

## پوشش دهی الکترولس نیکل نانوالیاف کربنی الکترورسی شده

منصور کیانپور راد، علی محمد بازرگان، ساسان قشقای و مجتبی نقوی

پژوهشگاه مواد نو، پژوهشگاه مواد و انرژی- کرج

( دریافت مقاله : ۸۹/۵/۳۰ - پذیرش مقاله : ۹۰/۲/۵ )

### چکیده

در پژوهش حاضر، با توجه به اهمیت پوشش نیکل در ارتقاء خواص سطحی الیاف کربنی، پوشش دهی نانوالیاف کربنی الکترورسی شده در حمام تجاری الکترولس نیکل مورد بررسی قرار گرفت. بررسی های میکروسکوپی و هم چنین نتایج بدست آمده از آزمون تفرق اشعه X نشان می دهد که به دنبال ۲۰ دقیقه قرار گرفتن الیاف در حمام الکترولس در pH حدود ۹، پوششی یکپارچه از فلز نیکل با ضخامت تقریبی ۱۸۴ nm بر روی آنها تشکیل می گردد. هم چنین، در این تحقیق در فرآیند سنتز الیاف کربنی از نیکل به عنوان کاتالیست برای گرافیت شدن الیاف استفاده شد. مشخصه یابی الیاف کربنی الکترورسی شده در حضور کاتالیست نیکل حضور نانوذرات نیکل بر سطح الیاف و نیز انجام واکنش گرافیت شدن در اثر عملیات حرارتی در ۱۴۰۰°C را تأیید می کند.

واژه های کلیدی: نیکل، پوشش دهی الکترولس، نانوالیاف کربنی، الکترورسی.

## Electroless nickel plating of electrospun carbon nanofibers

M. Keyanpour-rad, A. M. Bazargan, S. Ghashghaie and M. Naghavi

Department of New Materials, Material and Energy Research Center, Karaj, Iran

### Abstract

In the present study, due to the importance of nickel plating in the improvement of carbon nanofiber surface properties, the electroless nickel plating of electrospun carbon nanofibers was carried out using a commercial electroless bath. The electrospun carbon nanofibers were submerged into the electroless nickel bath and held for 20 minutes at 45 °C and a pH value of 9. Results obtained from scanning electron microscopy observations and X ray diffraction analysis indicated that a uniform nickel coating of about 184 nm thickness was formed on the whole surface of carbon nanofibers. The fiber fabrication process was performed in the presence of nickel as a graphitization catalyst. Raman spectroscopy and X-ray diffraction studies confirmed the presence of nickel nanoparticles on the surface of fibers and the accomplishment of graphitization at 1400 °C.

**Keywords:** Nickel, Electroless plating, Carbon nanofibers, Electrospinning.

**E-mail of corresponding author:** ambazargan@gmail.com

## مقدمه

تقویت کننده های کربنی، نقش مهمی را در ارتباط با ارتقای خواص طیف وسیعی از مواد مهندسی ساختاری شامل مواد پلیمری، فلزات و سرامیک ها ایفا می کنند که در این راستا، نقش نانوالیاف کربنی به عنوان یک نانوساختار کربنی با ویژگی های ابعادی متمایز و خواص مکانیکی، الکتریکی، حرارتی و شیمیایی منحصر به فرد در بهبود خواص مواد مهندسی یاد شده از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. در حالت کلی، قطر نانوالیاف کربنی در محدوده ۵۰ تا ۲۰۰ نانومتر است که این مقدار برای نانولوله های کربنی به زیر ۱۰۰ نانومتر می رسد. از جمله روش های رایج در تولید نانوالیاف کربنی می توان به رسوب شیمیایی از فاز بخار (CVD) و الکتروسی (Electrospinning) اشاره کرد. در الکتروسی، جتی از پیش ماده پلیمری مورد نظر پس از خروج از سرنگ حاوی آن تحت میدان الکتریکی به سمت صفحه کلکتور شتاب می گیرد. برای ایجاد جت، شدت میدان الکتریکی باید به گونه ای باشد که بر کشش سطحی پلیمر غلبه کند. به دنبال کلسینه کردن الیاف پلیمری بدست آمده در دمای مناسب، نانوالیاف با کیفیت مطلوب به دست می آید [۱]. نانوالیاف کربنی و کامپوزیت های ساخته شده از آن دارای کاربردهای متعددی در صنعت هوا-فضا، باطری های لیتیومی و نیز سپرهای حرارتی فضاپیماها می باشند.

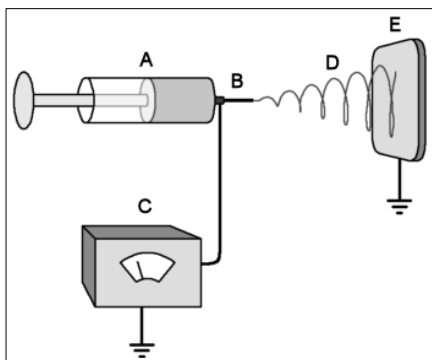
در میان مواد کامپوزیتی، کامپوزیت های زمینه فلزی از خواص مکانیکی- حرارتی منحصر به فردی هم چون سفتی ویژه بالا، استحکام بالا، مقاومت زیاد در برابر خزش و مقاومت به خوردگی و اکسیداسیون بالا برخوردار می باشند. باید توجه داشت که کامپوزیت های زمینه پلیمری و گاهی سرامیکی فاقد خصوصیات مذکور می باشند. در این ارتباط، کامپوزیت های متشکل از یک زمینه فلزی تقویت شده با الیاف کربنی بواسطه استحکام و مدول ویژه بالا، هدایت گرمایی و الکتریکی قابل ملاحظه، ضریب انبساط حرارتی پایین و نیز خاصیت خود روان سازی بالایشان به طور گسترده ای مورد استفاده و مطالعه بوده اند [۲-۴]. بزرگ ترین چالش بر سر راه اعمال الیاف کربنی در زمینه فلزی

ترشوندگی ضعیف الیاف توسط فلز مربوطه و نیز واکنش احتمالی بین کربن و زمینه است که گاهی منجر به تشکیل فازهای ترد و مخرب می گردد. هم چنین، ویژگی های سطحی الیاف کربنی توانایی برآورده ساختن برخی خواص ویژه همچون واکنش های فوتوکاتالیستی و ابزارهای فوتولتایی را دارا نیست. بنابراین با توجه به مشکلات بر شمرده شده در رابطه با اعمال الیاف کربنی در زمینه های فلزی، توجه بیشتر به اصلاح سطحی نانوالیاف ضروری به نظر می رسد.

به طور کلی، چالش های اصلی در ارتباط با ساخت نانوکامپوزیت های زمینه آلومینیومی تقویت شده با الیاف کربنی عبارتند از: الف- نفوذ کربن در فصل مشترک فلز-کربن و تشکیل فاز ترد  $Al_4C_3$  که ایجاد تنش و در نتیجه افت استحکام مکانیکی کامپوزیت حاصل را به دنبال خواهد داشت و ب- ترشوندگی کم الیاف کربنی توسط زمینه آلومینیومی که ناشی از دافعه بین ابر الکترونی گرافیت موجود در الیاف و تک لایه آنیون های اکسیژن بر روی سطح آلومینیوم می باشد. از جمله روش های اصلاح سطحی الیاف کربنی جهت برطرف ساختن مشکلات مذکور اعمال پوشش مناسب بر روی سطح الیاف به منظور بهبود کیفیت فصل مشترک الیاف و زمینه فلزی می باشد. از میان پوشش های رایج در این ارتباط می توان به پوشش آلومینا، مس و نیکل اشاره کرد که به با روش هایی هم چون سل-ژل (Improvement of interface)، آبکاری و پوشش دهی الکتروسل [۵] بر سطح اعمال می گردند. در پوشش دهی به روش الکتروسل، احیای یون های فلزی موجود در حمام به کمک یک عامل احیا کننده در شرایط مناسب از لحاظ دما و pH منجر به تشکیل رسوب فلزی بر روی سطح می گردد.

با توجه به اینکه پوشش دهی الیاف کربنی در حمام های الکتروسل عموماً به میکروالیاف کربنی محدود بوده است، گزارشات معدودی در ارتباط با نانوالیاف کربنی در دست است. آرای (Arai) و همکارانش نانوالیاف کربنی رشد داده شده از فاز بخار را در حمام الکتروسل نیکل در pH حدود ۹ و دمای  $35^{\circ}C$  با فلز نیکل پوشش دادند. در تحقیق حاضر، برای بار نخست، پوشش دهی نانوالیاف کربنی تولید شده به

آمده برای تولید نانوالیاف کربنی در این پژوهش در جدول ۱ آورده شده است.



شکل ۱. شمایی از دستگاه الکترورسی شامل محلول پلیمری داخلی سرنگ (A)، سوزن نوک سرنگ (B)، منبع تغذیه ولتاژ بالا (C)، جت ایجاد شده از مواد پلیمری (D) و کلکتور فلزی (E)

جدول ۱. پارامترهای بهینه بدست آمده جهت تولید نانوالیاف PAN

فاصله ی نازل تا جمع کننده	نرخ تغذیه	ولتاژ	غلظت محلول
۱۰ cm	۰/۵ ml/hr	۱۱/۵ kV	۱۲ Wt%

در مرحله بعد الیاف پلیمری جمع آوری شده، به مدت ۱h در دمای °C ۲۳۰ در محیط هوا تحت عملیات حرارتی قرار گرفتند. سپس الیاف کربنی پایدار شده، در دمای °C ۸۰۰ به مدت ۱h در اتمسفر نیتروژن تحت عملیات حرارتی کربونیزاسیون قرار گرفته و در ادامه این عملیات، الیاف در °C ۱۴۰۰ به مدت ۲h در اتمسفر نیتروژن حرارت داده شدند. نرخ گرمایش در تمامی مراحل مذکور °C/min ۳ در نظر گرفته شد.

### پوشش دهی الکترولس نیکل

فرآیند پوشش دهی شامل سه مرحله می باشد: حساس سازی، فعال سازی، احیای فلز بر روی سطح الیاف. در این پژوهش برای ایجاد پوششی از نیکل بر سطح نانوالیاف کربنی الکترورسی شده از حمام تجاری الکترولس نیکل خریداری شده از شرکت نیکل فرآیند استفاده شد. پیش از انجام عملیات پوشش دهی، الیاف در دو حمام جداگانه حساس سازی و

روش الکترورسی در یک حمام تجاری الکترولس نیکل مورد بررسی قرار گرفت.

### فعالیت های تجربی

به طور کلی روش های آزمایشگاهی به کار گرفته شده در این پژوهش را می توان به ۴ بخش زیر تقسیم بندی کرد:

### تهیه نانوالیاف کربنی

با انحلال ۲/۴ گرم پلی اکریلونیتریل (PAN) با وزن مولکولی متوسط ۷۰۰۰۰ g/mol خریداری شده از شرکت پلی اکریل اصفهان در ۱۷/۶ گرم DMF که به عنوان حلال از شرکت Merck تهیه گردیده است، یک محلول پلیمری کاملاً یکنواخت تحت همزدن مغناطیسی به مدت ۴ ساعت در دمای اتاق تهیه گردید. پس از تهیه محلول پلیمری، ۰/۴۸ گرم استیل استنات نیکل II با نسبت وزنی ۱ به ۵ نسبت به PAN به محلول تهیه شده اضافه گردید و تحت همزدن مغناطیسی در دمای اتاق به مدت ۲۴ ساعت قرار گرفت. سپس محلول نهایی درون سرنگ الکترورسی ریخته شد. اجزای سیستم الکترورسی به شرح زیر است:

الف- منبع تغذیه ولتاژ بالا (۰-۶۰kV Glassman High Voltage)

ب- پمپ سرنگ (Top5300, Japan) برای کنترل خروجی محلول. سرنگ به حجم ۵۰ml و نازلی از جنس فولاد زنگ نزن با قطر خارجی ۰/۸ mm.

ج- الکترودهای فلزی که برای ایجاد اختلاف پتانسیل به نازل و جمع کننده وصل می شوند.

د- ورقه های ۱۰×۱۰cm آلومینیوم به عنوان جمع کننده.

شماتیکی از دستگاه الکترورسی در شکل ۱ نشان داده شده است.

از جمله پارامترهای موثر در ایجاد یک جت پایدار می توان به غلظت محلول پلیمری، فاصله نازل تا جمع کننده، نرخ تغذیه محلول و ولتاژ اعمالی اشاره کرد. عدم تنظیم مناسب پارامترهای مذکور منجر به تولید الیافی با مورفولوژی دانه دار و توزیع اندازه قطر گسترده می گردد. پارامترهای بهینه بدست

جدول ۲. ترکیب شیمیایی حمام حساس سازی

عامل شیمیایی	کلرید قلع هیدراته (SnCl <sub>2</sub> .2H <sub>2</sub> O)	اسید هیدروکلریک (HCl)	آب مقطر (H <sub>2</sub> O)
غلظت	۰/۶ gr	۲ ml	۱۰۰ ml

جدول ۳. ترکیب شیمیایی حمام فعال سازی

عامل شیمیایی	کلرید پالادیوم (PdCl <sub>2</sub> )	اسید هیدروکلریک (HCl)	آب مقطر (H <sub>2</sub> O)
غلظت	۰/۰۱gr	۰/۱۲۵ ml	۱۰۰ml

گرافیتی ۳ بعدی حتی در دماهای بالا [۶]، هدف از افزودن پیش ماده حاوی نیکل (در این جا استیل استنات نیکل II) به پیش ماده های سازنده الیاف PAN، بهره گیری از نقش کاتالیستی نیکل در فرآیند گرافیت شده الیاف کربنی در ضمن عملیات حرارتی می باشد. به دنبال تجزیه حرارتی نمک مذکور در ۸۰۰ °C و احیای نیکل در حضور کربن در ضمن عملیات حرارتی، نانوذرات فلزی موجود در زمینه کربنی به عنوان کاتالیست تبدیل کربن آمورف به شکل دیگری از کربن با نظم بیشتر، یعنی گرافیت، وارد عمل می شوند [۷]. از جمله مکانیزم های مطرح شده برای انجام چنین تبدیل ساختاری می توان به مکانیزم پیشنهادی Fitzer و همکارانش [۸] اشاره نمود. بر اساس این مکانیزم، در ابتدا پیوند کربن-کربن توسط فلز کاتالیست و در فصل مشترک فلز- کربن بی نظم شکسته شده و در ادامه به دنبال انحلال کربن در فلز (فلز جامد یا مذاب) و نفوذ در ساختار فلز، گرافیت متبلور می گردد.

#### مشخصه یابی نانوالیاف کربنی

شکل ۲ تصویر SEM نانوالیاف کربنی سنتز شده در حضور کاتالیست فلزی نیکل را نشان می دهد. همانطور که در شکل ۲-۲a و با وضوح بیشتر در ۲-۲b مشاهده می گردد، دانه های سفید رنگی بر روی سطح الیاف وجود دارد که در حقیقت همان نانو ذرات نیکل به جای مانده از عملیات حرارتی الیاف پلیمری، با میانگین قطر ۶۰-۴۰ نانو متر می باشند. دیگرام توزیع قطر الیاف در شکل ۳ مشاهده می گردد. به این ترتیب، قطر متوسط نانوالیاف کربنی الکترورسی شده پیش از پوشش دادن حدود ۱۶۲ nm محاسبه شد.

فعال سازی شدند. این دو عملیات که ترکیب شیمیایی حمام های آن ها به ترتیب در جداول ۲ و ۳ آمده است، در در دمای محیط و تحت هم زدن مغناطیسی به مدت ۱۰ دقیقه به انجام رسیدند.

در پایان هر مرحله، محلول از میان کاغذ صافی عبور داده شده و الیاف به جای مانده با آب مقطر شسته شدند تا به حمام بعدی منتقل گردند.

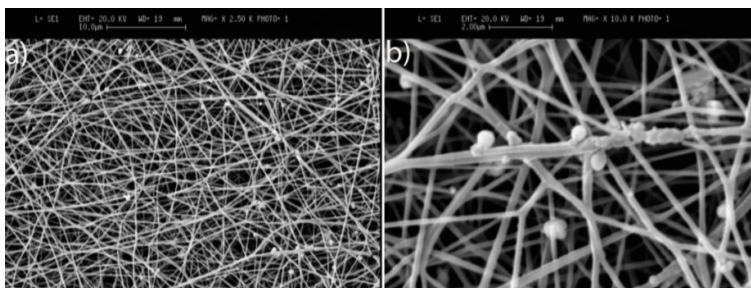
عملیات پوشش دهی در دمای ۴۵ °C تحت همزدن مداوم و به مدت ۲۰ min به انجام رسید. در ادامه، محلول از کاغذ صافی عبور داده شده و الیاف به جای مانده بر روی سطح آن پس از سه بار شستشو با آب مقطر به مدت ۱ ساعت در دمای ۸۰ °C داخل خشک کن قرار داده شدند.

به منظور بررسی مورفولوژی نانوالیاف کربنی سنتز شده و نیز الیاف پوشش داده شده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM-S360 Cambridge) استفاده شد و توزیع قطر الیاف قبل و بعد از پوشش دهی (و در نتیجه ضخامت پوشش) از طریق تحلیل تصاویر میکروسکوپی توسط نرم افزار ImageJ بدست آمد. هم چنین، جهت شناسایی الیاف کربنی سنتز شده و نیز پوشش اعمالی بر روی سطح از طیف سنجی رامان (Almega Raman Spectrometer) در طول موج تهییج ۵۱۴/۵ nm و آزمون تفرق اشعه ی X (PhilipsDiffractometer) استفاده شد.

#### نتایج و بحث

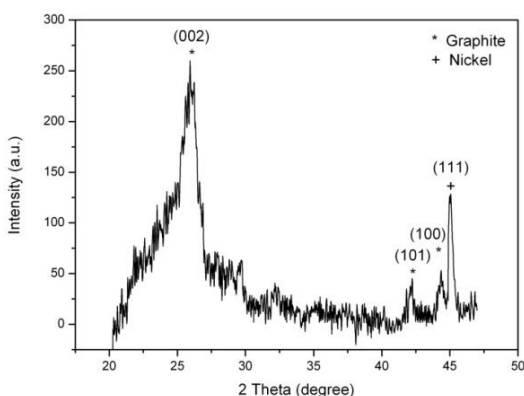
##### نقش کاتالیست

با توجه به دشوار بودن تبدیل الیاف PAN به ساختارهای

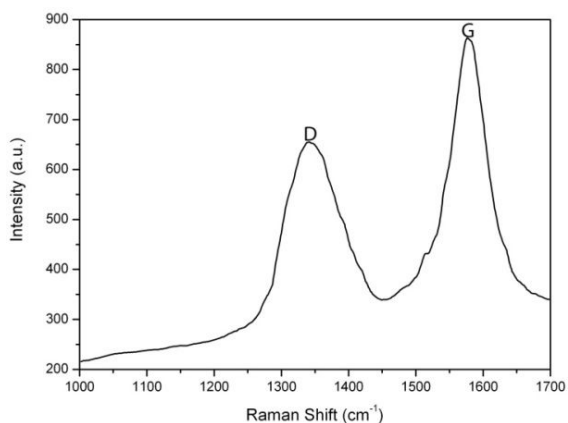


شکل ۲. تصویر SEM نانوالیاف کربنی سنتز شده در حضور کاتالیست نیکل در دو بزرگنمایی (a) ۲۵۰۰ و (b) ۱۰۰۰۰.

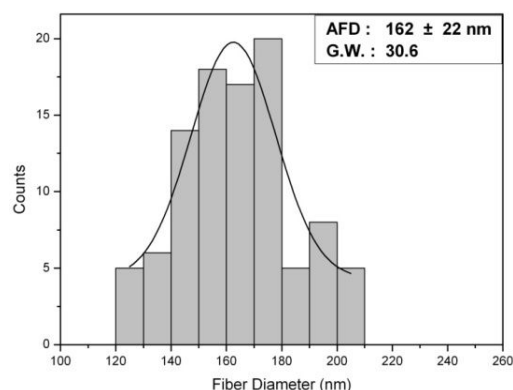
شناخته می شود، به ترتیب در حدود  $1580 \text{ cm}^{-1}$  و  $1350 \text{ cm}^{-1}$  مشاهده شد. شکل ۵ طیف بدست آمده از آنالیز رامان را نشان می دهد. این طیف همانطور که در رابطه با ساختارهای کربن مورد انتظار ماست دارای دو پیک اصلی در  $1576$  و  $1342 \text{ cm}^{-1}$  می باشد.



شکل ۴. الگوی XRD مربوط به نانوالیاف کربنی الکترورسی شده در حضور کاتالیست Ni و گرافیت شده در  $1400^\circ \text{C}$



شکل ۵. طیف رامان الیاف کربنی الکترورسی شده در حضور کاتالیست و گرافیت شده در  $1400^\circ \text{C}$



شکل ۳. نمودار توزیع قطر نانوالیاف کربنی سنتز شده در حضور کاتالیست

همان گونه که در الگوی تفرق اشعه X در شکل ۴ مشاهده می شود، پیک های  $(002)$ ،  $(101)$  و  $(100)$  مربوط به گرافیت بوده و  $(111)$  به نیکل تعلق دارد.  $(002)$  که پیک اصلی گرافیت به حساب می آید در زاویه  $2\theta = 26.08^\circ$  قرار دارد. هم چنین، مقدار بدست آمده برای فاصله بین صفحات  $(002)$  گرافیت  $(d_{002})$  حدود  $0.3415$  نانومتر است که به مقادیر گزارش شده در مراجع [۹۶] کاملاً نزدیک است.

باید به این نکته توجه داشت که پایین بودن مقدار  $d_{002}$  نشان دهنده نظم بیشتر ساختار گرافیت و کاهش میزان عیوب موجود در ساختار است. مقدار FWHM برای پیک مربوط به صفحه  $(002)$  گرافیت حدود  $1/33$  درجه محاسبه شد که با مقدار مشابه گزارش شده توسط Weisenberger [۱۸] در شرایطی که عملیات گرافیت شدن را در  $1500^\circ \text{C}$  به انجام رسانده اند ( $1/151$  درجه) اختلاف ناچیزی را نشان می دهد. در طیف رامان مربوط به ساختارهای کربنی دو باند مشاهده می شود. این باندها که به ترتیب آنها را با G و D

جدول ۴. نتایج بدست آمده از طیف سنجی رامان

نام باند	محل ( $\text{cm}^{-1}$ )	شدت	FWHM
G	۱۵۷۶	۸۶۳	۷۷/۲
D	۱۳۴۲	۶۵۵	۱۱۵/۶

در فرآیند رسوب دهی الکترولس بر خلاف آبکاری از هیچ جریان خارجی برای ایجاد پوشش استفاده نمی شود. به همین دلیل در حمام الکترولس علاوه بر یون های فلزی و برخی ترکیبات پایدار کننده، که در آبکاری نیز حضور دارند، به یک عامل احیا کننده و یک سطح کاتالیزگر نیز نیاز است. به طور کلی، عامل احیا کننده با اکسید شدن خود منجر به احیای یون های فلزی می شود. سطح کاتالیزگر در حقیقت همان سطحی است که قرار است نشست گونه فلزی (در اینجا نیکل) بر روی آن صورت گیرد. در حالی که در فرآیند پوشش دهی الکترولس نیکل بر روی سطح فلزات، به ویژه فولاد، سطح فلز خود نقش کاتالیزگر و مکان ترجیحی انجام واکنش را ایفا می کند، در رابطه با سطوح سرامیکی، پلیمری و کربنی اصلاح سطحی ماده مورد نظر از طریق عملیات فعال سازی از جمله مراحل مهم فرآیند پوشش دهی به شمار می آید.

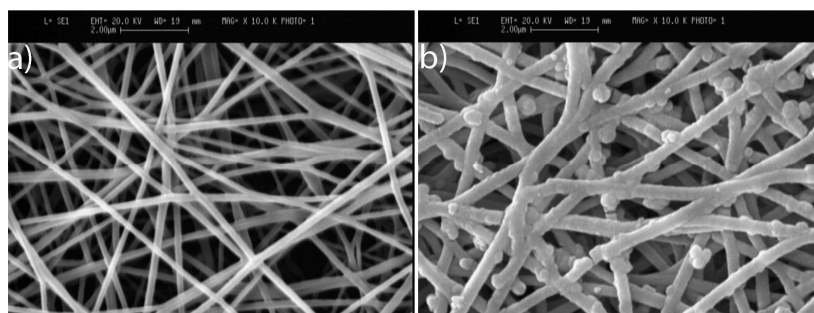
#### مشخصه یابی پوشش نیکل

شکل ۶ تصویر SEM نانوالیاف کربنی قبل و بعد از پوشش داده شدن توسط نیکل در حمام الکترولس را نشان می دهد. با مقایسه شکل های ۶-a و ۶-b (هر دو در بزرگنمایی ۱۰k) پوشیده شدن سطح لیاف توسط ماده پوشش و افزایش قطر لیاف را می توان مشاهده کرد.

بر اساس نتایج بدست آمده از آزمون رامان (جدول ۴)، نسبت  $I_D/I_G$  حدود ۰/۷۷ بدست می آید. در حالت کلی، هر چه نسبت شدت پیک های D و G یا به عبارت دیگر نسبت کربن آمورف به گرافیت کمتر باشد نشان دهنده این است که گرافیت شدن به میزان بیشتری صورت گرفته است. Weisenberger و همکارانش این نسبت را برای نانوالیاف کربنی مورد بررسی خود که در  $C = 1500^\circ$  گرافیت شده بودند ۰/۷۲ گزارش کردند [۱۰].

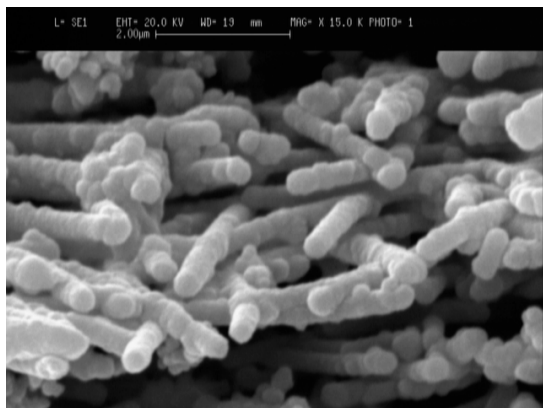
#### پوشش دهی لیاف در حمام الکترولس نیکل

همان طور که در تشریح روند عملی آزمایشات اشاره شد، پیش از قرار دادن لیاف در حمام الکترولس، لیاف در دو حمام جداگانه تحت همزدن مداوم حساس سازی و فعال سازی گردیدند. در این دو حمام که به ترتیب حاوی یون های  $\text{Sn}^{2+}$  و  $\text{Pd}^{2+}$  هستند، تماس مداوم لیاف با محلول منجر به جذب یون های مذکور بر روی سطح آنها و در نتیجه تشکیل مکان های ترجیحی جهت انجام واکنش احیای یون های نیکل می گردد [۱۱]. با شروع فرآیند تشکیل لایه، هر لایه خود کاتالیست تشکیل لایه بعدی خواهد بود بنحوی که عموماً رابطه ای خطی بین ضخامت پوشش و زمان وجود خواهد داشت.



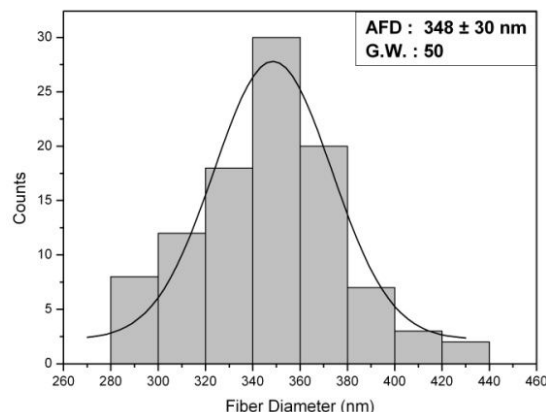
شکل ۶. (a) لیاف کربنی الکترورسی شده پیش از پوشش دادن. (b) لیاف کربنی پوشش داده شده در حمام الکترولس.

هم چنین، نمودار توزیع قطر الیاف در شکل ۷ افزایش قطر حدود ۱۸۶ nm را در اثر اعمال پوشش بر سطح الیاف نشان می دهد. بدیهی است که با تغییر زمان واکنش می توان به ضخامت های مختلفی از نیکل در حمام پوشش دهی الکترولس دست یافت.

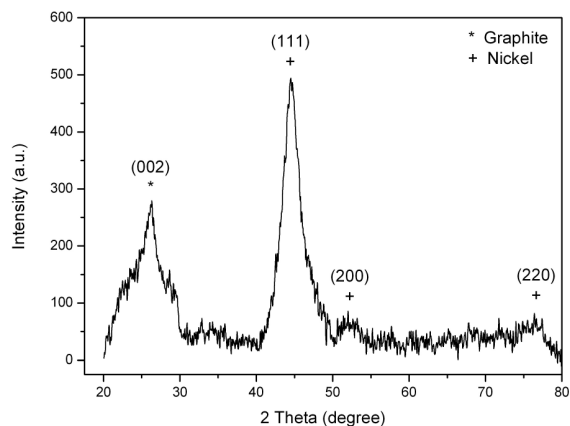


شکل ۸. تصویر SEM بدست آمده از مقطع نانوالیاف کربنی پوشش داده شده با نیکل به روش الکترولس.

شکل ۷. نمودار توزیع قطر نانوالیاف کربنی پوشش داده شده در حمام الکترولس نیکل



شکل ۷. نمودار توزیع قطر نانوالیاف کربنی پوشش داده شده در حمام الکترولس نیکل



شکل ۹. الگوی پراش پرتو X نانوالیاف کربنی پوشش داده شده با نیکل به روش الکترولس.

برای بررسی یکپارچگی پوشش از مقطع الیاف تصویربرداری شد که در شکل ۸ نشان داده است. مشاهده می شود که رشته های کربنی هر کدام به طور کامل توسط لایه نیکل پوشیده شده اند. بنابراین می توان نتیجه گرفت که به دنبال نفوذ کامل محلول حساس سازی و فعال سازی در میان الیاف سنتز شده که سطح الیاف برای انجام واکنش های شیمیایی احیا آماده می سازد، محلول الکترولس نیکل هم به خوبی در میان نمد الیاف نفوذ کرده و یون های نیکل را در مکان های مناسب احیا نموده است.

شکل ۹ الگوی پراش پرتو X الیاف کربنی پوشش داده شده به روش الکترولس نیکل را نشان می دهد. همان طور که ملاحظه می شود، بر خلاف الیاف سنتز شده که در آنها بیشترین شدت مربوط به پیک گرافیت بود، در اینجا پیک (۱۱۱) مربوط به نیکل این خصوصیت را داراست. در طیف XRD الیاف کربنی الکترورسی شده، پیک نیکل به نانوذرات نیکل تشکیل شده بواسطه تجزیه استیل استنات نیکل II نسبت داده می شود که به صورت تعداد نقاطی اندک بر روی

### نتیجه گیری

نظر به اهمیت پوشش دهی الیاف کربنی با یک فلز یا اکسید فلزی برای ارتقای خواص سطحی الیاف و جلوگیری از تشکیل فازهای ترد در فصل مشترک آنها با زمینه، روش پوشش دهی الکترولس می تواند به عنوان تکنیکی اقتصادی و ساده برای ایجاد لایه ای از فلز نیکل بر سطح نانوالیاف کربنی مورد استفاده قرار بگیرد. در این پژوهش، به دنبال ۲۰ دقیقه

## منابع

1. H. Wu, D. Lin, R. Zhang and W. Pan, *ZnO, Nanofiber field-effect transistor assembled by electrospinning*, Journal of American Ceramic Society, 91 (2008) 656–659.
2. J.B. Donnet, R.C. Bansal and M.J. Wang, *Carbon Fibers*, 3rd ed., Dekker, New York, 1990.
3. S.J. Park and M.S. Cho, *Effect of anti-oxidative filler on the interfacial mechanical properties of carbon-carbon composites measured at high temperature*, Carbon, 38(2000)1053–1058.
4. S. Chand, *Review carbon fibers for composites*, Journal of Material Science, 35(2000)1303–1313.
5. Y. Tang, *Interface characteristics and mechanical properties of short carbon fibers/Al composites with different coatings*, Applied Surface Science, 255(2009)4393–4400.
6. M. Dresselhaus, G. Dresselhaus, K. Sugihara, I. Spain and H. Goldberg, *Graphite fibers and filaments*, Springer Series in Materials Science, vol. 5, Berlin: Springer, 1988.
7. M. Sevilla and A. B. Fuertes, *Catalytic graphitization of templated mesoporous carbons*, Carbon, 44(2006)468–474.

قرار گرفتن نانو الیاف کربنی الکترورسی شده در داخل حمام تجاری الکترولس نیکل، پوششی یکپارچه از فلز نیکل با ضخامت تقریبی ۱۸۴ nm در سرتاسر الیاف بدست آمد. هم چنین، بواسطه اثر کاتالیزوری نیکل تشکیل شده بر روی سطح نانوالیاف کربنی، افزودن استیل استنات نیکل II به پیش ماده های سازنده محلول الکترورسی، سبب تسریع عملیات گرافیت شدن و انجام آن در حدود ۱۴۰۰°C گردید.

8. Fitzer, B. Kegel and R. V. Kohlenstoffges "attigter, *Carbon*, 6(1968)433–446.
9. F. Zhang, H. Dongmei, G. Shutian and C. Qingyun, *Effect of fiber splitting on the catalytic graphitization of electroless Ni-B-coated polyacrylonitrile-based carbon fibers*, Surface & Coatings Technology, 203(2008)99–103.
10. M. Weisenberger, I. Martin, J.V. Agullo and H. V. Rizo, *Carbon*, 47 ( 2009 ) 221 –2218.
11. S. J. Park, Y. S. Jang and K. Y. Rhee, *Interlaminar and ductile characteristics of carbon fibers-reinforced plastics produced by nanoscaled electroless nickel plating on carbon fiber surfaces*, Journal of Colloid and Interface Science, 245(2002)383–390.