



فصلنامه علمی
سال دهم، شماره ۱، شماره پیاپی ۳۹، پاییز ۱۴۰۴
Vol. 10, No. 3 Issue No. 39
Autumn 2025, Quarterly
صفحه ۵-۱۹

Iran Polymer Technology;
Research and Development

واژه‌های کلیدی:

جدایش پلی پروپیلن،
نانولوله‌های کربنی،
خواص مکانیکی،
پراکندگی نانوذرات،
فرایند اختلاط مذاب

پلی پروپیلن در عصر نانو: مروری بر نقش نانولوله‌های کربنی در بازآفرینی خواص نانوکامپوزیت‌ها

محدثه سرلک، شقایق دباغ عالی نسب، پدram منافی*
تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی پلیمر و رنگ

چکیده ...

پلی پروپیلن (PP) به عنوان یکی از پرمصرف‌ترین پلیمرهای گرمانرم، به دلیل ویژگی‌هایی نظیر چگالی پایین، قیمت مناسب، پایداری شیمیایی، مقاومت در برابر رطوبت، فرایندپذیری آسان و خواص مکانیکی قابل قبول، در طیف گسترده‌ای از صنایع شامل بسته‌بندی، لوازم خانگی، تجهیزات پزشکی، خودروسازی و منسوجات کاربرد دارد. با این حال، وجود برخی محدودیت‌ها از جمله مقاومت مکانیکی نسبتاً پایین، اشتعال‌پذیری بالا و هدایت حرارتی و الکتریکی ضعیف، استفاده از آن را در کاربردهای پیشرفته‌تر با چالش‌هایی مواجه کرده است. برای رفع این نواقص، استفاده از فناوری نانو و افزودن نانوذرات مختلف به ویژه نانولوله‌های کربنی (CNTs) به ماتریس پلی پروپیلن به عنوان راهکاری مؤثر مطرح شده است. CNTها به دلیل ساختار استوانه‌ای، نسبت ابعاد بالا، سطح ویژه زیاد و خواص منحصر به فرد، قادرند به طور چشمگیری خواص فیزیکی، مکانیکی، حرارتی و الکتریکی پلیمر را بهبود دهند. این مقاله مروری با هدف بررسی تأثیر عوامل مختلف از جمله نوع CNT (تک‌دیواره یا چنددیواره)، درصد وزنی بهینه، روش‌های اصلاح سطحی، نحوه پراکندگی و روش‌های فرایند اختلاط بر خواص نهایی نانوکامپوزیت‌های PP/CNT، تدوین شده است. همچنین اثر این عوامل بر ریزساختار، فرایند تبلور، مدول یانگ، استحکام کششی، پایداری ابعادی، رسانایی، مقاومت ضربه‌ای و رفتار رئولوژیکی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که در صورت بهینه‌سازی شرایط، این نانوکامپوزیت‌ها می‌توانند در حوزه‌های پیشرفته‌ای نظیر هوافضا، الکترونیک، پزشکی و خودرو کاربرد مؤثری داشته باشند.

*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:

pedram_manafi@aut.ac.ir

۱ مقدمه

پلیمرها با ویژگی‌هایی همچون سبکی، استحکام مناسب، انعطاف‌پذیری و سهولت فرآوری، به‌عنوان مواد چندمنظوره در صنایع گوناگون کاربرد فراوانی دارند. با این حال، محدودیت‌هایی در خواص مکانیکی آن‌ها وجود دارد که دامنه کاربردها را در برخی حوزه‌های مهندسی خاص، محدود می‌سازد. برای غلبه بر این محدودیت‌ها و دستیابی به ویژگی‌های ارتقایافته، تحقیقات گسترده‌ای در زمینه مهندسی پلیمرها صورت گرفته است.

یکی از رویکردهای مؤثر، آلیاژسازی پلیمری (Polymer Blending) است که با ترکیب پلیمرهای مختلف موادی با خواص تلفیقی و بهبودیافته تولید می‌شوند. با پیشرفت فناوری و افزایش نیاز به مواد با کارایی بالا، توسعه کامپوزیت‌های تقویت‌شده (Reinforced Composites) با استفاده از الیاف یا ذرات ریز مورد توجه قرار گرفت. مواد متداولی نظیر سیلیس، مواد کربنی (مانند دوده کربن) و ذرات فلزی به‌عنوان تقویت‌کننده به کار برده شدند. اما، دستیابی به خواص مطلوب غالباً مستلزم افزودن درصد بالایی از این تقویت‌کننده‌ها بود که این امر منجر به افزایش هزینه و دشواری فرایند تولید می‌شد. برای حل این چالش‌ها، استفاده از نانومواد به‌عنوان رویکردی نوین مطرح شد. با افزودن مقادیر کمتری از نانوذرات، امکان دستیابی به خواص مکانیکی، حرارتی، الکتریکی و حتی زیستی بهبودیافته در ماتریس پلیمری فراهم شد. این نسل جدید از مواد، تحت عنوان نانوکامپوزیت‌های پلیمری (Polymer Nanocomposites)، توجه چشمگیری را به خود جلب کرده‌اند [۱]. نانوذرات متنوعی نظیر نانولوله‌های کربنی (Carbon Nanotubes-CNTs)، گرافن (Graphene) و سایر نانوذرات با پلیمرها ترکیب شده‌اند تا نانوکامپوزیت‌هایی با ویژگی‌های منحصربه‌فرد تولید شوند. این مواد فرصت‌های بی‌نظیری را برای کشف عملکردهای نو و خاص در کاربردهای متنوع صنعتی فراهم می‌کنند [۱]. به‌طور خاص، ترکیب نانولوله‌های کربنی با بسترهای پلیمری مختلف، منجر به تلاش‌های گسترده‌ای در راستای تولید نانوکامپوزیت‌های پلیمری و نانوکامپوزیت‌های پلیمر/الیاف با خواص برتر شده است [۲]. پلیمرهایی نظیر پلی‌اتیلن (Polyethylene)، پلی‌آکریلونیتریل (Polyacrylonitrile)، پلی‌متیل متاکریلات (Polymethyl methacrylate)، پلی‌اتیلن ترفتالات و سایر پلیمرها به‌عنوان ماتریس در این نانوکامپوزیت‌ها به کار رفته‌اند [۳-۴]. افزودن نانولوله‌های کربنی به این پلیمرها، موجب تقویت خواصی چون استحکام کششی، سفتی (مدول یانگ)، دوام، و بهبود رسانایی حرارتی و الکتریکی در مواد حاصل می‌شود. در راستای تحقیقات جاری، پلی‌پروپیلن به‌عنوان پلیمری پرکاربرد

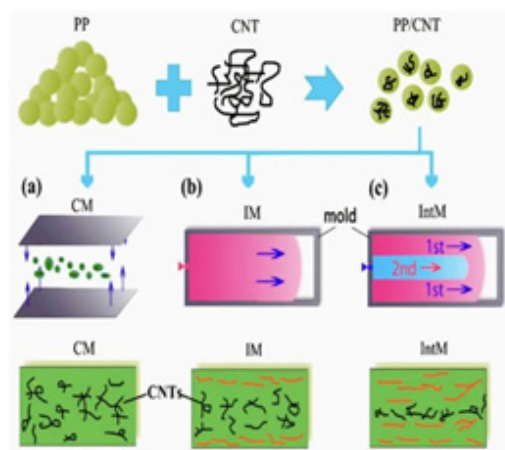
و نانولوله‌های کربنی (CNTs) به‌عنوان تقویت‌کننده نانومقیاس، به‌دلیل تقاضای بالا و کاربردهای گسترده در حوزه‌هایی مانند پزشکی، الکترونیک و صنعت ساخت‌وساز، به‌عنوان موضوعات اصلی مطالعه در این مقاله مروری انتخاب شده‌اند. پژوهشگران به‌طور مداوم در حال آزمایش ترکیب‌های جدیدی از پلیمرها و نانولوله‌های کربنی هستند تا موادی با خواص ویژه برای کاربردهای متنوع صنعتی ایجاد کنند.

پلی‌پروپیلن

پلی‌پروپیلن (PP) گرمانرمی محکم، سخت و بلوری است که از مونومر پروپین (یا پروپیلن) تولید می‌شود. در سال ۱۹۵۱، دانشمندان پال هوگان (Paul Hogan) و رابرت بنکس به‌طور تصادفی در شرکت Phillips Petroleum موفق به کشف این ماده شدند. پس از آن، این شرکت نخستین تولید تجاری پلی‌پروپیلن را در سال ۱۹۵۴ آغاز کرد. این ماده ابتدا با نام PP و سپس با برند "Marlex" به بازار عرضه شد. در سال ۱۹۵۷ کاتالیزورهای Stereospecific توسط کارل زیگلر و جولیو ناتا معرفی شدند که نتیجه تحقیقات آن‌ها منجر به سنتز پلی‌پروپیلن ایزوتاکتیک با ویژگی‌های بسیار بهتر شد. از دهه ۱۹۶۰ به بعد PP به‌دلیل خواص مکانیکی و شیمیایی برجسته‌اش به سرعت محبوبیت یافت و کاربرد آن در زمینه‌هایی نظیر بسته‌بندی، نساجی، خودروسازی و محصولات مصرفی گسترش پیدا کرد. از دهه ۱۹۸۰ بهبودهایی در روش‌های فرآوری مانند قالب‌گیری تزریقی، اکستروژن (Extrusion) و قالب‌گیری بادی (Blown Mouldination) مشاهده شد که باعث شد PP به ماده‌ای چندمنظوره تبدیل شود و تولید اشکال و ساختارهای پیچیده با آن ممکن شود [۵].

ویژگی‌های پلی‌پروپیلن

پلی‌پروپیلن (PP) یکی از پرکاربردترین پلیمرهای گرمانرم در جهان است که به‌دلیل خواص منحصربه‌فرد خود در حوزه‌های گوناگون مورد توجه قرار گرفته است. ساختار مولکولی این پلیمر از مونومرهای پروپیلن تشکیل شده که به‌صورت زنجیره‌ای خطی و بدون انحنای هم متصل هستند. این ساختار باعث شده که پلی‌پروپیلن دارای بلورینگی بالا، مقاومت شیمیایی مناسب، چگالی پایین و استحکام مکانیکی قابل قبول باشد که به آن قابلیت کاربرد در زمینه‌های مختلف مانند بسته‌بندی، لوازم مصرفی، قطعات خودرویی و تجهیزات پزشکی را می‌دهد [۴، ۵]. در دهه ۱۹۹۰، با افزایش ظرفیت‌های بازیافت، قابلیت بازیافت پلی‌پروپیلن به ویژگی مهمی در استفاده گسترده از آن تبدیل شد.



شکل ۱ طرح‌واره روش‌های قالب‌گیری و جهت‌گیری نانولوله‌های کربنی (a)، (b)، (c): قالب‌گیری فشاری (IM)، قالب‌گیری تزریقی متناوب (IntM)، قالب‌گیری تزریقی (CM)

در مطالعه‌ای پلی پروپیلن گرم‌انرم وارد مخلوط‌کن ساخته‌شده توسط (Brabender) شد. پس از ذوب ماتریس پلیمری، CNTs با حالت عملیاتی مشخصی وارد شد. سرعت چرخش ۳۰ دور در دقیقه، دمای محفظه مخلوط‌کن ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد و زمان مخلوط‌سازی ۳۰ دقیقه بود [۹]. داشان و همکارانش تأثیر جهت‌گیری و پراکندگی را بر رسانایی الکتریکی و خواص مکانیکی کامپوزیت CNT/PP اثبات کردند [۱۰]. مواد کامپوزیت با محتوای مختلف CNT با استفاده از اکسترودر دوپیچ مخلوط شدند. سپس سه روش قالب‌گیری برای ایجاد تنش‌های برشی متفاوت مطابق شکل ۱ استفاده شد، از جمله قالب‌گیری فشاری (CM)، قالب‌گیری تزریقی (IM) و قالب‌گیری تزریقی متناوب (IntM) [۱۱].

نقش جهت‌گیری CNT در بهبود خواص ساختاری و بلورینگی کامپوزیت‌های پلی پروپیلن

نویسندگان به تغییرات مختلف در جهت‌گیری مولکولی با افزایش محتوای CNT، بسته به روش انتخابی، اشاره می‌کنند. نتیجه‌گیری شد که جهت‌گیری بالا به ترتیب منجر به استحکام کششی و مدول کشسانی بالا شده و خواص مکانیکی را بهبود می‌بخشد. درعین حال، جهت‌گیری بالا و پراکندگی زیاد CNTs از تشکیل شبکه رسانا جلوگیری می‌کند. تأثیر فراصوت بر ساختار شیمیایی پلی پروپیلن و کامپوزیت‌های آن با محتوای مختلف CNT (۰٪، ۱٪، ۳٪ و ۵٪ وزنی) مورد مطالعه قرار گرفت [۱۱]. کامپوزیت‌ها با استفاده از اکسترودر تک‌پیچ

PP بازیافتی بسیاری از خواص اصلی خود را حفظ می‌کند و به گزینه‌ای مناسب برای کاربردهای سازگار با محیط‌زیست تبدیل شده است. پیشرفت‌های علمی در زمینه پلیمرها در دهه ۲۰۰۰ و ادامه پژوهش‌ها منجر به ابداع انواع و فرمول‌بندی‌های جدید از PP شد که دامنه خواص و کاربردهای آن را افزایش دادند. از دیگر ویژگی‌های برجسته پلی پروپیلن می‌توان به فرایندپذیری آسان، هزینه تولید پایین و پایداری حرارتی خوب اشاره کرد. در سال‌های اخیر، برای افزایش عملکرد این پلیمر، روش‌هایی نظیر کوپلمری‌شدن، افزودن افزودنی‌ها و ساخت نانوکامپوزیت‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۵].

PP همچنین ماده‌ای بسیار منعطف در کاربردهای صنعتی است. به عنوان مثال، در فناوری غشایی، پلی پروپیلن باعث بهبود خواص ضد رسوب و صافش می‌شود. ترکیب آن با نانولوله‌های کربنی (CNT) منجر به افزایش استحکام مکانیکی و محافظت الکترومغناطیسی در کامپوزیت‌ها می‌شود که در ادامه بیشتر با ترکیب پلی پروپیلن و نانولوله‌های کربنی آشنا می‌شویم [۵].

نانولوله‌های کربنی (CNTs)

نانولوله‌های کربنی مجموعه‌ای کامل از خواص را در اختیار دارند که در ساخت کامپوزیت‌های پلیمری استفاده می‌شود. این خواص شامل موارد زیر می‌شوند:

خواص مکانیکی: CNTs به عنوان ماده‌ای با استحکام کششی (تقریباً ۶۰ گیگاپاسکال) و مدول یانگ بالا (تقریباً ۱ تراپاسکال) شناخته می‌شوند. این خواص مکانیکی چشمگیر ناشی از پیوند شیمیایی قوی sp^2 بین اتم‌های کربن تشکیل‌دهنده نانولوله است. محاسبات کوانتومی شیمیایی مدول یانگ، ویژگی‌های جالب توجه‌ای را نشان داده است:

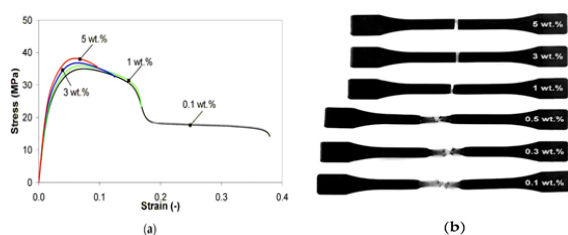
- تأثیر قطر: CNTs با قطر بزرگ‌تر ($E = 1.2$ تراپاسکال) دوام بیشتری نسبت به CNTs با قطر کوچک‌تر

($E = 0.76$ تراپاسکال) دارند.

- تأثیر کایرالیته: CNTs با پیکربندی «armchair» (صندلی دسته‌دار) ($E = 1.2$ تراپاسکال) بادوام‌تر از لوله‌های با همان قطر، اما با پیکربندی «zig-zag» (زیگزاگ) ($E = 0.825$ تراپاسکال) هستند [۶].

- رسانایی حرارتی و الکتریکی

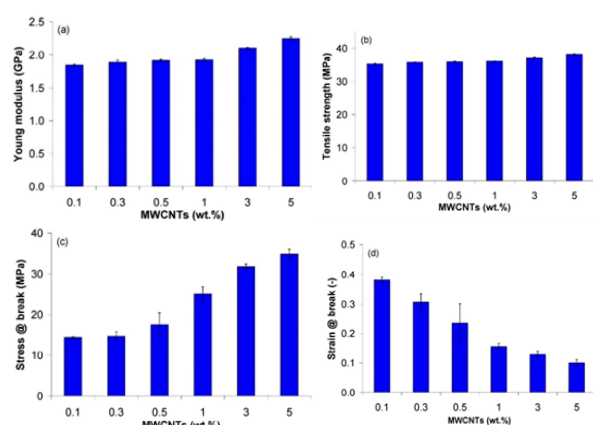
مشکل اصلی در به‌دست‌آوردن مواد کامپوزیت، اطمینان از توزیع یکنواخت نانوپرکننده‌ها در ماتریس پلیمری است. این عامل تا حد زیادی خواص مواد کامپوزیت به‌دست‌آمده را تعیین می‌کند. مطالعات زیادی روش‌هایی را برای پراکندگی ذرات CNT برای ساخت کامپوزیت‌های پلیمری ارائه داده‌اند [۷-۸].



شکل ۲ منحنی‌های تنش-کرنش برای نانوکامپوزیت‌های PP/MWCNTa: (a) در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت کشش ۱۰۰ میلی‌متر بر دقیقه، (b) نمونه‌های قالب‌گیری تزریقی شده پس از انجام آزمون [۱۶].

ترکیبی Cross و Tait می‌توانند به عنوان ابزار پیش‌بینی عملکرد نانوکامپوزیت‌ها در مراحل اولیه طراحی صنعتی مورد استفاده قرار گیرند (شکل ۳).

در پژوهشی دیگری [۱۸، ۱۷]، یوسومیا و همکاران نشان دادند که افزودن ۱/۲ درصد وزنی نانولوله‌های کربنی چند جداره باعث افزایش ۶۲/۸٪ در استحکام کششی و بهبود خواص ضربه‌ای تا ۸۲/۱۴٪ شد. محققان در مطالعه‌ای جامع نشان دادند که افزودن نانولوله‌های کربنی چند دیواره تا ۵ درصد وزنی باعث بهبود هدایت حرارتی (تا ۰/۳۵ وات بر متر کلوین)، مدول کشسانی، استحکام کششی و کاهش انبساط در نقطه شکست می‌شود، بدون اینکه تغییر قابل توجهی در دمای ذوب یا بلورینگی ایجاد کند [۲۰، ۱۹]. از منظر گرانبوی، این نانوکامپوزیت‌ها در شرایط بالا دارای رفتار غیرنیوتنی باقی می‌مانند و برای فرایندهایی مانند اکستروژن مناسبند. همچنین، کاهش حجم مخصوص باعث



شکل ۳ خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های PP/MWCNT: (a) مدول یانگ، (b) استحکام کششی، (c) تنش در نقطه شکست (d) کرنش در نقطه شکست در سرعت کشش ۱۰۰ میلی‌متر بر دقیقه [۲۱].

اکستروژن شده و بلافاصله در مخلوط‌کن استاتیک تحت تابش قرار گرفتند. نتایج نشان داد که تابش فراصوت باعث اکسایش خفیف ساختار پلی‌پروپیلن و کاهش ۱۳ درصدی وزن مولکولی آن شد. در نتیجه تابش فراصوت، افزایش بلورینگی پلی‌پروپیلن نیز مشاهده شد که با اثر هسته‌زایی بهبود یافته نانولوله‌ها توضیح داده می‌شود. در پژوهشی دیگر پلودمن نشان داد که افزودن نانولوله‌های کربنی موجب افزایش دمای بلورینگی و سرعت خنک‌سازی بحرانی می‌شود. با استفاده از این داده‌ها، شاخصی به نام «کارایی هسته‌زایی» معرفی شد که مستقل از دمای بلورینگی عمل می‌کند [۱۲]. در پژوهشی دیگر نیز گزارش دادند آستانه پراکندگی موثر نانولوله‌های کربنی چندجداره در حدود ۰/۵ درصد وزنی است و بالاتر از آن، خواص فیزیکی و پایداری حرارتی پلی‌پروپیلن به‌طور قابل توجهی بهبود می‌یابد [۱۳]. نانولوله‌های تک‌دیواره و چنددیواره دو نوع اصلی از نانولوله‌های کربنی هستند.

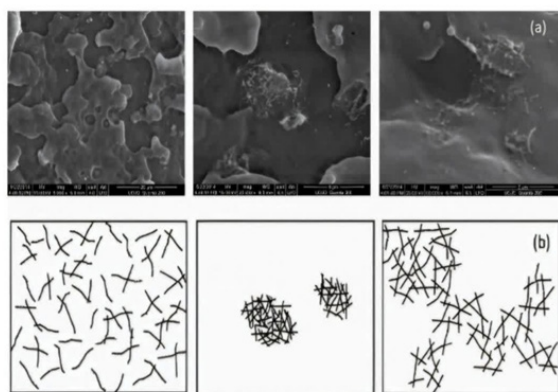
نانولوله‌های کربنی تک‌دیواره خواص بهتری دارند، اما هزینه تولید آن‌ها بسیار بالا (۷۰۰~ دلار/گرم) است. درحالی‌که نانولوله‌های کربنی چندجداره با هزینه‌ای به مراتب پایین‌تر (۱۰~۳۰ دلار/کیلوگرم) قابل تولید بوده و خواص مکانیکی رضایت‌بخشی ارائه می‌دهند [۱۵، ۱۴].

در مطالعه‌ای اثر افزودن نانولوله‌های کربنی چنددیواره (MWCNTs) به ماتریس پلی‌پروپیلن (PP) بر طیفی از خواص کلیدی نانوکامپوزیت شامل خواص فیزیکی (حجم ویژه)، حرارتی (هدایت حرارتی، دمای ذوب و تبلور)، مکانیکی (مدول و استحکام کششی) و رئولوژیکی (گرانروی برشی مذاب) بررسی شده است [۱۶]. برای پشتیبانی از داده‌های تجربی، دو مدل نظری پیشرفته به کار گرفته شده‌اند:

- مدل رئولوژیکی Cross برای پیش‌بینی گرانروی برشی مذاب
- مدل ترمودینامیکی Tait دومرحله‌ای اصلاح‌شده برای پیش‌بینی تغییرات حجم ویژه

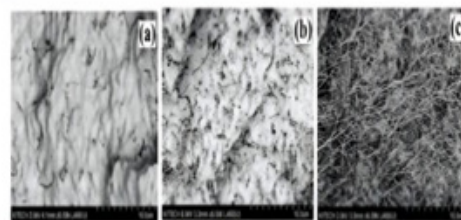
نتایج این بررسی نشان داد (شکل ۲) که افزودن تا ۵ درصد وزنی MWCNT منجر به:

- افزایش خواص مکانیکی (مدول، استحکام کششی)
 - کاهش کشیدگی در نقطه شکست (افزایش شکنندگی)
 - افزایش هدایت حرارتی تا مقدار حداکثری ۰/۳۵ W/m·K در حالت جامد
 - کاهش حجم ویژه (در نتیجه، پایداری ابعادی بهتر پس از فرایند)
 - حفظ رفتار غیرنیوتنی مذاب که برای فرایندهایی مانند قالب‌گیری تزریقی و اکستروژن مناسب است.
- به‌طور کلی، مطالعه نشان می‌دهد که داده‌های تجربی و مدل‌سازی



شکل ۵ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از نانوکامپوزیت شامل ۵ درصد وزنی نانولوله‌های کربنی چنددیواره (a: PP/MWCNT) و نمایش شماتیکی از ساختار MWCNT. [۲۷].

افزودن نانولوله‌های کربنی (CNTs) به ماتریس پلی پروپیلن (PP) موجب بهبود چشمگیر در طیفی گسترده از خواص فیزیکی و عملکردی نانوکامپوزیت‌ها می‌شود. این بهبودها که عمدتاً در بازه ۰/۵ تا ۵ درصد وزنی CNT مشاهده شده‌اند، شامل افزایش مدول ینگ، استحکام کششی، رسانایی حرارتی و پایداری ابعادی بوده و در عین حال فرایندپذیری مطلوب پلی پروپیلن را نیز حفظ می‌کنند. با این حال، دستیابی به عملکرد بهینه در نانوکامپوزیت‌های PP/CNT مستلزم کنترل دقیق بر متغیرهای متعددی است. از جمله این عوامل می‌توان به نوع نانولوله (تک‌دیواره یا چنددیواره)، درصد وزنی مناسب، روش‌های توزیع و اصلاح سطحی و همچنین فناوری‌های فراوری مانند اکستروژن دوپیچه، قالب‌گیری تزریقی و اعمال تابش فراصوت اشاره کرد. به‌ویژه، یکنواختی پراکندگی و جهت‌گیری مطلوب CNTها درون ماتریس پلیمری نقش تعیین‌کننده‌ای در ارتقای خواص نهایی ایفا می‌کند. در نهایت، نانوکامپوزیت‌های مبتنی بر پلی پروپیلن و نانولوله‌های کربنی به‌واسطه خواص چندمنظوره و قابلیت تنظیم دقیق ساختار، گزینه‌ای مستعد برای کاربرد در حوزه‌های پیشرفته‌ای نظیر خودروسازی، الکترونیک، هوافضا و تجهیزات زیست‌پزشکی به‌شمار می‌آیند. استمرار پژوهش‌ها در زمینه بهینه‌سازی روش‌های پراکندگی، اصلاحات سطحی هدفمند و توسعه فناوری‌های نوین فرایندی، نقشی کلیدی در ارتقای عملکرد و گسترش کاربردهای صنعتی این دسته از مواد خواهد داشت [۲۸، ۲۹، ۳۰].



شکل ۴ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از کامپوزیت‌های PP/SWCNT با مقادیر مختلف نانولوله‌های کربنی تک‌دیواره (a: ۰/۲۹ درصد وزنی، b: ۱/۲۸ درصد وزنی، c: ۶/۵۶ درصد وزنی) [۲۲].

بهبود پایداری ابعادی در حالت مذاب می‌شود. در پژوهشی دیگر نیز گزارش شده آستانه پراکندگی موثر نانولوله‌های کربنی چند جداره در حدود ۰/۵ درصد وزنی است و بالاتر از آن، خواص فیزیکی و پایداری حرارتی پلی پروپیلن به‌طور قابل توجهی بهبود می‌یابد [۲۳، ۲۴]. از منظر گرانی، این نانوکامپوزیت‌ها در شرایط بالا دارای رفتار غیرنیوتنی باقی می‌مانند و برای فرایندهایی مانند اکستروژن مناسبند. همچنین، کاهش حجم مخصوص باعث بهبود پایداری ابعادی در حالت مذاب می‌شود. نانولوله‌های کربنی به‌عنوان ذرات نانومقیاس در تولید نانوکامپوزیت‌های پلیمری به‌ویژه بر پایه پلی پروپیلن، جایگاه ویژه‌ای یافته‌اند.

یتگین به بررسی مطالعات مختلف پیرامون نحوه پراکندگی نانولوله‌های کربن مطابق شکل ۴ در ماتریس‌های پلیمری، تأثیر آن‌ها بر خواص مکانیکی، حرارتی، گرانی و کشسان مطابق شکل ۵ و هدایت حرارتی کامپوزیت‌های پلی پروپیلن پرداخته و برخی مدل‌سازی‌های نظری مرتبط را مرور می‌کند. تحقیقات متعددی نشان داده‌اند که نانولوله‌های کربنی نقشی کلیدی در تقویت خواص نانوکامپوزیت‌های پلیمری ایفا می‌کنند و در صنایع گوناگونی همچون خودروسازی، هوافضا، زیست‌پزشکی و الکترونیک مورد استفاده‌اند [۲۵، ۲۶]. مطالعات متعددی به بررسی تأثیر نانولوله‌های کربنی چندجداره (MWCNTs) بر خواص مکانیکی، حرارتی و رئولوژیکی نانوکامپوزیت‌های پلیمری پرداخته‌اند.

نتیجه‌گیری

یافته‌های حاصل از مرور نظام‌مند منابع علمی نشان می‌دهد که

مراجع

- Choudhary, V.; Gupta, A. Polymer/Carbon Nanotube Nanocomposites. Carbon Nanotube. Polym. Nanocomposite, 65–90, 2011.
- Soni, S.K.; Thomas, B.; Thomas, S.B.; Tile, P.S.; Sakharwade, S.G. Carbon Nanotubes as Exceptional Nanofillers in Polymer and Polymer/Fiber Nanocomposites: An Extensive Review. Mater. Today Commun. 37, 107358, 2023.
- Ghanbari, A.; Heuzey, M.-C.; Carreau, P.J. Polyethylene Terephthalate/Organoclay Nanocomposites: Improvement of Morphology and Viscoelastic Properties by Using a Chain-Extender. Appl. Clay Sci. 225, 106551, 2022.
- Meng, Z.; Lu, S.; Zhang, D.; Liu, Q.; Chen, X.; Liu, W.; Guo, C.; Liu, Z.; Zhong, W.; Ke, Y. Grafting Macromolecular Chains on the Surface of Graphene Oxide Through Crosslinker for Antistatic and Thermally Stable Polyethylene Terephthalate Nanocomposites, RSC Adv. 12, 33329–3339, 2022.
- Hossain, M. T., Shahid, M. A., Mahmud, N., Habib, A., Rana, M. M., Khan, S. A., & Hossain, M. D. Research and application of polypropylene: a review. Discover Nano, 19(1), 2, 2024]
- Zaporotskova, I.V. Uglerodnye i Neuglerodnye Nanomaterialy i Kompozitnye Struktury na Ikh Osnove: Stroenie i Elektronnnye Svoistva [Carbon and Non-Carbon Nanotubes and Composite Structures on Their Basis: Structure and Electronic Properties]; Izd-vo VolGU: Volgograd, Russia, 490, 2009.
- Kim, G.M.; Kil, T.; Lee, H.K. A Novel Physicomechanical Approach to Dispersion of Carbon Nanotubes in Polypropylene Composites. Compos. Struct. 258, 113377, 2021.
- Elbakyan, L.; Zaporotskova, I. Composite Nanomaterials Based on Polymethylmethacrylate Doped with Carbon Nanotubes and Nanoparticles: A Review. Polymers, 16, 1242, 2024.
- Sahli, M.L.; Barriere, T.; Roizard, X.; Assoul, M. Investigating Mechanical, Thermal and Rheological Properties of Polypropylene/Carbon Nanotubes Composites. Microsyst. Technol. 26, 3023–3027, 2020.
- Mi, D.; Zhao, Z.; Bai, H. Effects of Orientation and Dispersion on Electrical Conductivity and Mechanical Properties of Carbon Nanotube/Polypropylene Composite. Polymers, 15, 2370, 2023.
- Mi, D.; Zhao, Z.; Bai, H. Effects of Orientation and Dispersion on Electrical Conductivity and Mechanical Properties of Carbon Nanotube/Polypropylene Composite. Polymers, 15, 2370, 2023.
- Plueddemann, E.P. Silane Coupling Agents, 2nd ed.; Plenum Press: New York, NY, USA, 1991.
- Su X, Wang R, Li X, et al. A Comparative Study of Polymer Nanocomposites Containing Multiwalled Carbon Nanotubes and Graphene Nanoplatelets. Nano Mater Sci. 4(3):185-204, 2022.
- Su X, Wang R, Li X, et al. A Comparative study of Polymer Nanocomposites Containing Multiwalled Carbon Nanotubes and Graphene Nanoplatelets. Nano Mater Sci. 4(3):185-204, 2022.
- Coppola, B.; Di Maio, L.; Incarnato, L.; Tulliani, J.M. Preparation and Characterization of Polypropylene/Carbon Nanotubes (PP/CNTs) Nanocomposites as Potential Strain Gauges for Structural Health Monitoring. Nanomaterials, 10, 814, 2020.
- Tudose, I.V.; Mouratis, K.; Ionescu, O.N.; Romanitan, C.; Pachiu, C.; Tutunaru-Brincoveanu, O.; Sucnea, M.P.; Koudoumas, E. Comparative Study of Graphene Nanoplatelets and Multiwalled Carbon Nanotubes-Polypropylene Composite Materials for Electromagnetic Shielding. Nanomaterials, 12, 2411, 2022.
- Kaushal, A.; Singh, V. Electromagnetic Interference Shielding Response of Multiwall Carbon Nanotube/Polypropylene Nanocomposites Prepared Via Melt Processing Technique. Polym. Compos. 42, 1148–1154, 2021.
- Yetgin SH. Effect of Multi Walled Carbon Nanotube on Mechanical, Thermal and Rheological Properties of Polypropylene. J Mater Process Technol. (5):4725-4735, 2019.
- Mi, D.; Zhao, Z.; Bai, H. Effects of Orientation and Dispersion on Electrical Conductivity and Mechanical Properties of Carbon Nanotube/Polypropylene Composite. Polymers, 15, 2370, 2023.
- Elbakyan, L.; Zaporotskova, I.; Hayrapetyan, D. Nanocomposite Material Based on Polyvinyl Alcohol Modified with Carbon Nanotubes: Mechanism of Formation and Electronic Energy Structure. J. Compos. Sci. 8, 54, 2024.
- Coppola, B.; Di Maio, L.; Incarnato, L.; Tulliani, J.M. Preparation and Characterization of Polypropylene/Carbon Nanotubes (PP/CNTs) Nanocomposites as Potential Strain Gauges for Structural Health Monitoring. Nanomaterials, 10, 814, 2020.
- Kang, D.; Hwang, S.; Jung, B.; Shim, J. Characterizations of Polypropylene/SingleWalled Carbon Nanotube Nanocomposites Prepared by the Novel Melt Processing Technique with a Controlled Residence Time. Processes, 9, 1395, 2021.
- Martínez Colunga, J.G.; Cruz Delgado, V.J.; Sánchez Valdés, S.; Mata Padilla, J.M.; Valle, L.F.R.D.; Espinoza

- Martínez, A.B.; Benavides, R.; Ramírez Vargas, E.; Rodríguez Gonzalez, J.A.; Lara Sanchez, J.F.; et al. Application of Ultrasonic Radiation for the Development of Polypropylene/ Multi Walled Carbon Nanotubes Nanocomposites and its Effect on the PP Chemical Degradation. *Iran. Polym. J.* 33, 1751–1764, 2024
24. Zacccone, M.; Armentano, I.; Cesano, F.; Scarano, D.; Frache, A.; Torre, L.; Monti, M. Effect of Injection Molding Conditions on Crystalline Structure and Electrical Resistivity of PP/MWCNT Nanocomposites. *Polymers*, 12, 1685, 2020.
25. Yetgin SH. Effect of Multi Walled Carbon Nanotube on Mechanical, Thermal and Rheological Properties of Polypropylene. *J Mater Process Technol.* (5):4725–4735, 2019.
26. Yetgin SH. Effect of Multi Walled Carbon Nanotube on Mechanical, Thermal and Rheological Properties of Polypropylene. *J Mater Process Technol.* (5):4725–4735, 2019.
27. Kaushal, A.; Singh, V. Excellent Electromagnetic Interference Shielding Performance of Polypropylene/Carbon Fiber/ Multiwalled Carbon Nanotube Nanocomposites. *POLYM. Compos.* 43, 3708–3715, 2022.
28. Yosomiya, R.; Morimoto, K.; Nakajima, A.; Ikada, Y.; Suzuki, T.; Dharan, C.K.H. Adhesion and Bonding in Composites. *J. Eng. Ind.* 113, 117, 1991.
29. Stanciu, N.V.; Stan, F.; Sandu, I.L.; Fetecau, C.; Turcanu, A.M. Thermal, Rheological, Mechanical, and Electrical Properties of Polypropylene/Multi Walled Carbon Nanotube Nanocomposites. *Polymers*, 12, 187, 2021.
30. Kang, D.; Hwang, S.; Jung, B.; Shim, J. Characterizations of Polypropylene/Single Walled Carbon Nanotube Nanocomposites Prepared by the Novel Melt Processing Technique with a Controlled Residence Time. *Processes*, 9, 1395, 2021.

