کنترل و بررسی ناحیه‌ی تجمع نانوالیاف در فرایند الکتروریسی با یک و چند نازل

فرزانه قاسم‌خواه[۱]، نازنین انصاری[۲]، مریم یوسف‌زاده[۳]، مسعود لطیفی[۴]

چکیده:

الکتروریسی یکی از مهم‌ترین فرایندهای تولید نانوالیاف در سال‌های اخیر است. در این فرایند میدان الکتریکی قوی بین نازل حاوی محلول پلیمری و جمع کننده اعمال می‌شود و جت الکتروریسی را تشکیل می‌دهد. جت ایجاد شده یک سری ناپایداری‌های خمشی را در فاصله‌ی الکتروریسی تحمل می‌کند و به دلیل حرکت نامنظم جت، نانوالیاف به طور تصادفی تشکیل لایه‌ای را بر روی جمع کننده می‌دهند که به دلیل سرعت بالای جت، کنترل ناحیه‌ی تجمع مشکل است، اما روش‌های مختلفی برای کنترل جت و ناحیه‌ی تجمع وجود دارد. یکی از عوامل کنترل ناحیه‌ی تجمع نانوالیاف چگونگی اعمال میدان الکتریکی و میزان شدت آن است. در این تحقیق، برای کنترل جت و ناحیه‌ی تجمع نانوالیاف الکتروریسی شده از حلقه‌ها و دیسک‌های باردار هم‌نام با جت الکتروریسی شده استفاده شد که نتایج به‌دست آمده مبین مناسب بودن استفاده از این روش‌ها برای کنترل ناپایداری جت و کاهش ناحیه‌ی تجمع بوده است.

مقدمه

هنگامی که قطر الیاف پلیمری از میکرومتر به کم‌تر از یک میکرومتر یا چندصد نانومتر کاهش یابد، خواص جدید و ویژه‌ای به جهت افزایش میزان نسبت سطح به حجم الیاف ظهور می‌نماید که این خواص برجسته موجب شده است که نانوالیاف انتخاب مناسبی برای بسیاری از کاربردهای مهم و با کارایی بالا باشند. در سال‌های اخیر روش‌های متعددی برای تولید نانوالیاف پلیمری بکار گرفته شده است، اما تحقیقات نشان داده است که الکتروریسی بهترین و ساده‌ترین فرایند برای تولید نانوالیاف به مقدار زیاد است و امکان تولید نانوالیاف از طیف وسیعی از مواد با استفاده از این فرایند وجود دارد [۱]. به طور کلی الکتروریسی یک روش ساده و انعطاف‌پذیر برای تولید الیاف با قطر حدود ده‌ها نانومتر تا چند ده میکرومتر است. از مهم‌ترین ویژگی‌های الکتروریسی می‌توان به هزینه‌ی تولید کم در مقایسه با سایر روش‌ها، سرعت تولید نسبتاً بالا، توانایی تولید مواد با نسبت سطح به حجم زیاد و قابلیت تولید اکثر مواد (انواع پلیمرها، سرامیک‌ها، کامپوزیت‌ها) اشاره کرد [۲]. در فرایند الکتروریسی معمولی، میدان الکتریکی قوی بین نازل ظرف حاوی محلول پلیمری متصل به یک پمپ تزریق دقیق و صفحه‌ی جمع کننده اعمال می‌شود. هنگامی که نیروی الکتریکی بر کشش سطحی قطره‌ی پلیمری در نوک نازل غلبه کند، جت الکتروریسی تشکیل می‌شود. جت ایجاد شده یک سری ناپایداری‌های خمشی را در حین گذر تا صفحه‌ی جمع کننده (فاصله‌ی الکتروریسی) تحمل می‌کند که این عامل باعث کشش فوق‌العاده‌ی لیف تشکیل شده در جت می‌شود. این کشش به همراه تبخیر سریع مولکول‌های حلال در فاصله‌ی الکتروریسی منجر به کاهش قطر الیاف شده و الیاف مداوم نسبتاً خشک بر روی صفحه‌ی جمع کننده به‌طور تصادفی تشکیل می‌شوند [۳]. جت پلیمری در میدان الکتریکی به موجب این که نیروهای متضاد روی آن اثر می‌کند، ناپایدار است. کشش سطحی متمایل است که سطح جت را کوچک نماید و دافعه‌ی بارهای الکتریکی هم‌نام موجود در سطح جت آن را نامتعادل می‌کند و سطح آن را افزایش می‌دهد. بنابراین یکی از ناپایداری‌هایی که در طول الکتروریسی اتفاق می‌افتد ناپایداری‌های خمشی است که با چگالی شار الکتریکی سطحی بالا افزایش می‌یابد [۴]. به دلیل حرکت نامنظم جت، نانوالیاف به طور تصادفی تشکیل لایه‌ای را بر روی جمع کننده می‌دهند که به دلیل سرعت بالای جت، کنترل ناحیه‌ی تجمع نانوالیاف الکتروریسی شده مشکل است، اما روش‌های مختلفی برای کنترل جت و ناحیه‌ی تجمع وجود دارد. در الکتروریسی مسیر حرکت جت و چگونگی قرار گرفتن آن روی صفحه‌ی جمع کننده به‌شدت تحت تأثیر نیروهای وارد شده از سوی میدان الکتریکی اعمال شده به جت می‌باشد. بنابراین یکی از روش‌های ممکن جهت کنترل جمع‌آوری الیاف الکتروریسی شده کنترل نیروهای وارد بر جت از طریق به‌کارگیری میدان الکتریکی مناسب است. در نتیجه یکی از عوامل کنترل ناحیه‌ی تجمع نانوالیاف چگونگی اعمال میدان الکتریکی و میزان شدت آن است. در الکتروریسی، امکان ایجاد یک میدان الکتریکی خارجی به سادگی و با به‌کارگیری یک یا چند الکترود اضافی با بارهای مشابه یا مخالف بار جت وجود دارد. آنچه در این مورد اهمیت دارد انتخاب مناسب قطبیت الکترودها، شکل و موقعیت قرارگیری آنها در یک سامانه‌ی الکتروریسی است [۵]. تاکنون روش‌های مختلفی جهت کنترل فرایند الکتروریسی و ناحیه‌ی تجمع نانوالیاف با بهره‌گیری از تغییرات میدان الکتریکی ارائه شده است. به‌طور مثال، Jaeger و همکارانش [۶] از یک حلقه‌ی باردار با ولتاژ بالا و هم‌نام و به‌طور متحدالمرکز با سوزن سرنگ، استفاده کردند. Deitzel و همکارانش [۷] چند میدان الکتریکی مختلف، هم‌زمان با استفاده از حلقه‌های باردار مثبت و متحدالمرکز با سوزن در سامانه‌ی الکتروریسی تولید کردند که با به‌کارگیری این حلقه‌ها خطوط میدان الکتریکی در ناحیه‌ی مرکزی فاصله‌ی الکتروریسی متمرکز شده و شدت بیش‌تری می‌یابد. Bellan و همکارانش [۸] از الکترودهای کانونی کننده و هدایت کننده بین نازل و جمع کننده استفاده کردند تا مانع از حرکت مارپیچی نامنظم جت الکتروریسی شوند و ناحیه‌ی تجمع نانوالیاف را در ناحیه‌ای کوچک‌تر متمرکز کردند و نشان دادند که با استفاده از سامانه‌های الکتروریسی با میدان‌های الکتریکی هدایت کننده‌ی متغیر می‌توان تجمع نانوالیاف الکتروریسی شده را کنترل نمود. Kong و همکارانش [۹] از یک صفحه‌ی رسانای کمکی برای کنترل جمع‌آوری نانوالیاف استفاده کردند. Kim و همکارانش [۱۰ و ۱۱] برای تولید نانوالیاف آرایش‌یافته از سامانه‌ی الکتروریسی تک و چندنازله با الکترودهای استوانه‌ای شکل کمکی که به نازل ریسندگی متصل شده بودند و الکترودهای موازی با صفحه که به عنوان یک جمع کننده، میدان الکتریکی با جریان متناوب تولید می‌کردند تا جت‌های الکتروریسی را جمع نمایند، استفاده کردند. در این تحقیق، برای کنترل جت الکتروریسی و ناحیه‌ی تجمع نانوالیاف از حلقه‌ها و دیسک‌های مسی باردار هم‌نام با جت و در اندازه‌های مختلف در سامانه‌ی الکتروریسی معمول استفاده شد [۱۲].

روش تحقیق

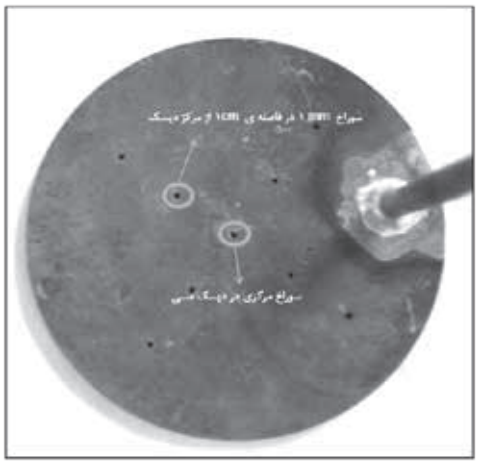
برای تولید نانوالیاف از پلیمر پلی‌اکریلونیتریل (PAN) شرکت پلی‌اکریل اصفهان با وزن

مولکولی (Mn) ۱۰۰۰۰۰ و حلال DMF با وزن مولکولی g/mol ۷/۱ و چگالی g/mol ۰/۹۴ برای تهیه‌ی محلول پلیمری با غلظت ٪۱۵ استفاده شد. سپس، محلول تهیه شده به دستگاه پمپ سرنگ ساخت شرکت New Era، مدل NE-1800 تغذیه شد. در این تحقیق ابتدا مقادیر بهینه‌ی عوامل الکتروریسی از قبیل غلظت محلول پلیمری، فاصله‌ی الکتروریسی، ولتاژ و میزان تغذیه مورد بررسی و آزمایش قرار گرفت و مقادیر بهینه برای آزمایش‌های اصلی مشخص شد. در ادامه جهت دستیابی به کنترل ناحیه‌ی تجمع نانوالیاف از حلقه‌های دایره‌ای شکل با بار هم‌نام و هم‌پتانسیل با سوزن در قطرهای ۳، ۴/۲ و ۶/۲ سانتی‌متر در سامانه‌ی الکتروریسی استفاده شد. هر بار یکی از این حلقه‌ها هم‌سطح با نوک نازل به طوری که نوک نازل در مرکز حلقه قرار بگیرد، قرار داده شد و سپس نازل و حلقه هر دو به ولتاژ مثبت و جمع کننده به زمین وصل شدند. عملیات الکتروریسی برای هریک از حلقه‌ها به مدت ۵ دقیقه با میزان تغذیه ml/h ۰/۵ و فاصله‌ی الکتروریسی ۱۸ سانتی‌متر و تحت ولتاژ معین که بین ۲۰–۱۱ کیلوولت متغیر بود انجام شد. سپس، قطر ناحیه‌ی تجمع نانوالیاف جمع شده روی جمع کننده اندازه‌گیری شد و تأثیر به کارگیری حلقه‌ی باردار روی میدان الکتریکی و ناحیه‌ی تجمع نانوالیاف مورد بررسی قرار گرفت. یکی دیگر از روش‌های استفاده شده در این تحقیق برای کنترل جت الکتروریسی و کاهش اندازه‌ی ناحیه‌ی تجمع نانوالیاف، اضافه کردن دیسک‌های مسی هم‌پتانسیل و هم‌نام با سوزن به سامانه‌ی الکتروریسی بود. چهار دیسک مسی به قطرهای ۲، ۴، ۶ و ۸ سانتی‌متر به دستگاه الکتروریسی اضافه شد، به طوری که نوک سوزن از مرکز دیسک عبور کرده و به اندازه‌ی ۴ میلی‌متر از سطح آن بیرون بود. تصویر یکی از این دیسک‌ها در شکل (۱) مشاهده می‌شود. سپس، عملیات الکتروریسی برای هریک از دیسک‌ها به مدت ۵ دقیقه با میزان تغذیه ml/h ۰/۵ و فاصله‌ی الکتروریسی ۱۸ سانتی‌متر و تحت ولتاژ ۱۲، ۱۶ و ۲۰ کیلوولت انجام شد. قطر ناحیه‌ی تجمع نانوالیاف جمع شده روی جمع‌کننده اندازه‌گیری شد و تأثیر به‌کارگیری دیسک‌های باردار روی میدان الکتریکی و ناحیه‌ی تجمع نانوالیاف مورد بررسی قرار گرفت. همچنین ترکیبی از حلقه و دیسک برای مشخص کردن بیشینه‌ی کنترل جت و ناحیه‌ی تجمع نانوالیاف مورد آزمایش قرار گرفت. در هر آزمایش فاصله‌ی الکتروریسی ۱۲ سانتی‌متر و میزان تغذیه‌ی ml/h ۰/۵ و ولتاژ اعمالی به نازل و دیسک مسی ۱۶ کیلوولت تنظیم شد. همچنین حلقه‌ی باردار در فاصله‌ی ۵ سانتی‌متر از جمع کننده قرار داده شد و ولتاژ اعمالی به حلقه که به یک منبع ولتاژ دیگر متصل بود، مقدار ۱۲ کیلو ولت تنظیم شد. از نانوالیاف الکتروریسی شده با میکروسکوپ الکترورنی پویشی (SEM)، تصاویری تهیه و ساختار سطحی آنها مورد بررسی قرار گرفت. برای آزمودن کاربردی بودن این روش در میزان تولید بیش‌تر، الکتروریسی با چهار نازل هم‌زمان و با افزودن دیسک به سامانه‌ی الکتروریسی نیز انجام شد. چگونگی تأثیر الکترودهای کمکی توسط نرم‌افزار Electric Field نیز مورد بررسی قرار گرفت و نتایج مدل‌سازی‌های انجام شده مؤید مشاهدات تجربی بود.

نتایج و بحث

تأثیر استفاده از حلقه‌های باردار در سامانه‌ی الکتروریسی روی اندازه ناحیه‌ی تجمع‌نانوالیاف

با به‌کارگیری حلقه‌ی باردار هم‌مرکز با نوک سوزن نازل، قطر ناحیه‌ی تجمع نانوالیاف نسبت به حالت بدون حلقه کاهش یافت. در واقع به دلیل دافعه‌ی بین حلقه‌ی باردار و جت الکتروریسی که از داخل حلقه عبور می‌کند، مسیر مستقیمی که جت الکتروریسی در ابتدای جریان می‌پیماید بیش‌تر می‌شود و نقطه شروع ناپایداری جت دیرتر اتفاق می‌افتد. در نتیجه حلقه‌های مسیر مارپیچی جت الکتروریسی در نزدیکی جمع‌کننده کوچک‌تر می‌شوند که موجب کاهش ناحیه‌ی تجمع نانوالیاف روی جمع‌کننده می‌شود. این روش فقط جت را در نقطه‌ی شروع کنترل کرده و از ناپایداری جت در شروع جریان جلوگیری می‌کند و جت بعد از عبور از حلقه‌ی باردار تحت ناپایداری خمشی قرار می‌گیرد. همچنین در اثر برهم‌کنش میدان‌های حاصل از حلقه‌ی باردار و میدان اصلی الکتروریسی، خطوط میدان الکتریکی در



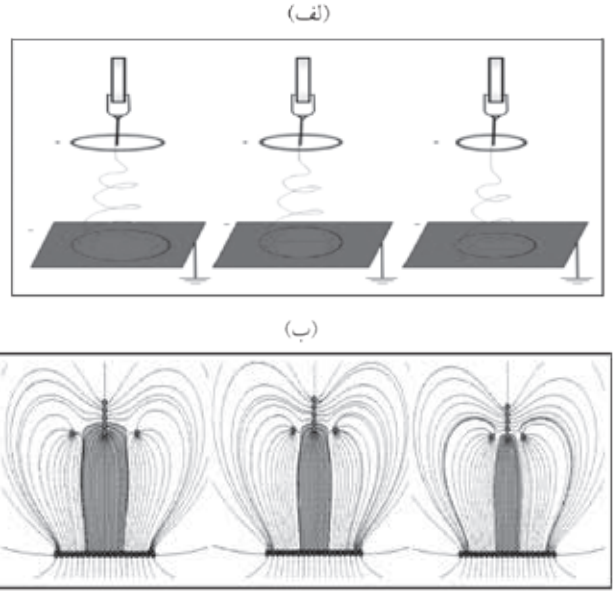
شکل ۱. تصویری از دیسک مسی به قطر ۸ سانتی‌متر.

ناحیه‌ی مرکزی فاصله‌ی الکتروریسی متمرکزتر شده و شدت بیش‌تری می‌یابند و به هم نزدیک‌تر می‌شوند. در نتیجه، با متمرکز شدن میدان الکتریکی وارد بر جت، فضای حرکتی جت الکتروریسی نیز محدود می‌شود و موجب کاهش حرکت جانبی مارپیچی جت می‌شود. بنابراین ناحیه‌ی تجمع نانوالیاف در جمع‌کننده کاهش می‌یابد. همچنین با کوچک‌تر شدن اندازه‌ی حلقه‌ی باردار، ناحیه‌ی تجمع نانوالیاف نیز کوچک‌تر شد. دلیل این امر را می‌توان این‌طور بیان نمود که هر چه قطر حلقه‌ی به کار رفته کوچک‌تر می‌شود، خطوط میدان الکتریکی در ناحیه‌ی مرکزی فاصله‌ی الکتروریسی متمرکزتر و به هم نزدیک‌تر می‌شوند و شدت میدان الکتریکی افزایش می‌یابد. در نتیجه میدان الکتریکی وارد بر جت متمرکزتر و فضای حرکتی جت الکتروریسی محدودتر می‌شود. بدین ترتیب در سامانه‌ی الکتروریسی با حلقه‌ی باردار، کوچک‌تر شدن حلقه‌ی باردار موجب کوچک‌تر شدن ناحیه‌ی تجمع نانوالیاف در جمع‌کننده می‌شود. کوچک‌ترین ناحیه‌ی تجمع در این سامانه با حلقه‌ی ۳ سانتی‌متری در اندازه‌ی ۴ سانتی‌متر به دست آمد. متمرکز شدن خطوط میدان الکتریکی با کاهش قطر حلقه‌ی باردار استفاده شده در شکل (۲) که با نرم‌افزار Electric Field رسم شده به وضوح مشاهده‌می‌شود.

تأثیر استفاده از دیسک‌های مسی در سامانه‌ی الکتروریسی روی اندازه ناحیه‌ی تجمع‌نانوالیاف

نتایج حاکی از این بود که با به‌کارگیری دیسک مسی در سامانه‌ی الکتروریسی قطر ناحیه‌ی تجمع نانوالیاف نسبت به بدون دیسک کاهش یافته و همچنین هرچه قطر دیسک بزرگ‌تر بود، قطر ناحیه‌ی تجمع نانوالیاف کوچک‌تر می‌شد. برای توجیه کاهش قطر ناحیه‌ی تجمع با به‌کارگیری دیسک، می‌توان این‌طور بیان نمود که با استفاده از دیسک میدان الکتریکی ایجاد شده در سطح دیسک توزیع می‌شود، در نتیجه از شدت میدان الکتریکی وارد بر جت الکتروریسی کاسته شده و موجب کاهش ناپایداری جت می‌شود که کاهش اندازه‌ی ناحیه‌ی تجمع الیاف را به دنبال دارد. با به‌کارگیری دیسک باردار، خطوط میدان الکتریکی در ناحیه‌ی مرکزی فاصله‌ی الکتروریسی به هم نزدیک و متمرکز می‌شوند. این موضوع به وضوح در خطوط میدان رسم شده در شکل (۳) مشاهده می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش قطر دیسک خطوط میدان الکتریکی در ناحیه‌ی کوچک‌تری بر جت اعمال می‌شوند و همین‌طور با بزرگ‌تر شدن دیسک خطوط میدان در ناحیه‌ی مرکزی فاصله‌ی الکتروریسی اعمالی بر جت، به هم نزدیک‌تر و فشرده‌تر می‌شود که باعث می‌شود فضای حرکتی جت محدودتر و ناپایداری خمشی کم‌تری در آن ایجاد شود. در نتیجه در این سامانه‌ی الکتروریسی، با بزرگ‌ترین دیسک، کوچک‌ترین ناحیه‌ی تجمع نانوالیاف حاصل شد.

در این تحقیق کوچک‌ترین نواحی تجمع با دیسک ۸ سانتی‌متری در فاصله‌ی الکتروریسی ۶



شکل ۲. (الف) تصویر نمایشی از جت الکترورسی در سامانه‌ی الکترورسی با حلقه‌های باردار با قطرهای مختلف (ب) تصویری از خطوط میدان‌های الکتریکی در سامانه‌ی الکترورسی موارد شکل الف.

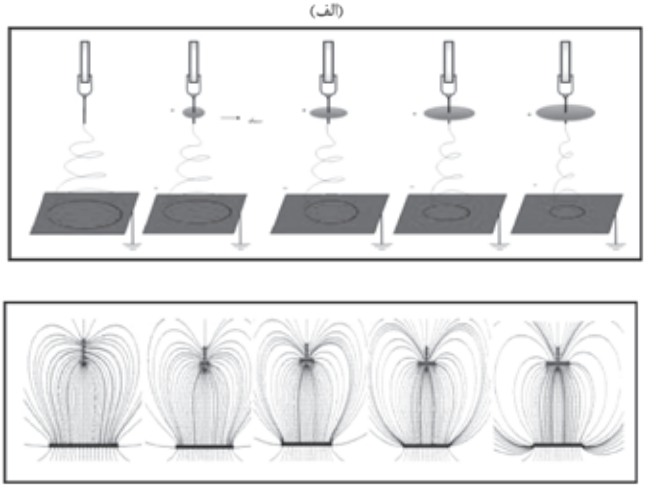
سانتی‌متر به دست آمده است که قطر ناحیه‌ی تجمع نانوالیاف الکترورسی شده در ولتاژهای ۱۲، ۱۶ و ۲۰ کیلوولت به ترتیب ۰/۵، ۱/۱ و ۱/۱ سانتی‌متر بوده است.

تحلیل و بررسی در مورد اندازه‌ی ناحیه‌ی تجمع نانوالیاف الکترورسی شده در سامانه‌ی الکترورسی با ترکیب حلقه‌ی باردار و دیسک مسی

اندازه‌ی ناحیه‌ی تجمع نانوالیاف الکترورسی شده در سامانه‌ی الکترورسی که دیسک با قطر ۸ سانتی‌متر با حلقه‌های باردار ترکیب شده بود، ۴ میلی‌متر اندازه‌گیری شد که تصویر آن در شکل (۴) نشان داده شده است. این شکل تصویری از خطوط میدان الکتریکی رسم شده برای سامانه‌ی الکترورسی ترکیب شده دیسک و حلقه‌ی باردار را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، خطوط میدان در این سامانه متمرکزتر و جمع‌تر شده‌اند. بنابراین وجود حلقه‌ی باردار با پتانسیل کم‌تر نسبت به دیسک و سوزن موجب می‌شود که اولاً خطوط میدان از داخل حلقه عبور نمایند و ثانیاً بعد از عبور از حلقه و در نزدیکی جمع‌کننده متمرکزتر شده و به هم نزدیک‌تر شوند که این امر باعث می‌شود تا فضای حرکتی جت در هنگام عبور از حلقه کوچک‌تر و در نتیجه در ناحیه‌ی کم‌تری روی جمع‌کننده جمع شود.

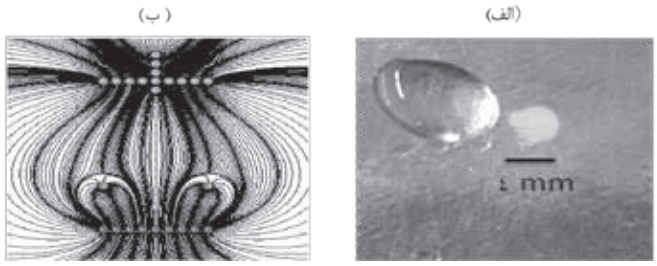
الکترورسی با چند نازل هم‌زمان با دیسک‌های مسی و بدون دیسک

جهت بررسی تأثیر استفاده از چندین نازل هم‌زمان و چگونگی جت الکترورسی و ناحیه‌ی تجمع از ۴ نازل هم‌زمان با میزان تغذیه‌ی یکسان استفاده شد. در سامانه‌ی الکترورسی با استفاده از دیسک نواحی تجمع حاصل از چهار جت الکترورسی نسبت به نواحی تجمع در سامانه‌ی الکترورسی معمولی (بدون دیسک) در فاصله‌ی کم‌تری نسبت به یکدیگر روی جمع‌کننده تشکیل شدند و دلیل این امر را می‌توان توزیع میدان الکتریکی در دیسک دانست که موجب می‌شود خطوط میدان الکتریکی در ناحیه‌ی مرکزی فاصله‌ی الکترورسی به هم نزدیک‌تر و یکنواخت‌تر شود در نتیجه فضای حرکتی جت‌ها کوچک‌تر و نیروی دافعه‌ی بین جت‌ها کم‌تر شود. همچنین مشخص شد که نواحی تجمع با یکدیگر تداخلی نداشته و از یکدیگر فاصله دارند. بدین ترتیب می‌توان برای الکترورسی دقیق و هم‌زمان با چند نازل فاصله‌ی سوزن‌ها را کم‌تر از حالت فعلی نیز تنظیم نمود و نانوالیاف چهار نازل را در فاصله‌ای نزدیک‌تر جمع‌آوری نمود. تصاویر SEM نانوالیاف نیز تهیه شد که یکنواختی قطر و عدم



شکل ۳. (الف) تصویر نمایشی از جت الکترورسی در سامانه‌ی الکترورسی با دیسک‌های مسی با قطرهای مختلف و بدون دیسک، (ب) تصویری از خطوط میدان‌های الکتریکی در سامانه‌ی الکترورسی موارد شکل الف.

وجود عیوبی همچون دانه تسبیحی و جوش‌خوردگی در الیاف حاکی از حفظ کیفیت نانوالیاف تولیدی در شرایط جدید می‌باشد.



شکل ۴. (الف) تصویر گرفته شده از ناحیه‌ی تجمع نانوالیاف الکترورسی شده در سامانه‌ی ترکیبی دیسک ۸ سانتی‌متری و حلقه‌ی ۶/۲ سانتی‌متری، (ب) تصویری از خطوط میدان الکتریکی در سامانه‌ی الکترورسی ترکیبی.

۴-نتیجه‌گیری

نتایج به‌دست آمده در این تحقیق مبین مناسب بودن استفاده از روش‌های به‌کار گرفته شده برای کنترل ناپایداری جت و ناحیه‌ی تجمع نانوالیاف می‌باشد. نتایج نشان دادند که استفاده از حلقه‌ی باردار در اندازه‌های کوچک‌تر موجب کوچک‌تر شدن ناحیه‌ی تجمع نانوالیاف شده و جت الکترورسی محدودتر می‌شود. همچنین با استفاده از دیسک می‌توان به بیشینه‌ی کنترل جت و کاهش ناحیه‌ی تجمع دست یافت که این اثر با افزایش قطر دیسک بیش‌تر می‌شود. بنابراین در آزمایش‌های انجام شده، با ترکیبی از کوچک‌ترین اندازه‌ی حلقه (۲ cm) و بزرگ‌ترین اندازه‌ی دیسک (۸ cm)، بیشینه‌ی ناحیه‌ی تجمع نانوالیاف به‌دست آمد.

پی‌نوشت

۱. دانشجوی کارشناسی‌ارشد تکنولوژی نساجی، دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
۲و۳. کارشناس تکنولوژی نساجی، دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
۴. استاد، دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
*fghasemkhah@aut.ac.ir

منابع در دفتر مجله موجود است.