



بررسی اثر نانولوله‌های کربنی بر برخی از خواص پوشش‌های آلی

مهلا ضابط^۱، سیامک مرادیان^۲، زهرا رنجبر^{۳،۴*}

۱. کارشناس ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده پلیمر، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۵۸۷۵-۴۴۱۳

۲. استاد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده پلیمر، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۵۸۷۵-۴۴۱۳

۳. دانشیار، گروه پژوهشی پوشش‌های سطح و خوردگی، موسسه پژوهشی علوم و فناوری رنگ، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۷۶۵-۶۵۴

۴. قطب علمی رنگ-موسسه پژوهشی علوم و فناوری رنگ، تهران، ایران

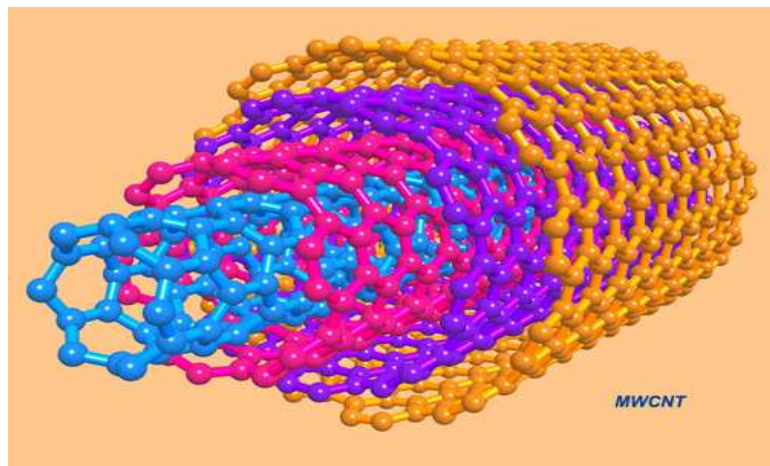
تاریخ دریافت: ۹۱/۱/۱۹ تاریخ بازبینی: ۹۱/۴/۳ تاریخ پذیرش: ۹۱/۴/۳۱

چکیده

در سال‌های اخیر مطالعه بر روی پوشش‌های حاوی ذرات نانو به شدت گسترش یافته است. استفاده از ذرات نانو در پوشش‌های آلی موجب بهبود خواص الکتریکی و مکانیکی آن می‌شود. یکی از بهترین گزینه‌ها برای بهبود خواص پوشش‌های آلی استفاده از نانولوله‌های کربنی با خواص منحصر به فرد است. رسانایی گرمایی و الکتریکی، مقاومت خوب و نسبت طول به قطر بسیار بالای این ماده باعث بهبود خواص پوشش‌های آلی می‌شود. از زمان کشف نانولوله‌های کربنی، این ماده بدلیل خواص منحصر به فرد در بیش از ۳۰ زمینه پلیمری از جمله اپوکسی، پلی یورتان، پلی متیل متاکریلات و غیره استفاده شده و اثر آن در بهبود خواص این پوشش‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است که در این مقاله به آن پرداخته شده است.

واژه‌های کلیدی

نانولوله‌های کربنی، خواص الکتریکی، خواص مکانیکی، الکتروبرنشانی.



۱- مقدمه

یک اتمسفر نانولوله‌های کربنی تولید می‌شوند. مزیت این روش نسبت به دو روش قبل این است که در دمای پایین‌تری انجام می‌شود [۲].

امروزه کاربرد نانولوله‌های کربنی به دلیل نسبت طول به قطر زیاد و سطح مخصوص بسیار بالای این مواد بسیار گسترش یافته است. این ذرات به دلیل دارا بودن ساختار گرافیتی، از رسانایی گرمایی و الکتریکی بالایی برخوردارند و به همین دلیل در فرمولاسیون پوشش‌ها استفاده می‌شوند.

به دلیل نسبت طول به قطر بالای نانولوله‌های کربنی انتقال بار الکتریکی و تنش، تنش در پوشش متمرکز نشده و بدین ترتیب خواص الکتریکی و مکانیکی آن بهبود می‌یابد. ترکیب خاصیت مکانیکی بسیار خوب به همراه چگالی کم و نسبت طول به قطر بسیار بالا و سطح مخصوص زیاد، این ماده را به ماده مناسبی برای کاربرد در پوشش‌ها نموده است [۳].

نانولوله‌های کربنی به خاطر دارا بودن پیوندهای sp^2 از سختی و استحکام محوری بسیار بالایی برخوردار بوده و به دلیل اندازه بسیار کوچکشان در ابعاد نانو می‌توانند ترکیباتی با وزن کم و استحکام بالا را حاصل کنند.

امروزه استفاده از پوشش‌های رسانا در صنایع مختلف بسیار گسترش یافته است که از آن جمله می‌توان به جلوگیری از تخلیه بار الکتریکی ساکن به خصوص بر روی سطوح عایق در کاربردهای صنایع هوافضا اشاره نمود.

برای ایجاد پوشش‌های رسانا روش‌های مختلفی وجود دارد که از آن جمله می‌توان به استفاده از بستر رسانا، افزودنی‌های رسانا و یا ترکیبی از این دو اشاره نمود. از آنجا که رزین‌های رسانا معمولاً در تماس با محیط‌های خارجی تخریب می‌شوند، به همین دلیل استفاده از پرکننده‌های رسانا در بستر پلیمری روش بسیار مناسبی برای ایجاد پوشش‌های رسانا است. از جمله پرکننده‌های رسانا با خواص عالی می‌توان به نانولوله‌های کربنی اشاره کرد [۴].

از زمان کشف نانولوله‌های کربنی تحقیقات بسیار زیادی در مورد این مواد و کامپوزیت‌های آن‌ها صورت گرفته است. نانولوله‌های کربنی ماکرومولکول‌هایی به شکل استوانه‌ای با شعاع چند نانومتر می‌باشند و تا طول ۲۰ سانتی‌متر نیز تهیه شده‌اند. دیواره‌های این مواد از شبکه‌های شش ضلعی گرافن تشکیل شده و به دو دسته‌ی چند دیواره و تک دیواره تقسیم می‌شوند. قطر نانولوله‌های کربنی چند دیواره تا ۱۰۰ نانومتر گزارش شده است. قطر نانولوله‌های کربنی تک دیواره نیز بین محدوده‌ی ۰/۴ تا ۳ نانومتر گزارش شده است.

به طور کلی رسانایی الکتریکی و گرمایی، قدرت بسیار زیاد و نسبت طول به قطر بسیار بالای این ماده، آن را گزینه مناسبی برای استفاده به عنوان پرکننده‌های رسانا در کامپوزیت‌های پلیمری که رسانایی الکتریکی و گرمایی آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، تبدیل نموده است.

یکی از بحث برانگیزترین مسائل در مورد نانولوله‌های کربنی برهم‌کنش بسیار ضعیف این ماده با پلیمر است که موجب پراکنده شدن ضعیف این ماده در بستر پلیمری می‌شود.

از این رو روش‌هایی در جهت عامل‌دار کردن سطوح نانولوله‌های کربنی به منظور بهبود پراکنش پذیری و خواص ارائه شده است [۵].

عصر کربن حالت‌های جامد متفاوتی دارد که یکی از انواع آن گرافیت می‌باشد که از صفحات شش‌تایی کربن تشکیل شده است. بین صفحات مختلف اتم‌های کربن، نیروی ضعیف واندروالس وجود دارد که این نیروهای ضعیف، گرافیت را به یک ماده نرم و ایده‌آل به عنوان روان‌کننده تبدیل نموده است.

گرافیت به دلیل پیوندهای (sp^2) در طول صفحه از الماس سخت‌تر است و الکترون خارج از صفحه آن نور را در ناحیه مرئی جذب کرده و باعث می‌شود گرافیت به رنگ سیاه دیده شود.

نوع دیگر از آزوتروپ کربنی، الماس است که از شبکه‌های چهارتایی اتم‌های کربنی تشکیل شده است. الماس، نور را در ناحیه فرابنفش جذب نموده اما در ناحیه مرئی جذب نمی‌کند. یکی دیگر از آزوتروپ‌های کربنی، نانولوله‌ی کربنی با ساختار میله‌ای شکل است [۱].

روش‌های متفاوتی برای تولید نانولوله‌های کربنی وجود دارد. اولین روش تولید نانولوله‌های کربنی روش تبخیر توسط تخلیه جریان الکتریکی است که در این روش کربن‌های سوزنی شکل با قطر ۳۰-۰/۴ نانومتر و با طول حداکثر یک میلی‌متر بر روی الکتروود کربنی ایجاد می‌شوند. از الکتروودهای کربنی جهت تبخیر کربن در محیط آرگون و فشار ۱۰۰ تور استفاده می‌شود. ایجیما^۱ [۲] محفظه تخلیه را با ترکیبی از دو گاز متان با فشار ۱۰ تور و آرگون با فشار ۴۰ تور پر نمود و دو الکتروود باریک کربنی را در مرکز این محفظه قرار داد.

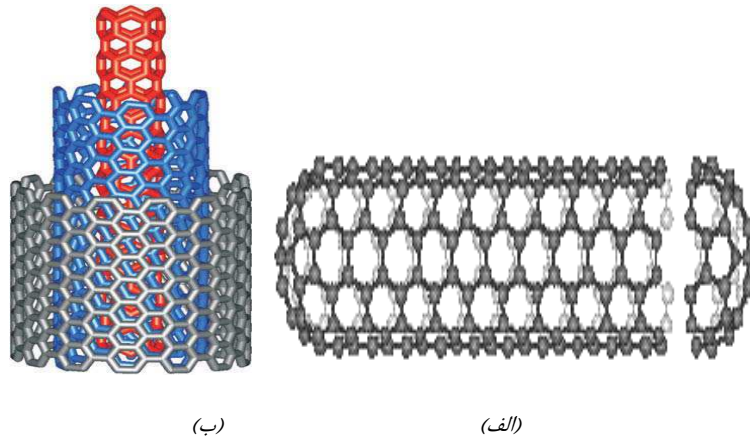
با برقرار نمودن جریان ۲۰۰ آمپر و ولتاژ ۲۰ ولت بین دو الکتروود فرآیند تبخیر انجام می‌شود. برای تولید نانولوله‌های تک دیواره حضور سه جز متان، آهن و آرگون در محفظه ضروری است. روش دوم، روش تبخیر میله‌های گرافیتی در دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد توسط لیزر است که در حضور مقدار کمی کاتالیزور نیکل و کبالت می‌باشد.

پرتوهای لیزر از بین میله‌های گرافیتی عبور داده شده و باعث تبخیر گرافیت و در نتیجه تشکیل نانولوله‌های کربنی می‌شود. نانولوله‌های کربنی به صورت مداوم رشد می‌کنند تا زمانی که تجمعات اتم‌های کاتالیزور در انتهای نانو ذرات جلوی رشد آن‌ها را بگیرد. به هر دو روش می‌توان مقدار زیادی نانولوله کربنی (با بازده بیشتر از ۷۰٪) تولید نمود.

اما این دو روش از دو ضعف برخوردارند. اولین ضعف این است که هر دو بر پایه تبخیر اتم‌های کربنی از حالت جامد می‌باشند که در دمای ۳۰۰۰ درجه سانتی‌گراد رخ می‌دهد. دومین ضعف این است که نانولوله‌های کربنی تولید شده با این روش‌ها بسیار در هم گره خورده‌اند و این مساله، خالص‌سازی آن‌ها را دشوار می‌نماید. با وجود تمامی پیشرفت‌های چشمگیر در تولید نانولوله‌های کربنی، هم چنان مشکلات زیادی در تولید این ذرات در مقیاس بزرگ و به صورت منظم وجود دارد.

در سال ۱۹۹۸ روش جدیدی به نام روش تجزیه بخارات شیمیایی برای تولید نانولوله‌های کربنی کشف شد که در این روش می‌توان جهت رشد نانولوله‌های کربنی و مقدار آن‌ها را کنترل نمود. در این روش مخلوطی از گازهای هیدروکربنی مانند استیلن، متان یا اتیلن و نیتروژن وارد محفظه می‌شود. در طول واکنش، با تجزیه گازهای هیدروکربنی در دمای ۹۰۰-۷۰۰ °C و فشار

¹ Iijima



شکل ۱- ساختار نانولوله کربنی (الف) چنددیواره و (ب) تک دیواره.

۲- اثر نانولوله‌های کربنی بر خواص مکانیکی پوشش‌های آلی

آزمایشات تجربی نشان داده است که مدول یانگ^۱ نانولوله‌های کربنی در بازه ۲۷۰ تا ۹۵۰ گیگا پاسکال متغیر است که این اختلاف زیاد به دلیل اندازه‌های مختلف طول و تعداد لایه‌های متفاوتی است که در آزمایشات، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در آزمون‌های اندازه‌گیری مقاومت کششی، نانولوله‌های کربنی تحت کشش قرار می‌گیرند که این نیروها به طور موثر بر لایه‌های داخلی آن وارد نمی‌شود و این امر منجر به انتقال بسیار ضعیف تنش بین لایه‌های نانولوله‌های کربنی شده و تنها لایه بیرونی آن متحمل نیروهای وارده می‌شود. بنابراین بر روی لایه بیرونی نقص‌هایی ایجاد می‌شود. هنوز رابطه مشخصی بین ابعاد هندسی نانولوله‌های کربنی مانند اندازه، طول و تعداد لایه‌های آن در رابطه با خواص مکانیکی به دست نیامده است [۷].

به‌طور کلی قدرت کششی و مقاومت در برابر ضربه پوشش‌های حاوی نانولوله‌های کربنی عامل‌دار شده با افزایش مقدار پرکننده به شدت افزایش می‌یابد که دلیل این بهبود خاصیت به تشکیل پیوند کوالانسی با بستر پلیمری و انتقال موثر تنش‌های اعمالی نسبت داده می‌شود [۸].

هر چقدر نسبت طول به قطر نانولوله‌های کربنی بیشتر باشد، انتقال بار بین بستر پلیمری و پرکننده بیشتر شده و خواص مکانیکی بهبود می‌یابد. مطالعات نشان داده است که با افزایش میزان پرکننده تا حد معینی خواص مکانیکی بهبود می‌یابد و استفاده بیشتر از آن به دلیل پراکنش نامناسب نانولوله‌ها خواص مکانیکی را تضعیف می‌کند.

از انواع روش‌های فیزیکی می‌توان به استفاده از حمام فراصوت اشاره نمود که روش بسیار مناسبی برای محیط‌های با گرانی کم مانند آب، استن و یا اتانول می‌باشد و از آنجا که معمولاً گرانی پلیمرها بالا است، لازم است قبل از پراکنش نانولوله‌های کربنی آن را با حلال رقیق نمود. روش‌های دیگری مانند آسیاب گلوله‌ای و هم‌زدن در سرعت‌های بالا نیز برای بهبود فرآیند پراکنش انجام می‌شود.

علاوه بر روش‌های فیزیکی، روش‌های شیمیایی نیز برای بهبود پراکنش نانولوله‌های کربنی به کار می‌رود که این روش‌های شیمیایی، نقص‌های زیادی بر روی دیواره نانولوله‌های کربنی ایجاد کرده و طول آن‌ها را نیز بسیار کوتاه می‌کند.

علاوه بر روش‌های فیزیکی، روش‌های شیمیایی نیز برای بهبود پراکنش نانولوله‌های کربنی به کار می‌رود که این روش‌های شیمیایی، نقص‌های زیادی بر روی دیواره نانولوله‌های کربنی ایجاد کرده و طول آن‌ها را نیز بسیار کوتاه می‌کند.

در این شرایط پیوندهای مزدوج تخریب شده و رسانایی کاهش می‌یابد. الکترون به هنگام برخورد با این نقص‌ها به جای عبور کردن، از روی سطح منتشر می‌شود.

بنابراین امروزه تمامی تلاش‌ها در جهت به‌کار بردن روش‌هایی کم هزینه با کمترین تخریب و بهترین پراکنش می‌باشد.

عامل‌دار کردن غیرکوالانسی روش دیگری برای بهبود پراکنش این ماده می‌باشد. سوسپانسیون نانولوله‌های کربنی در پلیمرهایی مانند پلی استایرن باعث ایجاد یک لایه از پلیمر در اطراف نانولوله شده و از طریق برهم‌کنش‌های واندروالس بین پلیمر و نانولوله‌های کربنی باعث بهبود پراکنش آن می‌شوند. علاوه بر پلیمرها از مواد فعال سطحی نیز می‌توان برای بهبود پراکنش استفاده نمود. در واقع مزیت کامپوزیت‌های حاوی پرکننده‌های نانو نسبت به میکرو این است که در این ترکیبات به دلیل فاصله کم بین ذرات خواص کامپوزیت‌ها با اضافه نمودن مقدار کمی از ترکیبات نانو به صورت عمده‌ای بهبود می‌یابد [۶].

¹ Young modulus

اما در درصدهای بالاتر به دلیل تجمعات ایجاد شده انرژی کمتری آزاد می‌شود و در نتیجه مدول اتلاف کاهش می‌یابد.

افزودن نانولوله‌های کربنی باعث سخت شدن حرکت زنجیرهای پلیمری و افزایش دمای انتقال شیشه‌ای تا حدود ۲۰ درجه سانتی‌گراد می‌گردد [۱۱].

هم‌چنین مطالعات انجام شده نشان داده است که با افزودن ۰/۵٪ وزنی نانولوله‌کربنی به رزین وینیل استر، تغییرات مدول ذخیره محسوس نیست اما با اضافه نمودن نانوذرات تا ۱٪ درصد وزنی مدول به صورت قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد [۱۲].

۳- اثر نانولوله‌های کربنی بر خواص الکتریکی پوشش‌های آلی

تاثیر بسیار زیاد نانولوله‌های کربنی بر خواص الکتریکی پوشش‌های آلی موجب گسترش کاربرد این ماده شده است. مطالعات انجام شده نشان داده است که با افزودن مقدار ۰/۰۴٪ وزنی از این ذرات در رزین‌های ترموست مانند رزین اپوکسی تجمعات رسانا ایجاد شده و رسانایی از این ترکیب درصد به بعد به صورت توانی افزایش می‌یابد.

هم‌چنین در رزین‌هایی مانند پلی متیل متاکریلات با افزودن ۱۰٪ وزنی نانو ذرات، رسانایی حداکثر به ۱۰۰۰۰ s/m، در پلی آنیلین با افزودن ۱۵٪ وزنی به مقدار ۳۰۰۰ s/m، و هم‌چنین در پلی یورتان نیز با افزودن ۱۵٪ وزنی به ۲۰۰۰ s/m افزایش می‌یابد.

این مطالعات نشان دهنده این است که تشکیل تجمعات رسانا در درصدهای وزنی پایین نانولوله‌ها رخ می‌دهد.

به عنوان مثال در رزین پلی متیل متاکریلات این تجمعات رسانا در ۱۷٪ وزنی، در رزین پلی آنیلین در ۰/۳٪ وزنی و در مورد پلی یورتان در ۱٪ وزنی شکل می‌گیرند [۱۳].

یکی از کاربردهای نانولوله‌های کربنی در مواد عایق الکتریسیته می‌باشد، زیرا در این مواد به دلیل طبیعت عایق آن‌ها و تجمع بار الکتریسیته، تخلیه الکتریکی رخ داده و منجر به افزایش دما به صورت موضعی و تخریب می‌شود. با به کار بردن این پرکننده رسانا الکترون‌ها کاملاً جریان پیدا کرده و تخلیه الکتریسیته رخ نمی‌دهد [۱۴].

رسانایی الکتریکی کل را می‌توان از طریق عوامل مختلفی مانند درصد حجمی پرکننده، شکل پرکننده‌های رسانا و پراکنش آن‌ها در بستر پلیمری کنترل نمود.

با اندازه‌گیری رسانایی مشاهده می‌شود که در یک درصد خاصی از پرکننده، رسانایی به شدت افزایش یافته و تجمعات رسانا ایجاد می‌شود و از این ترکیب درصد به بعد رسانایی به صورت توانی افزایش می‌یابد [۱۵].

عوامل مختلفی بر روی رسانایی تاثیر می‌گذارند. عواملی مانند نسبت طول به قطر بالا و پراکنش مناسب باعث افزایش رسانایی می‌شوند. رسانایی با آستانه تشکیل تجمعات رسانا رابطه توانی دارد (رابطه ۱)

$$\sigma \alpha (p - p_c)^t \quad (1)$$

در واقع شرط اصلی ایجاد یک پوشش با خواص خوب، پراکنده شدن خوب نانولوله‌های کربنی در بستر پلیمری می‌باشد. به عبارت دیگر پراکنش خوب نه تنها سطح تماس بیشتری را بین بستر پلیمری و پرکننده بوجود می‌آورد، بلکه از تجمعات ذرات پرکننده و تمرکز تنش نیز جلوگیری می‌کند.

با اندازه‌گیری گرانیوی می‌توان به میزان پراکنش این ذرات پی برد. طبق مطالعات تجربی و اندازه‌گیری گرانیوی مشاهده شد که گران روی نانولوله‌های کربنی آماده‌سازی شده و عامل‌دار شده با اسید کمی افزایش یافته و نانولوله‌های عامل‌دار نشده بیشترین گرانیوی را دارند.

در واقع با عامل‌دار کردن نانولوله‌های کربنی پراکنش ذرات بهبود می‌یابد. ذرات عامل‌دار نشده فاقد گروه‌های قطبی بوده و پیوند ضعیفی با بستر پلیمری برقرار می‌کنند.

در صورتیکه آماده‌سازی اولیه سبب ایجاد گروه‌های قطبی بر سطح پرکننده شده و در نتیجه رزین بهتر پرکننده را تر می‌کند [۹].

با افزودن نانولوله‌های کربنی چند لایه به رزین پلی یورتان، مقاومت کششی و مدول، افزایش یافته و مقاومت پوشش در برابر تغییر شکل نیز افزایش می‌یابد. به‌عنوان مثال، مقاومت کششی و مدول رزین پلی‌یورتان با اضافه کردن ۵ درصد نانولوله کربنی از ۱۲ به ۲۳ مگاپاسکال و مدول کششی نیز از ۱۵ به ۴۱ مگاپاسکال افزایش یافته است.

این نتایج بیان‌گر این است که با افزودن نانولوله‌های کربنی و تعامل آن با بستر پلیمری خواص مکانیکی به طور فوق العاده‌ای بهبود می‌یابد. در واقع با آماده‌سازی شیمیایی و ایجاد گروه‌های کربوکسیلیک بر روی نانوذرات و تشکیل پیوند کوالانسی با رزین، چسبندگی بین رزین و پرکننده بهبود یافته و با انتقال تنش و عدم تمرکز آن خواص مکانیکی پوشش بهبود می‌یابد.

تصاویر SEM حاصل از پوشش‌های پلی یورتان به تنهایی و پوشش حاوی ۵٪ نانولوله آماده‌سازی شده، بهبود مقاومت کششی این پوشش‌ها را به اندازه‌ی ۹۰٪ نشان می‌دهد [۱۰].

در مورد رزین اپوکسی با افزودن نانولوله کربنی مدول ذخیره^۱ افزایش می‌یابد که این افزایش مدول در ناحیه شیشه‌ای به دلیل سخت بودن حرکت زنجیرها خیلی محسوس نیست اما بعد از دمای انتقال شیشه‌ای به دلیل برهم‌کنش بین نانوذرات و رزین، افزایش مدول ذخیره قابل ملاحظه است.

افزایش مدول ذخیره به دلیل کاهش حرکت زنجیرهای رزین در نتیجه سطح زیاد برهم‌کنش بین رزین و نانولوله‌های کربنی است. با افزودن نانولوله‌های کربنی تا ۰/۵٪ وزنی، علاوه بر افزایش مدول ذخیره، مدول اتلاف^۲ نیز افزایش یافته و بعد از آن به تدریج کاهش می‌یابد که علت این امر مقاوم بودن نانولوله‌های پراکنده شده در بستر نسبت به تغییرات ویسکوالاستیک و آزاد کردن انرژی است.

¹ Storage modulus

² Loss modulus

الکترون‌ها تنها شانس جلو و عقب رفتن دارند و در این شرایط تنها برگشت کامل الکترون‌ها می‌تواند باعث ایجاد مقاومت الکتریکی شود که مستلزم برخورد‌های بسیار شدیدی است که در واقعیت خیلی محتمل نیست. بنابراین الکترون‌ها شانس انتشار کمتری دارند [۲].

۴- نتیجه‌گیری

نانولوله‌های کربنی که به دو نوع تک دیواره و چند دیواره تقسیم می‌شوند به دلیل نسبت طول به قطر بسیار بالا، چگالی کم و سطح مخصوص بالا دارای خواص منحصر به فردی هستند. یکی از مشکلات این ذرات عدم پراکنش مناسب آن‌ها می‌باشد.

روش‌های مختلفی اعم از روش‌های فیزیکی و روش‌های شیمیایی برای بهبود پراکنش نانولوله‌های کربنی صورت می‌گیرد. مطالعات آزمایشگاهی نشان داده است که با افزودن این ذرات به بستر پلیمری پایداری گرمایی، مقاومت‌های کششی و مقاومت در برابر ضربه و همچنین رسانایی الکتریکی پوشش بهبود می‌یابد.

۵- قدردانی

نویسندگان مراتب سپاس خود را از حمایت قطب علمی رنگ ابراز می‌دارند.

در این رابطه (۱)، رسانایی الکتریکی پوشش‌های حاوی نانولوله، p درصد وزنی نانولوله‌ی کربنی، p_c درصد وزنی نانولوله کربنی در آستانه تشکیل تجمعات رسانا و t فاکتور تعیین کننده بعد سیستم می‌باشد. در واقع تئوری تشکیل تجمعات رسانا تغییر از حالت عایق به حالت کاملاً رسانا را در بستر عایقی که حاوی یک ماده‌ی رسانا است نشان می‌دهد [۱۶].

در رزین‌های ترموست به دلیل گرانیوی پایین، تجمعات رسانا زودتر تشکیل می‌شوند. در مورد کامپوزیت‌های پلیمر ترموپلاست و نانولوله کربنی مقدار نانولوله مورد نیاز به منظور رسیدن به این نقطه بحرانی در حدود ۱/۵ تا ۴/۵٪ وزنی است [۱۷].

به طور کلی رسانایی الکتریکی بسیار خوب نانولوله‌های کربنی به خاطر ساختار تک بعدی آن‌هاست که مقاومت الکتریکی بسیار کمی از خود نشان می‌دهند.

مقاومت الکتریکی وقتی ایجاد می‌شود که الکترون در حین عبور از ساختار بلوری نانولوله‌های کربنی با نقص‌های موجود در ساختار این ماده برخورد نموده و انتشار یابد که این نقص می‌تواند به دلیل وجود ناخالصی در ساختار بلوری و یا لرزش اتم‌ها در جای خود باشد.

اما الکترون‌ها در ساختار نانولوله‌های کربنی به دلیل قطر بسیار کم و نسبت طول به قطر بالا به راحتی منتشر نمی‌شوند. در مورد ترکیبات رسانای سه بعدی شانس انتشار الکترون‌ها بسیار زیاد است اما در مواد تک بعدی

۶- مراجع

- M. S. Ahmed, "Characterization of carbon nanotubes grown by chemical vapor deposition", MSc. thesis, Ontario, Canada, **2009**.
- R. Khare, S. Bos "Carbon nanotube based composites- A review", J. Miner. Mater. Charact. Eng., 4, 31-46, **2005**.
- X. Li, S. Y. Wong, W. C. Tjiu, B. P. Lyons, S. A. Oh, C. B. He, "Non-covalent functionalization of multi walled carbon nanotubes and their application for conductive composite", Carbon, 46, 818-832, **2008**.
- F. Gojney, M. Wichmann, B. Fiedler, K. Schulte, "Influence of different carbon nanotubes on the mechanical properties of epoxy matrix composites – A comparative study", Compos Sci Technol, 65, 2300-2313, **2005**.
- J. A. M. J. Barbato, S. R. Hopkins, M. J. O'Malley, "Dispersion and film properties of carbon nanofiber pigmented conductive coatings", Prog. Org. Coat, 47, 198–206, **2003**.
- K. Balasubramanian, M. Burghard, "Chemically functionalized carbon nanotubes", Carbon nanotubes, 2, 180 -192, **2005**.
- P. Ma, A. S Naveed, G. Marom, J. Kim, Dispersion and functionalization of carbon nanotubes for polymer-based nanocomposites: A review" Composites Part A, 41, 1345-136, **2010**.
- K. T. Lau, C. Gu, D. Hui, "A critical review on nanotube and nanotube/nanoclay related polymer composite materials", Composites: Part B, 37, 425-436, **2006**.
- X. Chen, J. Wang, M. Lin, W. Zhong, "Mechanical and thermal properties of epoxy nanocomposites reinforced with amino-functionalized multi-walled carbon nanotubes", Mater. Sci. Eng. A, 492, 236-242, **2008**.
- Y. C. Jung, H. H. So, J. W. Cho, "Synthesis of polyurethane nanocomposites of functionalized carbon nanotubes by in-situ polymerization methods", J. Korean Phys. Soc., 51, 1-6, **2007**.
- F. H. Gojny, K. Schulte, "Functionalisation effect on the thermo-mechanical behavior of multi-wall carbon nanotube/epoxy-composites", Compos. Sci. Technol., 64, 2303-2308, **2004**.
- O. Gryshchuk, R. Thomann, "Multiwall carbon nanotube modified vinyl ester and vinyl ester – based hybrid resins", Composites: Part A, 37, 1252–1259, **2006**.
- O. Jacobs, W. Xu, B. S. del, W. Wu, "Wear behaviour of carbon nanotube reinforced epoxy resin composites", Tribology Letters, 23, 65-75, **2006**.

14. C. Lu, Y. Mai, "Anomalous electrical conductivity and percolation in carbon nanotube composites", *Mater. Sci.*, 43, 6012-6015, **2008**.
15. G. Ambrosetti, C. Grimaldi, T. Maeder, A. Danani, P. Ryser, "Filler dependencies of electrical conductivity in nanotube and nanofiber composites", *Condensed Matter.*, 1-5, **2009**.
16. J. K. W. Sandler, J. E. Kirk, I. A. Kinloch, M. S. P. Shaffer¹, A. H. Windle, "Ultra-low electrical percolation threshold in carbon-nanotube-epoxy composites", *Polymer*, 44, 5893-5899, **2003**.
17. W. Bauhofer, J. Z. Kovacs, "A review and analysis of electrical percolation in carbon nanotube polymer composites", *Compos Sci. Technol.*, 1-13, **2008**.