Available online: www.jnmr.ir/papers
نانومواد: ۱۹:۶ (۱۳۹۳) ۲۰۲-۱۹۵

ساخت و ارزیابی نانوالیاف کامپوزیتی حاوی نانولوله‌های کربنی و نانوذرات اکسید روی با کمترین میزان عبور امواج فرابنفش

عباس بشارتی سیدانی* و جواد میرزایی

دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۳/۰۳/۱۲، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۳/۰۵/۱۱، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۳/۰۶/۱۲

چکیده

در این پژوهش ابتدا لایه‌های نانوالیاف کامپوزیتی پلی‌آکریلونیتریل حاوی درصدهای مختلفی از نانولوله‌های کربنی چند دیواره و نانوذرات اکسید روی به روش الکتروریسی تهیه شدند. با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی، ساختار سطحی نانوالیاف مطالعه شد. در ادامه با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر میزان عبور امواج فرابنفش از نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل نشان داد که میزان عبور امواج فرابنفش در نمونه‌ها با افزایش درصد نانولوله‌های کربنی و نانوذرات اکسید روی به شدت کاهش یافته و نانوالیاف کامپوزیتی حاوی نانولوله‌های کربنی نسبت به نمونه‌های حاوی نانوذرات اکسید روی محافظت بیشتری در برابر امواج فرابنفش ایجاد می‌کنند.

***واژه‌های کلیدی*: امواج فرابنفش، نانوذرات اکسید روی، نانولوله‌های کربنی، نانوالیاف کامپوزیتی، الکتروریسی.**

۱- مقدمه

تابش فرابنفش محدوده طول موج‌های ۳۸۰-۱۰۰ nm را شامل می‌شود که به سه دسته تقسیم می‌شوند: تابش فرابنفش C (۲۸۰-۱۰۰ nm)، تابش فرابنفش B (۳۱۵-۲۸۰ nm) و تابش فرابنفش A (۳۸۰-۳۱۵ nm) [۱]. تابش فرابنفش UVC خورشید پس از آنکه در ارتفاع ۵۰ کیلومتری به سقف استراتوسفر رسید توسط مولکول‌های اکسیژن تماما جذب شده و در اثر این جذب، مولکول اکسیژن به دو اتم اکسیژن شکسته می‌شود و مقداری گرما نیز آزاد می‌شود و اتم‌های اکسیژن تولید شده با یک مولکول O_2 واکنش داده و مولکول ازن در این ارتفاع تولید می‌شود [۲]. خوشبختانه لایه ازن شدت تابش فرابنفش UVB وارد شده به جو را نیز کاهش می‌دهد. بنابراین UVC اصلا وارد جو زمین نمی‌شود، UVB به میزان کمی وارد شده و UVA از همه بیشتر به جو زمین وارد می‌شود [۲]. بنابراین تهیه پوشش‌هایی که مانع عبور امواج فرابنفش شود اهمیت و ضرورت این تحقیق را نشان می‌دهد. بطور کلی مواد مسدود کننده امواج فرابنفش به دو دسته تقسیم‌بندی می‌شوند: مواد آلی و مواد غیرآلی. این مواد امواج فرابنفش را یا انعکاس می‌دهند یا جذب می‌کنند و یا اینکه تلفیقی از این دو پدیده را انجام می‌دهند [۳،۴]. در مواد آلی سازوکار غالب بر جذب و در مواد غیرآلی سازوکار غالب بر انعکاس یا جذب می‌باشد.

* **عهده‌دار مکاتبات:** عباس بشارتی سیدانی
نشانی: تهران، لویزان، دانشگاه صنعتی مالک اشتر
تلفن: ۲۲۹۷۰۲۲۴-۰۲۱، **دورنگار:** ۲۲۹۷۰۲۲۴-۰۲۱، **پست الکترونیکی:** abbasbesharati@yahoo.com

بدلیل اینکه مواد آلی امواج فرابنفش را جذب می‌کنند بیشتر به عنوان جاذب‌های امواج فرابنفش شناخته می‌شوند. بازه جذب این مواد در طیف امواج فرابنفش محدود است. این مواد معمولا به دو دسته کلی جاذب‌های UVA و UVB تقسیم‌بندی می‌شوند. از کاربردهای این مواد می‌توان به استفاده در مواد آرایشی، نساجی و کامپوزیت‌ها به منظور پایداری نوری و ممانعت از تخریب ساختاری و نیز در رنگ‌ها به منظور افزایش ثبات رنگی و غیره اشاره نمود [۵]. بدلیل محدود بودن بازه جذب، عدم پایداری در برابر مواد شیمیایی و نور از این مواد استفاده کمتری می‌شود. مواد معدنی عمدتا بر پایه اکسیدهای فلزی و نانولوله‌های کربنی هستند. از خصوصیات کلی این مواد می‌توان به پایداری در برابر عوامل شیمیایی، پایداری در برابر پرتوهای نور، غیرسمی بودن، عدم واکنش‌پذیری با مواد دیگر و سازگاری با پوست را نام برد [۸-۶]. متداول‌ترین ترکیباتی که در حوزه جذب و یا انعکاس امواج فرابنفش استفاده می‌شوند عبارتند از: MgO، ZrO_2، CeO_2، SiO_2، Al_2O_3، ZnO، TiO_2 و غیره. البته نانولوله‌های کربنی نیز که به دو دسته نانولوله‌های کربنی چند دیواره و نانولوله‌های کربنی تک دیواره تقسیم‌بندی می‌شوند نیز جزء موادی هستند که مانع عبور بیشتر امواج فرابنفش از طریق انعکاس می‌شوند. در صورتیکه مواد معدنی در مقیاس نانو بکار روند به علت افزایش نسبت سطح به حجم و افزایش فعالیت فوتوکاتالیستی میزان کارایی آنها بهبود می‌یابد (منظور از فوتوکاتالیست ماده‌ای است که سرعت واکنش شیمیایی را با استفاده از تابش نور تغییر می‌دهد). نانوذرات اکسید روی دارای نوار گاف پهن در حدود ۳/۳۷ الکترون-ولت، معادل لبه جذب (منظور از لبه جذب، بیشترین میزان طول موجی از نور است که در آن تهییج الکترون صورت می‌گیرد) ۳۶۸ نانومتر است. به همین علت از عبور امواج فرابنفش تا حد زیادی جلوگیری می‌کند [۹]. نانولوله‌های کربنی بدلیل داشتن رسانایی الکتریکی بالا، خاصیت نشر میدانی، گپ انرژی بالا (در حالت نیمه رسانا) و غیره از مواد پرکاربرد در زمینه محافظت در فرابنفش می‌باشند [۱۰]. تهیه نانوالیاف حاوی نانولوله‌های کربنی و نانوذرات با توجه به خواص منحصربفرد آنها از قبیل سطح مخصوص و انعطاف‌پذیری بسیار بالا از اهمیت خاصی برخوردار است. با افزایش درصد خیلی کمی نانولوله کربنی می‌توان باعث ایجاد تغییرات قابل توجهی در خصوصیات نانوالیاف پلیمری شد [۱۱]. امروزه نسل جدید محافظ‌های امواج فرابنفش، بر پایه نانوالیاف هستند. جهت‌گیری بیشتر تحقیقات بر روی نانوالیاف کامپوزیتی بر پایه نانوذرات اکسید روی و نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم بوده است. از جمله این تحقیقات می‌توان به ساخت نانوالیاف کامپوزیتی پلی‌اورتان/اکسید روی حاوی ۱ و ۲ درصد از نانوذرات اکسید روی و کاهش میزان عبور امواج فرابنفش به کمتر از ۲۰ درصد [۱۲]، ساخت نانوالیاف کامپوزیتی نایلون ۶/دی‌اکسید تیتانیوم حاوی ۱، ۵ و ۱۰ درصد از نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم و کاهش شدید میزان عبور امواج فرابنفش با افزایش غلظت نانوذرات [۱۳] و ساخت نانوالیاف پلی‌اکریلونیتریل لایه‌نشانی شده با دی‌اکسید تیتانیوم و کاهش میزان عبور امواج فرابنفش به حدود ۰/۱ درصد با افزایش وزن نانوذرات تا ۶ گرم بر مترمربع [۱۴] اشاره نمود. تاکنون تأثیر افزایش میزان غلظت نانوذرات اکسید روی در داخل نانوالیاف تا میزان ۱۰ درصد بر روی میزان کاهش عبور امواج فرابنفش مورد مطالعه قرار نگرفته است. از طرفی هر چند نانوالیاف کامپوزیتی پلی‌آکریلونیتریل/نانولوله‌های کربنی چند دیواره تا درصدهای وزنی بالایی از نانولوله‌های کربنی تولید شده [۱۵] اما در هیچ یک از مطالعات انجام شده میزان عبور امواج فرابنفش از لایه نانوالیاف مورد مطالعه قرار نگرفته است. از این‌رو در پژوهش حاضر نانوالیاف کامپوزیتی پلی‌آکریلونیتریل/نانولوله‌های کربنی و پلی‌آکریلونیتریل/ نانوذرات اکسید روی تا ۱۰ درصد وزنی از پرکننده‌های ذکر شده به روش الکتروریسی تولید و خواص مربوط به ساختار، میزان عبور امواج فرابنفش نمونه‌ها مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت.

۲- فعالیت‌های تجربی

۲-۱- مواد و دستگاه‌ها

از پودر پلی‌آکریلونیتریل (PAN) شرکت پلی‌اکریل اصفهان به عنوان پلیمر در تولید نانوالیاف استفاده شد. نانوذرات اکسید روی با قطر ۳۰-۱۰ نانومتر، درصد خلوص ۹۹٪ از

شرکت نانوثانی مشهد تهیه شد. نانولوله‌های کربنی چند دیواره (MWNT) با خلوص ۹۵٪، قطر ۸ نانومتر، طول ۳۰ میکرومتر از شرکت نوترینو تهران تهیه شد.

از N، N-دی‌متیل فرمامید (DMF) شرکت مرک آلمان به عنوان حلال پلیمر مصرفی استفاده گردید. از پلی‌وینیل پیرولیدون (PVP) شرکت آلدریچ برای بهبود دیسپرسیون نانولوله‌های کربنی در حلال DMF استفاده گردید.

دستگاه فراصوت پروبی مدل UP200 ساخت شرکت Hielscher آلمان دارای توان کاری ۲۰۰ وات و فرکانس ۲۴ کیلوهرتز برای دیسپرس کردن MWNT در حلال DMF استفاده گردید. برای تولید نانوالیاف از دستگاه الکتروریسی با جمع کننده دوار استفاده شد. برای تولید نانوالیاف در تمام نمونه‌ها از نرخ تغذیه ۰/۲ میلی‌لیتر بر ساعت، سرعت دورانی جمع کننده ۱۰۰ دور بر دقیقه، ولتاژ اعمالی ۱۶ کیلوولت، فاصله نوک سوزن تا جمع کننده چرخان ۱۸ سانتی‌متر و سرنگ ۱ میلی‌لیتر با سوزن G22 (طول سوزن ۳۴ میلی‌متر، قطر داخلی سوزن ۰/۴ میلی‌متر و قطر خارجی سوزن ۰/۷ میلی‌متر) استفاده گردید. تصاویر SEM لایه‌های نانوالیاف با استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل XL-30 ساخت شرکت فیلیپس هلند گرفته شد. طیف عبوری نمونه‌ها در ناحیه فرابنفش توسط دستگاه اسپکتروفوتومتر مدل Lambda 950 ساخت شرکت پرکین المر آمریکا گرفته شد. برای بدست آوردن قطر نانوالیاف از هر عکس SEM قطر ۱۰۰ لیف مختلف توسط نرم‌افزار Image J اندازه‌گیری و به کمک آن میانگین، انحراف معیار و توزیع قطری نانوالیاف با استفاده از نرم‌افزار SPSS17 محاسبه شد.

۲-۲- آزمایش‌ها

برای تهیه دیسپرسیون نانولوله‌های کربنی در حلال DMF ابتدا ۱۰۰ میلی‌گرم پلی‌وینیل پیرولیدون در ۱۰ میلی‌لیتر حلال DMF حل شد و سپس مقدار مشخصی از MWNT (مطابق جدول ۱) به محلول حاصل اضافه گردید. نمونه به مدت ۴۰ دقیقه توسط پروب دستگاه التراسونیک مرتعش گردید. علت استفاده از پوشش دهنده پلیمری PVP، پخش شوندگی بهتر MWNT در حلال DMF می‌باشد که غلظت ۱ ٪w/w آن در حلال DMF به عنوان غلظت بهینه انتخاب گردید. برای تهیه دیسپرسیون نانولوله‌های کربنی در محلول پلیمری، ۱۲۰۰ میلی‌گرم پودر پلی‌آکریلونیتریل به دیسپرسیون نانولوله‌های کربنی (MWNT در حلال DMF) بدست آمده در مرحله قبل اضافه شده و سپس این مخلوط به مدت ۲۴ ساعت بر روی همزن مغناطیسی در دمای ۲۵ °C با دور ۱۰۰ rpm همزده شد. بدین ترتیب در مجموع ۵ دیسپرسیون نانولوله‌های کربنی در محلول پلیمری PAN برای فرآیند الکتروریسی مطابق مقادیر جدول ۱ تهیه گردید.

جدول ۱: نسبت‌های وزنی نانولوله‌های کربنی برای تولید نانوالیاف کامپوزیتی PAN/MWNT.

نمونه	در ml ۱۰ حلال DMF			نسبت وزنی MWNT به نانوالیاف (٪w/w)
	MWNT (mg)	PVP (mg)	PAN (mg)	
MWNT-0	صفر	۱۰۰	۱۲۰۰	صفر
MWNT-1	۱۳	۱۰۰	۱۲۰۰	۱
MWNT-2	۲۶	۱۰۰	۱۲۰۰	۲
MWNT-5	۶۸	۱۰۰	۱۲۰۰	۵
MWNT-10	۱۴۳	۱۰۰	۱۲۰۰	۱۰

برای تهیه مخلوط‌های دیسپرسیونی حاوی نانوذرات اکسید روی ابتدا ۱۲۰۰ میلی‌گرم پودر پلی‌آکریلونیتریل به ۱۰ میلی‌لیتر حلال DMF اضافه شده و به مدت ۲۴ ساعت بر روی همزن مغناطیسی با دور ۱۰۰ rpm همزده شد تا اینکه PAN در حلال DMF حل شده و محلول پلیمری حاصل شود. سپس مقادیر مشخصی از پودر ZnO مطابق جدول ۲ به محلول‌های پلیمری آماده شده در مرحله قبل اضافه گردید. محلول‌های پلیمری حاوی نانوذرات اکسید روی به مدت ۲۴ ساعت بر روی همزن مغناطیسی با دور ۱۰۰ rpm همزده شد تا اینکه پودر ZnO در محلول پلیمری دیسپرس شود.

مخلوط‌های دیسپرسیونی تحت شرایط ولتاژ ۱۶ kV، فاصله ۱۸ cm و نرخ تغذیه ۰/۲ ml/h الکتروریسی شدند. پس از انجام فرآیند الکتروریسی لایه‌های بدست آمده ابتدا از سطح زیرلایه آلومینیومی جدا شده و سپس میزان عبور

امـواج فـرابنفش از ایـن لایـه‌هـا توسـط دسـتگاه اسپکتروفوتومتر اندازه‌گیری شد.

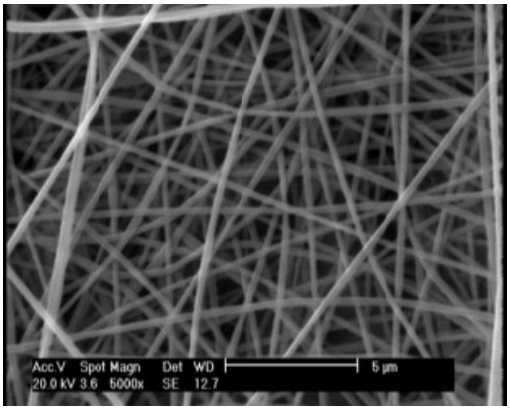
جدول ۲: نسبت‌های وزنی نانوذرات اکسید روی برای تولید نانوالیاف کامپوزیتی PAN/ZnO.

نمونه	در ۱۰ ml حلال DMF		نسبت‌های وزنی ZnO به نانوالیاف (٪w/w)
	ZnO (mg)	PAN (mg)	
ZnO-0	صفر	۱۲۰۰	صفر
ZnO-1	۱۲	۱۲۰۰	۱
ZnO-2	۲۴	۱۲۰۰	۲
ZnO-5	۶۳	۱۲۰۰	۵
ZnO-10	۱۳۲	۱۲۰۰	۱۰

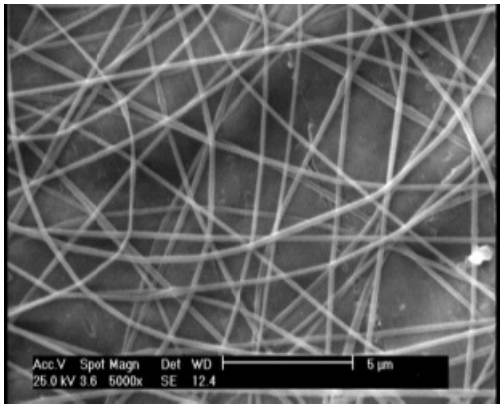
۳- نتایج و بحث

۳-۱- ساختار سطحی نانوالیاف

برای مشاهده آرایش یافتگی، ساختار سطحی و نیز انـدازه قطر نانوالیاف از نمونـه‌هـای بدسـت آمـده تصـاویر SEM گرفته شد. در شکل ۱ تصاویر SEM مربـوط بـه نانوالیـاف خالص و نانوالیاف حاوی ۱۰ درصد وزنـی MWNT نشـان داده شده اسـت. همـانطور کـه مشـاهده مـی‌شـود سـطح نانوالیـاف بسـیار صـاف و بـدون بیـرون‌زدگـی نانولولـه‌هـا می‌باشد که نشان دهنده پخش خوب نانولوله‌هـای کربنـی در داخل محلول پلیمری، بدلیل استفاده از پوشش‌دهنـده پلیمری پلی‌وینیل پیرولیـدون (PVP)، دسـتگاه فراصـوت پروبی و شرایط مطلوب الکتروریسی می‌باشد. با توجـه بـه تصـاویر SEM بدسـت آمـده بـرای نانوالیـاف کـامپوزیتی PAN/MWNT و محاسـبه میـانگین قطـر ایـن نانوالیـاف توسط نرم‌افزار، مشاهده مـی‌شـود کـه بـا افـزایش مقـدار MWNT از صفر تا ۱۰ درصد در نانوالیاف کامپوزیتی، قطر نانوالیاف دارای یک روند کاهشی به صـورتیکه در شـکل ۲ نشان داده شده است، می‌باشد. این پدیده را می‌توان از دو دیـدگاه تفسـیر نمـود. از دیـدگاه اول، بـا افـزایش درصـد نانولوله‌های کربنی در محلول پلیمـری هـدایت الکتریکـی محلول افزایش می‌یابد. با افزایش هدایت الکتریکی محلول الکتروریسی، قطر نانوالیاف تولیدی بـه علـت افـزایش بـار سطحی، میزان نازک شدن لیف برای غلبه بر ایـن موضـوع افزایش می‌یابد که این امـر باعـث کـاهش قطـر نانوالیـاف حاصـله خواهـد شـد. از دیـدگاه دوم، بـا افـزایش غلظـت نانولوله‌ها در درون محلول الکتروریسی، ویسکوزیته کاهش می‌یابد.

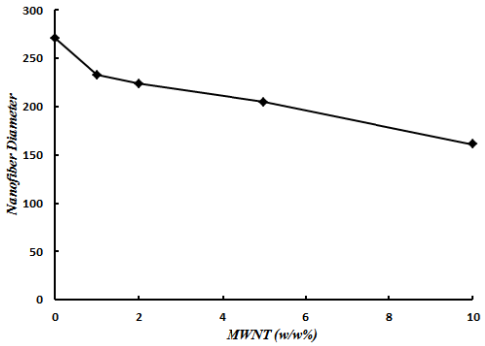


(الف)



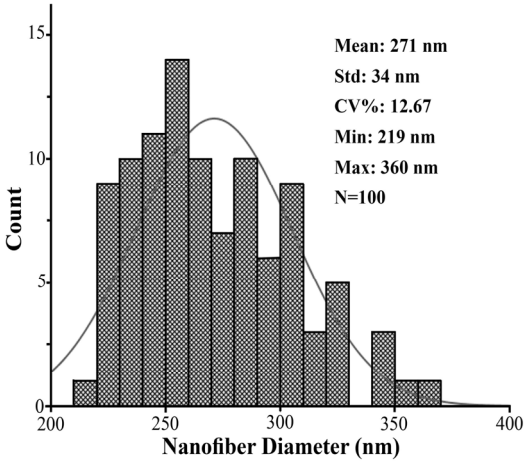
(ب)

شکل ۱: تصاویر SEM، الف) نانوالیاف خالص و ب) نانوالیاف کامپوزیتی PAN/MWNT حاوی ۱۰ درصد وزنی MWNT.

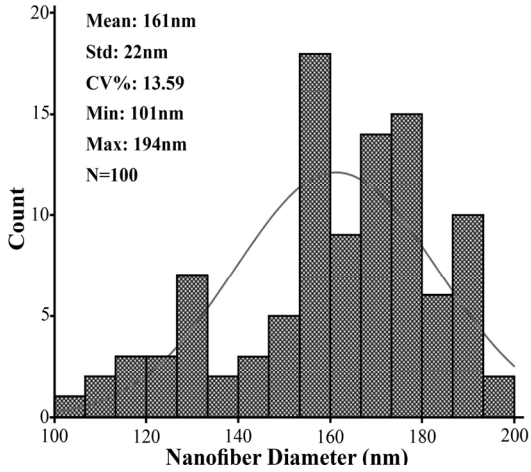


شکل ۲: نمودار قطر نانوالیاف کامپوزیتی PAN/MWNT بر حسب افزایش مقدار MWNT.

با افزایش هدایت الکتریکی محلول از یک طرف و کاهش ویسکوزیته محلول از طرف دیگر، قطر نانوالیاف کامپوزیتی تولیدی با افزایش میزان نانولوله‌ها کاهش می‌یابد [۱۶]. شکل ۳ توزیع قطری نانوالیاف را در دو حالت خالص و کامپوزیتی (PAN/MWNT) حاوی ۱۰ درصد وزنی MWNT را نشان می‌دهد.



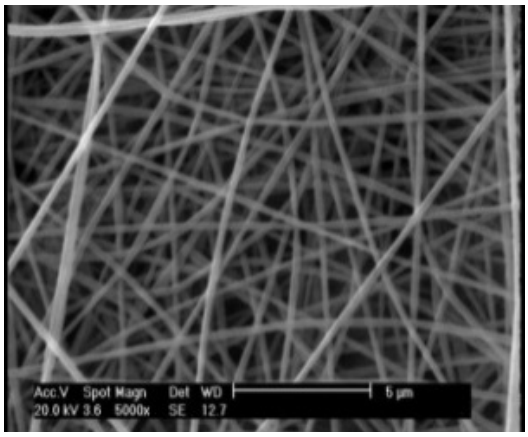
(الف)



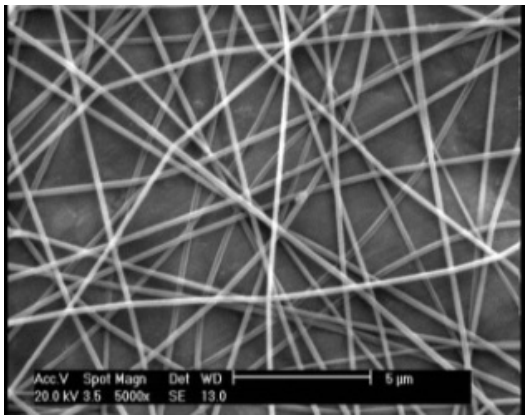
(ب)

شکل ۳: تصاویر مربوط به توزیع قطری نانوالیاف، الف) نانوالیاف خالص و ب) نانوالیاف کامپوزیتی PAN/MWNT حاوی ۱۰ درصد وزنی از نانولوله‌های کربنی.

در شکل ۴ تصاویر SEM مربوط به نانوالیاف خالص و نانوالیاف حاوی ۱۰ درصد وزنی ZnO نشان داده شده است. با توجه به تصاویر سطح نانوالیاف بسیار صاف، بدون بیرون‌زدگی و فاقد دانه تسبیحی می‌باشد که نشان دهنده پخش خوب نانوذرات اکسید روی در داخل محلول پلیمری و شرایط مطلوب الکتروریسی می‌باشد.



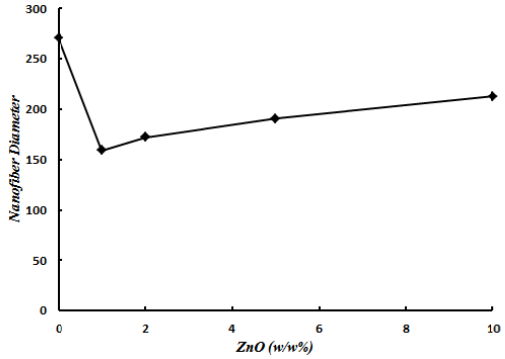
(الف)



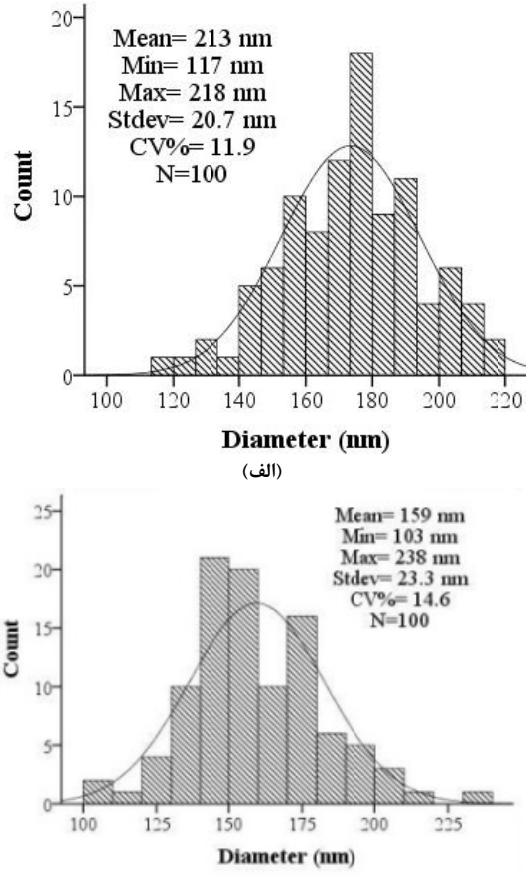
(ب)

شکل ۴: تصاویر SEM، الف) نانوالیاف خالص و ب) نانوالیاف کامپوزیتی PAN/ZnO حاوی ۱۰ درصد وزنی ZnO.

با توجه به تصاویر SEM بدست آمده برای نانوالیاف کامپوزیتی PAN/ZnO و محاسبه میانگین قطر این نانوالیاف توسط نرم‌افزار، مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار ZnO از صفر تا ۱۰ درصد در نانوالیاف کامپوزیتی، ابتدا تا مقدار ۱ درصد ZnO، قطر نانوالیاف کاهش یافته و سپس افزایش می‌یابد. علت این پدیده را می‌توان به نفوذ نانوذرات در بین زنجیرهای پلیمری و نحوه حرکت و درگیری زنجیرهای پلیمری در کنار هم نسبت داد (شکل ۵). شکل ۶ توزیع قطری نانوالیاف را در دو حالت خالص و نانوالیاف کامپوزیتی PAN/ZnO حاوی ۱۰ درصد وزنی ZnO را نشان می‌دهد.



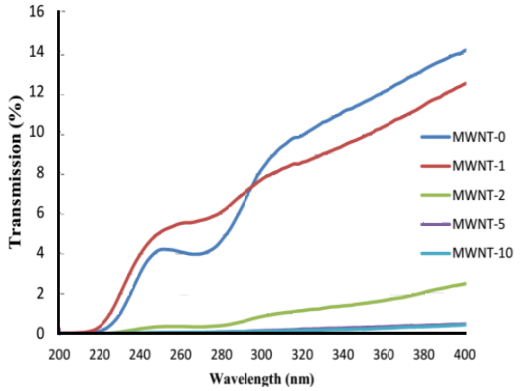
شکل ۵: نمودار قطر نانوالیاف کامپوزیتی PAN/ZnO بر حسب افزایش مقدار ZnO.



شکل ۶: تصاویر مربوط به توزیع قطری نانوالیاف، الف) نانوالیاف خالص و ب) نانوالیاف کامپوزیتی PAN/ZnO حاوی ۱۰ درصد وزنی ZnO.

۳-۲- میزان عبور امواج فرابنفش

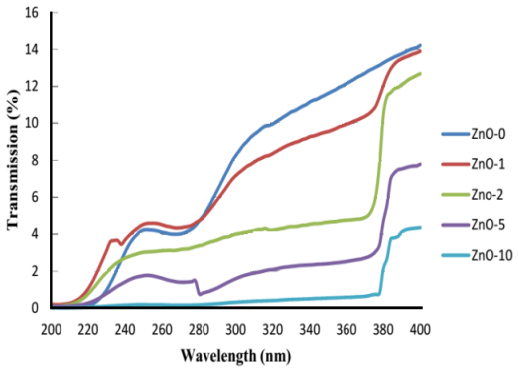
نانولوله‌های کربنی توانایی بالایی در مسدود کردن امواج فرابنفش دارند. در حالت نیمه‌رسانا دارای فاصله باندی (۱۰-۵۰ eV) می‌باشند که با توجه به نظریه نواری جسم جامد، هنگام برخورد نور با انرژی بیشتر از فاصله باندی آنها (طول موج کمتر از لبه جذب) باعث تهییج الکترون از لایه ظرفیت به لایه رسانش و ایجاد الکترون-حفره می‌شود. حال اگر الکترون و حفره‌ها با سایر الکترون‌ها و یا حفره‌های برانگیخته ترکیب شوند، اثر محافظتی MWNT را در برابر امواج فرابنفش توجیه می‌کنند، در غیر این صورت توسط جاذب‌های محیطی گرفته شده و باعث ایجاد واکنش‌های اکسایشی و کاهشی می‌شوند که این حالت مربوط به خواص فوتوکاتالیستی آنها می‌باشد [۱۰]. سازوکار اصلی مسدود کردن امواج فرابنفش توسط نانولوله‌های کربنی بر اساس پدیده انعکاس امواج فرابنفش می‌باشد و درصد بسیار کمی از این امواج توسط نانولوله‌ها جذب می‌شود. شکل ۷ میزان عبور امواج فرابنفش را از نانوالیاف خالص و نانوالیاف حاوی مقادیر مشخص از MWNT نشان می‌دهد.



شکل ۷: طیف عبوری امواج فرابنفش از لایه نانوالیاف خالص و کامپوزیتی PAN/MWNT.

همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش غلظت MWNT در نانوالیاف، میزان عبور امواج به شدت کاهش می‌یابد و در نمونه MWNT-5 به کمترین مقدار خود رسیده و از آن پس کاهش چندانی مشاهده نمی‌شود، یعنی به حالت اشباع می‌رسد. علت کاهش میزان عبور امواج فرابنفش از نمونه ۱ تا ۵، بیشتر شدن میزان MWNT و کمتر شدن قطر نانوالیاف در این نمونه است. با کاهش قطر میزان سطح مخصوص افزایش یافته و از اندازه تخلخل‌ها در لایه‌های نانولیفی کاسته می‌شود. با کاهش اندازه تخلخل‌ها به علت افزایش میزان مسدود کردن امواج فرابنفش، میزان

محافظت افزایش می‌یابد [۱۴]. هر چند که در شکل ۷ میزان عبور نمونه‌های حاوی ۵ و ۱۰ درصد وزنی از نانولوله‌های کربنی تقریبا یکسان است اما همین تفاوت اندک تأثیر زیادی در محاسبه فاکتور محافظتی فرابنفش (Ultraviolet Protection Factor) مربوط به منسوجات بر اساس استاندارد استرالیا/نیوزیلند AS/NZS 4399 از خود بر جای می‌گذارد. نانوذرات اکسید روی به عنوان یکی از متداول‌ترین مواد در زمینه جذب امواج فرابنفش به شمار می‌روند. سازوکار اصلی مسدود کردن امواج فرابنفش توسط این ذرات، پدیده جذب بوده و درصد بسیار کمی از امواج توسط این ذرات منعکس می‌شود. شکل ۸ طیف عبوری امواج فرابنفش را از نانوالیاف خالص و نانوالیاف حاوی مقادیر مشخص از ZnO نشان می‌دهد.



شکل ۸: طیف عبوری امواج فرابنفش از لایه نانوالیاف خالص و کامپوزیتی PAN/ZnO.

در تمامی نمونه‌های حاوی نانوذرات اکسید روی در حدود طول موج ۳۷۰ نانومتر، میزان عبور امواج فرابنفش به شدت افزایش می‌یابد. علت این امر مربوط به لبه جذب نانوذرات اکسید روی می‌باشد. به عبارت ساده‌تر، طول موج‌های بالاتر از ۳۷۰ نانومتر باعث تهییج الکترون‌های نانوذرات اکسید روی نمی‌شوند و در نتیجه طول موج تابیده شده به راحتی عبور می‌کند [۱۷]. با افزایش غلظت نانوذرات اکسید روی میزان عبور امواج فرابنفش کاهش می‌یابد. رفتار طیفی برای نمونه‌های صفر و ۱ درصد وزنی از نانوذرات اکسید روی تقریبا یکسان می‌باشد و نشان دهنده کم بودن میزان نانوذرات برای مسدود کردن امواج فرابنفش می‌باشد. با دو برابر شدن میزان نانوذرات میزان عبور تا طول موج ۳۷۰ نانومتر به کمتر از ۶ درصد می‌رسد. برای نمونه ZnO-5 نیز روند کاهش میزان عبور صدق می‌کند و به کمتر از ۲ درصد می‌رسد. در بین تمامی نمونه‌ها، نمونه ZnO-10 N دارای کمترین میزان عبور امواج فرابنفش می‌باشد و در محدوده‌ی UVA و UVB میانگین عبور امواج به ترتیب ۱/۳۴ و ۰/۳۷ درصد بوده است.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش نانوالیاف کامپوزیتی PAN/MWNT و PAN/ZnO تا غلظت ۱۰ wt.% از نانولوله‌های کربنی و نانوذرات اکسید روی با موفقیت به روش الکتروریسی تولید شد. ساختار سطحی نانوالیاف تولیدی یکنواخت و فاقد هر گونه دانه تسبیحی می‌باشد. به علت خصوصیات نانوذرات و نانولوله‌ها با افزایش میزان آنها در بستر نانوالیاف، عبور امواج فرابنفش به شدت کاهش پیدا کرد. با توجه به نتایج بدست آمده مخصوصا در مورد نمونه‌های حاوی نانولوله‌های کربنی و نمونه‌های حاوی ۵ و ۱۰ درصد وزنی از نانوذرات اکسید روی به خوبی می‌توان پوشش‌های نانولیفی با ضخامت کم و محافظ در برابر امواج فرابنفش طراحی نمود.

مراجع

[1] A. Nishkam, *Journal of Industrial Textiles*, **109**, 1999, 40.
[2] A.R. Horrocks, S.C. Anand, "*Handbook of Technical Textiles: Textile in Defence*", Woodhead, England, 2000.
[3] D. Saravanan, *Autex Research Journal*, **7**, 2007, 53.
[4] M. Jeong, J.M. Park, E.J. Lee, Y.S. Cho, *Bulletin of the Korean Chemical Society*, **34**, 2013, 3301.
[5] X. Chen, J. Wang, J. Zou, X. Wu, X. Chen, *Journal of* Polymer Science, **114**, 2009, 3407.
[6] T. Maier, M.C. Korting, *Skin Pharmacology and Physiology*, **18**, 2005, 253.
[7] T. Guang-Lei, H. Hong-Bo, S. Jian-Da, *Chemical Physics Letters*, **22**, 2005, 1787.
[8] S. Mondal, J.L. Hu, *Journal of Applied Polymer Science*, **103**, 2006, 3370.
[9] T.S. Ko, S. Yang, H.C. Hsu, C.P. Chu, H.F. Lin, S.C. Liao, T.C. Lu, H.C. Kuo, *Materials Science and Engineering, B*, **134**, 2006, 54.
[10] R.B. Prabhakar, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, **7**, 2007, 1.
[11] A.M. Naser, M.F. Abadir, *Chemical Engineering Journal*, **156**, 2010, 487.
[12] S. Lee, *Fiber and Polymer*, **10**, 2009, 295.
[13] H.R. Pant, M.P. Bajgai, K.T. Nam, Y.A. Seo, D.R. Pandeya, S.T. Hong, H.Y. Kim, *Journal of Hazardous Materials*, **185**, 2011, 124.

[14] S. Dadvar, H. Tavanai, H. Dadvar, M. Morshed, *The Journal of Sol-gel Science and Technology*, **59**, 2011, 269.
[15] H. Hou, J.J. Ge, J. Zeng, Q. Li, D.H. Reneker, A. Greiner, S.Z. Cheng, *Chemistry of Materials*, **17**, 2005, 967.
[16] C.J. Thompson, G.G. Chase, A.L. Yarin, D.H. Reneker, *Polymer*, **48**, 2007, 6913.
[17] J. Huo, L. Wang, H. Yu, *Journal of Materials Science*, **44**, 2009, 3917.