

A Review on Morphology, Thermal, Mechanical and Electrical Properties of Poly(Acrylonitrile-Butadiene-Styrene)/Carbon Nanotubes Nanocomposites

Zahra Soheilpour, Amir Masoud Rezadoust and Mohammad Razavi-Nouri*
Iran Polymer and Petrochemical Institute, P.O. Box:14975-112, Tehran, Iran

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 soundproofing of the polymer-based nanocomposites. One of the challenging issue 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 along with studies on their morphologies as well as thermal, mechanical and electrical properties by reviewing the recently published literatures in this area.

Keywords: nanocomposite; poly(acrylonitrile-butadiene-styrene) (ABS); carbon nanotube; electrical properties; morphology.

مروری بر شکل شناسی، خواص حرارتی، مکانیکی و الکتریکی نانو کامپوزیت‌های پلی اکریلونیتریل بوتادی ان استایرن و نانو لوله‌های کربنی

زهرا سهیل پور، امیر مسعود رضادوست و محمد رضوی نوری*

تهران، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، صندوق پستی ۱۱۲-۱۴۹۷۵

*Corresponding author

E-mail: m.razavi@ippi.ac.ir

Tel: +98 21 48662417

چکیده

در دو دهه اخیر مطالعات گسترده‌ای روی تهیه نانو کامپوزیت‌های پلیمری دارای نانو لوله‌های کربنی (CNTs) انجام گرفته است. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که افزودن مقدار کمی CNTs، موجب افزایش رسانایی، پایداری حرارتی، بازدارندگی شعله، مدول یانگ، مقاومت ضربه و اتلاف صوت نانو کامپوزیت‌های پلیمری می‌شود. یکی از چالش‌های مهم در تهیه این نانو کامپوزیت‌ها، چگونگی پراکنش CNTs و بهبود آن در زمینه پلیمری می‌باشد. از این رو روش‌های متفاوتی با کارایی‌های مختلف، برای دستیابی به پراکنش مناسب این نانو ذرات در این دسته از مواد ارایه شده است. کارایی نانو کامپوزیت‌های بر پایه پلی اکریلونیتریل بوتادی ان استایرن (ABS) و CNTs، استفاده از آن‌ها را در صنایع مختلف مانند ساخت وسایل الکترونیکی سبب شده است. همچنین در سال‌های اخیر این مواد نقش مهمی در فرآیند‌های شکل دهی استراتژیکی مانند ساخت برهم افزا بازی می‌کنند و همین موضوع اهمیت آن‌ها را دو چندان ساخته است. در این مقاله سعی بر آن است تا اطلاعات نسبتاً جامعی درباره روش‌های مختلف پراکنش این نانو ذرات در زمینه ABS و مطالعه‌ی شکل

شناسی و خواص حرارتی، مکانیکی و الکتریکی نانوکامپوزیت های ABS/CNTs با مروری بر مقالات و نوشته های چاپ شده اخیر در اختیار علاقه مندان قرار گیرد.

کلید واژه: نانوکامپوزیت، پلی اکریلونیتریل بوتادی ان استایرن (ABS)، نانولوله های کربنی، خواص الکتریکی، شکل

شناسی

مقدمه

از دیرباز محققان برای تولید مواد پلیمری با ویژگی های مورد نظر از روش های کوپلیمریزاسیون یا آلیاژ سازی استفاده می کنند. یکی از این پلیمرهای مهندسی که به روش های فوق تهیه می شود؛ به گونه ای که سختی ماده را عمدتاً پلی استایرن (PS)، استحکام فشاری است. این پلیمر از ترکیب سه مونومر تهیه می شود؛ به گونه ای که سختی ماده را عمدتاً پلی استایرن (PS)، استحکام فشاری مورد نظر را لاستیک بوتادی ان (PB) و مقاومت حرارتی آن را بخش پلی استایرن اکریلونیتریل (SAN) تامین می کند [۱]. این کوپلیمر مهندسی به دلیل خواص عالی خود مانند مقاومت شیمیایی بالا، خواص مکانیکی خوب، قابلیت بازیافت و سهولت فرایند از کاربرد وسیعی در صنایع مختلف برخوردار است. از معایب این پلیمر نیز می توان به کدوری، حساسیت شعله، تغییر رنگ و خواص در برابر اشعه خورشید و جذب رطوبت تقریباً بالا اشاره کرد. همچنین از این پلاستیک گرما نرم برای بهبود چقرمگی موادی چون پلی بوتیلن ترفتالات (PBT)، پلی کربنات (PC) و نایلون ۶ استفاده می کنند.

یکی از روش های بهبود خواص محصول نهایی، استفاده از مواد افزودنی به ویژه نانوذرات در زمینه پلیمری است. از نانوذراتی که در دو دهه ی اخیر بسیار مورد توجه محققان قرار گرفته است می توان به نانولوله های کربنی (CNTs) اشاره کرد. نانولوله های کربنی، یکی از دگر شکل های (آلوتروپ) کربن مانند الماس، فولرن و گرافیت است [۲]. بسته به مراحل ساخت این مواد، عموماً دو نوع نانولوله کربنی تک دیواره و چند دیواره وجود دارد. شکل ۱ این دو نوع نانولوله کربنی را نشان می دهد. نانولوله های تک دیواره (SWCNTs) از یک لایه گرافنی که حول استوانه ی تو خالی پیچیده شده، تشکیل شده است. ولی نانولوله های چند دیواره (MWCNTs) از پیچش دو یا چند لایه گرافنی تشکیل شده است که بصورت

استوانه‌های هم مرکز هستند. این مواد از طریق نیروهای واندروالسی با یکدیگر مرتبط هستند. نانو لوله‌های کربنی به دلیل داشتن مدول و استحکام کششی بالا از مستحکم‌ترین مواد شناخته شده به حساب می‌آیند. پیوندهای شیمیایی با هیبرید SP^2 که در نانو لوله‌های کربنی وجود دارند از پیوندهای با هیبرید SP^3 موجود در الماس قوی تر بوده و باعث خواص مکانیکی عالی CNTs می‌شوند [۲].

خواص منحصر به فرد نانو لوله‌های کربنی، این مواد را به عنوان ماده تقویت کننده برای زمینه‌های مختلف فلزی، سرامیکی و پلیمری مطرح کرده است، ولی میزان و نحوه پراکنش CNTs در ماتریس‌ها بویژه زمینه‌های پلیمری از جمله عوامل تاثیر گذار در دستیابی به خواص محصول نهایی است [۳].

نانو لوله‌های کربنی به روش‌های مختلف تخلیه قوس الکتریکی (Arc discharge method)، فرسایش لیزری (Laser ablation method)، رسوب شیمیایی فاز بخار (Chemical vapor deposition)، الکترولیز و سنتز شعله ای تهیه می‌شوند که از میان این روش‌ها، سه روش اول رواج بیشتری دارند [۴-۷]. در زیر به طور مختصر به شرح این سه روش پرداخته می‌شود:

تخلیه قوس الکتریکی: این روش توسط Iijima برای سنتز CNTs به کار گرفته شد. در این روش CNTs به کمک ایجاد یک تخلیه پلاسمای داغ بین دو الکترود گرافیتی متصل به منبع الکتریسیته (۲۰۷V، ۱۰۰A) در حضور گاز هلیوم تشکیل می‌شوند. زمانی که فشار هلیوم در محفظه تا مقدار معینی افزایش می‌یابد، بازده تولید CNTs افزایش پیدا می‌کند، اما فراتر از این فشار، بازده تولید کاهش خواهد یافت. لازم به ذکر است که به جای هلیوم می‌توان از گازهای مختلفی مانند نیتروژن و تترا فلورید کربن نیز استفاده کرد. . بعلاوه، کیفیت بهتر CNTs به پایین آوردن جریان بستگی دارد [۴،۶].

فرسایش لیزری: اولین بار Smally و همکارانش سنتز SWCNTs را به این روش در سال ۱۹۹۵ گزارش کردند. در این روش، منبع کربن (گرافیت) با مقادیر کمی از کاتالیست فلزی (Ni و Co) دوپه شده و سپس به کمک پالس پرتو لیزر در حضور گاز خنثی (معمولاً آرگون) در دماهای بسیار بالا (تقریباً $1200^{\circ}C$) و فشار ثابت ۵۰۰ Torr تبخیر می‌شود. وقتی پرتو

لیزری Nd:YAG ماده هدف را بارور می کند، این ماده شروع به تبخیر کرده و در انتهای دیگر که دارای دمای نسبتاً کمتری است، متراکم می شود. به دلیل نیاز به مصرف توان بالا و استفاده از لیزرهای گران قیمت این روش بسیار پرهزینه است [۷،۴].

رسوب شیمیایی فاز بخار: این روش برای تولید عمده و رشد کنترل شده CNTs به کار می رود. در این روش، سنتز CNTs به سبب تجزیه مخلوطی از گازهای هیدروکربنی (مانند متان، اتیلن و غیره) یا ترکیبات کربنی فرار موجود روی بستری فلزی اتفاق می افتد. در این حالت نانو ذرات فلزی به عنوان کاتالیست و مکان های هسته گذاری برای فرایند رشد CNTs در دمای ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ °C و تحت فشار اتمسفری عمل می کنند. انتخاب کاتالیست و آماده کردن بستر، نوع و کیفیت CNTs تولیدی را تعیین می کند. معمولاً نانو ذرات Fe، Co و Ni به عنوان کاتالیست و سیلیکون متخلخل به عنوان بستری ایده آل برای رشد کنترل شده CNTs در نظر گرفته می شوند [۵،۴].

روش های پراکنش CNTs

پژوهشگران با استفاده از تصاویر تهیه شده با میکروسکوپ الکترونی دریافته اند که کلوخه ای شدن نانو لوله ها در زمینه پلیمری منجر می شود تا خواص مکانیکی و الکتریکی نانو کامپوزیت ها در مقایسه با مقادیری که از محاسبات تئوری برای نانو لوله ها بدست آمده است، بسیار کمتر باشد. بنابراین یکی از مسائل چالش برانگیز در این خصوص چگونگی پراکنش نانو لوله ها در زمینه پلیمری است. پراکنندگی نانو لوله های کربنی علاوه بر شکل هندسی یعنی طول و اندازه نانو لوله ها، به روش انتخاب شده برای پراکنش نانو لوله های کربنی در ماتریس پلیمری و جلوگیری از تشکیل کلوخه های مجدد بستگی دارد. در ادامه با توجه به اهمیت پراکنندگی نانو ذرات در زمینه پلیمری به روش های رایج پراکنش این مواد پرداخته می شود [۲].

روش فراصوت دهی

نقش امواج فراصوت؛ اعمال انرژی مافوق صوت جهت تحریک ذرات معلق در حلال برای اهداف مختلف است. در این روش به دلیل ضرباتی که امواج به نانو ذرات وارد می کنند، نانو لوله های کربنی لایه لایه شده و ساختار کلوخه ای آنها از هم

باز می‌شود. این روش برای پراکنش CNTs در مایعاتی با گرانشی پایین مانند آب، استون و اتانول بسیار موثر است. بسیاری از پلیمرها در حالت جامد یا مایع گرانش هستند، بنابراین قبل از پراکنش نانو لوله‌های کربنی، پلیمر می‌بایستی در حلالی حل شده و یا از حلالی جهت رقیق سازی و افت گرانشی آن استفاده شود. در صورتی که زمان فراصوت دهی و شدت آن افزایش یابد باعث صدمه زدن و کاهش نسبت منظر نانولوله‌های کربنی می‌شود، بطوری که در حالت افراطی لایه‌های گرافنی نانو لوله‌ها از بین رفته و با از بین رفتن نظم لایه‌ها، این مواد به نانو الیافی بی شکل (آمورف) تبدیل می‌شوند [۲]. الصالح و همکاران [۸]، گزارش کردند که متداول ترین روش‌ها برای بهبود پراکنش تقویت کننده و باز شدن کلوخه‌ها، فراصوت دهی، پیوند زنی پلیمرها و اصلاح سطح نانو ذرات است.

فرایند غلتک کاری

این فرایند که اصطلاحاً به سه غلتکی معروف است؛ از سه غلتک استوانه ای که در مجاورت یک دیگر قرار دارند، تشکیل شده است. تنش برشی که توسط غلتک‌ها به ماده وارد می‌شود باعث پراکنش و همگن سازی مخلوط می‌شود. از مزایای این روش دستیابی آسان به توزیع باریک اندازه ذرات و پخش آن‌ها در مواد گرانشی از طریق تنظیم و حفظ فاصله بین غلتک‌ها بصورت مکانیکی یا هیدرولیکی است. غلتک کاری بطور گسترده ای در صنایع مختلف از جمله چاپ، رنگ، مواد شیمیایی، پوشش شیشه، چسب، مواد دارویی و غذایی به کار می‌رود. علاوه بر این، محققان گزارش کرده اند که فرایند غلتک کاری روش نسبتاً مناسبی برای رسیدن به پراکنش مطلوب نانو لوله‌های کربنی است. زیرا تنش برشی نسبتاً بالا سبب باز شدن کلوخه‌ها و پراکندگی نانو ذرات می‌شود. همچنین با توجه به زمان اقامت کوتاه، احتمال آسیب دیدگی نانو ذرات محدود می‌باشد. از دیگر عوامل موثر بر کیفیت پراکندگی، فاصله بین غلتک‌ها و سرعت چرخش آنهاست.

روش آسیاب گلوله ای

این سیستم دارای یک محفظه استوانه ای شکل است که درون آن با تعداد زیادی گلوله صلب و کوچک از جنس سرامیک یا فولاد زنگ نزن پر شده است. با چرخش محفظه و فشار موضعی ایجاد شده از برخورد گلوله‌ها، ذرات ریزتر شده و نانو

ذرات بخوبی در زمینه پلیمری پخش می‌شوند. کیفیت پراکنش به عوامل مختلفی از جمله اندازه گلوله‌ها، سرعت چرخش و زمان اقامت مواد در آسیاب و نسبت تعداد گلوله‌ها به نانو لوله‌های کربنی بستگی دارد. از مزایای دیگر این روش آن است که همزمان با دستیابی به پراکنش خوب می‌توان به اصلاح سطح نانو لوله‌های کربنی در حضور یک ماده شیمیایی دست یافت.

استفاده از همزن و اکسترودر

از تکنیک‌های رایج برای توزیع کردن ذرات در سیستم‌های مایع استفاده از همزن است. از این روش می‌توان برای پراکنش نانو لوله‌های کربنی در زمینه پلیمری نیز استفاده کرد. شکل و اندازه پروانه و سرعت چرخش همزن از عوامل کنترل کننده پراکنش ذرات به شمار می‌روند. دیده شده است که پراکنندگی نانو لوله‌های چند دیواره راحت تر از نانو لوله‌های تک دیواره انجام می‌شود، با وجود این، نانو لوله‌های چند دیواره تمایل دارند تا دوباره کلوخه‌ای شوند.

اکستروژن روشی متداول برای پراکنش نانو لوله‌های کربنی در زمینه‌های پلیمری جامد به خصوص پلیمرهای گرما نرم به حساب می‌آید. سرعت چرخش بالای ماردون‌ها در اکسترودر دو ماردون باعث ایجاد تنش برشی زیاد به مخلوط پلیمر و نانو لوله‌های کربنی شده و در نتیجه پراکنش و باز شدن کلوخه‌های CNTs در مذاب پلیمری رخ می‌دهد. این روش معمولاً برای تولید نانو کامپوزیت‌های پلیمری به کار می‌رود که درصد نانو لوله‌های کربنی در آنها زیاد است.

بطور کلی برای تهیه نانو کامپوزیت‌هایی که از اختلاط نانو لوله‌های کربنی و زمینه پلیمری بدست می‌آیند، عواملی چون حالت فیزیکی (جامد یا مایع) و شیمیایی (گرماسخت و گرما نرم) زمینه پلیمری، ابعاد و میزان نانو لوله‌های کربنی و نیز روش‌های ساختی که در دسترس هستند بر پراکنش نانو لوله‌های کربنی تاثیر گذارند [۲].

روش‌های تهیه نانو کامپوزیت

یکی از روش‌های تهیه نانو کامپوزیت‌ها، روش پلیمر شدن درجا است. این روش به میزان قابل توجهی باعث بهبود پراکنش و برهم کنش نانو ذرات با زمینه پلیمری می‌شود. در این روش پس از اختلاط نانو لوله‌های کربنی با مونومرها و استفاده از شروع کننده در صورت لزوم، واکنش پلیمری شدن در دما، فشار و زمان مورد نظر انجام شده و نانو کامپوزیت تهیه می‌شود [۹-۱۱]. ذکر این نکته ضروری است که با این روش می‌توان نانو کامپوزیت‌هایی تهیه نمود که کسر وزنی CNTs در آنها زیاد است [۲].

فراورش محلولی از دیگر روش‌های رایج برای تهیه نانو کامپوزیت‌ها می‌باشد. در این روش ابتدا نانو ذرات در حلالی مناسب که پارامتر حلالیت آن به پارامتر حلالیت پلیمر نزدیک است، پخش شده و سپس اختلاط آن با پلیمر مورد نظر به کمک استفاده از همزن مکانیکی، مغناطیسی و یا فراصوت دهی در دمای اتاق یا بالاتر از آن انجام می‌شود. در نهایت پس از خارج کردن حلال از طریق عمل تقطیر و یا تبخیر، نانو کامپوزیت بدست می‌آید [۲]. از معایب این روش به سرعت تولید پایین، دقت ابعادی کم و وجود رطوبت و حباب هوا در نانو کامپوزیت می‌توان اشاره کرد. در ضمن به دلیل گران قیمت بودن حلال می‌بایستی سامانه‌ای برای بازیابی آن بکار گرفته شود. در سامانه‌هایی که حلال در فضای باز تبخیر شده و توسط افراد قابل استنشاق است، خطراتی برای سلامتی کارکنان وجود دارد [۱۲].

روش اختلاط مذاب برای تهیه نانو کامپوزیت‌هایی که از پلیمرهای گرما نرم تهیه می‌شوند، در صنعت بسیار رایج است. پراکنش نانو ذرات با زمینه پلیمری از طریق اکسترودر و یا مخلوط کن داخلی انجام می‌شود. این روش به پارامترهایی نظیر سرعت چرخش ماردون، دما و زمان اختلاط بستگی دارد. دیده شده است که با بالا رفتن نرخ برش تمایل نانو ذرات به یکدیگر کمتر شده و از کلوخه‌ای شدن جلوگیری می‌شود [۱۲]. از معایب این روش می‌توان به احتمال آسیب دیدگی و یا شکست نانو لوله‌های کربنی وقتی که عمل اختلاط در نرخ برش بالا انجام می‌شود، اشاره کرد [۱۱]. اختلاط مذاب را می‌توان به دو صورت تک مرحله‌ای و دو مرحله‌ای انجام داد. در روش تک مرحله‌ای، مواد با نسبت‌های از پیش تعیین شده وارد مخلوط کن شده و پس از اختلاط در شرایط مورد نظر نانو کامپوزیت تهیه می‌شود. ولی در حالت دو مرحله‌ای، ابتدا

مستربجی از پلیمر و نانو ذرات تهیه شده و سپس این مستربج با پلیمر فاقد نانو ذرات به ترکیب درصد مورد نظر رقیق می‌شود.

محققان گزارش کردند که پخش نانو ذرات در روش دو مرحله‌ای بهتر است [۱۳].

اهمیت پراکنش نانو ذرات در زمینه پلیمری

وجود برهم کنش‌های سطحی بین نانو ذرات و زمینه‌های پلیمری باعث سازگاری و پراکنش بهتر نانو پرکننده‌ها (در غلظت‌های کم) درون زمینه پلیمری می‌شود، ولی در صورتی که غلظت این مواد از غلظت بحرانی بیشتر شود، پراکنش ذرات با مشکل مواجه شده و نیروهای واندر والسی موجود بین این ذرات باعث کلوخه‌ای شدن آن‌ها می‌شود. محققان از روش‌هایی چون طیف سنجی رامان (Raman) [۱۲]، پراش پرتو ایکس (XRD) [۱۴] و طیف سنجی فرابنفش مرئی (UV-visible) [۸] برای ارزیابی میزان پراکنش CNTs در زمینه ABS استفاده کرده‌اند. این افراد از طریق انتقال پیک در طیف سنجی رامان و اندازه‌گیری شدت پیک نسبت به حالتی که زمینه فاقد پرکننده است در طیف سنجی‌های XRD و UV-vis به غلظت بحرانی نانو ذرات پی بردند.

وحید و همکاران [۱۴] برای تعیین غلظت بحرانی و میزان پراکنندگی از XRD استفاده کردند. ملاک ارزیابی این گروه ایجاد پیکی شاخص در غلظت بحرانی و فراتر از آن در XRD عنوان شده است. به عبارت دیگر ظاهر شدن پیکی جدید به منزله‌ی کلوخه‌ای شدن نانو ذرات در غلظت بحرانی است. شکل ۲ طیف XRD از ABS خالص و نانو کامپوزیت 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 می‌باشد. برای MWCNTs پیکی در $2\theta = 25.8^\circ$ ظاهر می‌شود که از آن می‌توان فاصله بین لایه‌ای این نانو ذرات را برابر با 3.45 \AA به دست آورد. دیده می‌شود که برای این نانو کامپوزیت‌ها تا غلظت 0.24% حجمی از نانو ذرات، پیک جدیدی ظاهر نمی‌شود. این مسئله مبین آن است که نانو لوله‌ها به خوبی در زمینه پلیمری پراکنده شده‌اند. ولی در غلظت‌های بالاتر، پیک جدیدی در محلی که نانو لوله خود را نشان می‌دهد، نمایان می‌شود. این پیک جدید به مفهوم تشکیل تجمعاتی از نانو لوله‌ها در زمینه پلیمری است که شدت آن با افزایش غلظت

نانو پرکننده‌ها بیشتر می‌شود. این محققان با استفاده از نتایج XRD گزارش دادند که غلظت بحرانی نانو لوله‌های کربنی چند دیواره بیشتر از ذرات گرافن است.

الصالح و همکاران [۸]، نانو کامپوزیت ABS/MWCNTs را به روش محلولی تهیه کردند. این محققان برای بررسی کیفیت پراکنش و انتخاب حلال مناسب، UV-vis را انتخاب کردند. این روش یک شاخص کیفی برای تعیین درجه نسبی پراکنش نانو ذرات در حلال‌های مختلف است. در طیف UV-vis، کلوخه‌های CNTs غیر فعال و نانو لوله‌های منفرد فعال به حساب آمده و افزایش شدت جذب با افزایش پراکنش نانو لوله‌های کربنی اتفاق می‌افتد. شکل ۳ طیف UV-vis را برای مخلوط نانو لوله‌های کربنی با حلال‌های کلروفرم (Chloroform) و ۲،۱-دی کلرو اتیلن (DCE) نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که شدت پیک در سوسپانسیون CNTs-Chloroform بیشتر از CNTs-DCE است. بنابراین کلروفرم حلال مناسب تری برای پراکنش نانولوله‌های کربنی چند دیواره به حساب می‌آید. گزارش شده است که این حلال برای نانو لوله‌های کربنی تک دیواره نیز مناسب است.

شکل شناسی

بطور کلی محققان برای بررسی سازگاری و توزیع یکنواخت تقویت کننده CNTs در زمینه ABS از روش‌های گوناگونی مانند تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) [۱۵]، میکروسکوپ الکترونی پویشی (SEM) [۱۶] و میکروسکوپ نوری [۱۷] استفاده کرده‌اند.

الصالح و همکاران [۸]، طی پژوهشی نانو کامپوزیت ABS/MWCNTs حاوی ۰/۱۵٪ حجمی تقویت کننده را با فرایند محلولی تهیه کرده و با بررسی تصاویر TEM نتایج خود را ارائه کردند. این محققان بیان کردند که ذرات PB در فاز پیوسته SAN پراکنده هستند. آن‌ها با توجه به دو فاز بودن ABS پیش بینی کردند که تمایل CNTs به این دو فاز PB و SAN می‌تواند متفاوت باشد. تصاویر TEM نشان داد که CNTs در فاز SAN به خوبی پراکنده شده است [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. این محققان

پراکندگی خوب CNTs در زمینه ABS را به گرانبوی کم زمینه پلیمری، انتخاب حلال مناسب و سازگاری خوب بین CNTs و زمینه پلیمری نسبت دادند. در هنگام آلیاژ سازی به روش مذاب این نکته پذیرفته شده است که تمایل CNTs برای جای گیری در هر فاز را می توان به کمک انرژی های بین سطحی و ضریب ترشوندگی اجزا پیش بینی کرد. از نظر ترمودینامیکی، CNTs تمایل دارند تا در فازی قرار گیرند که از کشش سطحی کمتری برخوردار باشد [۸].

مطالعه الصالح و همکاران [۱۶] بر روی نانو کامپوزیت ABS/MWCNTs که به روش اختلاط مذاب تهیه شد، نشان داد که قطر ذرات CNTs پس از پخش شدن درون زمینه SAN از قطر ذرات CNTs اولیه بسیار بیشتر است. آن ها این افزایش قطر را به در برگرفتنی این ذرات با لایه هایی از SAN نسبت دادند. شکل ۴-الف و ب به ترتیب تصاویر SEM از ABS و نانو کامپوزیت ABS/MWCNTs دارای ۵٪ وزنی CNTs را در دو بزرگنمایی مختلف نشان می دهد.

تحقیقات دیگری که برای بررسی تمایل CNTs به دیگر فازهای پلیمری انجام شده است، حاکی از آن است که وقتی ABS با نایلون ۶ [۱۵]، و پلی کربنات [۱۸-۱۹] مخلوط می شود این نانو ذرات دیگر تمایل چندانی به فاز ABS نداشته و در دو فاز دیگر پخش می شوند. این تمایل به میزان قطبش، چگالی، انرژی بین سطحی و ضریب ترشوندگی پلیمر بستگی دارد. شکل ۵-الف و ب تصاویر SEM از سطح شکست نانو کامپوزیت ABS/PC/MWCNTs را با دو بزرگنمایی مختلف نشان می دهد [۱۸]. از شکل ۵-ب، به وضوح می توان نتیجه گرفت که ذرات تقویت کننده به فاز PC بیشتر از ABS تمایل دارند.

موسوی و همکاران [۳] به منظور بررسی کیفیت پراکنش تقویت کننده در زمینه پلیمری، نانو کامپوزیت ABS/MWCNTs را به دو روش فرایند محلولی و اختلاط مذاب تهیه کردند. شکل ۶-الف و ب به ترتیب تصاویر SEM از این نانو کامپوزیت ها را نشان می دهد. آنها از این تصاویر استنباط کردند که کیفیت پراکنش این نانو ذرات در نانو کامپوزیتی که به کمک فرایند محلولی تهیه شده، به مراتب از اختلاط مذاب بهتر است.

خواص مکانیکی

در سال‌های اخیر مطالعات گسترده‌ای روی خواص مکانیکی نانو کامپوزیت‌های پلیمری دارای CNTs انجام شده است. افزودن این مواد به زمینه پلیمری سبب بهبود خواص مکانیکی مانند مدول یانگ، استحکام کششی و چقرمگی نانو کامپوزیت می‌شود. شکل ۷-الف تا ج به ترتیب نمودار تغییرات مدول یانگ، استحکام کششی و درصد ازدیاد طول را با غلظت MWCNTs برای نانو کامپوزیت‌های ABS/MWCNTs نشان می‌دهد [۱۲]. همانگونه که مشاهده می‌شود (شکل ۷-الف) با افزایش درصد CNTs مدول یانگ افزایش پیدا می‌کند. محققین این مسئله را به پراکنش خوب تقویت کننده در زمینه پلیمری و کاهش تحرک زنجیرها در اثر حضور نانو ذرات نسبت دادند. شکل ۷-ب، نشان می‌دهد که با افزودن ۳٪ وزنی از نانو لوله‌های کربنی، استحکام کششی نانو کامپوزیت نسبت به ABS فاقد پرکننده، ۲۹٪ افزایش می‌یابد. با افزایش بیشتر MWCNTs، استحکام کششی کاهش یافته ولی کماکان بیشتر از ABS باقی می‌ماند. شکل ۷-ج نیز نشان می‌دهد که با افزایش درصد تقویت کننده و بهبود میزان پراکنش CNTs در زمینه پلیمری، نانو کامپوزیت حاصل در مقابل تنش و ازدیاد طول از خود مقاومت نشان داده و بنابراین درصد ازدیاد طول با اضافه شدن مقدار نانو پرکننده کاهش پیدا می‌کند.

دو (Du) و همکاران [۱۱] مجموعه‌ای از مقادیر مربوط به خواص مکانیکی بدست آمده برای بعضی از پلیمرهای تقویت شده با نانو ذرات را جمع آوری کردند. آن‌ها خاطر نشان کردند که اگر نانو لوله‌های کربنی اصلاح نشده باشند و آرایش یافتگی آن‌ها نیز تصادفی باشد، مقدار استحکام کششی برای اغلب نانو کامپوزیت‌های پلیمری مطالعه شده افزایش نیافته و یا این افزایش، چشمگیر نخواهد بود. زیرا این دو عامل باعث پراکندگی نامناسب و چسبندگی ضعیف بین این نانو ذرات با زمینه پلیمری می‌شوند. گروه پژوهشی لی [۱۷] طی مطالعه خود در زمینه کارایی نانو کامپوزیت ABS/CNTs دریافتند با افزایش درصد CNTs، سختی و اتلاف صوت نانو کامپوزیت افزایش می‌یابد.

خواص حرارتی

یکی از معایب اصلی ABS اشتعال پذیری ذاتی این ماده است. بنابراین سعی شده است تا پایداری حرارتی و مقاومت در برابر شعله آن با اضافه کردن مواد افزودنی بهبود یابد. مطالعات گسترده‌ای برای یافتن راهکاری برای افزایش مقاومت در

برابر اشتعال این ماده انجام شده است. از جمله این بررسی‌ها می‌توان به تهیه نانو کامپوزیت‌های ABS/Nanoclay [۲۰]، ABS/zinc stannate [۲۱] و ABS/SWCNTs [۲۲] اشاره کرد. محققان تخریب حرارتی ABS را به دو صورت تک مرحله‌ای و دو مرحله‌ای مشاهده کرده‌اند. از عوامل تاثیر گذار بر روی رفتار تخریب حرارتی ABS، می‌توان به نوع گاز ورودی و دبی آن، سرعت گرما دهی و حجم یا وزن نمونه اشاره کرد [۲۲]. شکل ۸ رفتار تخریب حرارتی نانو کامپوزیت ABS/MWCNTs را با غلظت MWCNTs نشان می‌دهد [۱۶]. مشاهده می‌شود که تغییر رفتار قابل توجهی در اثر افزودن نانو لوله‌های کربنی رخ نمی‌دهد. این در حالی است که تغییر رفتار تخریب این ماده در اثر افزودن CNTs توسط محققان دیگر گزارش شده است. به عنوان مثال، ینگ (Yang) و همکاران [۲۲]، برای نانو کامپوزیت ABS/SWCNTs در مقایسه با ABS خالص تخریب حرارتی را برای شرایط مختلف یعنی محیط هوا و نیتروژن دو مرحله‌ای مشاهده کرده‌اند. ولی سینگ (Singh) و همکاران [۲۳] گزارش دادند، که تخریب حرارتی در محیط هوا، برای نانو کامپوزیت ABS/MWCNTs تک مرحله‌ای است. پس از مطالعات و بررسی‌های دقیق‌تر، گزارش شده است که این تفاوت در رفتار تخریب را می‌توان به ساختار خود ABS نسبت داد. ماده‌ای که ینگ و همکاران [۲۲] از آن استفاده کرده بودند شامل حداقل ۵۰٪ لاستیک PB بود ولی ABS به کار رفته توسط سینگ و همکاران [۲۳] دارای فقط ۱۳٪ لاستیک PB بود. از این رو می‌توان چنین برداشت کرد زمانیکه بخش عمده پلیمر ABS را فاز لاستیکی در بر می‌گیرد تخریب حرارتی بصورت دو مرحله‌ای و وقتی که مقدار این فاز کم است تخریب در یک مرحله اتفاق می‌افتد [۱۶]. لازم به ذکر است که فاز غنی از PB آسیب پذیرترین فاز در مقابل تخریب حرارتی اعلام شده است [۲۲].

تحلیل دینامیک مکانیکی حرارتی (DMTA)

خواص مکانیکی نانو کامپوزیت‌های پلیمری وابستگی شدیدی به میزان پراکنش، چسبندگی و خواص ذاتی زمینه و تقویت کننده دارد. موسوی و همکاران [۳] طی مطالعه‌ای که روی اثر روش تهیه نانو کامپوزیت ABS/MWCNTs بر روی خواص آن داشته‌اند، خواص مکانیکی این نانو کامپوزیت‌ها را با DMTA بررسی کردند. شکل ۹-الف و ب به ترتیب تغییرات

مقدار اتلاف با دما را برای نانو کامپوزیت‌های تهیه شده به دو روش فراورش محلولی و اختلاط مذاب گزارش می‌دهد. مشاهده می‌شود که در اثر افزایش غلظت MWCNTs مقدار اتلاف ناشی از فاز لاستیکی، برای نانو کامپوزیت تهیه شده از هر دو روش کاهش یافته است. این رفتار حاکی از آن است که بخشی از تنش بکار رفته، بر نانو لوله‌های کربنی متمرکز شده است و در نتیجه سهم فاز لاستیکی در پاسخ مکانیکی برای نمونه حاوی نانو لوله‌های 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، کمتر از نمونه تهیه شده به روش اختلاط مذاب می‌باشد. دمای انتقال شیشه‌ای نیز برای نمونه‌های تهیه شده در اثر افزودن CNTs حدود 20°C افزایش پیدا می‌کند [۳]. این مسئله از محدودیت تحرک زنجیرهای SAN موجود در ABS بدلیل برهم کنش با CNTs ناشی می‌شود. سینگ و همکاران نیز با هدف بررسی مقدار مدول ذخیره ای و اتلاف نانو کامپوزیت‌های 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 به شمار می‌روند که بیشترین استفاده را در ساخت نانو کامپوزیت‌های رسانا به خود اختصاص داده اند [۲۴]. کربن‌ها در CNTs با هیبرید قوی sp^2 به یکدیگر متصل بوده و الکترون‌های اوربیتال‌های π که آزادی عمل بیشتری دارند، باعث هدایت الکتریکی این ماده می‌شوند [۲۵].

از مزایای آن‌ها در مقایسه با فلزات می‌توان به وزن نسبتاً پایین، انعطاف پذیری در طراحی و مقاومت در برابر خوردگی اشاره کرد. همچنین نسبت منظر (نسبت طول به قطر نانو ذرات) بالای این ذرات و هدایت الکتریکی فوق العاده آنها منجر به تهیه نانو کامپوزیت‌هایی با مقاومت الکتریکی کم می‌شود. در بررسی میزان رسانایی نانو کامپوزیت‌ها مفهوم آستانه زهش (percolation) مطرح است که این اصطلاح به کاهش ناگهانی و قابل توجه مقاومت الکتریکی نانو کامپوزیت در یک غلظت بحرانی از تقویت کننده مربوط می‌شود. در غلظت‌های بیشتر از مقدار بحرانی، مسیرهای متعددی برای عبور الکترون در زمینه پلیمری بوجود می‌آید. از طرف دیگر، ظهور پدیده آستانه زهش در غلظت‌های پایین یکی از عوامل مهم در حفظ

خواص پلیمرها و کاهش هزینه نهایی نانو کامپوزیت‌های پلیمری است [۲۶]. پژوهش‌های متعددی بر روی خواص الکتریکی و الکترومغناطیسی نانو کامپوزیت‌های پلیمری حاوی نانولوله‌های کربنی انجام شده است [۹، ۱۱، ۱۲، ۲۴-۲۸]. سوال اصلی در این مطالعات این است که آیا خواص الکتریکی نانو کامپوزیت‌ها به توزیع نانو ذرات بستگی دارد یا خیر. محققان گزارش دادند که بهترین درجه پخش لزوماً حداکثر رسانایی را نتیجه نمی‌دهد. زیرا در اثر پخش خوب ذرات CNTs فیلمی پلیمری به دور هر ذره از CNTs تشکیل می‌شود که مانع از تماس ذرات با یکدیگر و در نتیجه کاهش رسانایی می‌شود.

دو (Du) و همکاران [۲۷] اثر آرایش یافتگی ذرات CNTs را به عنوان یکی دیگر از عوامل موثر بر روی خواص الکتریکی نانو کامپوزیت‌های رسانا بررسی کردند. از دستاوردهای این پژوهش استنباط می‌شود که بیشترین رسانایی بین دو حالت حدی آرایش تصادفی و آرایش یافتگی بالای CNTs بدست می‌آید. در این حالت مسیرهای ایجاد شده برای عبور الکترون از طریق تماس ذرات CNTs در حالت پیشینه خود قرار می‌گیرد. شکل ۱۰- الف تا ج طرح‌واره‌هایی از آستانه زهش در نانو کامپوزیت‌های PMMA/SWCNTs را نشان می‌دهند.

شکل ۱۰- الف شامل ۵۰ نانو ذره می‌باشد که این نانو ذرات شبه میله‌ای نسبت به هم زاویه 90° می‌سازند. همانطور که مشاهده می‌شود تماس این نانو ذرات در شکل فراگیر نبوده و ارتباط آنان در چندین ناحیه قطع شده است. شکل ۱۰- ب ۱۰۰ نانو ذره را نشان می‌دهد که نسبت به هم تحت زاویه 5° قرار گرفته اند. در این حالت نیز آرایش یافتگی نانو ذرات منجر به ایجاد آستانه زهش و مسیر عبور الکترون نمی‌شود. ولی شکل ۱۰- ج ۱۰۰ ذره را نشان می‌دهد که با هم زاویه 90° می‌سازند. مسیر خاکستری ایجاد شده در این شکل بیانگر ایجاد مسیر عبور الکترون می‌باشد. در این شکل تمام نانو ذرات با هم در تماس بوده و این پیوستگی و ایجاد مسیر برای عبور الکترون دیده می‌شود. همچنین لازم به ذکر است که این تعداد نانو ذرات برای طول مشخص $L=0/255$ گزارش شده است [۲۷].

جیوتی (Jyoti) و همکاران [۱۲] برای نانو کامپوزیت ABS/MWCNTs گزارش کردند که تا غلظت ۳٪ وزنی از نانو ذرات، نانو کامپوزیت شبه عایق بوده و در مقادیر بیشتر از آن، رسانایی الکتریکی بطور ناگهانی افزایش می‌یابد (شکل ۱۱). بسیاری

از محققان ضمن مطالعه در این زمینه به نتایج مشابهی دست یافتند و گزارش دادند که با افزودن درصد کمی از CNTs میزان رسانایی و مسیرهای عبور الکترون افزایش پیدا می کند [۲۸،۱۱].

پدیده آستانه زهش به پارامترهای دیگری نظیر پراکنش، توزیع و نسبت منظر CNTs نیز بستگی دارد [۲۸]. بطوری که هر چه پراکنش و پراکندگی نانو لوله‌ها در زمینه بهتر انجام شود، آستانه زهش در غلظت‌های پایین تری اتفاق می افتد و در نتیجه سبب بهبود رسانایی نانو کامپوزیت پلیمری می شود. لازم به ذکر است که نسبت منظر با آستانه زهش رابطه عکس دارد. هر چه طول نانو لوله‌ها کوتاهتر باشد، درگیری نانو لوله‌ها با نانو لوله‌های همسایه کمتر شده و سبب افزایش غلظت آستانه زهش می شود، در نتیجه رسانایی افت پیدا می کند [۹، ۱۰، ۲۹].

از دیگر کاربردهای این نانو کامپوزیت‌ها، استفاده از آن‌ها به عنوان محافظ تداخل الکترومغناطیس (EMI) است. الصالح و همکاران [۲۸]، پس از تهیه نانو کامپوزیت 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 فرکانس ۱۰۰-۱۵۰۰ MHz گزارش کردند. در حالی که شن (Shen) و همکاران [۳۰]، نانو کامپوزیت مشابهی به روش فرایند محلولی تهیه کرده و مقدار بیشینه EMI را حدود ۳۶/۷ dB در فرکانس ۷۶۰ MHz بدست آوردند. مقدار EMI نانو کامپوزیت‌های پلیمری حاوی CNTs به شکل شناسی، میزان پراکنش نانو ذرات، ضخامت نمونه و غلظت CNTs بستگی دارد [۱۲]. همچنین گزارش شده است که با افزایش درصد وزنی MWCNTs مقدار EMI افزایش می یابد [۲۸].

اثر هم افزایی نانو ذرات در رسانایی

از آن جا که هدایت الکتریکی نانو کامپوزیت‌ها به پراکندگی نانو ذرات و نسبت منظر آن‌ها بستگی دارد، استفاده از ترکیب دو یا چند پرکننده رسانا منجر به بهبود رسانایی آن‌ها می شود. پرکننده دوم از طریق ایجاد دسته‌های CNTs/پرکننده دوم/CNTs باعث بهبود تماس بین نانو ذرات شده و در نتیجه رسانایی را افزایش می دهد. پوشکه (Pötschke) و همکاران [۳۱] برای بررسی اثر وجود همزمان MWCNTs و دوده بر هدایت الکتریکی، از پلی وینیلیدین فلوراید (PVDF) به عنوان

زمینه استفاده کردند. آن‌ها گزارش دادند که در غلظت‌های کم CNTs (کمتر از ۰/۵۳٪ وزنی) مسیری برای رسانایی مشاهده نمی‌شود. ولی در اثر افزودن دوده، این ذرات از طریق ایجاد پل و پر کردن فواصل بین نانو لوله‌های همسایه، سبب افزایش سریع رسانایی الکتریکی در نانو کامپوزیت‌های هیبریدی می‌شود.

ریولوژی

شکل ۱۲-الف و ب به ترتیب تغییرات مدول ذخیره و گرانروی مختلط را با فرکانس برای نانو کامپوزیت ABS/MWCNTs تهیه شده از روش اختلاط مذاب نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، در فرکانس‌های پایین، گرانروی مختلط به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد، در حالی که روند کلی آن با افزایش فرکانس بصورت کاهشی می‌باشد. محققان اعلام کردند که این رفتار را می‌توان به ریز ساختار شبکه‌ای ناشی از اتصالات بین نانو لوله‌ها یا برهمکنش بین نانو لوله‌ها و زمینه پلیمری نسبت داد. مدول ذخیره‌ای نانو کامپوزیت به تدریج با افزایش فرکانس و مقدار نانو لوله‌های کربنی افزایش می‌یابد. این روند افزایشی به دلیل انتقال رفتار از حالت مایع به جامد (رفتار شبه جامد) می‌باشد [۳،۲]. بسیاری از محققان علت این رویداد را چسبندگی مناسب CNTs با زمینه پلیمری می‌دانند [۳۲،۲۳].

نتایج مشابهی برای نانو کامپوزیت تهیه شده به روش فرایند محلولی توسط موسوی و همکاران [۳] نیز مشاهده شده است. این محققان گزارش کردند که مدول ذخیره‌ای نانو کامپوزیت تهیه شده به روش محلولی مقداری بیشتر از اختلاط مذاب است. آنها این موضوع را به پراکنش و توزیع بهتر نانو لوله‌ها در نانو کامپوزیت تهیه شده به روش محلولی، نسبت دادند.

نتیجه گیری

عملکرد برجسته نانو لوله‌های کربنی که دارای خواص الکتریکی و حرارتی منحصر به فرد و استحکام مکانیکی بالا سبب شده است تا به عنوان تقویت کننده در زمینه‌های پلیمری استفاده شود. لذا نانو کامپوزیت‌های پلیمری را می‌توان در طیف گسترده‌ای از کاربردهای صنعتی در زمینه‌های مختلف از جمله محافظ الکترومغناطیسی و مواد رسانای الکتریکی استفاده کرد. در این مقاله اثر مقدار و نوع نانو لوله‌های کربنی و اثر روش فراورش روی شکل شناسی و خواص نهایی نانو کامپوزیت

ABS/CNTs گزارش شده است. با افزودن درصد کمی از نانو لوله‌های کربنی خواص مکانیکی، پایداری حرارتی، ریولوژیکی و مقاومت در برابر شعله نانو کامپوزیت حاوی نانو لوله کربنی بهبود می‌یابد. همچنین با توجه به اهمیت پراکنش CNTs بر خواص نانو کامپوزیت ABS/CNTs گزارش شده است که در نانو لوله‌های کربنی چند دیواره به مراتب پراکنش بهتری اتفاق می‌افتد. از میان روش‌های مختلف مطرح شده برای تهیه نانو کامپوزیت‌های پلیمری، در فراورش محلولی پراکنش بهتری گزارش شده است. با این حال اختلاط مذاب به عنوان روشی صنعتی بر فراورش محلولی ترجیح داده می‌شود.

دیدار پس نشسته

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, *Compos. Part A-Appl. S.*, **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-Mater.*, **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, *Compos. Part A-Appl. S.*, **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, *Compos Part B-Eng*, **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, *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., Sangvanich P., An Oxygen Index Evaluation of Flammability for zinc Hydroxystannate and zinc Stannate as Synergistic Flame Retardants for Acrylonitrile-Butadiene-Styrene Copolymer, *Polym. Degrad. Stabil.*, **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. Stabil.*, **83**, 383-388, 2004.
23. Singh B.K., Kar P., Shrivastava N.K., Banerjee S., 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.*, **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.

زیرنویس شکل ها

شکل ۱- تصویر TEM از انواع مختلف نانو لوله‌های کربنی (الف) تک دیواره (SWCNTs) و (ب) چند دیواره (MWCNTs) (۲، ۵ و ۷ دیواره ای) [۲].

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

شکل ۳- طیف سنجی فرابنفش مرئی برای اختلاط Chloroform/CNTs و DCE/CNTs [۸].

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

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

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

شکل ۷- نمودار تغییرات (الف) مدول یانگ، (ب) استحکام کششی و (ج) درصد ازدیاد طول با غلظت نانو لوله‌های کربنی برای نانو کامپوزیت ABS/MWCNTs [۱۲].

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

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

شکل ۱۰- طرحواره ای از آستانه زهش در نانو کامپوزیت PMMA/SWCNTs، (الف) ۵۰ نانو ذره با زاویه 90° ، (ب) ۱۰۰ نانو ذره با زاویه 5° و (ج) ۱۰۰ نانو ذره با زاویه 90° [۲۷].

شکل ۱۱- رسانایی الکتریکی نانو کامپوزیت ABS/MWCNTs با غلظت‌های مختلف MWCNTs [۱۲].

شکل ۱۲- تغییرات (الف) مدول ذخیره ای و (ب) گرانروی مختلط با فرکانس برای نانو کامپوزیت‌های

ABS/MWCNTs تهیه شده به روش اختلاط مذاب [۳].

ویرایش نشده