

Morphology, Thermal, Mechanical and Electrical Properties of Poly(acrylonitrile-butadiene-styrene)/Carbon Nanotubes Nanocomposites: A Review

Zahra Soheilpour, Amir Masoud Rezadoust, and
Mohammad Razavi-Nouri*

Iran Polymer and Petrochemical Institute, P.O. Box: 14975-112, Tehran, Iran

Received: 26 April 2017, Accepted: 6 September 2017

Abstract

Rapid development in producing carbon nanotubes (CNTs) thermoplastics nanocomposites have been observed in the past two decades. This is because the addition of a small amount of CNTs could increase the thermal stability, flame retardancy, conductivity, Young's modulus, impact resistance and sound-proofing of the polymer-based nanocomposites. One of the challenging issues for obtaining the full performance of the nanocomposites is the dispersion of CNTs in a polymeric matrix. There are several methods to achieve a good dispersion of the nanofiller throughout the polymer matrices. It should be noted that the type of method used could play an important role in dispersion of CNTs. Poly(acrylonitrile-butadiene-styrene) (ABS)/CNTs nanocomposites are used in various industries, for instance in manufacturing of the electronic devices. In recent years, there has been an increasing interest in additive manufacturing technologies in which fused deposition modeling (FDM) has the fastest growth rate by using thermoplastics such as ABS as one of the most applicable materials for this processing method. In this paper, our aim is to present some information on ABS/CNTs nanocomposites prepared using different methods and with studies on their morphologies as well as thermal, mechanical and electrical properties by reviewing the recently related published literature.

Key Words

nanocomposite,
poly(acrylonitrile-butadiene-
styrene),
carbon nanotube,
electrical properties,
morphology

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail: m.razavi@ippi.ac.ir

مروری بر شکل‌شناسی، خواص گرمایی، مکانیکی و الکتریکی نانوکامپوزیت‌های پلی(آکریلونیتریل-بوتادی-ان-استیرن) و نانولوله‌های کربنی

بسیار ش
فصلنامه علمی-ترویجی
سال هشتم، شماره ۱
صفحه ۴۴-۳۱، ۱۳۹۷
ISSN: 2252-0449

زهره سهیل پور، امیرمسعود رضادوست، محمد رضوی نوری*
تهران، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، صندوق پستی: ۱۴۹۷۵-۱۱۲

دریافت: ۱۳۹۶/۲/۶، پذیرش: ۱۳۹۶/۶/۱۵

در دو دهه اخیر، مطالعات گسترده‌ای در باره تهیه نانوکامپوزیت‌های پلیمری دارای نانولوله‌های کربنی (CNTs) انجام گرفته است. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که افزودن مقدار کمی CNTs، موجب افزایش رسانندگی، پایداری گرمایی، بازدارندگی شعله، مدول یانگ، مقاومت به ضربه و اتلاف صوت نانوکامپوزیت‌های پلیمری می‌شود. از چالش‌های مهم در تهیه این نانوکامپوزیت‌ها، چگونگی پراکندگی CNTs و بهبود آن در زمینه پلیمری است. از این رو، روش‌های متفاوتی با کارایی‌های مختلف برای دستیابی به پراکنش مناسب این نانوذرات در این دسته از مواد ارائه شده است. کارایی نانوکامپوزیت‌های برپایه پلی(آکریلونیتریل-بوتادی-ان-استیرن) (ABS) و CNTs، سبب استفاده از آن‌ها در صنایع مختلف مانند ساخت وسایل الکترونیکی شده است. همچنین در سال‌های اخیر، این مواد نقش مهمی در فرایندهای شکل‌دهی راهبردی مانند ساخت برهم‌افزا ایفا می‌کنند که اهمیت آن‌ها را دوچندان ساخته است. در این مقاله سعی شده است تا اطلاعات به نسبت جامعی درباره روش‌های مختلف پراکنش این نانوذرات در زمینه ABS و مطالعه شکل‌شناسی و خواص گرمایی، مکانیکی و الکتریکی نانوکامپوزیت‌های ABS/CNTs ارائه و مقالات و نوشته‌های چاپ شده اخیر مرور شوند.

چکیده



زهره سهیل پور



امیرمسعود رضادوست



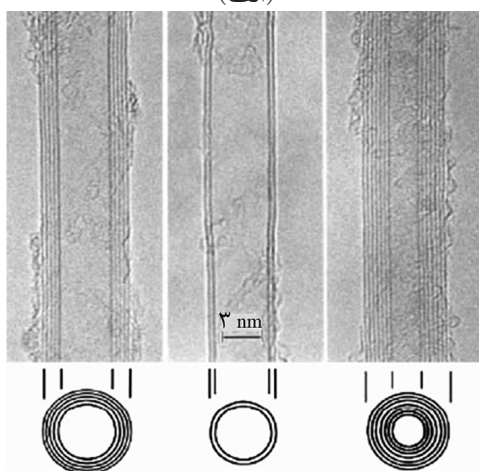
محمد رضوی نوری

واژگان کلیدی

نانوکامپوزیت،
پلی(آکریلونیتریل-بوتادی-ان-
استیرن)،
نانولوله کربنی،
خواص الکتریکی،
شکل‌شناسی



(الف)



(ب)

شکل ۱- تصویر TEM از انواع مختلف نانولوله‌های کربنی: (الف) تک‌دیواره و (ب) چنددیواره (۲، ۵ و ۷ دیواره) [۲].

نانولوله‌های کربنی به روش‌های مختلف تخلیه قوس الکتریکی (arc discharge)، فرسایش لیزری (laser ablation)، رسوب‌دهی شیمیایی در فاز بخار (chemical vapor deposition)، برق‌کافت و سنتز شعله‌ای تهیه می‌شوند که از میان این روش‌ها، سه روش اول رواج بیشتری دارند [۷-۴]. در ادامه به‌طور مختصر به شرح این سه روش پرداخته می‌شود.

تخلیه قوس الکتریکی

این روش را Iijima برای سنتز CNTs به‌کار برد. در این روش CNTs به‌کمک ایجاد تخلیه پلاسمای داغ بین دو الکترود گرافیتی متصل به منبع الکتریسیته (۲۰ V، ۱۰۰ A) در مجاورت گاز هلیوم تشکیل می‌شوند. زمانی که فشار هلیوم در محفظه تا مقدار معینی افزایش یابد، بازده تولید CNTs زیاد می‌شود، اما فراتر از این فشار،

مقدمه

از دیرباز پژوهشگران برای تولید مواد پلیمری با ویژگی‌های مدنظر از روش‌های کوپلیم‌شدن یا آلیاژسازی استفاده کرده‌اند. یکی از پلیمرهای مهندسی که با این روش‌ها تهیه می‌شود، پلی (آکریلونیتریل-بوتادی-ان-استیرن) (ABS) است. این پلیمر از ترکیب سه مونومر تهیه می‌شود، به‌گونه‌ای که سختی ماده را به‌طور عمده پلی‌استیرن (PS)، استحکام فشاری مدنظر را لاستیک بوتادی‌ان (PB) و مقاومت گرمایی آن را بخش پلی (استیرن-آکریلونیتریل) (SAN) تامین می‌کنند [۱]. این کوپلیم‌ر مهندسی به‌دلیل خواص عالی مانند مقاومت شیمیایی زیاد، خواص مکانیکی خوب، قابلیت بازیافت و سهولت فراورش از کاربرد وسیعی در صنایع مختلف برخوردار است. از معایب این پلیمر نیز می‌توان به کدری، حساسیت به شعله، تغییر رنگ و خواص در برابر تابش خورشید و جذب رطوبت تقریباً زیاد اشاره کرد. همچنین از این پلاستیک گرمانرم برای بهبود چقرمگی موادی چون پلی‌بوتیلن ترفتالات (PBT)، پلی‌کربنات (PC) و نایلون ۶ استفاده می‌شود.

از روش‌های بهبود خواص محصول نهایی، استفاده از مواد افزودنی، به‌ویژه نانوذرات، در زمینه پلیمری است. از نانوذراتی که در دو دهه اخیر بسیار مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است، می‌توان به نانولوله‌های کربنی (CNTs) اشاره کرد. نانولوله‌های کربنی، یکی از دگرشکل‌های (allotropes) کربن مانند الماس، فولرن و گرافیت است [۲]. بسته به مراحل ساخت این مواد، به‌طور کلی دو نوع نانولوله کربنی تک‌دیواره (SWCNT) و چنددیواره (MWCNT) وجود دارد. شکل ۱ این دو نوع نانولوله کربنی را نشان می‌دهد. نانولوله‌های تک‌دیواره از یک لایه گرافنی تشکیل شده که دور استوانه توخالی پیچیده شده است. ولی نانولوله‌های چنددیواره از پیچش دو یا چند لایه گرافنی تشکیل شده است که به‌شکل استوانه‌های هم‌مرکز هستند. این مواد با نیروهای واندروالسی با یکدیگر مرتبط‌اند. نانولوله‌های کربنی، به‌دلیل داشتن مدول و استحکام کششی زیاد از مستحکم‌ترین مواد شناخته شده به‌شمار می‌روند. پیوندهای شیمیایی با هیبرید sp^2 ، که در نانولوله‌های کربنی وجود دارند، از پیوندهای با هیبرید sp^3 موجود در الماس قوی‌تر بوده و سبب خواص مکانیکی عالی CNTs می‌شوند [۲].

خواص منحصر به فرد نانولوله‌های کربنی، این مواد را به‌عنوان ماده تقویت‌کننده برای زمینه‌های مختلف فلزی، سرامیکی و پلیمری مطرح کرده است. ولی مقدار و نحوه پراکنش CNTs در ماتریس‌ها، به‌ویژه زمینه‌های پلیمری، از جمله عوامل اثرگذار برای دستیابی به خواص محصول نهایی است [۳].

بازده تولید کاهش پیدا می‌کند. لازم به ذکر است، به‌جای هلیوم می‌توان از گازهای مختلف مانند نیتروژن و کربن تترافلوئورید نیز استفاده کرد. افزون بر این، کیفیت بهتر CNTs به کم‌کردن جریان بستگی دارد [۴،۶].

فرسایش لیزری

در سال ۱۹۹۵ نخستین بار Smalley و همکاران سنتز SWCNTs را بدین روش گزارش کردند. در این روش، منبع کربن (گرافیت) با مقادیر کمی از کاتالیزگر فلزی (Ni و Co) دوپه شده و سپس به‌کمک پالس پرتو لیزر در مجاورت گاز خنثی (معمولاً آرگون) در دماهای بسیار زیاد (تقریباً 1200°C) و فشار ثابت ۵۰۰ Torr تبخیر می‌شود. با بارور شدن ماده هدف با پرتو لیزری Nd:YAG، این ماده شروع به تبخیر می‌کند و در انتهای دیگر که دارای دمای نسبتاً کمتری است، متراکم می‌شود. به‌دلیل نیاز به مصرف توان زیاد و استفاده از لیزرهای گران‌قیمت این روش بسیار پرهزینه است [۴،۷].

رسوب‌دهی شیمیایی در فاز بخار

این روش برای تولید عمده و رشد کنترل شده CNTs به‌کار می‌رود. در این روش، سنتز CNTs به سبب تجزیه مخلوطی از گازهای هیدروکربنی (مانند متان، اتیلن و غیره) یا ترکیبات کربنی فرار موجود بر بستری فلزی اتفاق می‌افتد. در این حالت، نانوذرات فلزی به‌عنوان کاتالیزگر و مکان‌های هسته‌گذاری برای فرایند رشد CNTs در دمای ۵۰۰ تا 1000°C در فشار اتمسفری عمل می‌کنند. انتخاب کاتالیزگر و آماده‌سازی بستر، نوع و کیفیت CNTs تولیدی را تعیین می‌کند. معمولاً نانوذرات Co، Fe و Ni به‌عنوان کاتالیزگر و سیلیکون متخلخل به‌عنوان بستر ایده‌آلی برای رشد کنترل شده CNTs در نظر گرفته می‌شوند [۴،۵].

روش‌های پراکنش CNTs

پژوهشگران با استفاده از تصاویر تهیه شده با میکروسکوپ الکترونی دریافته‌اند، کلوخه‌ای شدن نانولوله‌ها در زمینه پلیمری باعث می‌شود تا خواص مکانیکی و الکتریکی نانوکامپوزیت‌ها در مقایسه با مقادیر به‌دست آمده از محاسبات نظری برای نانولوله‌ها، بسیار کمتر باشد. بنابراین، از مسائل چالش برانگیز در این باره چگونگی پراکنش نانولوله‌ها در زمینه پلیمری است. پراکندگی نانولوله‌های کربنی افزون بر شکل هندسی یعنی طول و اندازه نانولوله‌ها، به روش انتخاب شده برای پراکنش نانولوله‌های کربنی در ماتریس پلیمری و

جلوگیری از تشکیل کلوخه‌های مجدد بستگی دارد. در ادامه با توجه به اهمیت پراکندگی نانوذرات در زمینه پلیمری به روش‌های رایج پراکنش این مواد پرداخته می‌شود [۲].

فراصوت‌دهی

نقش امواج فراصوت، اعمال انرژی فراصوت به‌منظور تحریک ذرات معلق در حلال برای اهداف مختلف است. در این روش، به دلیل ضربه‌هایی که امواج به نانوذرات وارد می‌کنند، نانولوله‌های کربنی لایه‌لایه شده و ساختار کلوخه‌ای آن‌ها از هم باز می‌شود. این روش برای پراکنش CNTs در مایعاتی با گرانش کم مانند آب، استون و اتانول بسیار موثر است. بسیاری از پلیمرها در حالت جامد یا مایع گرانش هستند، بنابراین پیش از پراکنش نانولوله‌های کربنی، پلیمر باید در حلالی حل شده یا از حلالی برای رقیق‌سازی و کاهش گرانش آن استفاده شود. افزایش زمان فراصوت‌دهی و شدت آن باعث صدمه‌زدن و کاهش نسبت منظر نانولوله‌های کربنی می‌شود، به‌طوری که در حالت افراطی لایه‌های گرافنی نانولوله‌ها از بین می‌رود. با ازبین‌رفتن نظم لایه‌ها، این مواد به نانوالیاف بی‌شکل تبدیل می‌شوند [۲]. الصالح و همکاران [۸] گزارش کردند، متداول‌ترین روش‌ها برای بهبود پراکنش تقویت‌کننده و بازشدن کلوخه‌ها، فراصوت‌دهی، پیوندزنی پلیمرها و اصلاح سطح نانوذرات است.

غلطک‌کاری

این فرایند که اصطلاحاً به سه‌غلطکی معروف است، از سه غلطک استوانه‌ای مجاور هم تشکیل شده است. تنش برشی که به‌وسیله غلطک‌ها به ماده وارد می‌شود، باعث پراکنش و همگن‌سازی مخلوط می‌شود. از مزایای این روش دستیابی آسان به توزیع باریک اندازه ذرات و پخش آن‌ها در مواد گرانش از طریق تنظیم و حفظ فاصله بین غلطک‌ها به‌طور مکانیکی یا هیدرولیکی است. غلطک‌کاری به‌طور گسترده در صنایع مختلف از جمله چاپ، رنگ، مواد شیمیایی، پوشش شیشه، چسب، مواد دارویی و غذایی به‌کار می‌رود. افزون بر این پژوهشگران گزارش کرده‌اند، این فرایند روش به‌نسبت مناسبی برای دستیابی به پراکنش مطلوب نانولوله‌های کربنی است. زیرا تنش برشی نسبتاً زیاد سبب بازشدن کلوخه‌ها و پراکندگی نانوذرات می‌شود. همچنین با توجه به زمان اقامت کوتاه، احتمال آسیب‌دیدگی نانوذرات محدود است. از دیگر عوامل موثر بر کیفیت پراکندگی، فاصله بین غلطک‌ها و سرعت چرخش آن‌هاست.

آسیاب گلوله‌ای

این سامانه دارای محفظه استوانه‌ای شکل است که درون آن با تعداد زیادی گلوله صلب و کوچک از جنس سرامیک یا فولاد زنگ‌نزن پر شده است. با چرخش محفظه و فشار موضعی ایجاد شده از برخورد گلوله‌ها، ذرات ریزتر شده و نانوذرات به‌خوبی در زمینه پلیمری پراکنده می‌شوند. کیفیت پراکنش به عوامل مختلف از جمله اندازه گلوله‌ها، سرعت چرخش و زمان اقامت مواد در آسیاب و نسبت تعداد گلوله‌ها به نانولوله‌های کربنی بستگی دارد. از مزایای دیگر این روش، امکان دستیابی هم‌زمان به پراکنش خوب و اصلاح سطح نانولوله‌های کربنی در مجاورت یک ماده شیمیایی است.

استفاده از همزن و اکسترودر

از فنون رایج برای توزیع ذرات در سامانه‌های مایع استفاده از همزن است. از این روش می‌توان برای پراکنش نانولوله‌های کربنی در زمینه پلیمری نیز استفاده کرد. شکل و اندازه پروانه و سرعت چرخش همزن از عوامل کنترل‌کننده پراکنش ذرات به‌شمار می‌روند. دیده شده است، پراکندگی نانولوله‌های چنددیواره راحت‌تر از نانولوله‌های تک‌دیواره انجام می‌شود. با وجود این، نانولوله‌های چند دیواره تمایل دارند تا دوباره کلوخه شوند.

اکستروژن روش متداولی برای پراکنش نانولوله‌های کربنی در زمینه‌های پلیمری جامد، به‌ویژه پلیمرهای گرمانرم، به حساب می‌آید. سرعت چرخش زیاد پیچ‌ها در اکسترودر دویچی باعث ایجاد تنش برشی زیاد در مخلوط پلیمر و نانولوله‌های کربنی می‌شود. در نتیجه، پراکنش و بازشدن کلوخه‌های CNTs در مذاب پلیمری رخ می‌دهد. این روش معمولاً برای تولید نانوکامپوزیت‌های پلیمری با درصد نانولوله‌های کربنی زیاد به‌کار می‌رود.

به‌طور کلی، برای تهیه نانوکامپوزیت‌های حاصل از اختلاط نانولوله‌های کربنی و زمینه پلیمری، عواملی چون حالت فیزیکی (جامد یا مایع) و شیمیایی (گرماسخت یا گرمانرم) زمینه پلیمری، ابعاد و مقدار نانولوله‌های کربنی و نیز روش‌های ساخت در دسترس، بر پراکنش نانولوله‌های کربنی اثرگذارند [۲].

روش‌های تهیه نانوکامپوزیت

از روش‌های تهیه نانوکامپوزیت‌ها، روش پلیمرشدن درجاست. این روش به مقدار شایان توجهی باعث بهبود پراکنش و برهم‌کنش نانوذرات با زمینه پلیمری می‌شود. در این روش، پس از اختلاط نانولوله‌های کربنی با مونومرها و استفاده از آغازگر در صورت

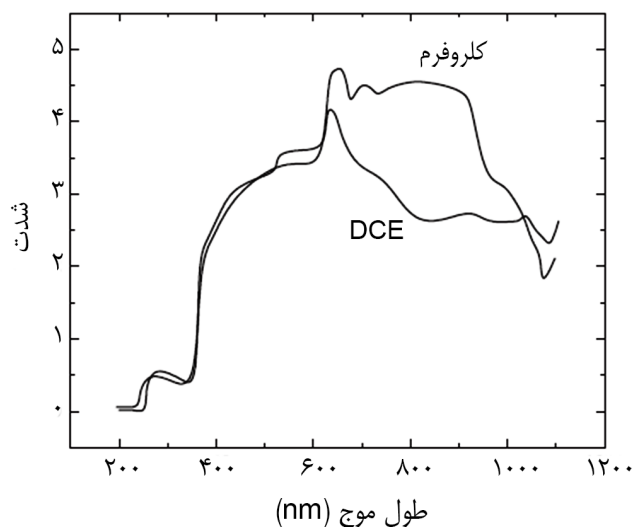
لزوج، واکنش پلیمرشدن در دما، فشار و زمان مدنظر انجام و نانوکامپوزیت تهیه می‌شود [۹-۱۱]. بیان این نکته ضروری است که با این روش می‌توان نانوکامپوزیت‌هایی با کسر وزنی CNTs زیاد تهیه کرد [۲].

فراورش محلولی از دیگر روش‌های رایج برای تهیه نانوکامپوزیت‌هاست. در این روش، ابتدا نانوذرات در حلال مناسبی که پارامتر انحلال‌پذیری آن به پارامتر انحلال‌پذیری پلیمر نزدیک است، پراکنده شده و سپس اختلاط آن با پلیمر مدنظر با استفاده از همزن مکانیکی، مغناطیسی یا فراصوت‌دهی در دمای محیط یا بیش از آن انجام می‌شود. در نهایت، پس از خارج کردن حلال با تقطیر یا تبخیر، نانوکامپوزیت به‌دست می‌آید [۲]. از معایب این روش می‌توان به سرعت تولید و دقت ابعادی کم و وجود رطوبت و حباب هوا در نانوکامپوزیت اشاره کرد. در ضمن، به‌دلیل گرانی قیمت بودن حلال باید سامانه‌ای برای بازیابی آن به‌کار گرفته شود. در سامانه‌هایی که حلال در فضای باز تبخیر می‌شود و توسط افراد قابل استنشاق است، برای سلامتی کارکنان خطراتی وجود دارد [۱۲].

روش اختلاط مذاب برای تهیه نانوکامپوزیت‌های تهیه شده از پلیمرهای گرمانرم، در صنعت بسیار رایج است. پراکنش نانوذرات در زمینه پلیمری با اکسترودر یا مخلوط‌کن داخلی انجام می‌شود. این روش به پارامترهایی نظیر سرعت چرخش پیچ، دما و زمان اختلاط بستگی دارد. دیده شده است، با افزایش سرعت برش، تمایل نانوذرات به یکدیگر کمتر شده و از کلوخه‌ای شدن جلوگیری می‌شود [۱۲]. از معایب این روش می‌توان به احتمال آسیب‌دیدگی یا شکست نانولوله‌های کربنی به هنگام اختلاط در سرعت برش زیاد، اشاره کرد [۱۱]. اختلاط مذاب را می‌توان به دو صورت تک‌مرحله‌ای و دو مرحله‌ای انجام داد. در روش تک‌مرحله‌ای، مواد با نسبت‌های ازپیش معین وارد مخلوط‌کن شده و پس از اختلاط در شرایط مدنظر، نانوکامپوزیت تهیه می‌شود. ولی در حالت دو مرحله‌ای، ابتدا پیمانه اصلی (masterbatch) از پلیمر و نانوذرات تهیه شده و سپس این پیمانه با پلیمر بدون نانوذرات به ترکیب درصد مدنظر رقیق می‌شود. پژوهشگران گزارش کرده‌اند، پخش نانوذرات در روش دو مرحله‌ای بهتر است [۱۳].

اهمیت پراکنش نانوذرات در زمینه پلیمری

وجود برهم‌کنش‌های سطحی بین نانوذرات و زمینه‌های پلیمری باعث سازگاری و پراکنش بهتر نانوپرکننده‌ها (در غلظت‌های کم) درون زمینه پلیمری می‌شود. ولی در صورتی که غلظت این مواد از



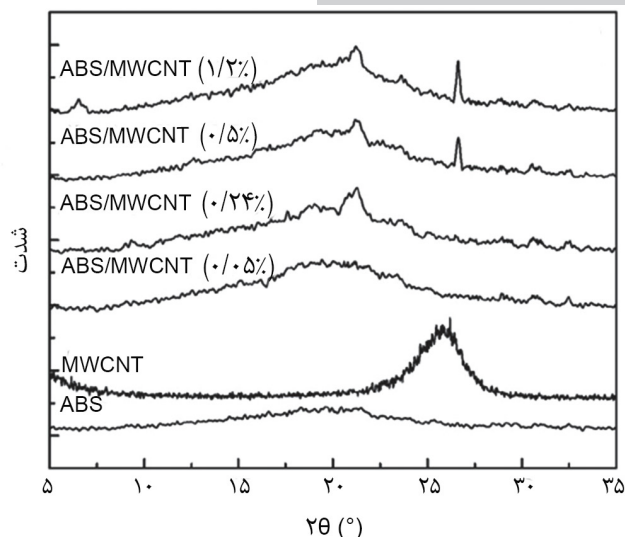
شکل ۳- طیف‌سنجی فرابنفش مرئی برای آمیخته‌های CNTs/کلروفرم و DCE/CNTs [۸].

این پیک جدید به مفهوم تشکیل تجمعاتی از نانولوله‌ها در زمینه پلیمری است که شدت آن با افزایش غلظت نانوپرکننده‌ها بیشتر می‌شود. این پژوهشگران با استفاده از نتایج XRD گزارش دادند، غلظت بحرانی نانولوله‌های کربنی چنددیواره بیشتر از ذرات گرافن است.

الصالح و همکاران [۸]، نانوکامپوزیت ABS/MWCNTs را به روش محلولی تهیه کردند. این پژوهشگران برای بررسی کیفیت پراکنش و انتخاب حلال مناسب، UV-vis را انتخاب کردند. این روش، شاخص کیفی برای تعیین درجه نسبی پراکنش نانوذرات در حلال‌های مختلف است. در طیف UV-vis، کلوخه‌های CNTs غیرفعال و نانولوله‌های منفرد فعال به حساب می‌آیند و افزایش شدت جذب با افزایش پراکنش نانولوله‌های کربنی اتفاق می‌افتد. شکل ۳ طیف UV-vis را برای مخلوط نانولوله‌های کربنی با حلال‌های کلروفرم و ۲،۱-دی‌کلرواتیلن (DCE) نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود، شدت پیک در تعلیق کلروفرم-CNTs بیش از CNTs-DCE است. بنابراین، کلروفرم حلال مناسب‌تری برای پراکنش نانولوله‌های کربنی چنددیواره به حساب می‌آید. گزارش شده است که این حلال برای نانولوله‌های کربنی تک‌دیواره نیز مناسب است.

شکل‌شناسی

به‌طور کلی، پژوهشگران برای بررسی سازگاری و توزیع یکنواخت تقویت‌کننده CNTs در زمینه ABS از روش‌های گوناگونی مانند میکروسکوپ‌های الکترونی عبوری (TEM) [۱۵]، الکترونی پویشی (SEM) [۱۶] و نوری [۱۷] استفاده کرده‌اند.



شکل ۲- پراش پرتو ایکس در غلظت‌های مختلف برای نانوکامپوزیت‌های ABS/MWCNTs [۱۴].

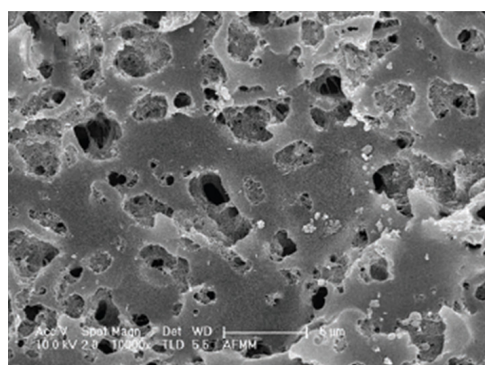
غلظت بحرانی بیشتر شود، پراکنش ذرات با مشکل مواجه شده و نیروهای واندروالسی موجود بین این ذرات باعث کلوخه‌ای شدن آن‌ها می‌شوند. پژوهشگران از روش‌هایی چون طیف‌سنجی رامان (Raman) [۱۲]، پراش پرتو ایکس (XRD) [۱۴] و طیف‌سنجی فرابنفش مرئی (UV-visible) [۸] برای ارزیابی مقدار پراکنش CNTs در زمینه ABS استفاده کرده‌اند. این افراد با انتقال پیک در طیف‌سنجی رامان و اندازه‌گیری شدت آن نسبت به حالت زمینه بدون پرکننده، در طیف‌سنجی‌های XRD و UV-vis به غلظت بحرانی نانوذرات پی بردند.

وحید و همکاران [۱۴] برای تعیین غلظت بحرانی و مقدار پراکندگی از XRD استفاده کردند. ملاک ارزیابی این گروه ایجاد پیک شاخصی در غلظت بحرانی و فراتر از آن عنوان شده است. به عبارت دیگر، ظاهر شدن پیک جدید به منزله کلوخه‌ای شدن نانوذرات در غلظت بحرانی است. شکل ۲ طیف XRD از ABS خالص و نانوکامپوزیت ABS/MWCNTs را در غلظت‌های مختلف MWCNTs نشان می‌دهد. برای ABS خالص تنها یک پیک پهن دیده می‌شود که بیشینه آن در $2\theta = 20^\circ$ قرار دارد. این به منزله آن است که ABS ماده‌ای بی‌شکل است. برای MWCNTs پیکی در $2\theta = 25/8^\circ$ ظاهر می‌شود که از آن می‌توان فاصله بین‌لایه‌ای این نانوذرات را برابر با $3/45 \text{ \AA}$ به دست آورد. دیده می‌شود، برای این نانوکامپوزیت‌ها تا غلظت ۰/۲۴٪ حجمی از نانوذرات، پیک جدیدی ظاهر نمی‌شود. این مسئله نشانگر آن است که نانولوله‌ها به‌خوبی در زمینه پلیمری پراکنده شده‌اند. ولی در غلظت‌های بیشتر، پیک جدیدی در محل ظاهر شدن پیک نانولوله، نمایان می‌شود.

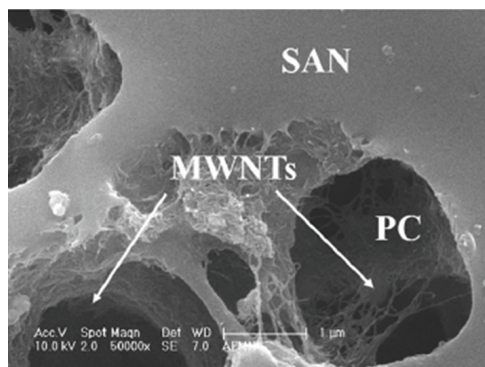
کشش سطحی کمتر قرار گیرند [۸].

مطالعه الصالح و همکاران [۱۶] در باره نانوکامپوزیت ABS/MWCNTs که به‌روش اختلاط مذاب تهیه شد، نشان داد که قطر ذرات CNTs پس از پراکنش درون زمینه SAN از قطر ذرات CNTs اولیه بسیار بیشتر است. آن‌ها این افزایش قطر را به دربرگرفتنی این ذرات با لایه‌هایی از SAN نسبت دادند. شکل‌های ۴-الف و ب به‌ترتیب تصاویر SEM از ABS و نانوکامپوزیت ABS/MWCNTs دارای ۵٪ وزنی CNTs را در دو بزرگ‌نمایی مختلف نشان می‌دهد.

پژوهش‌های دیگری که برای بررسی تمایل CNTs به سایر فازهای پلیمری انجام شده حاکی از آن است، وقتی ABS با نایلون ۶ [۱۵] و پلی‌کربنات [۱۸، ۱۹] مخلوط می‌شود، این نانوذرات دیگر تمایل چندانی به فاز ABS نداشته و در دو فاز دیگر پخش می‌شوند. این تمایل به مقدار قطبش، چگالی، انرژی بین‌سطحی و ضریب ترشوندگی پلیمر بستگی دارد. شکل‌های ۵-الف و ب تصاویر SEM از سطح شکست نانوکامپوزیت ABS/PC/MWCNTs را با دو بزرگ‌نمایی مختلف نشان می‌دهد [۱۸]. از شکل ۵-ب، به‌وضوح می‌توان نتیجه گرفت، ذرات تقویت‌کننده به فاز PC بیشتر از ABS تمایل دارند.



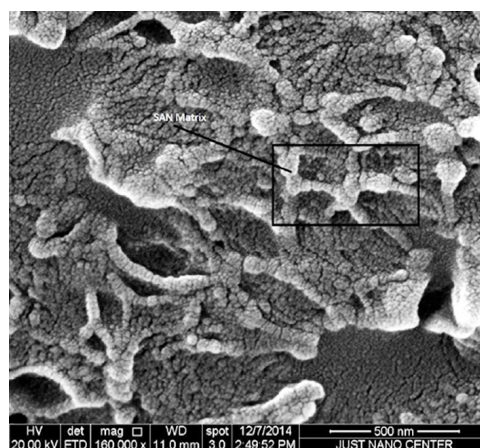
(الف)



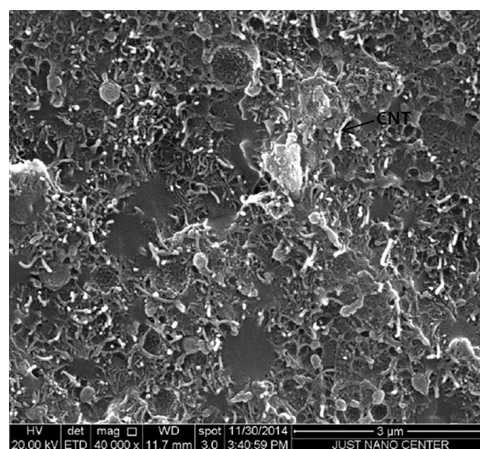
(ب)

شکل ۵- تصاویر SEM از اختلاط PC/SAN (۶۰:۴۰) شامل ۳٪ وزنی MWCNTs با دو بزرگ‌نمایی مختلف [۱۸].

الصالح و همکاران [۸]، طی پژوهشی نانوکامپوزیت ABS/MW-CNTs حاوی ۰/۱۵٪ حجمی تقویت‌کننده را با فرایند محلولی تهیه و با بررسی تصاویر TEM نتایج خود را ارائه کردند. این پژوهشگران بیان کردند، ذرات PB در فاز پیوسته SAN پراکنده هستند. آن‌ها با توجه به دوفازی بودن ABS پیش‌بینی کردند که تمایل CNTs به دو فاز PB و SAN می‌تواند متفاوت باشد. تصاویر TEM نشان داد، CNTs در فاز SAN به‌خوبی پراکنده شده‌اند [۸، ۱۰]. این گروه عدم تمایل توزیع CNTs در فاز PB را به شبکه‌ای بودن و نیز قطر کوچک ذرات آن (کمتر از ۲۰۰ nm) نسبت دادند. همچنین، پراکندگی خوب CNTs در زمینه ABS را با گرانیوی کم زمینه پلیمری، انتخاب حلال مناسب و سازگاری خوب CNTs و زمینه پلیمری مرتبط دانستند. در هنگام آلیاژسازی به‌روش مذاب این نکته پذیرفته شده است که تمایل CNTs برای جای‌گیری در هر فاز را می‌توان به‌کمک انرژی‌های بین‌سطحی و ضریب ترشوندگی اجزا پیش‌بینی کرد. از نظر ترمودینامیکی، CNTs تمایل دارند تا در فاز با

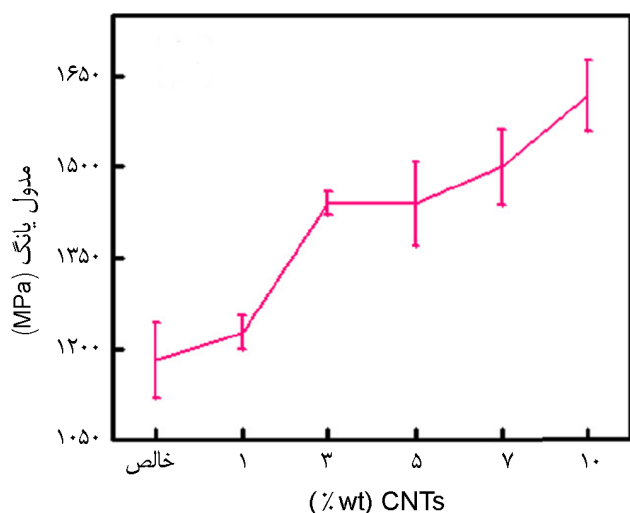


(الف)

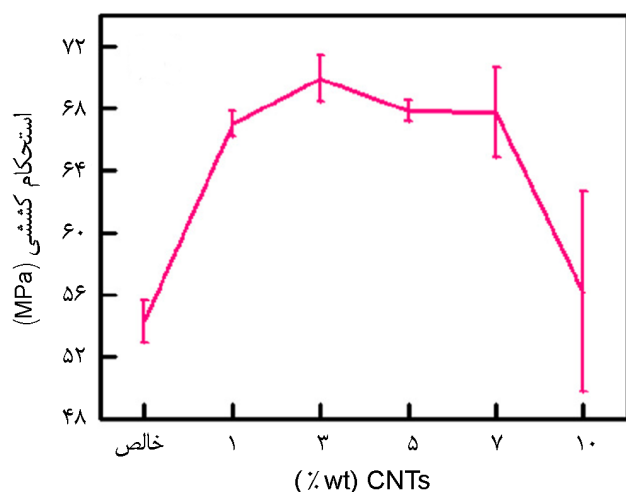


(ب)

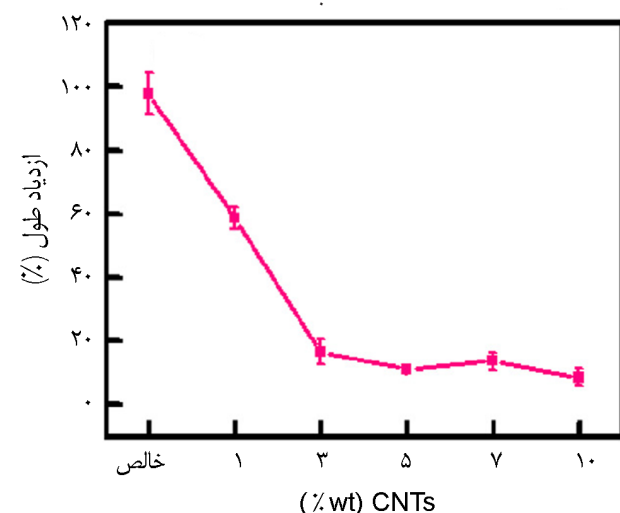
شکل ۴- تصاویر SEM: (الف) ABS خالص و (ب) نانوکامپوزیت ABS/MWCNTs [۱۶].



(الف)

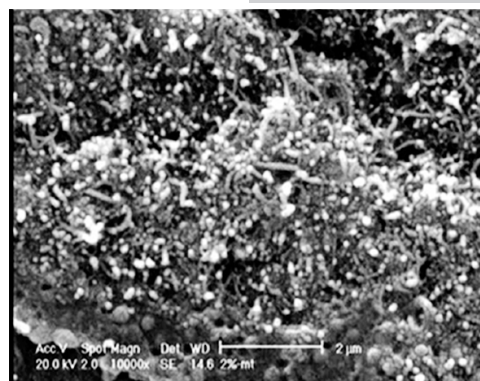


(ب)

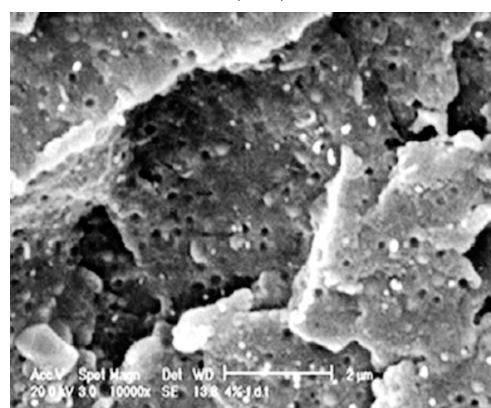


(پ)

شکل ۷- نمودار تغییرات: (الف) مدول یانگ، (ب) استحکام کششی و (پ) درصد ازدیاد طول با غلظت نانولوله‌های کربنی برای نانوکامپوزیت ABS/MWCNTs [۱۲].



(الف)



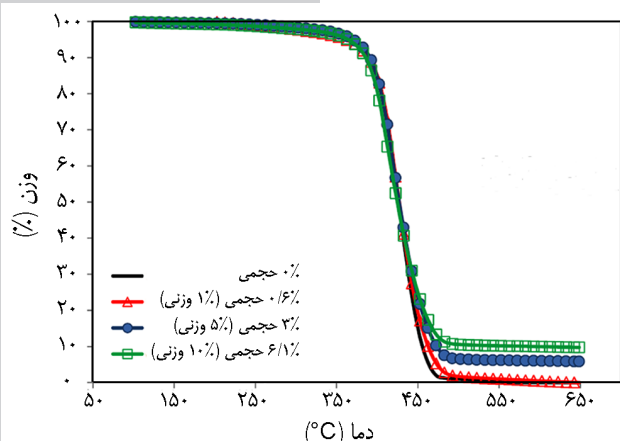
(ب)

شکل ۶- تصاویر SEM از نانوکامپوزیت ABS/MWCNTs دارای ۴٪ وزنی MWCNTs تهیه شده به روش: (الف) اختلاط مذاب و (ب) فرایند محلولی [۳].

موسوی و همکاران [۳] به منظور بررسی کیفیت پراکنش تقویت‌کننده در زمینه پلیمری، نانوکامپوزیت ABS/MWCNTs را به دو روش فرایند محلولی و اختلاط مذاب تهیه کردند. شکل‌های ۶-الف و ب به ترتیب تصاویر SEM از این نانوکامپوزیت‌ها را نشان می‌دهد. آن‌ها از این تصاویر استنباط کردند، کیفیت پراکنش این نانوذرات در نانوکامپوزیتی که به کمک فرایند محلولی تهیه شده، به مراتب از اختلاط مذاب بهتر است.

خواص مکانیکی

در سال‌های اخیر، مطالعات گسترده‌ای در باره خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های پلیمری دارای CNTs انجام شده است. افزودن این مواد به زمینه پلیمری سبب بهبود خواص مکانیکی مانند مدول یانگ، استحکام کششی و چقرمگی نانوکامپوزیت می‌شود. شکل‌های ۷-الف تا پ به ترتیب نمودار تغییرات مدول یانگ، استحکام کششی و درصد ازدیاد طول را با غلظت MWCNTs برای نانوکامپوزیت‌های ABS/MWCNTs نشان می‌دهد [۱۲].



شکل ۸- دمانگاشت TGA مربوط به نانوکامپوزیت ABS/MWCNTs بر حسب تابعی از مقدار CNTs [۱۶].

کربنی رخ نمی‌دهد. این در حالی است که سایر پژوهشگران تغییر رفتار تخریب این ماده را در اثر افزودن CNTs گزارش داده‌اند. به عنوان مثال، Yang و همکاران [۲۲]، برای نانوکامپوزیت ABS/SWCNTs در مقایسه با ABS خالص تخریب گرمایی را در شرایط مختلف یعنی محیط هوا و نیتروژن دومرحله‌ای مشاهده کرده‌اند. ولی Singh و همکاران [۲۳] گزارش دادند، تخریب گرمایی در محیط هوا، برای نانوکامپوزیت ABS/MWCNTs تک‌مرحله‌ای است. پس از مطالعات و بررسی‌های دقیق‌تر گزارش شد، این تفاوت در رفتار تخریب را می‌توان به ساختار خود ABS نسبت داد. ماده‌ای که Yang و همکاران [۲۲] از آن استفاده کرده بودند، شامل حداقل ۵۰٪ لاستیک PB بود. ولی ABS به کار رفته توسط Singh و همکاران [۲۳] دارای فقط ۱۳٪ لاستیک PB بود. از این رو می‌توان چنین برداشت کرد، زمانی که بخش عمده پلیمر ABS را فاز لاستیکی دربرگیرد، تخریب گرمایی در دومرحله و وقتی که مقدار این فاز کم است، تخریب در یک‌مرحله اتفاق می‌افتد [۱۶]. شایان توجه است، فاز غنی از PB آسیب‌پذیرترین فاز در برابر تخریب گرمایی اعلام شده است [۲۲].

تحلیل دینامیکی مکانیکی گرمایی (DMTA)

خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های پلیمری وابستگی شدیدی به مقدار پراکنش، چسبندگی و خواص ذاتی زمینه و تقویت‌کننده دارد. موسوی و همکاران [۳] طی مطالعه‌ای که در باره اثر روش تهیه نانوکامپوزیت ABS/MWCNTs بر خواص آن داشته‌اند، خواص مکانیکی این نانوکامپوزیت‌ها را با DMTA بررسی کردند. شکل‌های ۹-الف و ب به ترتیب تغییرات مقدار اتلاف با دما را برای نانوکامپوزیت‌های تهیه شده به دو روش فراورشی محلولی و

همان‌گونه که در شکل ۷-الف مشاهده می‌شود، با افزایش درصد CNTs مدول یانگ افزایش پیدا می‌کند. پژوهشگران این مسئله را به پراکنش خوب تقویت‌کننده در زمینه پلیمری و کاهش تحرک زنجیرها در اثر وجود نانوذرات نسبت دادند. شکل ۷-ب نشان می‌دهد، با افزودن ۳٪ وزنی از نانولوله‌های کربنی، استحکام کششی نانوکامپوزیت نسبت به ABS بدون پرکننده، ۲۹٪ افزایش می‌یابد. با افزایش بیشتر MWCNTs، استحکام کششی کاهش می‌یابد، ولی همچنان بیشتر از ABS باقی می‌ماند. شکل ۷-پ نیز نشان می‌دهد، با افزایش درصد تقویت‌کننده و بهبود مقدار پراکنش CNTs در زمینه پلیمری، نانوکامپوزیت حاصل در برابر تنش و ازدیاد طول مقاومت نشان می‌دهد، بنابراین درصد ازدیاد طول با اضافه شدن مقدار نانوپرکننده کاهش پیدا می‌کند.

Du و همکاران [۱۱] مجموعه‌ای از داده‌های مربوط به خواص مکانیکی به دست آمده برای بعضی از پلیمرهای تقویت‌شده با نانوذرات را جمع‌آوری کردند. آن‌ها خاطر نشان کردند، اگر نانولوله‌های کربنی اصلاح نشده باشند و آرایش‌یافتگی آن‌ها نیز تصادفی باشد، مقدار استحکام کششی برای اغلب نانوکامپوزیت‌های پلیمری مطالعه شده افزایش نمی‌یابد یا این افزایش، چشمگیر نخواهد بود. زیرا این دو عامل باعث پراکندگی نامناسب و چسبندگی ضعیف بین این نانوذرات با زمینه پلیمری می‌شوند. گروه پژوهشی Lee [۱۷] طی مطالعه خود در زمینه کارایی نانوکامپوزیت ABS/CNTs دریافتند، با افزایش درصد CNTs، سختی و اتلاف صوت نانوکامپوزیت افزایش می‌یابد.

خواص گرمایی

از معایب اصلی ABS اشتعال‌پذیری ذاتی این ماده است. بنابراین، سعی شده است تا پایداری گرمایی و مقاومت در برابر شعله آن با اضافه کردن مواد افزودنی بهبود یابد. مطالعات گسترده‌ای در باره یافتن راهکاری برای افزایش مقاومت در برابر اشتعال این ماده انجام شده است. از جمله این بررسی‌ها می‌توان به تهیه نانوکامپوزیت‌های ABS/Nanoclay [۲۰]، ABS/zinc stannate [۲۱] و ABS/SWCNTs [۲۲] اشاره کرد. پژوهشگران تخریب گرمایی ABS را به دو صورت تک‌مرحله‌ای و دومرحله‌ای مشاهده کرده‌اند. از عوامل اثرگذار بر رفتار تخریب گرمایی ABS، می‌توان به نوع گاز ورودی و سرعت حجمی آن، سرعت گرمادهی و حجم یا وزن نمونه اشاره کرد [۲۲]. شکل ۸ رفتار تخریب گرمایی نانوکامپوزیت ABS/MWCNTs را با غلظت MWCNTs نشان می‌دهد [۱۶]. مشاهده می‌شود، تغییر رفتار درخور توجهی در اثر افزودن نانولوله‌های

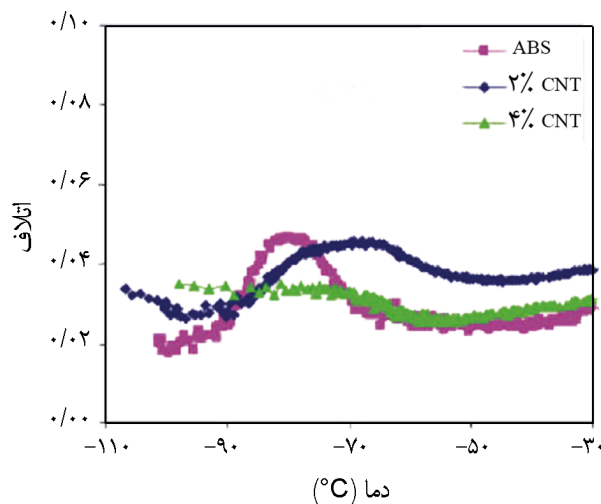
افزایش می‌یابد [۳]. این مسئله از محدودیت تحرک زنجیرهای SAN موجود در ABS به دلیل برهم‌کنش با CNTs ناشی می‌شود. Singh و همکاران نیز با هدف بررسی مقدار مدول ذخیره و اتلاف نانوکامپوزیت‌های ABS/MWCNTs به نتایج مشابهی دست یافتند و مشاهده کردند که CNTs به فاز SAN تمایل دارد [۲۳].

خواص الکتریکی

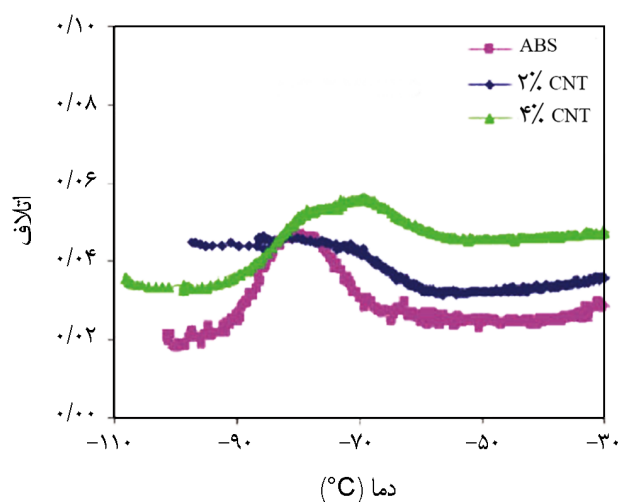
نانولوله‌های کربنی از جمله موادی هستند که بیشترین استفاده را در ساخت نانوکامپوزیت‌های رسانا دارند [۲۴]. کربن‌ها در CNTs با هیبرید قوی SP^2 به یکدیگر متصل بوده و الکترون‌های اوربیتال‌های π که آزادی عمل بیشتری دارند، باعث رسانندگی الکتریکی این ماده می‌شوند [۲۵].

از مزایای آن‌ها در مقایسه با فلزات می‌توان به وزن نسبتاً کم، انعطاف‌پذیری در طراحی و مقاومت در برابر خوردگی اشاره کرد. همچنین، نسبت منظر (نسبت طول به قطر نانوذرات) زیاد این ذرات و رسانندگی الکتریکی بسیار زیاد آن‌ها به تهیه نانوکامپوزیت‌هایی با مقاومت الکتریکی کم منجر می‌شود. در بررسی مقدار رسانندگی نانوکامپوزیت‌ها مفهوم آستانه شبکه‌ای شدن (percolation) مطرح است که این اصطلاح به کاهش ناگهانی و شایان توجه مقاومت الکتریکی نانوکامپوزیت در غلظت بحرانی از تقویت‌کننده، مربوط می‌شود. در غلظت‌های بیش از مقدار بحرانی، مسیرهای متعددی برای عبور الکترون در زمینه پلیمری به وجود می‌آید. از سوی دیگر، ظهور پدیده آستانه شبکه‌ای شدن در غلظت‌های کم از عوامل مهم در حفظ خواص پلیمرها و کاهش هزینه نهایی نانوکامپوزیت‌های پلیمری است [۲۶]. پژوهش‌های متعددی در باره خواص الکتریکی و الکترومغناطیسی نانوکامپوزیت‌های پلیمری حاوی نانولوله‌های کربنی انجام شده است [۲۸-۹، ۱۱، ۱۲، ۲۴]. پرسش اصلی در مطالعات مزبور این است، آیا خواص الکتریکی نانوکامپوزیت‌ها به توزیع نانوذرات بستگی دارد یا خیر. پژوهشگران گزارش دادند، بهترین درجه پراکنش لزوماً حداکثر رسانندگی را نتیجه نمی‌دهد. زیرا در اثر پراکنش خوب ذرات CNTs، فیلم پلیمری به دور هر ذره از CNTs تشکیل می‌شود که مانع از تماس ذرات با یکدیگر و در نتیجه کاهش رسانندگی می‌شود.

Du و همکاران [۲۷] اثر آرایش‌یافتگی ذرات CNTs را به عنوان یکی دیگر از عوامل موثر بر خواص الکتریکی نانوکامپوزیت‌های رسانا بررسی کردند. از دستاوردهای این پژوهش استنباط می‌شود، بیشترین رسانندگی بین دو حالت حدی آرایش تصادفی و آرایش‌یافتگی زیاد CNTs به دست می‌آید. در این حالت،



(الف)



(ب)

شکل ۹- تغییرات اتلاف با دما برای نانوکامپوزیت‌های ABS/MWCNTs تهیه شده با روش: (الف) محلولی و (ب) اختلاط مذاب [۳].

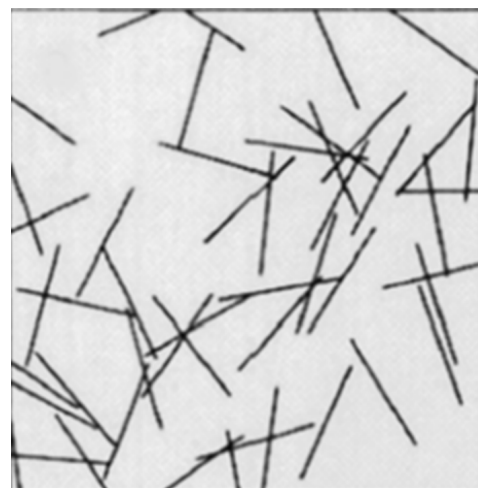
اختلاط مذاب نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود، در اثر افزایش غلظت MWCNTs مقدار اتلاف ناشی از فاز لاستیکی، برای نانوکامپوزیت تهیه شده از هر دو روش کاهش یافته است. این رفتار حاکی از آن است که بخشی از تنش به کار رفته بر نانولوله‌های کربنی متمرکز شده است. در نتیجه، سهم فاز لاستیکی در پاسخ مکانیکی نمونه حاوی نانولوله‌های کربنی در مقایسه با ABS خالص کمتر می‌شود. در ضمن، اتلاف فاز لاستیکی برای نمونه‌ای که با فرایند محلولی تهیه شده و از پراکندگی بسیار خوبی برخوردار است، از نمونه تهیه شده به روش اختلاط مذاب کمتر است. دمای انتقال شیشه‌ای نیز برای نمونه‌های تهیه شده در اثر افزودن CNTs حدود 20°C

CNTs در حالت بیشینه خود قرار می‌گیرد. شکل‌های ۱۰-الف تا پ طرح‌واره‌هایی از آستانه شبکه‌ای شدن در نانوکامپوزیت‌های PMMA/SWCNTs را نشان می‌دهند.

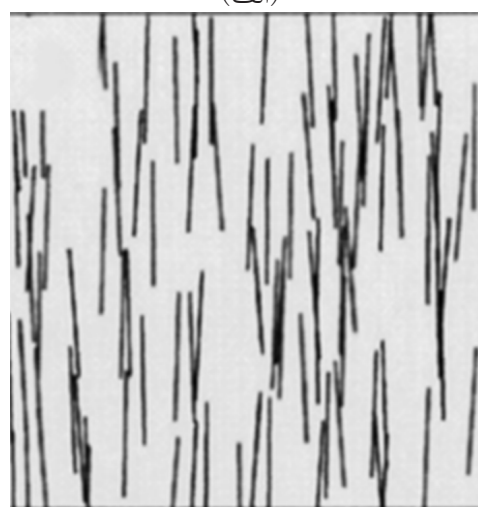
شکل ۱۰-الف شامل ۵۰ نانوذره است که شبه‌میله‌ای بوده و نسبت به هم زاویه 90° می‌سازند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تماس این نانوذرات در شکل فراگیر نبوده و ارتباط آنان در چند ناحیه قطع شده است. شکل ۱۰-ب ۱۰۰ نانوذره را نشان می‌دهد که نسبت به هم تحت زاویه 5° قرار گرفته‌اند. در این حالت نیز آرایش‌یافتگی نانوذرات به ایجاد آستانه شبکه‌ای شدن و مسیر عبور الکترون منجر نمی‌شود. ولی شکل ۱۰-پ ۱۰۰ ذره را نشان می‌دهد که با هم زاویه 90° می‌سازند. مسیر خاکستری ایجاد شده در این شکل، بیانگر ایجاد مسیر عبور الکترون است. در این شکل، تمام نانوذرات با هم در تماس بوده و این پیوستگی و ایجاد مسیر برای عبور الکترون دیده می‌شود. شایان توجه است که این تعداد نانوذرات برای طول $L=0/255$ (نسبت به مربع واحد) گزارش شده است [۲۷].

Jyoti و همکاران [۱۲] برای نانوکامپوزیت ABS/MWCNTs گزارش کردند، تا غلظت ۳٪ وزنی از نانوذرات، نانوکامپوزیت شبه‌عایق بوده و در مقادیر بیش از آن، رسانندگی الکتریکی به‌طور ناگهانی افزایش می‌یابد (شکل ۱۱). بسیاری از پژوهشگران ضمن مطالعه در این زمینه به نتایج مشابهی دست یافتند. آن‌ها گزارش دادند، با افزودن درصد کمی از CNTs مقدار رسانندگی و مسیرهای عبور الکترون افزایش پیدا می‌کند [۱۱، ۲۸].

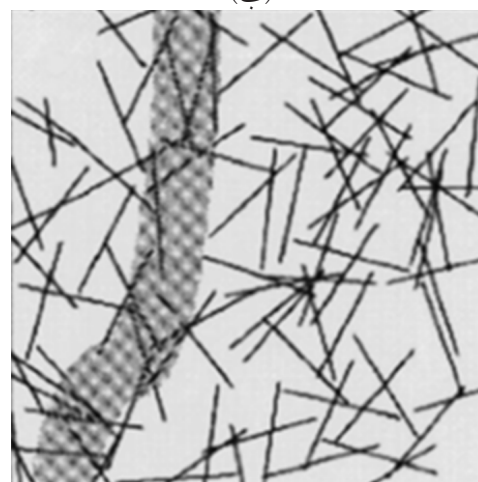
پدیده آستانه شبکه‌ای شدن به پارامترهای دیگری نظیر پراکنش، توزیع و نسبت منظر CNTs نیز بستگی دارد [۲۸]. به‌طوری که هر



(الف)



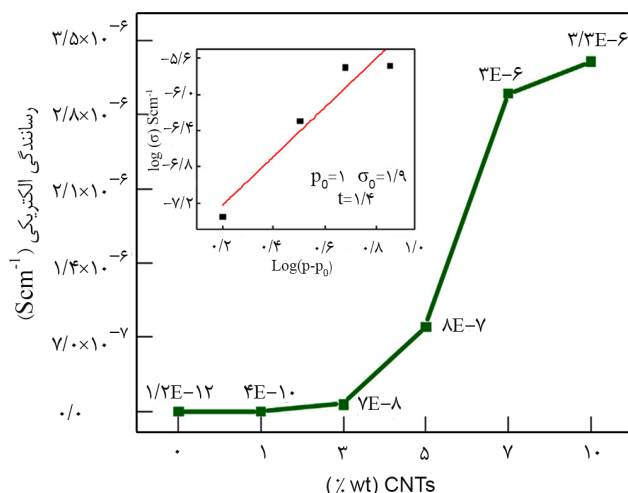
(ب)



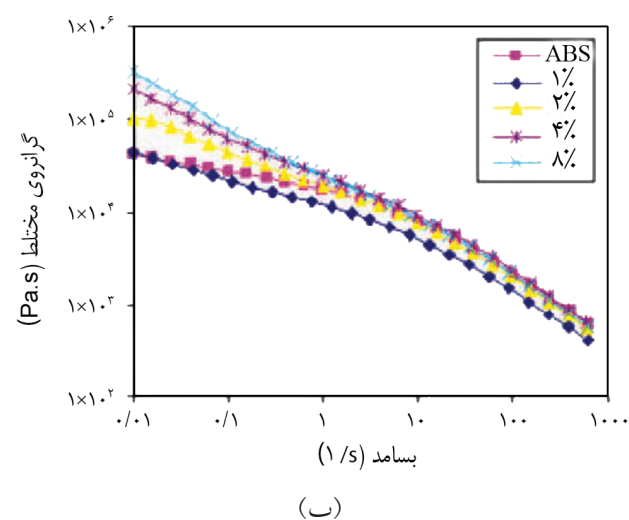
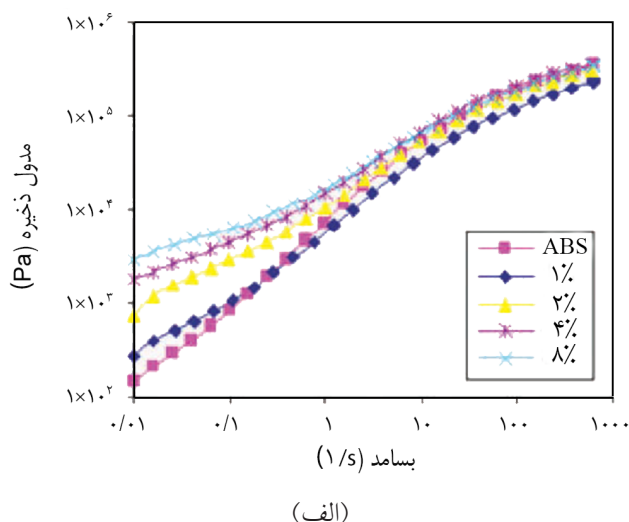
(پ)

شکل ۱۰- طرح‌واره‌ای از آستانه شبکه‌ای شدن در نانوکامپوزیت PMMA/SWCNTs: (الف) ۵۰ نانوذره با زاویه 90° ، (ب) ۱۰۰ نانوذره با زاویه 5° و (پ) ۱۰۰ نانوذره با زاویه 90° [۲۷].

مسیرهای ایجاد شده برای عبور الکترون از راه تماس ذرات



شکل ۱۱- رسانندگی الکتریکی نانوکامپوزیت ABS/MWCNTs با غلظت‌های مختلف MWCNTs [۱۲].



شکل ۱۲- تغییرات: (الف) مدول ذخیره و (ب) گرانروی مختلط با بسامد برای نانوکامپوزیت‌های ABS/MWCNTs تهیه شده به روش اختلاط مذاب [۳].

مختلط را با بسامد برای نانوکامپوزیت ABS/MWCNTs تهیه شده با روش اختلاط مذاب نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، در بسامدهای کم، گرانروی مختلط افزایش درخور توجهی می‌یابد، در حالی که روند کلی آن با افزایش بسامد کاهشی است. پژوهشگران اعلام کردند، این رفتار را می‌توان به ریزساختار شبکه‌ای ناشی از اتصالات یا برهم‌کنش بین نانولوله‌ها و زمینه پلیمری نسبت داد. مدول ذخیره نانوکامپوزیت به تدریج با افزایش بسامد و مقدار نانولوله‌های کربنی افزایش می‌یابد. این روند افزایشی به دلیل انتقال رفتار از حالت مایع به جامد (رفتار شبه جامد) است [۲،۳]. بسیاری از پژوهشگران علت این رویداد را چسبندگی مناسب CNTs با زمینه پلیمری می‌دانند [۲۳،۳۲].

موسوی و همکاران [۳] نتایج مشابهی را نیز برای نانوکامپوزیت

چه پراکنش و پراکندگی نانولوله‌ها در زمینه بهتر انجام شود، آستانه شبکه‌ای شدن در غلظت‌های کمتری اتفاق می‌افتد و در نتیجه سبب بهبود رسانندگی نانوکامپوزیت پلیمری می‌شود. یادآور می‌شود، نسبت منظر با آستانه شبکه‌ای شدن رابطه عکس دارد. هر چه طول نانولوله‌ها کوتاه‌تر باشد، درگیری نانولوله‌ها با نانولوله‌های همسایه کمتر شده و سبب افزایش غلظت آستانه شبکه‌ای شدن می‌شود. در نتیجه، رسانندگی کاهش پیدا می‌کند [۹،۱۰،۲۹].

از دیگر کاربردهای این نانوکامپوزیت‌ها، استفاده از آن‌ها به عنوان محافظ تداخل الکترومغناطیس (EMI) است. الصالح و همکاران [۲۸]، پس از تهیه نانوکامپوزیت ABS/MWCNTs حاوی ۱۵٪ جرمی CNTs به روش اختلاط مذاب مقدار EMI را برای نمونه تهیه شده به روش قالب‌گیری فشاری حدود ۳۶ dB در محدوده بسامد ۱۰۰-۱۵۰۰ MHz گزارش کردند. در حالی که Shen و همکاران [۳۰]، نانوکامپوزیت مشابهی با روش فرایند محلولی تهیه کردند و مقدار بیشینه EMI را حدود ۳۶/۷ dB در بسامد ۷۶۰ MHz به دست آوردند. مقدار EMI نانوکامپوزیت‌های پلیمری حاوی CNTs به شکل‌شناسی، مقدار پراکنش نانوذرات، ضخامت نمونه و غلظت CNTs بستگی دارد [۱۲]. همچنین گزارش شده است، با افزایش درصد وزنی MWCNTs مقدار EMI افزایش می‌یابد [۲۸].

اثر هم‌افزایی نانوذرات بر رسانندگی

از آن جا که رسانندگی الکتریکی نانوکامپوزیت‌ها به پراکندگی نانوذرات و نسبت منظر آن‌ها بستگی دارد، استفاده از ترکیب دو یا چند پرکننده رسانا به بهبود رسانندگی آن‌ها منجر می‌شود. پرکننده دوم با ایجاد دسته‌های CNTs-پرکننده دوم- CNTs باعث بهبود تماس بین نانوذرات شده و در نتیجه رسانندگی را افزایش می‌دهد. Pötschke و همکاران [۳۱] برای بررسی اثر وجود هم‌زمان MWCNTs و دوده بر رسانندگی الکتریکی، از پلی‌وینیلیدین فلوئورید (PVDF) به عنوان زمینه استفاده کردند. آن‌ها گزارش دادند، در غلظت‌های کم CNTs (کمتر از ۰/۵۳٪ وزنی) مسیری برای رسانندگی مشاهده نمی‌شود. ولی در اثر افزودن دوده، این ذرات با ایجاد پل و پرکردن فواصل بین نانولوله‌های همسایه، سبب افزایش سریع رسانندگی الکتریکی در نانوکامپوزیت‌های هیبریدی می‌شود.

رئولوژی

شکل‌های ۱۲-الف و ب به ترتیب تغییرات مدول ذخیره و گرانروی

از کاربردهای صنعتی در زمینه‌های مختلف از جمله محافظ الکترومغناطیسی و مواد رسانای الکتریکی استفاده کرد. در این مقاله، اثر مقدار و نوع نانولوله‌های کربنی و روش فراورش بر شکل‌شناسی و خواص نهایی نانوکامپوزیت ABS/CNTs گزارش شده است. با افزودن درصد کمی از نانولوله‌های کربنی خواص مکانیکی، پایداری گرمایی، رئولوژیکی و مقاومت در برابر شعله نانوکامپوزیت حاوی نانولوله کربنی بهبود می‌یابد. همچنین، با توجه به اهمیت پراکنش CNTs بر خواص نانوکامپوزیت ABS/CNTs گزارش شده است، برای نانولوله‌های کربنی چنددیواره پراکنش بهتری اتفاق می‌افتد. از میان روش‌های مختلف مطرح شده برای تهیه نانوکامپوزیت‌های پلیمری، پراکنش بهتری برای فراورش محلولی گزارش شده است. با این حال، اختلاط مذاب به‌عنوان روشی صنعتی بر فراورش محلولی ترجیح داده می‌شود.

تهیه شده به‌روش فرایند محلولی مشاهده کرده‌اند. این پژوهشگران گزارش کردند، مدول ذخیره نانوکامپوزیت تهیه شده به‌روش محلولی مقداری بیشتر از اختلاط مذاب است. آن‌ها این موضوع را به پراکنش و توزیع بهتر نانولوله‌ها در نانوکامپوزیت تهیه شده به روش محلولی، نسبت دادند.

نتیجه‌گیری

عملکرد برجسته نانولوله‌های کربنی با خواص الکتریکی و گرمایی منحصر به فرد و استحکام مکانیکی زیاد سبب شده است تا به‌عنوان تقویت‌کننده در زمینه‌های پلیمری استفاده شوند. از این رو، نانوکامپوزیت‌های پلیمری را می‌توان در طیف گسترده‌ای

مراجع

1. Modesti M., Besco S., and Lorenzetti A., *Handbook of Polymer Nanocomposites. Processing, Performance and Application*, Springer, Italy, 177-203, 2014.
2. Ma P.C., Siddiqui N.A., Marom G., and Kim J.K., Dispersion and Functionalization of Carbon Nanotubes for Polymer-Based Nanocomposites: A Review, *Composites Part A*, **41**, 1345-1367, 2010.
3. Mousavi L., Nazockdast H., Mohammadi Y., Azizi H., and Saleh Z., The Effect of Mixing Process on Linear Viscoelastic and Electrical Properties of ABS/MWNT Nanocomposites, *J. Appl. Polym. Sci.*, **125**, E260-E267, 2012.
4. Mital G., Dhand V., Rhee K.Y., Park S.J., and Lee W.R., A Review on Carbon Nanotubes and Graphene as Fillers in Reinforced Polymer Nanocomposites, *J. Ind. Eng. Chem.*, **21**, 11-25, 2015.
5. Mubarak N.M., Abdullah E.C., Jayakumar N.S., and Sahu J.N., An Overview on Methods for the Production of Carbon Nanotubes, *J. Ind. Eng. Chem.*, **25**, 1186-1197, 2014.
6. Journet C. and Bernier P., Production of Carbon Nanotubes, *Appl. Phys. A*, **67**, 1-9, 1998.
7. Guo T., Nikolaev P., Thess A., Colbert D.T., and Smalley R.E., Catalytic Growth of Single-Walled Nanotubes by Laser Vaporization, *Chem. Phys. Lett.*, **243**, 49-54, 1995.
8. Al-Saleh M.H., Al-Anid H.K., and Hussain Y.A., CNT/ABS Nanocomposites by Solution Processing: Proper Dispersion and Selective Localization for Low Percolation Threshold, *Composites Part A*, **46**, 53-59, 2013.
9. Shrivastava N.K., Suin S., Maiti S., and Khatua B.B., An Approach to Reduce the Percolation Threshold of MWCNT in ABS/MWCNT Nanocomposites Through Selective Distribution of CNT in ABS Matrix, *RSC Adv.*, **4**, 24584-24593, 2014.
10. Shrivastava N.K., Suin S., Maiti S., and Khatua B.B., Ultralow Electrical Percolation Threshold in Poly(styrene-co-acrylonitrile)/Carbon Nanotube Nanocomposites, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **52**, 2858-2868, 2013.
11. Du J.H., Bai J., and Cheng H.M., The Present Status and Key Problems of Carbon Nanotube Based Polymer Composites, *eXPRESS Polym. Lett.*, **1**, 253-273, 2007.
12. Jyoti J., Basu S., Singh B.P., and Dhakate S.R., Superior Mechanical and Electrical Properties of Multiwall Carbon Nanotube Reinforced Acrylonitrile Butadiene Styrene High Performance Composites, *Composites Part B*, **83**, 58-65, 2015.
13. Chen J., Du X.C., Zhang W.B., Yang J.H., Zhang N., Huang T., and Wang Y., Synergistic Effect of Carbon Nanotubes and Carbon Black on Electrical Conductivity of PA6/ABS Blend, *Compos. Sci. Technol.*, **81**, 1-8, 2013.

14. Waheed Q., Khan A.N., and Jan R., Investigating the Reinforcement Effect of Few Layer Graphene and Multi-walled Carbon Nanotubes in Acrylonitrile-Butadiene-Styrene, *Polymer*, **97**, 496-503, 2016.
15. El Ghanem H.M., Jawad S.A., Al-Saleh M.H., Hussain Y.A., and Salah W., Effect of DC-Bias on the Dielectric Behavior of CNT/ABS Nanocomposites, *Physica B*, **418**, 41-46, 2013.
16. Al-Saleh M.H., Al-Saidi B.A., and Al-Zoubi R.M., Experimental and Theoretical Analysis of the Mechanical and Thermal Properties of Carbon Nanotube/Acrylonitrile-Styrene-Butadiene Nanocomposites, *Polymer*, **89**, 12-17, 2016.
17. Lee J.C., Hong Y.S., Nan R.G., Jang M.K., Lee C.S., Ahn S.H., and Kang Y.J., Soundproofing Effect of Nano Particle Reinforced Polymer Composites, *J. Mech. Sci. Technol.*, **22**, 1468-1474, 2008.
18. Pawar S.P., Gandhi M., Saraf C., and Bose S., Exceptional Microwave Absorption in Soft Polymeric Nanocomposites Facilitated by Engineered Nanostructures, *J. Mater. Chem. C*, **4**, 4954-4966, 2016.
19. Marcin W., Benedito A., and Gimenez E., Preparation and Characterization of Extruded Nanocomposite Based on Polycarbonate/Butadiene-Acrylonitrile-Styrene Blend Filled with Multiwalled Carbon Nanotubes, *J. Appl. Polym. Sci.*, **131**, 40271-40278, 2014.
20. Choi Y.S., Xu M., and Chung I.J., Synthesis of Exfoliated Acrylonitrile-Butadiene-Styrene Copolymer (ABS) Clay Nanocomposites: Role of Clay as a Colloidal Stabilizer, *Polymer*, **46**, 531-538, 2005.
21. Petsom A., Roengsumran S., Ariyaphattanakul A., and Sangvanich P., An Oxygen Index Evaluation of Flammability for zinc Hydroxy Stannate and Zinc Stannate as Synergistic Flame Retardants for Acrylonitrile-Butadiene-Styrene Copolymer, *Polym. Degrad. Stab.*, **80**, 17-22, 2003.
22. Yang S., Castilleja J.R., Barrera E.V., and Lozano K., Thermal Analysis of an Acrylonitrile-Butadiene-Styrene/SWNT Composite, *Polym. Degrad. Stab.*, **83**, 383-388, 2004.
23. Singh B.K., Kar P., Shrivastava N.K., Banerjee S., and Khatua B.B., Electrical and Mechanical Properties of Acrylonitrile-Butadiene-Styrene/Multiwall Carbon Nanotube Nanocomposites Prepared by Melt-Blending, *J. Appl. Polym. Sci.*, **124**, 3165-3174, 2012.
24. Chen G.X., Li Y., and Shimizu H., Ultrahigh-Shear Processing for the Preparation of Polymer/Carbon Nanotube Composites, *Carbon*, **45**, 2334-2340, 2007.
25. Kaiser A.B. and Skákalová V., Electronic Conduction in Polymers, Carbon Nanotubes and Graphene, *Chem. Soc. Rev.*, **40**, 3786-3801, 2011.
26. Al-Saleh M.H., Influence of Conductive Network Structure on the EMI Shielding and Electrical Percolation of Carbon Nanotube/Polymer Nanocomposites, *Synth. Met.*, **205**, 78-84, 2015.
27. Du F., Fischer J.E., and Winey K.I., Effect of Nanotube Alignment on Percolation Conductivity in Carbon Nanotube/Polymer Composites, *Phys. Rev. B: Condens. Matter*, **72**, 121404(R), 2005.
28. Al-Saleh M.H. and Sundararaj U., Microstructure, Electrical, and Electromagnetic Interference Shielding Properties of Carbon Nanotube/Acrylonitrile-Butadiene-Styrene Nanocomposites, *J. Polym. Sci., Part B: Polym. Phys.*, **50**, 1356-1362, 2012.
29. Sumfleth J., Adroher X.C., and Schulte K., Synergistic Effects in Network Formation and Electrical Properties of Hybrid Epoxy Nanocomposites Containing Multi-Wall Carbon Nanotubes and Carbon Black, *J. Mater. Sci.*, **44**, 3241-3247, 2009.
30. Shen H., Jiao Q., Zhao Y., Li H., and Sun Z., Electrical Conductivity and Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness of Multiwalled Carbon Nanotubes Filled ABS Composites, *Adv. Mater. Res.*, **194-196**, 1554-1557, 2011.
31. Ke K., Pötschke P., Wiegand N., Krause B., and Voit B., Tuning the Network Structure in Poly(vinylidene fluoride)/Carbon Nanotube Nanocomposites Using Carbon Black: Towards Improvements of Conductivity and Piezoresistive Sensitivity, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **22**, 14190-14199, 2016.
32. McNally T., Pötschke P., Halley P., Murphy M., Martin D., Bell S.E.J., Brennan G.P., Bein D., Lemoine P., and Quinn J.P., Polyethylene Multiwalled Carbon Nanotube Composites, *Polymer*, **46**, 8222-8232, 2005.