون 66 ، از شرکت نخ صبا به شکل نخ (cord) با دنیر 2650 ، قطر 0.68 mm و طول بریده شده تقریباً 6 mm استفاده شد. عامل سازگارکننده شامل رزورسینول با چگالی 2.36 g/cm^3 ، هگزامتیلن تترآمین با چگالی 1.33 g/cm^3 و سیلیکای رسوبی با نام تجاری ولکاسیل S با چگالی 2 g/cm^3 به عنوان عامل اتصال‌دهنده بین لاستیک و الیاف، از شرکت Lanxess آلمان تهیه شدند. عوامل پخت شامل روی اکسید (ZnO)، استتاریک اسید، گوگرد و شتاب‌دهنده سیکلو هگزیل بنزوتیازول سولفونامید (CBS) از شرکت Bayer آلمان تهیه شدند. از نانولوله کربن چنددیواره ساخت شرکت Nanocyl بلژیک با خلوص بیش از 95% ، چگالی 1.66 g/cm^3 ، قطر متوسط $9/5 \text{ nm}$ و طول متوسط $1/5 \text{ mm}$ به شکل اصلاح‌شده و نشده در مقادیر 0 ، 1 ، 2 و 3 phr با گروه‌های اسیدی کربوکسیل (COOH- بیشتر از 0.8) استفاده شد.

دستگاه‌ها

برای اختلاط آمیزه‌ها، غلتک آزمایشگاهی مدل L200 Polymix ساخت آلمان به کار گرفته شد. پخت آمیزه‌ها به وسیله پرس هیدرولیک 25 تنی ساخت شرکت Davenport انگلستان در دمای 150°C و فشار 2180 kg/cm^2 انجام شد. مشخصات پخت کامپوزیت‌ها با رئومتر مدل 4308 ساخت شرکت Zwick آلمان در دمای 150°C مطابق ASTM D2084 تعیین شد. سختی نمونه‌ها با سختی‌سنج در مقیاس Shore A ساخت شرکت Zwick آلمان طبق استاندارد ASTM D2240 اندازه‌گیری شد. خواص کششی آمیزه‌ها روی نمونه‌های دمبلی شکل تهیه‌شده در دو

جدول ۱- فرمول‌بندی نمونه‌های تهیه شده (تمام مقادیر برحسب phr است).

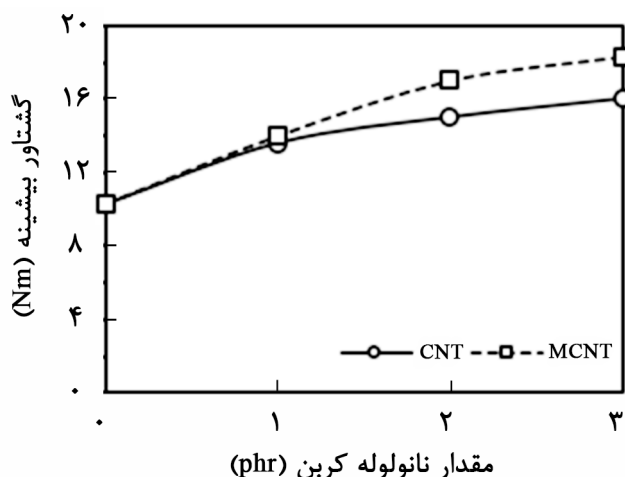
اجزا	BF0CNT0	BF20CNT0	BF20CNT1	BF20CNT2	BF20CNT3	BF20MCNT1	BF20MCNT2	BF20MCNT3
NR	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰
SBR	۶۰	۶۰	۶۰	۶۰	۶۰	۶۰	۶۰	۶۰
ZnO	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵
استئاریک اسید	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲
رزورسینول	۲/۵	۲/۵	۲/۵	۲/۵	۲/۵	۲/۵	۲/۵	۲/۵
HMTA	۱/۶	۱/۶	۱/۶	۱/۶	۱/۶	۱/۶	۱/۶	۱/۶
سیلیکا	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵
الیاف نایلون	۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰
CNT	۰	۰	۰	۲	۳	۰	۰	۰
MCNT	۰	۰	۱	۰	۰	۲	۳	۰
CBS	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸
گوگرد	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲

B عامل سازگارکننده، F الیاف نایلون، CNT نانولوله کربن اصلاح‌نشده، MCNT نانولوله کربن اصلاح‌شده و HMTA هگزامتیلن تترآمین است.

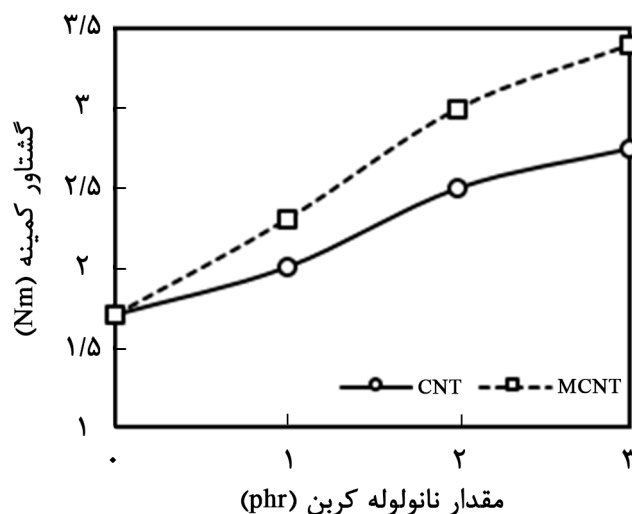
زمان پخت کامل است. در اینجا ماتریس شکل استحکامی پخت شده خود را گرفته است و تنش را به پرکننده‌ها منتقل می‌کند. بنابراین هر پرکننده، نقش تقویت‌کنندگی خود را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با ازدیاد مقدار نانولوله کربن اصلاح‌شده، مقدار این کمیت افزایش می‌یابد. این نتایج، بیانگر برهم‌کنش قوی نانولوله کربن اصلاح‌شده با الیاف و انتقال بهتر تنش ماتریس به نانولوله‌های کربن اصلاح‌شده و الیاف است.

در شکل‌های ۳ (الف) و (ب) تغییرات زمان پخت و سرعت پخت (شیب ناحیه ثابت منحنی رئومتر گشتاور برحسب زمان در بازه زمانی

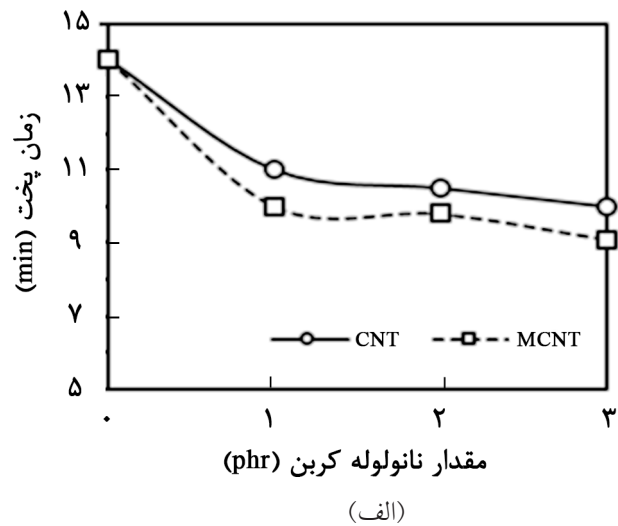
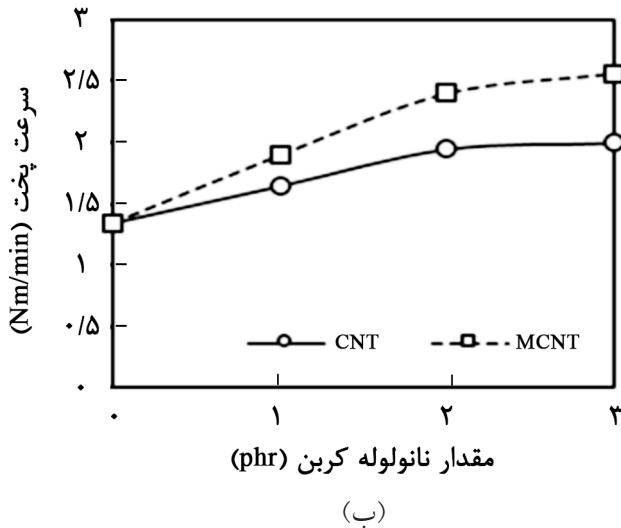
اصلاح‌شده و نشده را از ۰ phr تا ۳ phr نشان می‌دهد. گشتاور کمینه در واقع معیاری از گرانروی آمیزه پخت‌نشده است. در آمیزه‌های دارای تقویت‌کننده، این گشتاور افزون بر گرانروی فاز ماتریس، به توزیع مناسب ذرات و برهم‌کنش خوب ذرات با ماتریس بستگی دارد. گشتاور کمینه مطابق انتظار با اضافه‌کردن درصد نانولوله کربن افزایش می‌یابد. اما، افزایش گشتاور کمینه در نانولوله کربن اصلاح‌شده بیشتر است. شکل ۲ تغییرات گشتاور بیشینه را برای مقادیر مختلف نانولوله کربن نشان می‌دهد. گشتاور بیشینه نیز، معیاری از مقاومت نمونه در



شکل ۲- گشتاور بیشینه آمیزه‌های تهیه‌شده با مقادیر مختلف نانولوله کربن اصلاح‌شده و نشده و ۲۰ phr الیاف کوتاه نایلون.



شکل ۱- گشتاور کمینه آمیزه‌های تهیه‌شده با مقادیر مختلف نانولوله کربن اصلاح‌شده و نشده و ۲۰ phr الیاف کوتاه نایلون.



شکل ۳- تغییرات (الف) زمان پخت و (ب) سرعت پخت آمیزه‌های تهیه‌شده با مقادیر مختلف نانولوله کربن اصلاح‌شده و نشده و ۲۰ phr الیاف کوتاه نایلون.

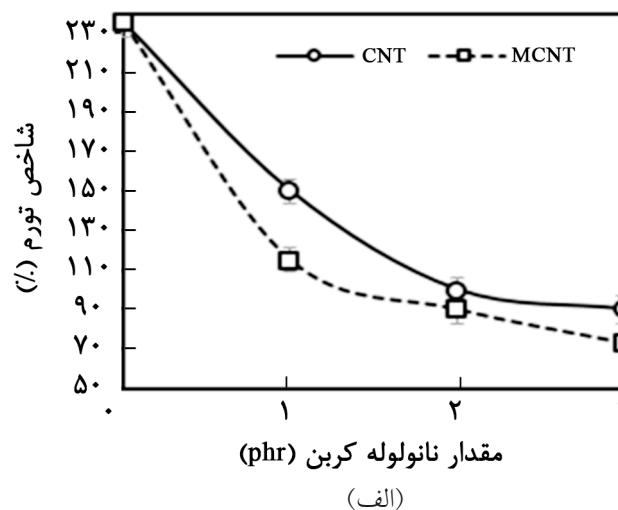
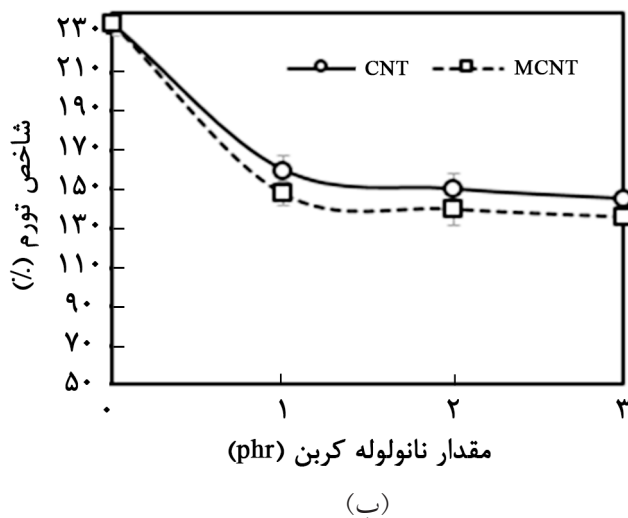
نانولوله‌های اصلاح‌شده کاهش بیشتری مشاهده می‌شود که می‌تواند به دلیل اتصالات قوی‌تر و برهم‌کنش بهتر بین ماتریس و نانولوله و چسبندگی بین دو فاز باشد. همچنین حین فرایند، پراکنش خوب CNTs در محلول تولوئن و سپس کلوخه‌شدن مجدد آن‌ها پس از مشارکت پلیمر رخ می‌دهد، بنابراین، مولکول‌های لاستیک همانند پرکننده عمل می‌کنند و متورم نمی‌شوند. تغییرات شاخص تورم در جهت‌گیری عرضی در شکل ۴ (ب) نشان داده شده که مقدار تورم در جهت‌گیری طولی بیشتر از جهت‌گیری عرضی کاهش یافته است.

خواص مکانیکی

شکل‌های ۵ (الف) و (ب) اثر مقدار نانولوله کربن اصلاح‌شده و نشده بر افزایش استحکام کششی نانوکامپوزیت NR/SBR را به ترتیب در جهت طولی و عرضی نشان می‌دهند. افزایش استحکام کششی در کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف به دلیل انتقال تنش بین الیاف و ماتریس کاملاً شناخته شده است. وجود الیاف در ماتریس در مجاورت سازگارکننده HRH به پدیده تقویت‌کنندگی در اثر برهم‌کنش بین الیاف و ماتریس منجر می‌شود و در نتیجه استحکام کششی بهبود می‌یابد [۵،۳۸،۳۹]. عامل سازگارکننده نقش مهمی در افزایش خواص مکانیکی آمیخته‌ها ایفا می‌کند. زیرا، اتصالات بین الیاف و ماتریس را افزایش داده به طوری که مقدار تنش از ماتریس به الیاف به راحتی قابل انتقال است و در نهایت مقدار استحکام کششی افزایش می‌یابد. در هر دو حالت جهت‌گیری طولی و عرضی الیاف، با افزایش مقدار نانولوله کربن و افزودن ۲۰ phr الیاف، استحکام کششی بیشتر

تا t_{90} آمیزه‌ها با افزایش ترکیب درصد نانولوله کربن اصلاح‌شده و نشده و افزودن ۲۰ phr الیاف کوتاه نایلون به نمونه خام نشان داده شده است. زمان پخت با ازدیاد الیاف کاهش می‌یابد و کاهش شدیدتری با افزایش نانولوله کربن مشاهده می‌شود. همچنین نانولوله کربن اصلاح‌شده در مقایسه با اصلاح‌نشده زمان پخت کمتری را نشان می‌دهد. این به دلیل برهم‌کنش‌ها و اتصالات قوی بین نانولوله و ماتریس و نیز رسانندگی گرمایی زیاد نانولوله‌هاست. محیط قلیایی که الیاف نایلون با افزودن گروه‌های آمینی آزاد شده ایجاد کرده‌اند، سرعت پخت را تسریع می‌کند. تغییرات سرعت پخت آمیزه‌ها نشان می‌دهد، با افزودن ۲۰ phr الیاف به نمونه خام، سرعت پخت تقریباً ۰/۴ Nm/min افزایش می‌یابد. با ازدیاد ترکیب درصد نانولوله کربن سرعت پخت افزایش می‌یابد و در نانولوله کربن اصلاح‌شده این سرعت بیشتر است. افزایش مزبور ناشی از سطح ویژه زیاد نانوذرات و پراکنندگی خوب در ماتریس است. همچنین، گروه‌های قطبی موجود در سطح CNTs باعث فعال‌شدن اتصالات دوگانه و کاهش زمان دستیابی به گوگرد و شروع پخت می‌شوند [۲۹].

برای مطالعه اثر نانولوله کربن به‌عنوان عامل سازگارکننده چسبندگی ماتریس به الیاف و تأیید جهت‌گیری الیاف در آمیزه‌های تهیه شده، رفتار تورمی کامپوزیت‌ها در حلال تولوئن بررسی شد. شکل ۴ (الف) تغییرات شاخص تورم را در جهت‌گیری طولی نشان می‌دهد. با افزودن ۲۰ phr الیاف به نمونه خام مقدار تورم کاهش می‌یابد. این به دلیل ایجاد اتصالات بین ماتریس و الیاف است. همچنین، با افزایش بارگذاری نانولوله، شاخص تورم به تدریج کاهش نشان می‌دهد. در

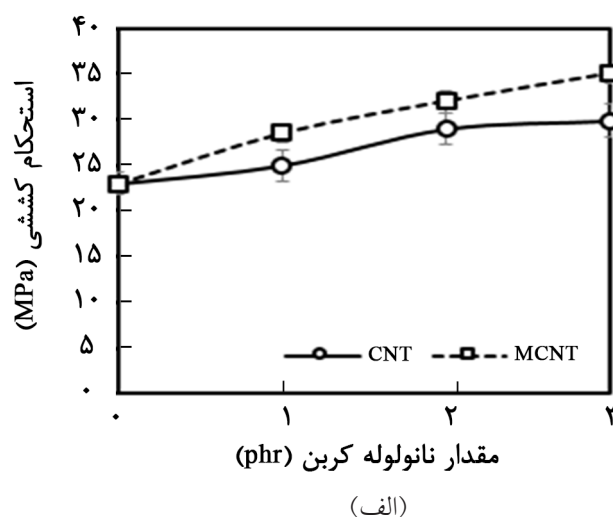
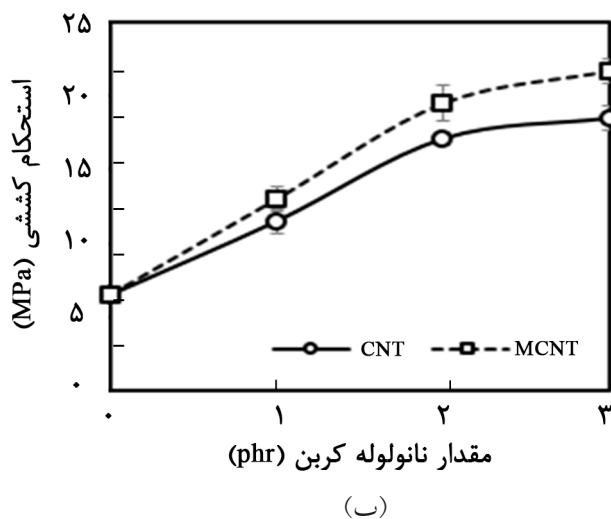


شکل ۴- شاخص تورم آمیزه‌های تهیه‌شده با ۲۰ phr الیاف کوتاه نایلون و مقادیر مختلف نانولوله کربن اصلاح‌شده و نشده با جهت‌گیری: (الف) طولی و (ب) عرضی.

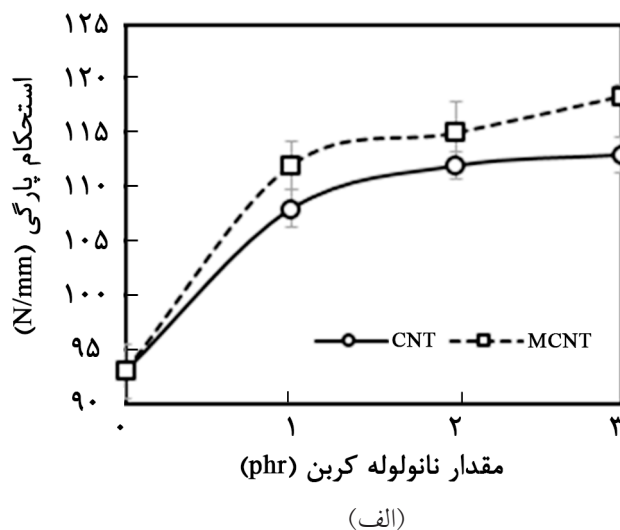
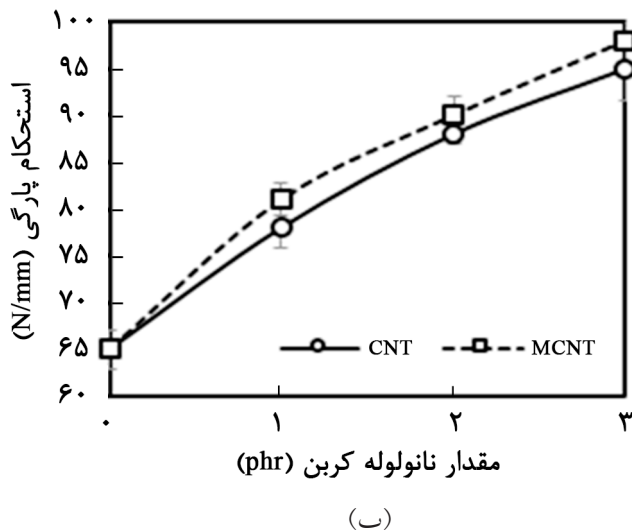
این کسر حجمی کم از نظر قیمت تمام شده نسبتاً کم محصول نهایی و وزن کم محصول با خواص مطلوب حائز اهمیت است. هر دو این نکات در استفاده از نانولوله‌های کربنی در مقیاس صنعتی دارای اهمیت و توجه است. گفتنی است، روند افزایش بیشتر استحکام کششی در جهت طولی نسبت به جهت عرضی در شکل ۵(ب) را می‌توان به خواص ناهمسانگردی کامپوزیت‌ها و تحمل بار کمتر الیاف در جهت عرضی نسبت داد [۴۳]. در شکل‌های ۶ (الف) و (ب) تغییرات استحکام پارگی در جهت‌های طولی و عرضی الیاف با افزایش مقدار نانولوله کربن نشان داده شده است. با افزایش ترکیب درصد نانولوله کربن مقدار استحکام پارگی افزایش می‌یابد. اندازه ذرات کوچک

شده است. این افزایش برای نمونه دارای نانولوله کربن اصلاح‌شده نسبت به سایر نمونه‌ها بیشتر است. علت این موضوع مساحت سطح زیاد این پرکننده، شکل لیفچه‌مانند و قابلیت انتقال بار زیاد آن است که باعث بهبود مقدار ترشدگی سطح الیاف می‌شود، به طوری که افزون بر توزیع بهتر الیاف در ماتریس برهم‌کنش آن با ماتریس نیز افزایش می‌یابد [۴۱].

نکته بسیار مهم آن است که افزایش استحکام کششی در مقادیر کم نانولوله کربن یعنی در ۱ phr به خوبی مشاهده می‌شود، به سبب اینکه در مقادیر کمتر، غلظت گروه‌های اسیدی اتصال‌یافته به سطح نانولوله‌های کربن ممانعت فضایی و مشکلات نفوذ کمتری را دارد.



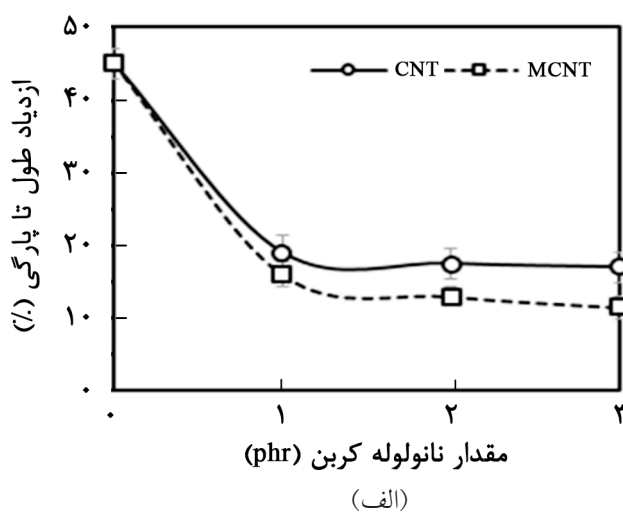
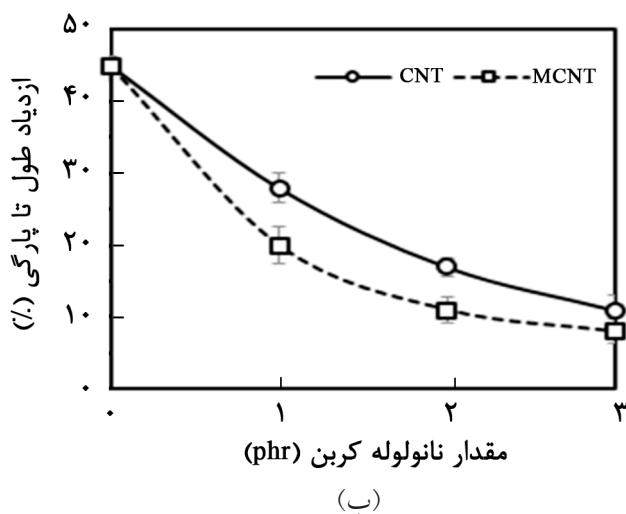
شکل ۵- استحکام کششی آمیزه‌های تهیه‌شده با ۲۰ phr الیاف کوتاه نایلون و با مقادیر متفاوت نانولوله کربن با جهت‌گیری: (الف) طولی و (ب) عرضی.



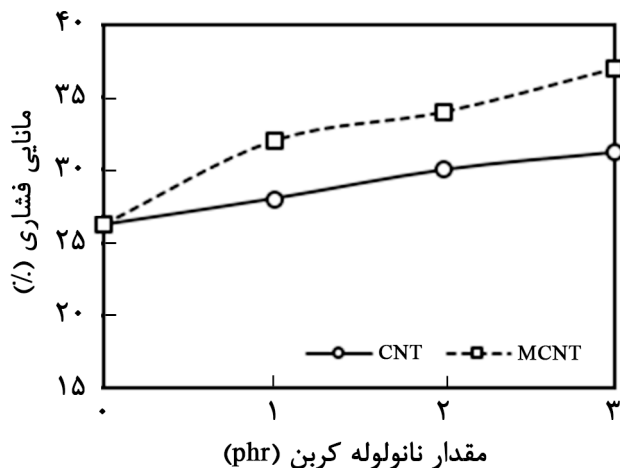
شکل ۶- استحکام پارگی آمیزه‌های تهیه‌شده با ۲۰ phr الیاف کوتاه نایلون و مقادیر مختلف نانولوله کربن با جهت‌گیری: (الف) طولی و (ب) عرضی.

تحرك زنجیرهای ماتریس کمتر شده، انعطاف‌پذیری کاهش یافته، در نتیجه منحنی ازدیاد طول تا پارگی سیر نزولی یافته است. همان‌طور که در مطالعات پیشین اشاره شد [۴] با اضافه کردن الیاف کوتاه تا ۱۰ phr به ماتریس ازدیاد طول تا پارگی کاهش شدید یافته است که سپس به تدریج با افزایش الیاف به مقدار بیشتر، ثابت باقی‌مانده است. این کاهش در جهت‌گیری عرضی الیاف در ماتریس به علت تحمل کمتر بار الیاف به وسیله ماتریس، کمتر مشاهده شده است. حال با ورود نانولوله کربن به ماتریس به مقدار کم به علت برهم‌کنش قوی‌تر الیاف با ماتریس به‌ویژه در جهت طولی موجب کاهش ازدیاد طول تا پارگی شد که به تدریج با افزایش نانولوله کربن از ۱ phr به بعد تغییرات

نانولوله کربن در آزمون استحکام پارگی در جهت طولی جلوی رشد ترک را می‌گیرد یا باعث انحراف این ترک‌ها می‌شود. این پدیده در جهت‌گیری عرضی الیاف کمتر اتفاق می‌افتد، به طوری که استحکام پارگی در این جهت کمتر است [۲۶] و استحکام پارگی در نمونه‌هایی با جهت‌گیری طولی الیاف به علت عدم رشد ترک، بیشتر است. در شکل‌های ۷ (الف) و (ب) کاهش ازدیاد طول تا پارگی آمیخته‌ها با افزایش نانولوله کربن در جهت‌های طولی و عرضی دیده می‌شود. کاهش ازدیاد طول تا پارگی با افزایش نانولوله کربن می‌تواند به علت چسبندگی قوی و نیز برهم‌کنش قوی بین نانولوله کربن و ماتریس لاستیکی باشد. با افزایش برهم‌کنش بین نانولوله کربن و ماتریس



شکل ۷- ازدیاد طول تا پارگی آمیزه‌های تهیه‌شده با ۲۰ phr الیاف کوتاه نایلون و مقادیر مختلف نانولوله کربن اصلاح‌شده و نشده با جهت‌گیری: (الف) طولی و (ب) عرضی.

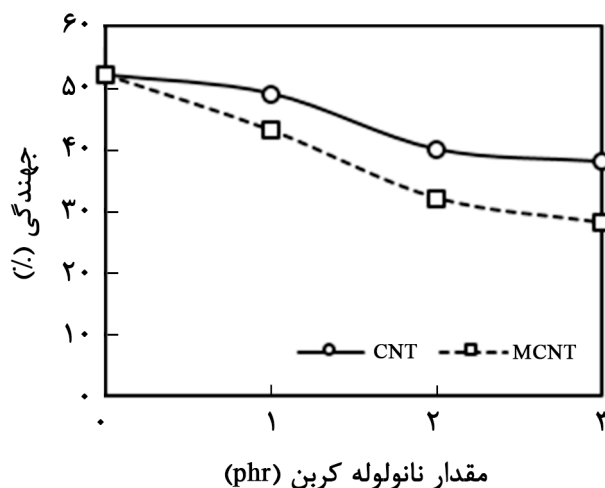


شکل ۹- تغییرات مانایی فشار آمیزه‌های تهیه شده با مقادیر مختلف نانولوله کربن و ۲۰ phr الیاف کوتاه نایلون.

انرژی بیشتر در فصل مشترک بین ماتریس و الیاف نسبت داد. با افزودن نانولوله مقدار جهندگی بیشتر کاهش یافته است و با مقایسه نانولوله کربن اصلاح‌شده و نشده می‌توان کاهش بیشتر جهندگی در نانولوله کربن اصلاح‌شده را دید که این موضوع به دلیل اتصالات شیمیایی گروه‌های عاملی و برهم‌کنش بهتر با ماتریس است [۲۹].

مطالعه شکل‌شناسی

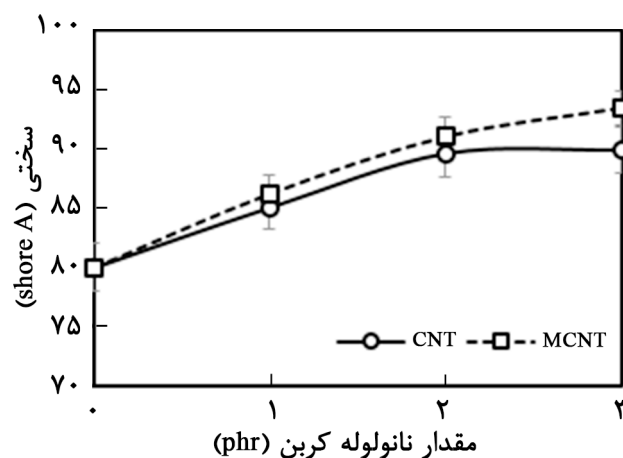
شکل ۱۱ (الف) ریزنگاری از سطح شکست کششی نمونه خام بدون نانولوله و الیاف را نشان می‌دهد. در این نوع شکست، اتفاق خاصی در نمونه رخ نمی‌دهد. شکل ۱۱ (ب) سطح کششی در جهت طولی نمونه بدون نانولوله و دارای الیاف (BF20CNT0) را نشان



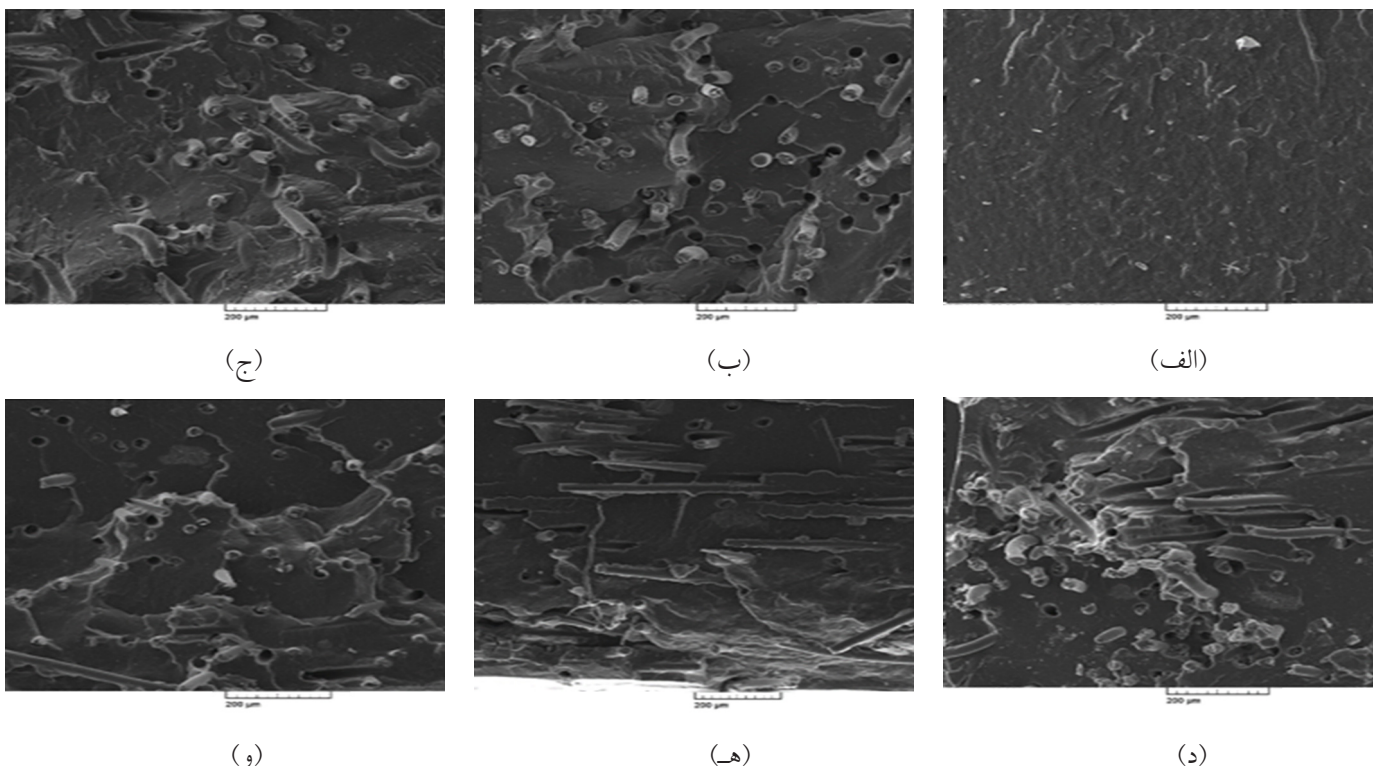
شکل ۱۰- تغییرات جهندگی آمیزه‌های تهیه‌شده با مقادیر مختلف نانولوله کربن و ۲۰ phr الیاف کوتاه نایلون.

زیادی دیده نمی‌شود. درباره جهت‌گیری عرضی مطابق شکل ۷ (ب)، از مقادیر ۳ phr به بعد کاهش کمتری در ازدیاد طول تا پارگی مشاهده شد. شکل ۸ نشان می‌دهد، با افزایش الیاف و نانولوله کربن مقدار سختی افزایش می‌یابد. افزایش سختی را می‌توان به مقدار زیاد اتصالات بین الیاف با ماتریس لاستیکی نسبت داد. همچنین، به دلیل سختی نانولوله کربن به‌عنوان عامل تقویت‌کننده نیز است. شدت افزایش سختی از ۲ phr نانولوله کربن به بعد کم می‌شود که این به دلیل پراکنش دشوار مقادیر بیشتر نانولوله کربن درون ماتریس پلیمری است. افزایش سختی نانوکامپوزیت‌ها حاکی از مقاومت در برابر فرورفتگی (دندانه دندانه‌شدن) است. این مقاومت زمانی بیشتر است که ماتریس لاستیکی با نانولوله کربن و نیز با الیاف پر شده باشد. شکل ۹ مانایی فشاری نمونه‌ها را با مقادیر مختلف نانولوله نشان می‌دهد. با افزودن ۲۰ phr الیاف به نمونه خام ۵٪ مانایی فشاری افزایش نشان داده است. به‌طور کلی با وجود پرکننده‌های تقویت‌کننده، انرژی اتلاف کشسان در فصل مشترک ماتریس با پرکننده افزایش می‌یابد. در آزمون مانایی فشار دما زیاد می‌شود [۲۶] و ماتریس تحت جریان برگشت‌ناپذیر نرم می‌شود و پس از حذف فشار، تنش اعمال شده به‌طور ناقص برمی‌گردد. با افزایش مقدار نانولوله کربن اصلاح‌شده درون ماتریس، تقویت‌کنندگی بیشتری مشاهده شد که در نتیجه آن اتلاف کشسان بیشتر می‌شود. بنابراین کامپوزیت دارای نانولوله کربن به‌ویژه نوع اصلاح‌شده مانایی فشاری بیشتری را نشان می‌دهد.

در شکل ۱۰ تغییرات جهندگی آمیزه‌ها با افزودن الیاف و افزایش بارگذاری نانولوله کربن نشان داده شده است. جهندگی معیاری از مقدار کشسانی ماده را نشان می‌دهد که با افزودن نانولوله برای همه نمونه‌ها کاهش می‌یابد. علت کاهش جهندگی را می‌توان به اتلاف



شکل ۸- تغییرات سختی آمیزه‌های تهیه‌شده با مقادیر مختلف نانولوله کربن و ۲۰ phr الیاف کوتاه نایلون.



شکل ۱۱- تصاویر SEM سطح شکست نمونه‌های: (الف) BF0CNT0، (ب) BF20CNT0، (ج) BF20CNT2 و (د) BF20MCNT2، در جهت طولی (L) (ه) BF20MCNT2 و (و) BF20CNT2 در جهت عرضی (T) با ۲۰ phr الیاف کوتاه نایلون.

سطح شکست‌ها نمونه‌ها در جهت طولی مشاهده می‌شود، بیرون‌زدگی الیاف بیشتر و چسبندگی ضعیف‌تر است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مشخصات پخت، خواص فیزیکی و مکانیکی، ساختاری و شکل‌شناسی نانوکامپوزیت‌ها بر پایه NR/SBR تقویت‌شده با الیاف کوتاه نایلون و نانولوله‌های کربن اصلاح‌شده و نشده بررسی شده است. زمان پخت با وجود الیاف کوتاه نایلون و افزایش مقدار نانولوله کربن در نانوکامپوزیت به دلیل افزایش رسانندگی گرمایی آمیخته کاهش یافته است. خواص مکانیکی آمیزه‌ها مانند استحکام کششی، استحکام پارگی، سختی و مانایی فشاری با وجود الیاف کوتاه نایلون و افزایش مقادیر نانولوله کربن افزایش و ازدیاد طول تا پارگی در مقادیر کم نانولوله کاهش نشان داد که با نتایج ریزساختار مطابقت دارد. افزایش خواص مکانیکی و کاهش ازدیاد طول تا پارگی در نانولوله کربن اصلاح‌شده بیشتر بود. مقدار جهندگی نمونه‌های تهیه‌شده با افزایش نانولوله کربن کاهش می‌یابد. مقدار تورم با وجود حلال تولوئن به علت اتصالات بیشتر الیاف به ماتریس و نیز وجود

می‌دهد. در اثر شکست کششی، انتهای طولی الیاف از درون ماتریس بیرون کشیده می‌شود که قدرت استحکام اتصال بین الیاف و ماتریس را نشان می‌دهد. در نمونه کامپوزیتی زیر بار، سطح الیاف همان‌طور که دیده می‌شود، از الیاف شکسته شده و بار اعمالی روی الیاف انتقال پیدا کرده است. شکل ۱۱ (ج) سطح شکست کششی در جهت طولی نمونه BF20CNT2 دارای ۲۰ phr الیاف و ۲ phr نانولوله کربن را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل نمایان است، بیرون‌زدگی الیاف در سطح شکست نسبت به نمونه‌های قبلی کمتر و سطح شکست منسجم‌تر است. این نشانگر چسبندگی و اتصال قوی‌تر الیاف و پرکننده به ماتریس است. شکل ۱۱ (د) سطح شکست کششی در جهت طولی نمونه BF20MCNT2 دارای ۲۰ phr الیاف و ۲ phr نانولوله کربن اصلاح‌شده را نشان می‌دهد که در مقایسه با شکل ۱۱ (ج) نمونه دارای نانولوله کربن اصلاح‌نشده، بیرون‌زدگی الیاف و حفره‌های توخالی کمتر است. یعنی چسبندگی قوی‌تری بین ماتریس و الیاف با وجود نانولوله کربن اصلاح‌شده به وجود آمده است. شکل‌های ۱۱ (ه) و (و) سطح شکست کششی در جهت عرضی نمونه‌های (T)(BF20MCNT2) و (T)(BF20CNT2) دارای ۲۰ phr الیاف و ۲ phr نانولوله اصلاح‌شده و نشده را نشان می‌دهد که در مقایسه با

در نتیجه چسبندگی قوی‌تری بین ماتریس و الیاف با وجود نانولوله کربن اصلاح‌شده به‌وجود آمده است. برای نمونه‌ها در جهت عرضی، بیرون‌زدگی الیاف بیشتر و چسبندگی ضعیف‌تری مشاهده شد.

نانولوله کربن کاهش یافت. بررسی‌های ریزساختاری انجام شده روی سطح شکست نشان داد، با افزودن نانولوله کربن به‌ویژه اصلاح‌شده در جهت طولی بیرون‌زدگی الیاف و حفره‌های توخالی کمتر است.

مراجع

- Vahidifar A., Esmizadeh E., Naderi G., and Varvani-Farahani A., Ratcheting Response of Nylon Fiber Reinforced Natural Rubber/Styrene Butadiene Rubber Composites Under Uniaxial Stress Cycles: Experimental Studies, *Fatigue Fract Eng. Mater. Struct.*, 1-10, 2017.
- Kooshki M.M. and Arani A.J., Preparation, Characterization and Properties of Polymeric Nanocomposites Based on Natural Rubber and Polybutadiene Rubber Blend, *e-Polymers*, **9**, 1570-1579, 2009.
- Soltani S., Naderi G., and Ghoreishy M.H.R., Short Nylon Fibre Reinforce NR/SBR Composites : Optimization of Interfacial Bonding Agent, *Iran. Polym. J.*, **19**, 853-861, 2010.
- Soltani S., Naderi G., and Ghoreishy M.H.R., Mechanical and Rheological Properties of Short-Nylon Fibre NR/SBR Composites, *J. Rubber Res.*, **13**, 110-124, 2010.
- Ghoreishy M.H.R., Soltani S., and Naderi G., Studies on Properties of Short Fibre Reinforced Natural Rubber Composites, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **21**, 259-267, 2008.
- George S.C., Ninan K.N., Groeninckx G., and Thomas S., Styrene-Butadiene Rubber/Natural Rubber Blends: Morphology, Transport Behavior, and Dynamic Mechanical and Mechanical Properties, *J. Appl. Polym. Sci.*, **78**, 1280-1303, 2000.
- Manshaie R., Khorasani S.N., Veshare S.J., and Abadchi M.R., Effect of Electron Beam Irradiation on the Properties of Natural Rubber (NR)/Styrene-Butadiene Rubber (SBR) Blend, *Radiation Phys. Chem.*, **80**, 100-106, 2011.
- Tolooei S., Naderi G., Shokoohi S., and Soltani S., Elastomer Nanocomposites Based on NBR/BR/Nanoclay: Morphology and Mechanical Properties, *J. Polym. Eng.*, **33**, 133-139, 2013.
- PK B. and Kutty S.K., A Comparative Study of Short Nylon Fiber-Natural Rubber Composites Prepared from Dry Rubber and Latex Masterbatch, *J. Appl. Polym. Sci.*, **109**, 1484-1491, 2008.
- Martins M.A. and Mattoso L.H., Short Sisal Fiber-Reinforced Tire Rubber Composites: Dynamic and Mechanical Properties, *J. Appl. Polym. Sci.*, **91**, 670-7, 2004.
- Murty V.M. and De S.K., Short-Fiber-Reinforced Styrene-Butadiene Rubber Composites, *J. Appl. Polym. Sci.*, **29**, 1355-68, 1984.
- Rajesh C., Unnikrishnan G., Purushothaman E., and Thomas S., Cure Characteristics and Mechanical Properties of Short Nylon Fiber-Reinforced Nitrile Rubber Composites, *J. Appl. Polym. Sci.*, **92**, 1023-1030, 2004.
- Tjong S.C., Xu S.A., Li R.K., and Mai Y.W., Mechanical Behavior and Fracture Toughness Evaluation of Maleic Anhydride Compatibilized Short Glass Fiber/SEBS/Polypropylene Hybrid Composites, *Compos. Sci. Technol.*, **62**, 831-840, 2002.
- Derringer G.C., Short Fiber-Elastomer Composites, *J. Elast. Plast.*, **3**, 230-248, 1971.
- Wazzan A.A., Physico-mechanical Properties of EPDM/Nylon-6 Short Fiber Composites, *Int. J. Polym. Mater.*, **53**, 59-67, 2004.
- Varghese S., Kuriakose B., Thomas S., Koshy A.T., Mechanical and Viscoelastic Properties of Short Fiber Reinforced Natural Rubber Composites: Effects of Interfacial Adhesion, Fiber Loading, and Orientation, *J. Adhesion Sci. Technol.*, **8**, 235-248, 1994.
- Hrachova J., Komadel P., and Chodak I., Effect of Montmorillonite Modification on Mechanical Properties of Vulcanized Natural Rubber Composites, *J. Mater. Sci.*, **43**, 2012-2017, 2008.
- Li P.Y., Wang L., and Song G.J., Characterization of High-performance Exfoliated Natural Rubber/Organoclay Nanocomposites, *J. Appl. Polym. Sci.*, **109**, 3831-3838, 2008.

19. Kumar R.P. and Thomas S., Short Fibre Elastomer Composites: Effect of Fibre Length, Orientation, Loading and Bonding Agent, *Bull. Mater. Sci.*, **18**, 1021-1029, 1995.
20. Razzaghi-Kashani M., Aramid-Short-Fiber Reinforced Rubber as a Tire Tread Composite, *J. Appl. Polym. Sci.*, **113**, 1355-1363, 2009.
21. Bokobza L., Mechanical, Electrical and Spectroscopic Investigation of Carbon Nanotube-Reinforced Elastomers, *Vibr. Spect.*, **51**, 52-59, 2009.
22. Esmizadeh E., Naderi G., and Paran S.M.R., Preparation and Characterization of Hybrid Nanocomposites Based on NBR/Nanoclay/Carbon Black, *Polym. Compos.*, **38**, E181-E188, 2017.
23. Tavakoli M., Katbab A.A., and Nazockdast H., NR/SBR/Organoclay Nanocomposites: Effects of Molecular Interactions upon the Clay Microstructure and Mechano-dynamic Properties, *J. Appl. Polym. Sci.*, **123**, 1853-1864, 2011.
24. Mohan T.P., Kuriakose J., and Kanny K.J., Effect of Nanoclay Reinforcement on Structure, Thermal and Mechanical Properties of Natural Rubber-Styrene Butadiene Rubber (NR/SBR), *Ind. Eng. Chem.*, **17**, 264-270, 2011.
25. Shan C., Gu Z., Wang L., Li P., Song G., Gao Z., and Yang X., Characterization, and Application of NR/SBR/Organoclay Nanocomposites in the Tire Industry, *J. Appl. Polym. Sci.*, **119**, 1185-1194, 2010.
26. Andideh M., Naderi G., Ghoreishy M.H., and Soltani S., Effects of Nanoclay and Short Nylon Fiber on Morphology and Mechanical Properties of Nanocomposites Based on NR/SBR, *Fibers Polym.*, **15**, 814-822, 2014.
27. Kang I.K., Khaleque M.A., Yoo Y., Yoon P.J., Kim S.Y., and Lim K.T., Preparation and Properties of Ethylene Propylene Diene Rubber/Multi-Walled Carbon Nanotube Composites for Strain Sensitive Materials, *Composites: Part A*, **42**, 623-630, 2011.
28. Ismail H. and Shaari S.M., Curing Characteristics, Tensile Properties and Morphology of Palm Ash/Halloysite Nanotubes/Ethylene-Propylene-Diene Monomer (EPDM) Hybride Composites, *Polym. Test.*, **29**, 872-878, 2010.
29. Bokobza L. Mechanical and Electrical Properties of Elastomer Nanocomposites Based on Different Carbon Nanomaterials, *J. Carbon Res.*, **3**, 10, 2017.
30. Bokobza L. Multiwall Carbon Nanotube Elastomeric Composites: A Review, *Polymer*, **48**, 4907-4920, 2007.
31. Mensah B., Kim H.G., Lee J.H., Arepalli S., and Nah C., Carbon nanotube-reinforced Elastomeric Nanocomposites: A Review, *Int. J. Smart Nano Mater.*, **6**, 211-238, 2015.
32. Ahmadi M. and Shojaei A., Cure Kinetic and Network Structure of NR/SBR Composites Reinforced by Multiwalled Carbon Nanotube and Carbon Blacks, *Thermochim Acta*, **566**, 238-248, 2013.
33. Boonmahitthisud A., Chuayjuljit S. NR/XSBR Nanocomposites with Carbon Black and Carbon Nanotube Prepared by Latex Compounding, *J. Metal., Mater. Mineral.*, **22**, 2012.
34. Le H.H., Parsekar M., Ilisch S., Henning S., Das A., Stöckelhuber K.W., Beiner M., Ho C.A., Adhikari R., Wießner S., and Heinrich G., Effect of Non-Rubber Components of NR on the Carbon Nanotube (CNT) Localization in SBR/NR Blends, *Macromol. Mater. Eng.*, **299**, 569-582, 2014.
35. Le H.H., Sriharish M.N., Henning S., Klehm J., Menzel M., Frank W., Wießner S., Das A., Stöckelhuber K.W., Heinrich G., and Radusch H.J., Dispersion and Distribution of Carbon Nanotubes in Ternary Rubber Blends, *Compos. Sci. Technol.*, **90**, 180-186, 2014.
36. Le H.H., Pham T., Henning S., Klehm J., Wießner S., Stöckelhuber K.W., Das A., Hoang X.T., Do Q.K., Wu M., and Vennemann N., Formation and Stability of Carbon Nanotube Network in Natural Rubber: Effect of Non-Rubber Components, *Polymer*, **73**, 111-21, 2015.
37. Shanmugaraj A.M., Bae J.H., Lee K.Y., Noh W.H., Lee S.H., and Ryu S.H., Physical and Chemical Characteristics of Multiwalled Carbon Nanotubes Functionalized with Aminosilane and Its Influence on the Properties of Natural Rubber Composites, *Compos. Sci. Technol.*, **67**, 1813-1822, 2007.
38. Soltani S., Naderi G., and Mohseniyan S., Mechanical, Morphological and Rheological Properties of Short nylon Fiber Reinforced Acrylonitrile-Butadiene Rubber Composites, *Fibers Polym.*, **15**, 2360-2369, 2014.
39. Mohseniyan S.H., Bakhshandeh G.R., Naderi G., and Soltani S., Mechanical and Morphological Properties of Short Nylon Fiber Reinforced Acrylonitrile-Butadiene Rubber Composites, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **23**, 255-264, 2010.
40. Andideh M., Naderi G., Ghoreishy M.H., and Soltani S., Nanocomposites Based on NR/SBR: Effects of Nanoclay and Short Nylon Fibers on the Cure Characteristics and Thermal Properties, *Polym. Plast. Technol. Eng.*, **52**, 1016-1024, 2013.

41. Khademeh molavi F., Soltani S., Naderi G., and Bagheri R., Effect of Multi-walled Carbon Nanotube on Mechanical and Rheological Properties of Silane Modified EPDM Rubber, *Polyolefins J.*, **3**, 69-77, 2016.
42. Khademeh Molavi F., Bagheri R, Naderi G., and Soltani S., Compatibilization of Multi-Wall Carbon Nanotube/EPDM: Studies on the Properties of Nanocomposite, *Sci. Technol.*, **26**, 115-123, 2013.
43. Taya M., Kim W.J., and Ono K. Piezoresistivity of a Short Fiber/Elastomer Matrix Composite, *Mechanic. Mater.*, **28**, 53-9, 1998.