

Vertical Electrospinning of UHMWPE/ZnO Nanocomposite Fibers at High Temperature

Hadi Hosseini, Mehrdad Kokabi*, and Nadereh Golshan Ebrahimi

Polymer Engineering Department, Faculty of Chemical Engineering, Tarbiat Modares University,
P.O. Box: 14115-114, Tehran, Iran

Received 18 July 2013, accepted 18 February 2014

ABSTRACT

UHMWPE, as a thermoplastic polymer and especially in the form of high performance fiber, has attracted much interest due to its exceptional tribological and mechanical properties. In this work, electrospinning process, known as a versatile, low cost, highly efficient and suitable technique for continuous production of fine fibers in micron or nanometer scale is employed to fabricate the UHMWPE/ZnO nanocomposite fibers. Electrospinning of UHMWPE has some inherently serious problems and limitations, due to its poor solubility in common solvents and low electrical conductivity of its solution. The most important issue is the necessity of maintaining the system temperature sufficiently high to prevent temperature depression and solution gelation during spinning. Fabrication of UHMWPE/ZnO nanocomposite fibers, containing 2.5, 5 and 7.5 wt% of ZnO nanoparticle, was carried out by self-modified vertical electrospinning at high temperature. An electrospinning system was first equipped with an infrared emitter (IR heaters) and then the conditions for fabrication of bead-free uniform UHMWPE fibers with an average diameter of $1.8 \pm 0.25 \mu\text{m}$ were implemented. Under the acquired conditions, uniform and bead-free UHMWPE/ZnO nanocomposite fibers containing various percentages of ZnO nanoparticles were also successfully produced. UHMWPE/ZnO nanocomposite fibers exhibited much higher average diameter proportional to added percentage of nanoparticles. The morphology and the quality of nanoparticles dispersion within nanocomposite fibers were evaluated using field emission scanning electron microscopy (FESEM) equipped with EDAX mapping spectra. The results showed a well dispersed morphology, which was attributed to good compatibility between the ZnO nanoparticles, solvent and UHMWPE matrix.

Keywords:

UHMWPE,
nanocomposite fibers,
vertical electrospinning,
high temperature,
ZnO nanoparticles

(*)To whom correspondence should be addressed.

E-mail: mehrir@modares.ac.ir

الکتروریسی عمودی الیاف نانوکامپوزیتی UHMWPE/ZnO در دمای زیاد

هادی حسینی، مهرداد کوکبی*، نادره گلشن ابراهیمی

تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی شیمی، گروه مهندسی پلیمر، صندوق پستی ۱۱۴-۱۴۱۱۵

دریافت: ۹۲/۴/۲۷، پذیرش: ۹۲/۱۱/۲۹

چکیده

پلی اتیلن با وزن مولکولی بسیار زیاد (UHMWPE) به عنوان پلیمری گرمانرم، با خواص تریبولوژیکی و مکانیکی استثنایی، به ویژه به شکل الیاف بسیار کارآمد، خیلی مورد توجه است. در پژوهش حاضر، الکتروریسی که به عنوان روشی آسان، کم هزینه و با بازده زیاد برای تولید پیوسته الیاف ظریف با قطرهای میکرونی، حتی نانومتری شناخته می شود، برای تولید الیاف نانوکامپوزیتی UHMWPE/ZnO به کار گرفته شد. الکتروریسی UHMWPE به دلیل انحلال پذیری ضعیف آن در حلال های رایج و رسانایی الکتریکی بسیار کم محلول آن، با مشکلات و محدودیت های متعددی روبروست. از مهم ترین آنها ضرورت زیاد نگاه داشتن دمای سامانه برای جلوگیری از کاهش دما و ژل شدن محلول حین ریسندهی است. در این پژوهش، ساخت الیاف نانوکامپوزیتی UHMWPE/ZnO با سه سطح از بارگذاری نانوذرات روی اکسید (۲/۵، ۵ و ۷/۵ وزنی) به روش الکتروریسی عمودی اصلاح یافته در دمای زیاد انجام شد. سامانه الکتروریسی مزبور به گرم کن های زیرقرمز، مجهز شد. ابتدا شرایط برای تولید الیاف UHMWPE یکنواخت بدون شکل شناسی دانه ای با قطر متوسط $1.8 \pm 0.25 \mu\text{m}$ ، تنظیم شد. در این شرایط، الیاف نانوکامپوزیتی UHMWPE/ZnO نیز حاوی درصد های وزنی مختلف نانوذرات روی اکسید تولید شد. الیاف نانوکامپوزیتی UHMWPE/ZnO قطر متوسط بیشتری را متناسب با درصد نانوذرات اضافه شده نشان می دهد. شکل شناسی و چگونگی پراکنش نانوذرات در الیاف نانوکامپوزیتی، با آزمون میکروسکوپی الکترونی پویشی (FE-SEM) مجهز به تحلیل کیفی EDAX همراه با تصویربرداری نگاشت ارزیابی شد. نتایج، پراکنش بسیار خوب نانوذرات روی اکسید را به دلیل سازگاری با حلال و UHMWPE، نشان می دهد.

واژه های کلیدی

UHMWPE

الیاف نانوکامپوزیتی،

الکتروریسی عمودی،

دمای زیاد،

نانوذرات ZnO

* مسئول مکاتبات، پیام نگار:

mehrir@modares.ac.ir

مقدمه

پلی اتیلن با وزن مولکولی بسیار زیاد (ultra high molecular weight)، پلیمری بی همتا با خواص تریبولوژیکی استثنایی و مجموعه‌ای از خواص فیزیکی و شیمیایی بی نظیر است [۱]. این پلیمر بیشترین مقاومت سایشی - دوغابی را در میان گرمانرم‌ها و بیشترین مقاومت لغزشی و استحکام ضربه‌ای شکاف‌دار را در میان پلاستیک‌های تجاری دارد [۲]. به جز مقاومت سایشی و چقرمگی [۱]، ضریب اصطکاک خودروان‌کننده غیرچسبان آن نیز زیاد است [۳]. حتی در دماهای خیلی کم، استحکام ضربه‌ای خوب، ضریب اصطکاک کم و جذب آب اندک دارد [۲]. مقاومت در برابر ترک و مقاومت به شکست خستگی چرخه‌ای UHMWPE عالی است [۲]. همچنین، خاصیت تضعیف انرژی و صوت را دارد. خواص دی‌الکتریک UHMWPE مناسب است و برای استفاده در زیست‌پزشکی و صنایع غذایی مجاز به شمار می‌آید [۴]. UHMWPE مقاومت فرسایشی زیاد در مقایسه با بسیاری از پلیمرهای دیگر از جمله پلی‌اترکتون، پلی‌اتیلن و پلی‌استیرن دارد [۵]. ولی معایبی، از قبیل سختی و مدول یانگ کم دارد و با اعمال بار، دچار خزش می‌شود [۶]. برای بهبود این خواص، آن را به روش‌های خاصی به الیاف تبدیل می‌کنند [۷].

چند روش برای تولید الیاف UHMWPE ابداع شده که از مذاب‌رسی تا ریسندگی با محلول خیلی رقیق دسته‌بندی شده‌اند، اما همه این روش‌ها بر پایه تغییر شکل ماده ژل یا مذاب است [۸]. روش مذاب‌رسی، به دلیل اینکه در آن با افزایش وزن مولکولی، گرانیوی مذاب به شدت افزایش می‌یابد و شکست مذاب نیز در سرعت‌های برشی کم اتفاق می‌افتد، روش چندان مناسبی نیست. از طرف دیگر، با افزایش وزن مولکولی و افزایش گرهوردگی زنجیره‌ها، پلیمر مذاب‌رسی شده در برابر کشش مقاومت نشان می‌دهد و کشش‌پذیری کاهش می‌یابد [۹].

از دیگر روش‌های تولید الیاف UHMWPE که فقط در حد آزمایشگاهی و پژوهشی باقی مانده، روش رشد سطحی است که Barham و همکاران برای نخستین بار از این روش استفاده کردند. در این روش، پس از انحلال UHMWPE در حلال پارافین مایع و تهیه ژل از آن، ژل بین دو استوانه هم‌محور قرار داده می‌شود. استوانه داخلی با سرعت یکنواخت شروع به چرخش می‌کند. در این حالت، لیفی تولید می‌شود که با سطح استوانه داخلی تماس دارد. این لیف بدون جدا شدن از سطح کشیده می‌شود و درشت‌مولکول‌هایی که به بلور در حال رشد در سطح استوانه داخلی می‌چسبند، شروع به کشیده شدن کرده، کرنشی مداوم را تحمل می‌کنند که مانع بازگشت زنجیرها به حالت قبلی می‌شود. با جمع کردن پیوسته لیف تولید شده

روی جمع‌کننده و ثابت نگه‌داشتن غلظت محلول بین دو استوانه، الیاف پیوسته تولید می‌شود. از مزایای این روش به استحکام کششی و مدول زیاد الیاف تولید شده می‌توان اشاره کرد که به ترتیب ۲ و ۱۰۰ GPa هستند. اما، مشکل عمده این روش که مانع از صنعتی - تجاری شدن آن شده، سرعت بسیار کم تولید آن است. همچنین، برای تولید الیاف یکنواخت با خواص ثابت باید غلظت محلول بین دو استوانه همواره ثابت بماند که فراهم کردن چنین شرایطی بسیار دشوار است [۱۰].

امروزه، الیاف UHMWPE با فناوری ژل‌رسی تهیه می‌شوند که در سال ۱۹۸۰ تجاری شده است. در این فناوری، محلول ۲٪ تا ۱۰٪ وزنی UHMWPE در حلال، ترجیحاً هیدروکربن مثل دکالین یا تتراپن در دمای ۱۷۰°C-۱۳۰°C برای تشکیل پیش‌ماده ژل که در آن شبکه گرهوردگی‌ها برقرار است، اکستروود می‌شود. پیش‌ماده ژل بیش از یک مرتبه در محدوده دمایی ۱۴۳°C-۱۲۰°C با نسبت کششی در محدوده ۴ تا ۳۰ برابر در معرض کشش گرم قرار می‌گیرد تا لیفی کاملاً جهت‌یافته با شکل‌شناسی زنجیر لیفچه‌های کوچک کشیده شده (extended small fibrillar chain morphology)، تشکیل شود. اساس این روش بر مبنای ژل‌رسی و کشش گرم دومرحله‌ای بنا نهاده شده است و مزیت آن تولید پیوسته الیاف در سرعت‌های زیاد و نیز تولید الیاف با مدول و استحکام کششی زیاد است [۸، ۱۱].

در سال‌های اخیر از روش الکترورسی، برای تهیه الیاف UHMWPE با قطر میکرون یا حتی نانومتر استفاده شده است. از مزایای این روش می‌توان هزینه بسیار کم تولید و آسان بودن فرایند نسبت به ژل‌رسی نام برد [۱۲، ۱۳]. اما الکترورسی پلی‌اولفین‌ها، به ویژه پلی‌اتیلن به دلیل انحلال‌پذیری ضعیف آن در حلال‌های رایج با چالش مواجه است. به‌طور کلی می‌توان گفت که برای انحلال UHMWPE، دمای زیاد و حلال‌های غیرقطبی نیاز است [۱۴-۱۶]. چون در الکترورسی متوسط قطر الیاف با افزایش فرارایت حلال کاهش می‌یابد، به همین دلیل از پارازایلن که فرارترین حلال شناخته شده برای UHMWPE و خانواده پلی‌اتیلن‌هاست، استفاده می‌شود. اما محلول پلیمری تهیه شده از پارازایلن، دارای ثابت دی‌الکتریک کم و رسانایی الکتریکی اندک است و الکترورسی را با مشکل مواجه می‌کند [۱۳].

برای رفع این مشکل توصیه شده است، به محلول مقدار مشخصی نمک (تتراپتیل آمونیوم برمید) اضافه شود تا رسانایی محلول افزایش یابد [۱۳، ۱۷]. بدین ترتیب، برای رفع محدودیت‌ها در تولید الیاف UHMWPE به روش الکترورسی ابتدا باید پلیمر را در دمای زیاد حل کرد. سپس، رسانایی محلول تهیه شده را افزایش داد و از الکترورسی در دمای زیاد بهره برد. تاریخچه تولید نانوالیاف UHMWPE به سال ۲۰۰۶ برمی‌گردد که Rein و همکاران، با استفاده

از سامانه ریسندگی الکتريکی مجهز به حمام روغن، موفق به تولید آن شدند [۱۳]. کار Rein و همکاران گسترش یافت و با به‌کاربردن سامانه گاز داغ دوررشته‌ساز (gentle annular gas veil)، در سامانه الکترورسی، با جلوگیری از تبخیر حلال و بلورینگی زودرس پلیمر موفق به تولید نانوالیاف UHMWPE با متوسط قطر ۲۳۰ nm شدند [۱۸]. آنها باز هم به‌وسیله سامانه الکترورسی، الیاف UHMWPE تقویت شده با نانولوله‌های کربنی با قطر ۴ μm را تولید کردند [۱۹]. به‌جز کار Rein و همکاران، تنها تلاش دیگر برای تولید نانوالیاف UHMWPE به سال ۲۰۱۰ برمی‌گردد که Shen و همکاران، موفق به تولید آن شدند و با بررسی رسانایی گرمایی، مقدار آن را ۱۰۴ W/mK تخمین زدند. در این کار آنها از روش کشش دو مرحله‌ای، همراه با سامانه گرمادهی استفاده کردند [۲۰].

روش‌ها

تهیه تعلیق مناسب الکترورسی

برای تهیه تعلیق پایدار از نانوذرات ZnO در محلول پلیمری مناسب برای الکترورسی، ابتدا نانوذرات با بارگذاری‌های مختلف (۲/۵، ۵ و ۷/۵٪ وزنی) به حلال داغ پارازیلن (در دمای ۱۳۰°C) اضافه و به مدت ۵ min همزده شدند. پس از آن، به مدت ۱۵ min در دستگاه فراصوت قرار گرفت تا نانوذرات به‌طور یکنواخت در حلال پراکنده شوند. سپس، این مخلوط به محلول داغ UHMWPE (در دمای ۱۳۰°C) که از پیش تهیه شده اضافه و اجازه داده شد تا مخلوطی یکنواخت به‌دست آید. در ادامه، ضمن اضافه‌کردن نمک، همزدن تا انحلال کامل آن ادامه یافت. بدین ترتیب، محلول نهایی برای الکترورسی آماده شد.

الکترورسی الیاف نانوکامپوزیتی

محلول آماده، به‌سرعت وارد سرنگ شیشه‌ای (۵ mL) از پیش گرم شده، شد. هنگام ریسندگی باید همواره توجه داشت که سرنگ حاوی محلول باید در دمای زیاد باقی بماند تا از تشکیل ژل درون سرنگ (به دلیل کاهش دمای محلول) جلوگیری شود. برای الکترورسی از پمپ سرنگی دقیق Harvard-PHD 2000 Infusion ساخت آمریکا و منبع تغذیه با ولتاژ زیاد (ایران، با دقت ۰/۱ kV) استفاده شد. فرایند الکترورسی UHMWPE به ترتیب در غلظت ثابت ۰/۵ wt٪ پلیمر، دمای ثابت ۱۳۰°C و سرعت ثابت ۰/۱۵ mL/min در ولتاژ اعمالی با سه سطح ۱۵، ۲۰ و ۲۵ kV و فاصله کاری در دو سطح ۱۰ و ۱۵ cm انجام شد. شایان ذکر است، ابتدا شرایط مناسب برای تولید الیاف UHMWPE به‌دست آمد. از این شرایط، برای تولید الیاف نانوکامپوزیتی استفاده شد. جمع‌کننده صفحه‌ای، از جنس فویل آلومینیمی برای جمع‌آوری الیاف نانوکامپوزیتی به‌کار گرفته شد. برای الکترورسی و تولید الیاف نانوکامپوزیتی UHMWPE/ZnO از سامانه الکترورسی عمودی دمایی، نشان داده شده در شکل ۱ استفاده شد که مجهز به گرم‌کن‌های زیرقرمز (۵۰۰ W و ۲۲۰ V) است. دما با حسگر متحرک نصب شده روی سرنگ شیشه‌ای که به دور آن غلاف

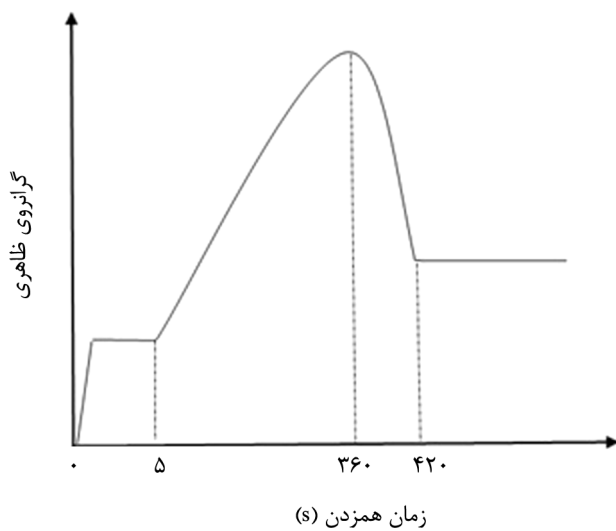
ZnO ماده‌ای زیست‌سازگار و ضدباکتریایی است که برای کاربردهای زیستی از قبیل تصویربرداری زیستی و تشخیص سرطان قابل استفاده است. کاربرد این ماده در تولید الیاف نانوکامپوزیتی بر پایه UHMWPE تاکنون گزارش نشده است. ساخت الیاف نانوکامپوزیتی UHMWPE حاوی ZnO، در پیچه‌های کاربردی جدیدی در پزشکی، زیست‌پزشکی و ساخت داربست‌ها باز می‌کند. در پژوهش حاضر، تولید این الیاف نانوکامپوزیتی با شکل‌شناسی مناسب، به روش الکترورسی عمودی در دمای زیاد، مدنظر قرار گرفت که لازمه آن انجام اصلاحاتی روی سامانه الکترورسی در حالت عمودی و کنترل شرایط فرایندی است.

از پلیمر UHMWPE با وزن مولکولی ۶×۱۰^۶ g/mol ساخت Sigma-Aldrich، پارازیلن (حلال) و نمک تتراپوتیل آمونیوم برمید (برای افزایش رسانایی الکتريکی محلول) ساخت Merck و نانوذرات ZnO (متوسط قطر ۲۵±۱۰ nm) ساخت نانورادبهان ایران، استفاده شده است. آزمون‌های انجام شده برای تهیه مقادیر متوسط سه مرتبه تکرار شده و خطای اضافه شده نیز از نوع انحراف معیار است. برای بررسی و مشاهده شکل‌شناسی اولیه الیاف تولید شده، میکروسکوپ نوری Olympus BX51M و میکروسکوپ الکترونی پویشی (SEM) Hitachi S-4160 ساخت ژاپن به‌کار گرفته شد. همچنین، برای بررسی شکل‌شناسی و اطمینان از وجود و پراکنش نانوذرات ZnO در الیاف UHMWPE، آزمون FE-SEM با دستگاه

تجربی

مواد و دستگاه‌ها

از پلیمر UHMWPE با وزن مولکولی ۶×۱۰^۶ g/mol ساخت Sigma-Aldrich، پارازیلن (حلال) و نمک تتراپوتیل آمونیوم برمید (برای افزایش رسانایی الکتريکی محلول) ساخت Merck و نانوذرات ZnO (متوسط قطر ۲۵±۱۰ nm) ساخت نانورادبهان ایران، استفاده شده است. آزمون‌های انجام شده برای تهیه مقادیر متوسط سه مرتبه تکرار شده و خطای اضافه شده نیز از نوع انحراف معیار است. برای بررسی و مشاهده شکل‌شناسی اولیه الیاف تولید شده، میکروسکوپ نوری Olympus BX51M و میکروسکوپ الکترونی پویشی (SEM) Hitachi S-4160 ساخت ژاپن به‌کار گرفته شد. همچنین، برای بررسی شکل‌شناسی و اطمینان از وجود و پراکنش نانوذرات ZnO در الیاف UHMWPE، آزمون FE-SEM با دستگاه



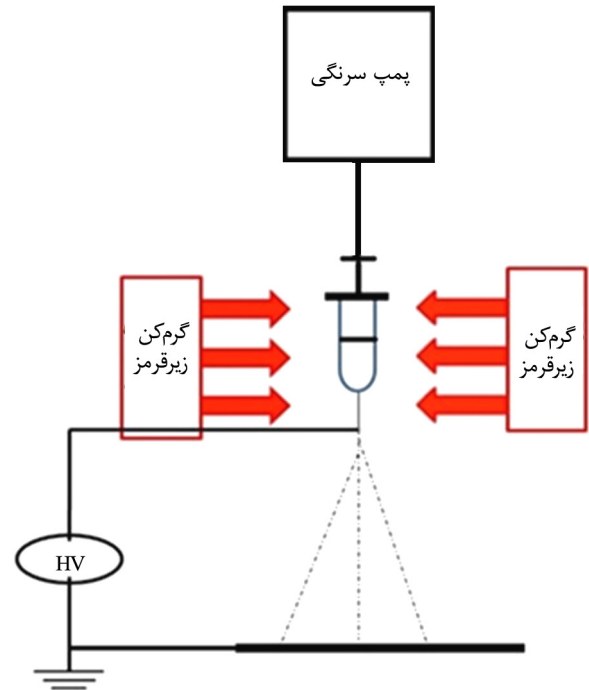
شکل ۲- نمودار گرانروی ظاهری برحسب زمان همزدن (۵ s) زمان شروع پیک، ۳۶۰ s قله پیک و ۴۲۰ s زمانی دلخواه پس از پیک حالت توزیع تعادلی).

اتصالات مولکولی، در نتیجه شبکه تشکیل می‌دهند که می‌تواند ماهیتی شبه بلوری داشته باشد. با گذشت زمان، این شبکه به طور جزئی انبساط یافته، به طور همگن در سراسر محلول توزیع می‌شود و به توزیعی تعادلی می‌رسد که گرانروی ظاهری ثابت در محلول مشاهده می‌شود [۲۱].

الیاف UHMWPE

با توجه به ادبیات پژوهش، تعیین شرایط مناسب در الکترورسی برای تولید الیاف بسیار مهم است. بنابراین، باید غلظت مناسب محلول همراه با شرایط فرایندی الکترورسی از جمله ولتاژ و فاصله کاری، یعنی فاصله نوک سوزن تا جمع‌کننده، معین شود. بدین منظور، ابتدا شرایط مناسب برای تولید الیاف UHMWPE به دست آمد. سپس در آن شرایط، الیاف نانوکامپوزیتی تولید شد. شکل‌های ۳ و ۴ تصاویر میکروسکوپی نوری الیاف UHMWPE را با توجه به آزمون‌های متعدد انجام شده مندرج در جدول ۱، نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، الیاف تولید شده در فاصله کاری ۱۰ cm، شکل‌شناسی مارپیچ دارند. پدیده مزبور به این دلیل است که در لحظه برخورد جت باردار به سطح، بارهای الکتریکی با علامت مخالف از جمع‌کننده به جت منتقل می‌شوند و مقدار چگالی بار الکتریکی افزایش می‌یابد. این افزایش می‌تواند به شکل اختلال به جت وارد شده، موجب پیچ‌خوردگی الیاف شود. هرچه فاصله کاری کمتر باشد، این اثر تشدید می‌شود [۲۲]. انتظار می‌رود، با



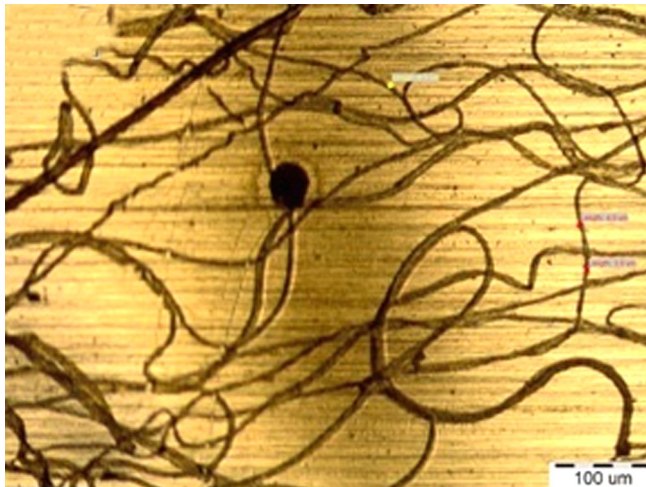
شکل ۱- طرح کلی سامانه الکترورسی دمایی زیاد.

محافظتی پیچیده شده بود، اندازه‌گیری شد.

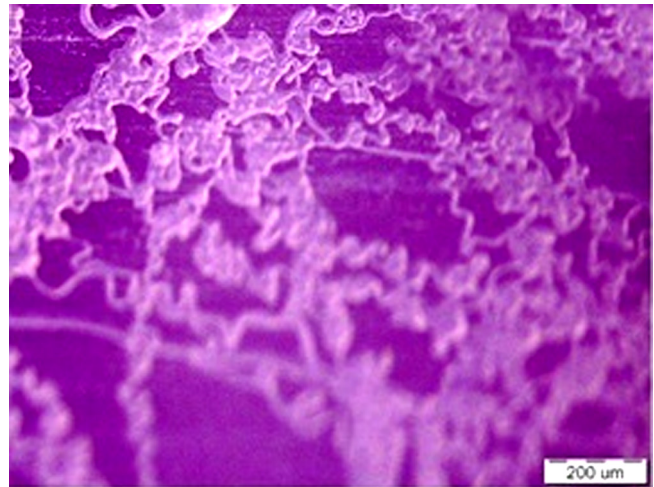
نتایج و بحث

گرانروی ظاهری

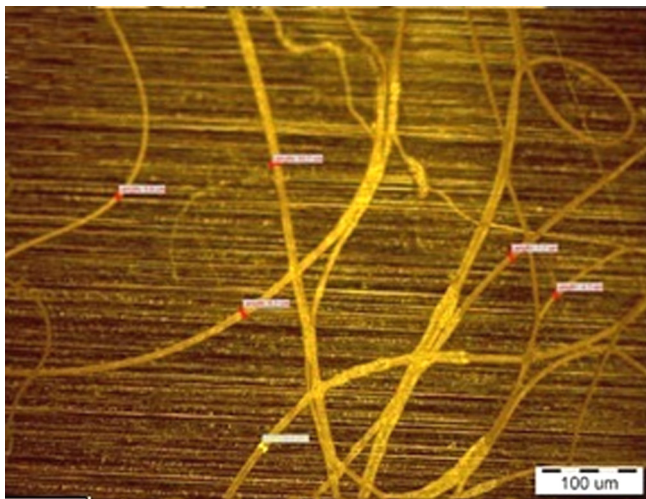
با افزودن مقدار معینی از پودر UHMWPE (۱wt%/۵) به حلال، هنگام انحلال اثر افزایش اولیه گرانروی و به دنبال آن کاهش گرانروی مشاهده شد. ۵ s پس از شروع همزدن گرانروی ظاهری افزایش و پس از گذشت ۳۶۰ s دوباره گرانروی ظاهری کاهش یافت. نمودار تغییرات گرانروی ظاهری برحسب زمان همزدن به طور کیفی در شکل ۲ نشان داده شده است. این پدیده به سرعت چرخش اولیه همزن مغناطیسی وابسته نیست و افزایش گرانروی می‌تواند موجب کاهش سرعت چرخش همزن مغناطیسی درون محلول، حتی توقف آن شود. Wabena و همکاران [۲۱] اولین بار این پدیده را مشاهده و گزارش کردند که توسط Rein و همکاران [۱۹] نیز تأیید شد. آنها علت این پدیده را با تشکیل و سپس توزیع شبکه ژل توجیه کردند. بدین شکل که با همزدن، نواحی جریان توسعه یافته و باعث انبساط و باز شدن جزئی زنجیرهای مولکولی UHMWPE می‌شود. این زنجیرهای مولکولی که به طور جزئی کشیده شده‌اند، با یکدیگر



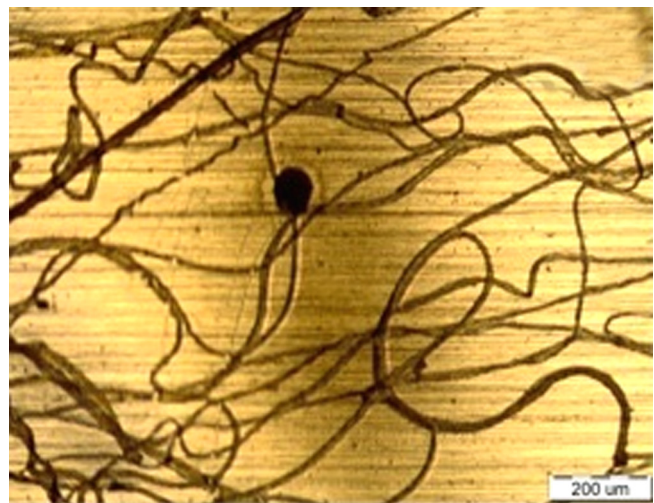
(الف)



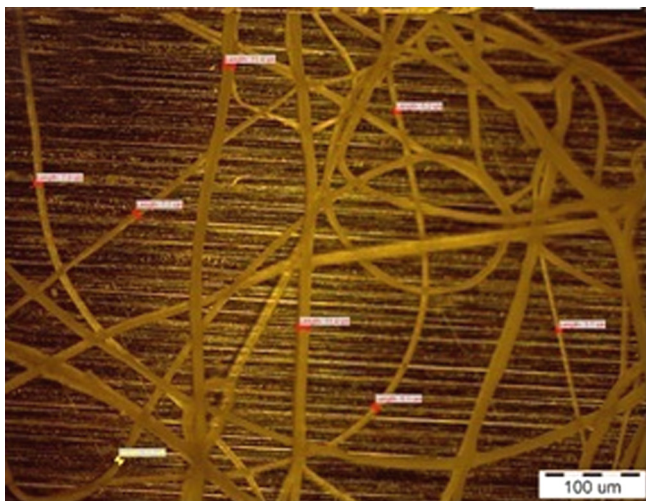
(الف)



(ب)



(ب)



(ج)

شکل ۴- تصاویر میکروسکوپ نوری از الیاف تولید شده در غلظت ۰/۵ wt/، پلیمر، فاصله کاری ۱۵ cm، سرعت ۰/۱۵ mL/min و ولتاژهای مختلف: (الف) ۱۵ kV، (ب) ۲۰ kV و (ج) ۲۵ kV.

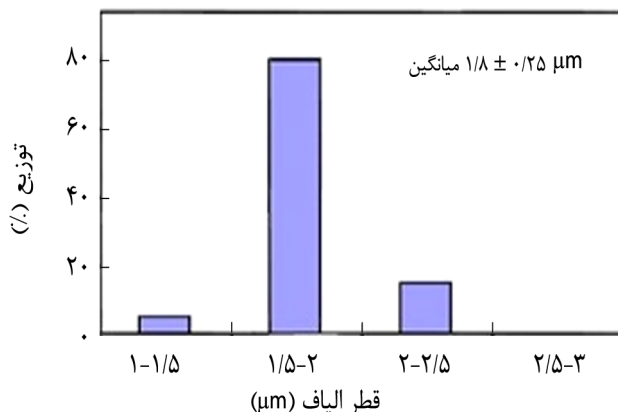
شکل ۳- تصاویر میکروسکوپ نوری از الیاف تولید شده در غلظت ۰/۵ wt/، پلیمر، ولتاژ ۱۵ kV، سرعت ۰/۱۵ mL/min و فاصله‌های کاری مختلف: (الف) ۱۰ cm و (ب) ۱۵ cm.

افزایش فاصله کاری [۲۲] و ولتاژ (افزایش زمان پرواز جت) [۲۳] این پدیده حذف شود. با افزایش ولتاژ اعمالی نیروی کولنی، مدت زمان پرواز جت پلیمری در فضا افزایش می‌یابد. این موضوع، موجب کشیده شدن بیشتر جت شده، از برخورد سریع جت با صفحه جمع کننده و باردار شدن مجدد آن جلوگیری می‌کند.

از سوی دیگر می‌توان گفت، با افزایش بیش از حد ولتاژ اعمالی در فاصله کاری ثابت و در نتیجه میدان الکتریکی قوی تر، چگالی بار الکتریکی افزایش یافته، موجب پیچ خوردگی الیاف می‌شود [۲۳]. بنابراین، می‌توان حد ولتاژ معینی را برای تولید الیاف UHMWPE در نظر گرفت. همچنین، افزایش غلظت محلول و به دنبال آن افزایش گرانیوی نیز می‌تواند از عوامل کاهش پیچ خوردگی الیاف باشد که

الیاف نانوکامپوزیتی UHMWPE/ZnO

شکل ۶ تصاویر FE-SEM الیاف نانوکامپوزیتی UHMWPE/ZnO و نمودار توزیع قطر و متوسط قطر الیاف، با سه سطح بارگذاری ۲/۵، ۵ و ۷/۵٪ وزنی را نشان می‌دهد. دیده می‌شود، این الیاف که با استفاده از شرایط مناسب گفته شده در قسمت قبل تولید شده‌اند، بدون شکل‌شناسی دانه‌ای و کاملاً یکنواخت هستند. با افزایش درصد وزنی نانوذرات از ۲/۵ به ۵ و ۷/۵٪ وزنی متوسط قطر الیاف نانوکامپوزیتی به ترتیب از $44 \pm 4 \mu\text{m}$ به $49 \pm 7 \mu\text{m}$ و $49 \pm 10 \mu\text{m}$ افزایش می‌یابد. علت این موضوع افزایش گرانیوی، به علت وجود نانوذرات ZnO در محلول پلیمری در مقایسه با محلول خالص است. به همین علت، در مقایسه با شکل ۵، مشاهده می‌شود که قطر الیاف نانوکامپوزیتی نسبت به الیاف خالص افزایش محسوسی داشته است. شکل ۷ تحلیل EDAX تصویر FE-SEM سطوح منتخب از الیاف نانوکامپوزیتی حاوی نانوذرات ZnO را نشان می‌دهد. شایان ذکر است، شکل ۷ (۱) تا (۳) به ترتیب به سه سطح بارگذاری ۲/۵، ۵ و ۷/۵٪ وزنی نانوذرات ZnO مربوط است. شکل ۷-الف تصویر EDAX از سطوح منتخب الیاف نانوکامپوزیتی و شکل ۷-ب تصویر نگاشت آن را که برای تحلیل پراکندگی نانوذرات در ماتریس پلیمری استفاده شده است، نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، زمینه سیاه با نقاط روشن پراکنده در آن به خوبی مشخص است. زمینه سیاه نشانگر ماتریس پلیمری و نقاط روشن پراکنده شده در آن نشانگر نانوذرات است. با توجه به تصاویر مشاهده می‌شود، نانوذرات ZnO در ماتریس پلیمری به خوبی پراکنده شده‌اند که ناشی از سازگاری خوب این نانوذرات با حلال و نیز ماتریس پلیمری است. افزایش مقدار نانوذرات به ۷/۵٪ وزنی موجب نزدیک شدن نقاط روشن در تصویر به یکدیگر شده که حاکی از خوشه‌ای شدن نانوذرات ZnO است.

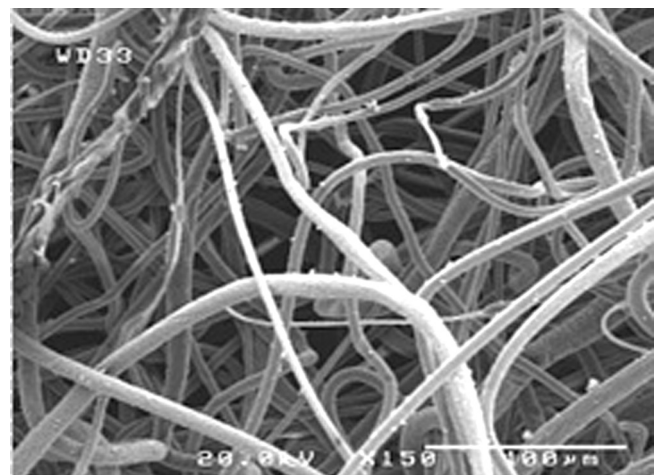


جدول ۱- آزمون‌های انجام شده برای تعیین شرایط بهینه ریسندگی.

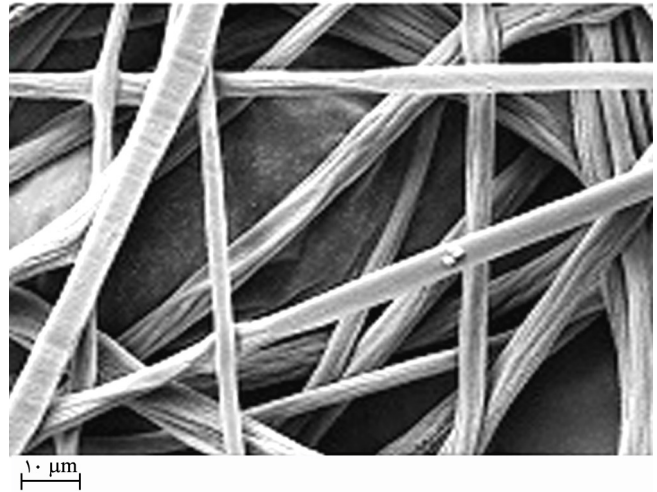
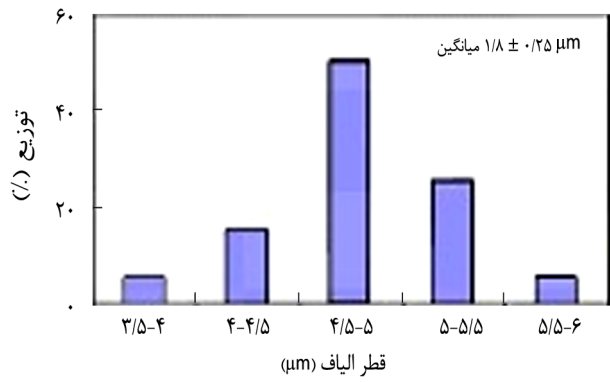
| غلظت محلول (wt./.) | ولتاژ (kV) | فاصله کاری (cm) | سرعت (mL/min) |
|--------------------|------------|-----------------|---------------|
| ۰/۵ | ۱۵ | ۱۰ | ۰/۱۵ |
| ۰/۵ | ۲۰ | ۱۰ | ۰/۱۵ |
| ۰/۵ | ۲۵ | ۱۰ | ۰/۱۵ |
| ۰/۵ | ۱۵ | ۱۵ | ۰/۱۵ |
| ۰/۵ | ۲۰ | ۱۵ | ۰/۱۵ |
| ۰/۵ | ۲۵ | ۱۵ | ۰/۱۵ |

در این پژوهش افزایش غلظت محلول، منجر به افزایش گرانیوی آن شده، خروج محلول از نوک سوزن و فرایند ریسندگی را با مشکل مواجه می‌ساخت. البته الیاف الکترورسی شده با شکل‌شناسی ماریپیج کاربردهای گسترده‌ای در مهندسی بافت، حسگرهای زیستی و شیمیایی دارند، ولی در این پژوهش، هدف تولید الیاف نانوکامپوزیتی با شکل‌شناسی صاف بود.

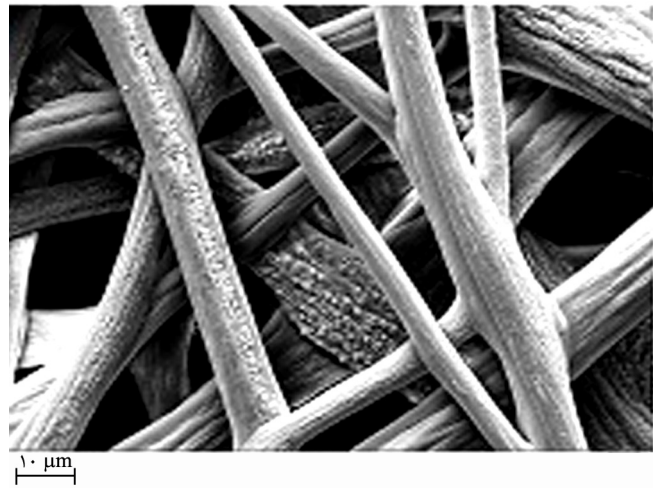
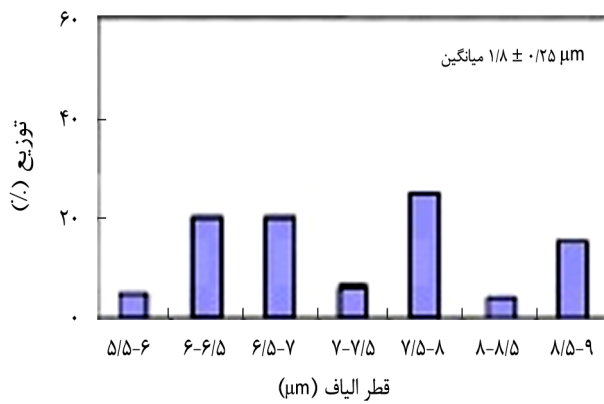
همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، با افزایش فاصله کاری و ولتاژ، الیاف با شکل‌شناسی صاف و بدون ماریپیج به دست آمد. بدین ترتیب، شرایط مناسب برای تولید الیاف UHMWPE در سامانه استفاده شده، عبارت‌اند از: غلظت ۰/۵ wt./، ولتاژ ۲۵ kV، فاصله کاری ۱۵ cm و سرعت جریان ۰/۱۵ mL/min. شکل ۵ تصویر SEM الیاف UHMWPE تولید شده و نمودار توزیع قطر و متوسط قطر الیاف را در این شرایط نشان می‌دهد. شایان ذکر است، الیاف تولید شده قطر متوسط $25 \pm 1 \mu\text{m}$ دارند.



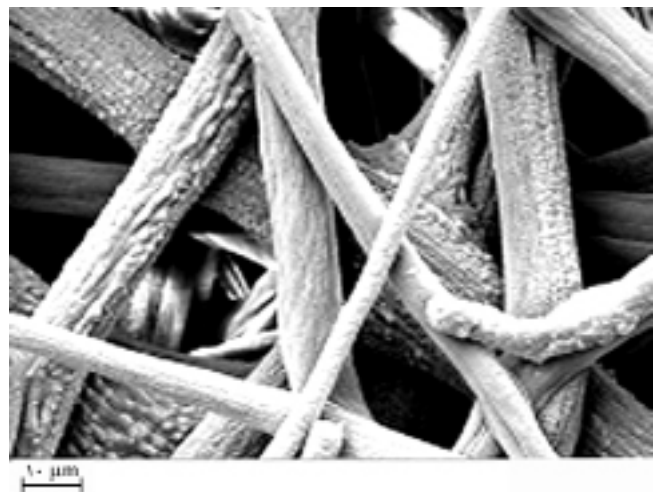
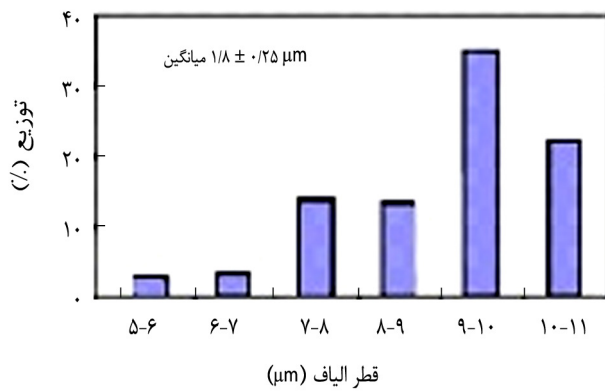
شکل ۵- عکس SEM الیاف UHMWPE و نمودار توزیع قطر و متوسط قطر الیاف در غلظت ۰/۵ wt./، ولتاژ ۲۵ kV و فاصله کاری ۱۵ cm.



(الف)



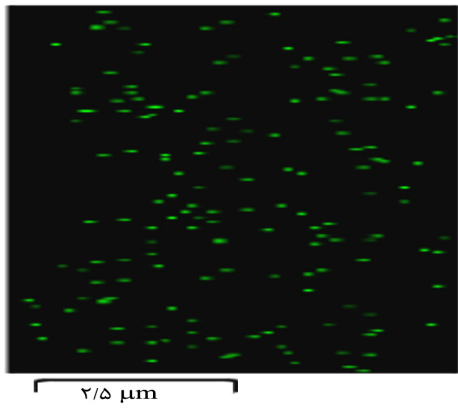
(ب)



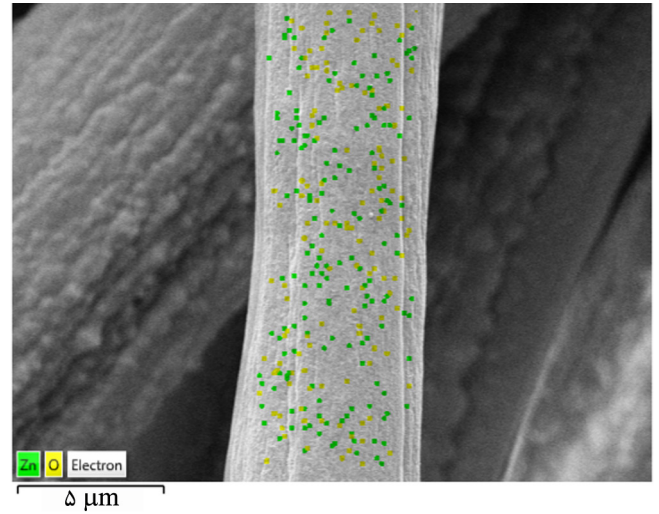
(ج)

شکل ۶- تصاویر FE-SEM الیاف نانوکامپوزیتی UHMWPE/ZnO و نمودار توزیع قطر و متوسط قطر الیاف با بارگذاری: (الف) ۲/۵ wt٪، (ب) ۵ wt٪ و (ج) ۷/۵ wt٪ نانوذرات ZnO بر پایه پلیمر.

(۱)

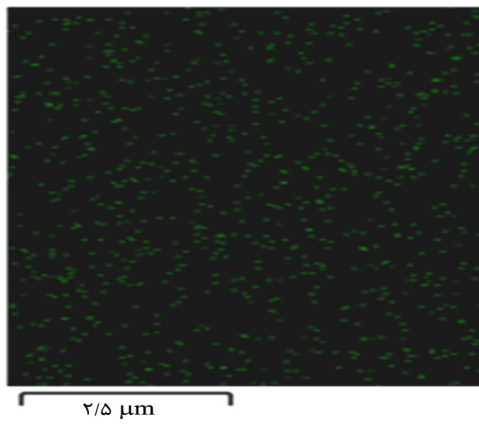


(ب)

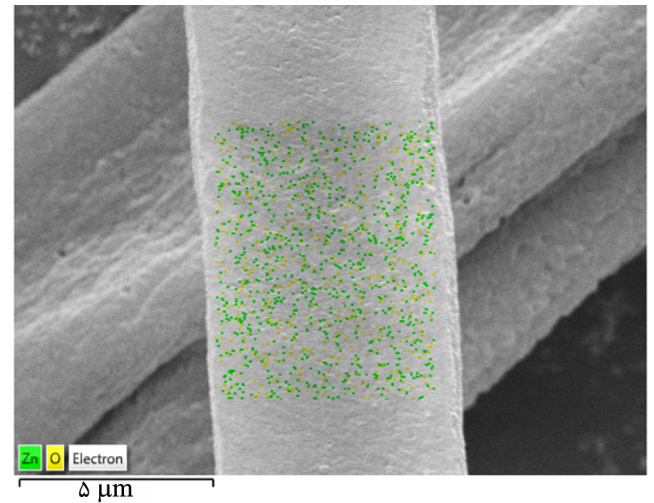


(الف)

(۲)

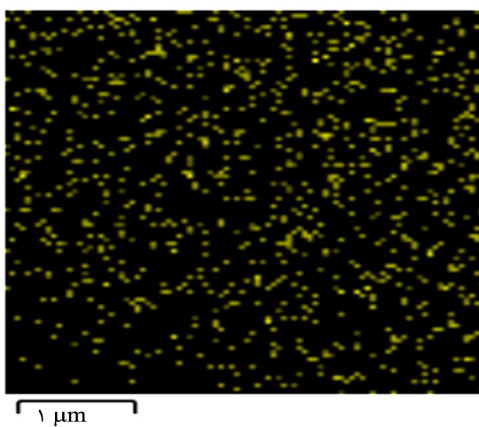


(ب)

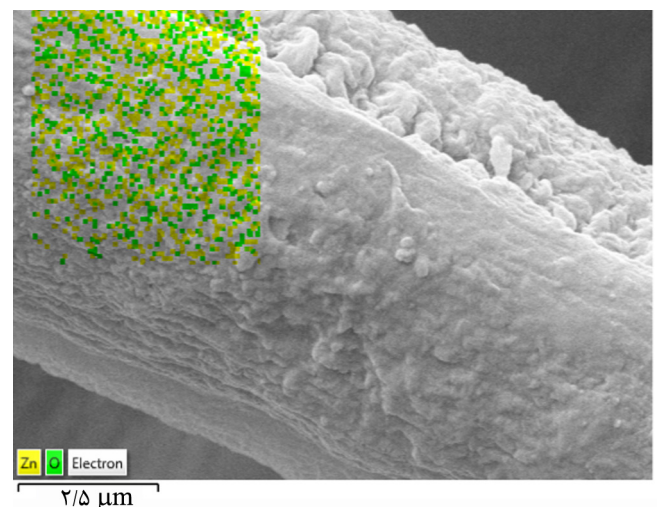


(الف)

(۳)



(ب)



(الف)

شکل ۷- تصاویر FE-SEM از الیاف نانوکامپوزیتی UHMWPE/ZnO: (الف) تصویر EDAX از سطوح منتخب الیاف نانوکامپوزیتی و (ب) تصویر نگاشت با سه بارگذاری (۱) ۲/۵ wt٪، (۲) ۵ wt٪ و (۳) ۷/۵ wt٪ از نانوذرات ZnO.

نتیجه گیری

به ترتیب از $4/9 \pm 0/44 \mu\text{m}$ به $7/4 \pm 0/89 \mu\text{m}$ و $10/8 \pm 0/49 \mu\text{m}$ افزایش یافت. علت این موضوع، افزایش گرانروی در اثر وجود نانوذرات ZnO در محلول‌های نانوکامپوزیتی در مقایسه با محلول خالص است. نانوذرات ZnO به دلیل سازگاری خوب با حلال و ماتریس پلیمری پراکندگی مناسب در الیاف نانوکامپوزیتی نشان دادند.

قدردانی

از دانشگاه تربیت مدرس و ستاد ویژه توسعه فناوری نانو به دلیل حمایت‌های مالی از این پژوهش، تشکر و قدردانی می‌شود.

مراجع

- Costa F.R., Goad M.A., Wagenknecht U., and Heinrich G., Nanocomposites Based on Polyethylene and Mg-Al Layered Double Hydroxide, I. Synthesis and Characterization, *Polymer*, **46**, 1-7, 2005.
- Wen J., Yin P., and Zhen M., Friction and Wear Properties of UHMWPE/Nano-MMT Composites under Oil Field Sewage Condition, *Mater. Lett.*, **62**, 4161-4163, 2008.
- Galetz M.C., Uth T., Wimmer M.A., and Adam P., Determination of the Temperature Rise within UHMWPE Tibial Components during Tribological Loading, *Acta Biomater.*, **6**, 552-562, 2010.
- Samad M.A. and Sinha S.K., Effects of Counterface Material and UV Radiation on the Tribological Performance of a UHMWPE/CNT Nanocomposite Coating on Steel Substrates, *Wear*, **271**, 2759-2765, 2011.
- Feng J., Ming Z., Meng Q., and Yang Q., CNTs/ UHMWPE Composites with a Two-Dimensional Conductive Network, *Mater. Lett.*, **62**, 3530-3532, 2008.
- Zhong W.H., Sui G., Jana S., and Miller J., Cosmic Radiation Shielding Tests for UHMWPE Fiber/Nano-epoxy Composites, *Compos. Sci. Technol.*, **69**, 2093-2097, 2008.
- Torrisi L., Gammino S., and Mezzasalma A.M., Laser Ablation of UHMWPE-Polyethylene by 438 nm High Energy Pulsed Laser, *Appl. Surf. Sci.*, **227**, 164-174, 2004.
- Chodak I., High Modulus Polyethylene Fibres: Preparation, Properties and Modification by Crosslinking, *Prog. Polym. Sci.*, **23**, 1409-1442, 1998.
- Xiao C., Zhang Y., An S., and Jia G., Investigation on the Thermal Behaviors and Mechanical Properties of Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene (UHMW-PE) Fibers, *J. Appl. Polym. Sci.*, **59**, 931-935, 1996.
- Barham P.J. and Keller A., High-Strength Polyethylene Fibers from Solution and Gel Spinning, *J. Mater. Sci.*, **20**, 2281-2302, 1985.
- Moadel H., Anaraki M., and Ameri R., Gel Spinning of UHMWPE: Effect of Processing Parameters and Raw Materials on Fiber Structure, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (In Persian)*, **2**, 81-89, 2005.
- Subbiah T., Bhat G.S., Tock R.W., Parameswaran S., and Ramkumar S.S., Electrospinning of Nanofibers, *J. Appl. Polym. Sci.*, **96**, 557-569, 2005.
- Rein D.M., Shavit-Hadar L., Khalfin R.L., Cohen Y., Shuster K., and Zussman E., Electrospinning of Ultra High Molecular Weight Polyethylene Nanofibers, *J. Polym. Sci., Pol. Phys.*, **45**, 766-777, 2007.
- Givens S.R., Gardner K.H., Rabolt J.F., and Chase D.B., High-Temperature Electrospinning of Polyethylene Microfibers from Solution, *Macromolecules*, **40**, 608-610, 2007.
- Liu Y., Chen S., Zussman E., Korach C.S. and Zhao W., Diameter-Dependent Modulus and Melting Behavior in Electrospun Semicrystalline Polymer Fibers, *Macromolecules*, **44**, 4439-4444, 2011.
- Cheng Y.W., Lu H., Wang Y., Thierry A., and Lotz B., Syndiotactic Polystyrene Nanofibers Obtained from High-Temperature Solution Electrospinning Process,

- Macromolecules*, **45**, 2371-2376, 2010.
17. Yoshioka T., Dersch R., Tsuji M., and Schaper K., Orientation Analysis of Individual Electrospun PE Nanofibers by Transmission Electron Microscopy, *Polymer*, **51**, 2383-2389, 2010.
 18. Rein D.M., Cohen Y., Ronen A., Shuster K., and Zussman E., Application of Gentle Annular Gas Veil for Electrospinning of Polymer Solutions and Melts, *Polym. Eng. Sci.*, **49**, 774-782, 2009.
 19. Rein D.M., Cohen Y., Lipp J., and Zussman E., Elaboration of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene/Carbon Nanotubes Electrospun Composite Fibers, *Macromol. Mater. Eng.*, **295**, 1003-1008, 2010.
 20. Shen S., Henry A., Tong J., Zheng R., and Chen G., Polyethylene Nanofibers with Very High Thermal Conductivities, *Nat. Nanotechnol.*, **5**, 251-255, 2010.
 21. Wabena K., Narh A., Barham J., and Keller A., Effect of Stirring on the Gelation Behavior of High-Density Polyethylene Solutions, *Macromolecules*, **15**, 464-469, 1982.
 22. Reneker D.H. and Yarin A.L., Electrospinning Jets and Polymer Nanofiber, *Polymer*, **49**, 2387-2425, 2008.
 23. Reneker D.H., Han T., and Yarin A.L., Buckling of Jets in Electrospinning, *Polymer*, **48**, 6064-6076, 2007.