



بررسی اثر میدان مغناطیسی بر فرایند الکتروریسی نانو الیاف پلیمری

فاطمه پارسی مود^۱، پدرام پیوندی^۲، محمدعلی توانایی^۳

۱ دانشگاه یزد، دانشکده مهندسی نساجی

۲ دانشگاه یزد، دانشکده مهندسی نساجی،

۳ دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشیار، دانشکده مهندسی نساجی

چکیده

امروزه نانو الیاف به عنوان یکی از مهم‌ترین محصولات فناوری نانو در بسیاری از حوزه‌ها به‌ویژه پزشکی، مهندسی بافت، دارویی و صنایع نظالمی کاربرد قابل توجهی دارد. از آنجایی که الکتروریسی یکی از بهترین روش‌های تولید نانو الیاف تاکنون شناخته شده است، لازم است تولید نانو الیاف با این روش و نیز نحوه آرایش یافتنگی آن‌ها در شبکه ایجاد شده به‌نحوی اصلاح و کترل شود. از جمله روش‌هایی که می‌توان برای کترل شبکه الکتروریسی استفاده کرد، اعمال نیروی خارجی است. از جمله نیروهای خارجی موثر بر فرایند الکتروریسی می‌توان به نیروهای مغناطیسی، الکتریکی و قرار دادن اجسام خارجی در اطراف مسیر الکتروریسی اشاره کرد. در این مقاله به بررسی مقایلات در زمینه تأثیر اعمال نیروی مغناطیسی بر فرایند الکتروریسی پرداخته شده است.

Iran Polymer Technology:
Research and Development

واژه‌های کلیدی:

الکتروریسی
میدان مغناطیسی
نانوالیاف
ریزساختار

سال چهارم شماره ۴، نشریه مهندسی نساجی
Vol. 4, No. 4, Issue No. 16, Quarterly
می ۲۰۲۰، زمستان ۹۸-۹۹
Winter

*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:
fatemehparsib@gmail.com

جمع کننده، وجود اختلاف پتانسیل بالای الکتریکی است و هنگامی که فرایند الکتروریسی آغاز می شود جریان عبوری از افشانک به جمع کننده برابر است با:

$$I = \frac{V}{R}$$

که در معادله (۲)، V اختلاف پتانسیل بین افشانک و جمع کننده و R مقاومت الکتریکی وابسته به مولفه های محلول و فاصله افشانک از جمع کننده است. با توجه به اینکه در فرایند الکتروریسی ماده حامل بار الکتریکی وجود دارد می توان انتظار داشت با قرارگرفتن این فرایند در میدان مغناطیسی، نیروی مطباق با معادله (۱) به الیاف وارد شود. مزیت اصلی این نیرو، غیرتماسی بودن آن است؛ بنابراین مطالعات در زمینه استفاده از میدان مغناطیسی در فرایند الکتروریسی مورد توجه محققان قرار گرفته است که این مطالعات خود به دو دسته مطالعات تجربی و شبیه سازی اثر میدان مغناطیسی بر فرایند الکتروریسی تقسیم می شود که در شکل ۱ نشان داده شده است [۷-۶].

۲ مطالعات تجربی

۲-۱ ناپایداری خمی جت الکتروریسی

در تحقیقی که بر روی پلیمر پلی کاپرولاکتون صورت گرفت شکل حلقه های الیاف حاصل از پلی کاپرولاکتان در الکتروریسی بررسی قرار شد که با در نظر گرفتن نتایج بدست آمده (شکل ۲) معلوم شد حلقه ها ممکن است در حین الکتروریسی به هم برخورد کنند. دلیل این برخورد این گونه توجیه شده است که نیروهای مکانیکی وارد شونده به جت بر نیروهای دافعه غلبه کرده و حلقه های باز در حالت پرواز با هم تماس برقرار می کنند و در نقطه تماس با هم ادغام شده و حلقه های بسته را تشکیل می دهند [۸].

۲-۲ تأثیر میدان مغناطیسی (آهن ربا)

در تحقیقات صورت گرفته در راستای تأثیر میدان مغناطیسی بر فرایند الکتروریسی، الکتروریسی در حضور دو آهن ریای نواری به ابعاد $(15 \times 2/5 \times 2/5 \text{ cm})$ و اندازه میدان مغناطیسی $0/2 \text{ Tesla}$ انجام شد. طرح واره و نحوه قرارگیری دستگاه الکتروریسی در حضور میدان مغناطیسی

۱ مقدمه

امروزه نانو الیاف به عنوان یکی از مهم ترین محصولات فناوری نانو در بسیاری از حوزه ها به ویژه در حوزه های پزشکی، دارویی، مهندسی بافت، ماسک ها و صافی های پزشکی، پوشش های زخم، صنایع دفاعی و امنیتی، صنایع جداسازی و صافش، صنایع شیمیایی، صنایع رنگ و پوشش، صنایع نساجی، صنایع نفت، گاز و ... کاربردهای زیادی پیدا کرده اند [۲-۱].

روش های مختلفی برای تولید نانو الیاف وجود دارد که برخی از آن ها شامل کشش، جداسازی الیاف چند جزئی، روش قالب، جدایش فازی، خودآرایی درشت مولکول ها، الکتروریسی وغیره است.

از دلایل اهمیت فرایند الکتروریسی این است که هم محلول های پلیمری و هم پلیمرهای مذاب می توانند الکتروریسی شوند. الکتروریسی، موفقیت های زیادی در فناوری شکل گیری نانو الیاف از محلول های پلیمری با گرانروی زیاد، داشته است [۳]. از عوامل دیگری که این روش را مورد توجه قرار می دهد کنترل قطر، تولید نانو الیاف با ریز ساختارهای مختلف، داشتن تنوع در مواد اولیه (پلیمرهای طبیعی، مصنوعی و پلیمرهایی که در روش های معمولی نمی توان برای تولید الیاف استفاده کرد) است [۴].

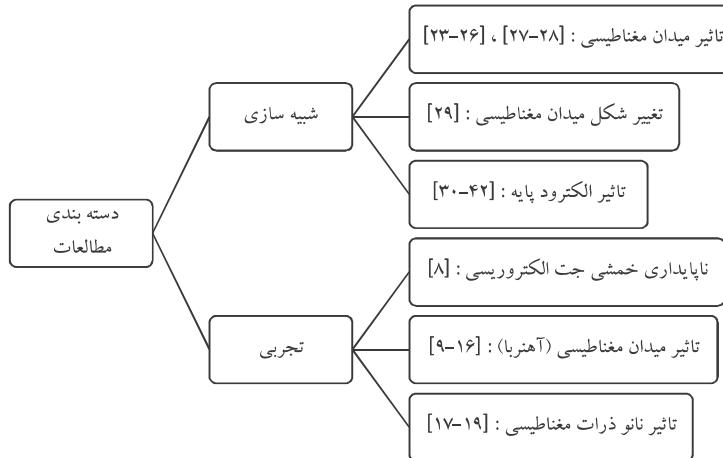
مولفه های موثر بر الکتروریسی عبارتند از عوامل مختلف فرایندی (ولتاژ، دبی محلول و ...)، محیطی (دما و رطوبت محیط) و محلول (رسانایی، گرانروی و ...). که بر یکنواختی و قطر نانو الیاف تاثیرگذارند. یکی از روش های کنترل نانو الیاف اعمال نیروی مغناطیسی است. این نیرو به همراه سایر نیروها سبب کاهش ناپایداری های رشتہ پلیمری می شود و درنهایت می توان محصول کنترل شده تری تولید کرد.

میدان مغناطیسی توسط ماده مغناطیسی یا به وسیله تغییر میدان الکتریکی، تولید می شود [۵]. اگر در داخل میدان مغناطیسی ماده حامل جریان الکتریکی قرار گیرد با توجه به قانون لنز نیرویی به ماده حامل جریان وارد می شود که میزان این نیرو برابر است با:

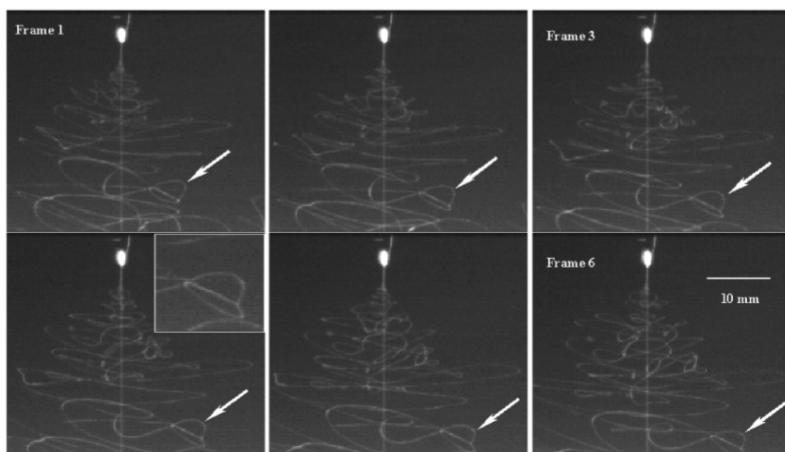
(۱)

$$F = BLI$$

که در معادله (۱) B چگالی میدان مغناطیسی، L طول ماده حامل جریان و I جریان الکتریکی است. در فرایند الکتروریسی علت حرکت محلول از افشانک به سمت



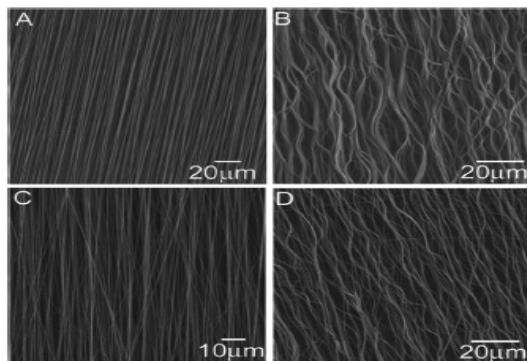
شکل ۱ نمودار دسته بندی مطالعات انجام شده بر روی تأثیر میدان مغناطیسی بر فرایند الکتروریسمی.



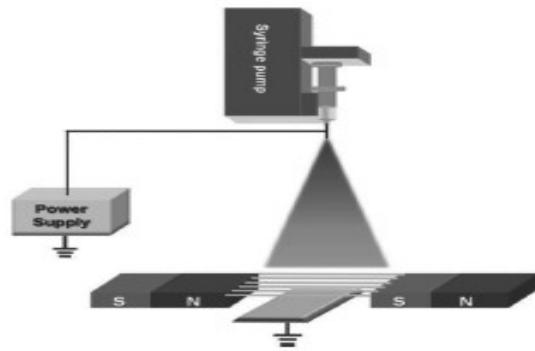
شکل ۲ حلقه های کوچک و گاهی پیچیده که بالا فاصله بعد از شروع بی ثباتی خمی در جت های PCL%۱۵ ایجاد می شود. فلاش، حلقه ای دوتایی را نشان می دهد. خط عمودی ناشی از نور پراکنده از نوک است. (۵ کیلوولت، ۱۴۰ میلی متر، ۵۰۰ فریم در ثانیه) [۸].

از نرخ جریان ثابت بین $۰/۳$ و $۰/۵$ میلی لیتر بر ساعت استفاده شده است. در الکتروریسمی محلول پلیمری PVP، ولتاژ ۲۰ کیلوولت و فاصله بین افشارانک و جمع کننده ۱۰ سانتی متر بوده است. پس از فرایند الکتروریسمی قطر نانوایاف با اندازه گیری ۱۵۰ لیف در مناطق مختلف توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی شد. نتایج نشان داده است در نانوایاف انشعابات از بین رفته، یکنواختی قطر نانوایاف نیز بهبود یافته است. علت وجود آمدن انشعابات در نانوایاف الکتروریسمی شده،

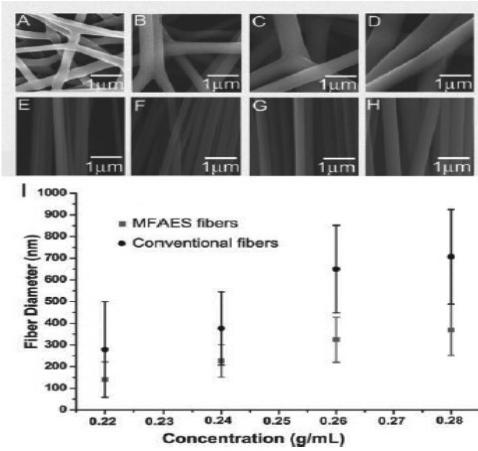
کمکی در شکل ۳ نشان داده شده است. فاصله بین دو آهنربا در محلوده $۰/۵-۴$ سانتی متر متغیر بوده است. در این پژوهش از دو پلیمر پلی لاکتیک کو (Poly lactic-co-glycolic acid-PLGA) و پلی وینیل پیرولیدون (Polyvinylpyrrolidone-PVP) استفاده شده است. به منظور اعمال ولتاژ به جت الکتروریسمی محلول پلیمری PLGA از منبع جریان مستقیم با اعمال ولتاژ ۱۵ کیلوولت استفاده شده است. فاصله بین افشارانک تا جمع کننده ۱۴ سانتی متر بوده و



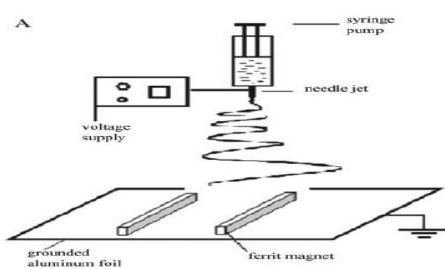
شکل ۴ تصاویر میکروسکوپ الکترونی رویشی (A-B) پلیمر PLGA و (C-D) پلیمر PVP با استفاده از میدان مغناطیسی در فرایند الکتروریسی. نرخ تغذیه (A): ۱ (C)، ۳ (B)، ۵ (D)، ۲،۵ (ml/h). [۹].



شکل ۳ طرح واره قرارگیری آهن ربا در فرایند الکتروریسی [۹].



شکل ۵ (A-H) تصاویر میکروسکوپ الکترونی رویشی و (I) رابطه قطر با غلظت محلول PLGA در حضور میدان مغناطیسی و عدم حضور آن. غلظت ها (gr/ml) در حضور میدان مغناطیسی از A تا D به ترتیب ۰/۲۲، ۰/۲۴، ۰/۲۶، ۰/۲۸ و عدم حضور میدان مغناطیسی از E تا H به ترتیب ۰/۲۲، ۰/۲۴، ۰/۲۶، ۰/۲۸ و ۰/۲۰ است [۱۸].



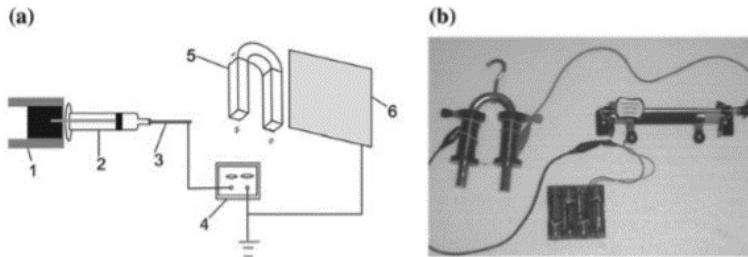
شکل ۶ طرح واره فرایند الکتروریسی با استفاده از آهن ربا روی صفحه جمع کننده [۱۰].

اثرات متقابل الکترواستاتیک بین بخش های مختلف جت عنوان شده است. با استفاده از میدان مغناطیسی نیروهای دافعه در جت اثر متقابل الکترواستاتیک بیشتر شده، در نتیجه منجر به تولید الیاف بدون انشعاب و آرایش یافته می شود. نمونه ای از این الیاف در شکل ۴ آورده شده است. همچنین نتایج نشان داد که می توان نانو الیاف مواج بدون انشعاب با افزایش نرخ جریان محلول پلیمر تولید کرد.

در پژوهش انجام شده گزارش شده است که با تغییر غلظت محلول پلیمر می توان قطر و ریز ساختار الیاف را نیز کنترل کرد. با توجه به شکل ۵ با افزایش غلظت محلول حتی در حضور میدان مغناطیسی قطر نانو الیاف افزایش می یابد [۹].

یانگ و همکارانش روش جدیدی مبنی بر الکتروریسی برای تولید نانو الیافی آرایش یافته در یک جهت ارائه کرده اند. در مطالعه آنها نانو الیاف در طول محور یعنی دو یقه آهن ربا نارسانای فریت منظم شده اند. این دستگاه از لحاظ اصول همان شکل متدائل را دارد؛ به جز جمع کننده که مجهز به دو سور مغناطیسی فریت است که توسط شکافی از هم جدا شده اند. طرح واره این فرایند در شکل ۶ نشان داده شده است [۱۰].

در بررسی های انجام شده برای تهیه نانو الیاف با آرایش یافته که بیشتر، از فرایند ساده الکتروریسی مغناطیسی استفاده شد. در مقایسه با دستگاه های الکتروریسی مرسوم، یک آهن ربا دائمی U شکل مورد استفاده قرار گرفت که با یک رئوستا کاربردی شده است که طرح واره آن



شکل ۷ دستگاه الکتروریسمی جدید مغناطیسی (a-b): (۱) پمپ، (۲) وینیل سکل (Polyvinyl)، (۳) سوزن، (۴) منبع تغذیه ولتاژ بالا، (۵) زنر اتور میدان مغناطیسی و (۶) صفحه جمع کننده [۱۱].

آهن ربای دائمی در موقعیت‌های مختلف، الکتروریسمی نانو الیاف در حضور میدان مغناطیسی صورت گرفت. سپس با استفاده از میکروسکوپ الکترونی تصاویری از شبکه‌های تولید شده تهیه شد و مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد حضور میدان مغناطیسی موجب کاهش الیاف در موقعیت‌های مکانی مختلف شده است که تأثیر چشمگیری در بهبود تولید نانو الیاف و آرایش یافتگی آن‌ها داشته است [۱۳]. تأثیر قرارگیری آهن ربای دائمی، در موقعیت‌های مختلف در حین فرایند الکتروریسمی مورد بررسی قرار گرفته است و با بررسی نتایج و تجزیه تحلیل داده‌ها مشخص شد که حضور میدان مغناطیسی موجب کاهش ۲۸ تا ۴۲ درصدی اندازه پخش مواد و ۲۰ تا ۲۸ درصدی قطر نانو الیاف در موقعیت‌های مکانی مختلف شده است که تأثیر چشمگیری در بهبود تولید نانو الیاف و آرایش یافتگی آن‌ها داشته است که نتایج آن در جدول ۲ نشان داده شده است [۱۴].

در شکل ۷ نشان داده شده است.

در ابتدا به ترتیب الیاف پلی وینیل السکل (Polyvinyl) و $\text{PVA}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ به وسیله الکتروریسمی مغناطیسی تولید شدند. آرایش یافتگی و ریزاساختار الیاف با استفاده از میکروسکوپ الکترونی (SEM) بررسی شد. نتایج نشان داد که میدان مغناطیسی می‌تواند قطر الیاف را کاهش و نظم و بلوری بودن الیاف را افزایش دادند و افزودن Fe_3O_4 آرایش یافتگی الیاف را افزایش می‌دهد. در جدول ۱ رابطه بین شدت مغناطیسی و قطر نانوذرات گزارش شده است [۱۱].

در تحقیقی که در سال ۲۰۱۰ صورت گرفت به بررسی نحوه تأثیر نیروی مغناطیسی بر حرکت جت و در نتیجه بر مساحت شبکه نانو الیاف جمع‌آوری شده بر روی صفحه جمع کننده با به کارگیری میدان مغناطیسی پرداخته شده که مشخص شد با به کارگیری میدان مغناطیسی خارجی می‌توان پایداری حرکت جت در فرایند الکتروریسمی را کنترل کرد [۱۲]. همچنین در تحقیق دیگری با استفاده از قرارگیری

جدول ۱ رابطه بین شدت مغناطیسی و قطر نانوذرات [۲۳]

شدت مغناطیسی (میلی تسل)	PVA				PVA/ Fe_3O_4		
	میانگین قطر (نامومتر) (D)	انحراف معیار (نامومتر) (σ)	فاصله اطمینان (نامومتر)	میانگین قطر (نامومتر) (D)	انحراف معیار (نامومتر) (σ)	فاصله اطمینان (نامومتر)	
۰	۳۵۷/۵	۸۴/۷	۶/۱۶±	۳۲۰/۴	۷۷/۳	۱/۱۵±	
۹/۵	۲۹۵/۶	۸۳/۲	۳/۱۶±	۲۸۶	۵۱/۵	۱/۱۰±	
۱۶/۲	۲۷۹/۴	۶۵/۲	۸/۱۲±	۲۵۹/۲	۶۲/۷	۳/۱۲±	
۲۷/۲	۲۴۰/۵	۵۶/۲	۰/۱۱±	۲۳۲/۸	۴۲/۱	۲۵/۸±	

جدول ۲ تحلیل آماری موقعیت‌های مکانی مختلف آهن ربا [۱۴]

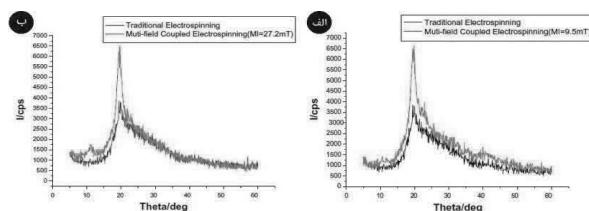
فرایند	میانگین (نامتر)	عرض باند نانوایاف (سانتی‌متر)	ضریب تغییرات
آهن ربا زیر صفحه جمع کننده	۱۲۹/۴۹	۱۰-۸	۶/۵۴
آهن ربا زیر افشارک	۱۲۰/۱۷	۹-۶	۷/۱۳
دو آهن ربا دو طرف صفحه	۱۱۸/۳۳	۸-۶	۵/۶
جمع کننده			

۹ نشان داده شده است. بر اساس اطلاعات گزارش شده در جدول ۲ شدت میدان مغناطیسی باعث افزایش بلورینگی نانوایاف الکتروریسی شده می‌شود [۱۵]. در سال ۲۰۱۹ تأثیر حضور میدان مغناطیسی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد حضور میدان مغناطیسی در حین فرایند الکتروریسی باعث کاهش قطر نانوایاف حاصل می‌شود (شکل ۱۰). همچنین با اعمال میدان مغناطیسی در حین فرایند الکتروریسی مساحت نانوایاف جمع آوری شده بر روی صفحه جمع کننده کاهش پیدا کرده که نشان دهنده کاهش پراکندگی نانوایاف در حضور میدان مغناطیسی است (شکل ۱۱) [۱۶].

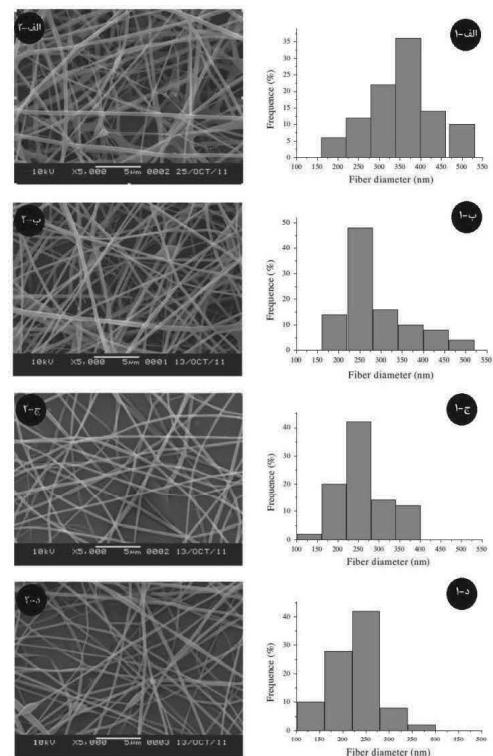
همچنین در پژوهش دیگری تأثیر شدت میدان مغناطیسی بر قطر و بلورینگی نانوایاف پلی‌وینیل‌الکل و نانوذرات مغناطیسی اکسید آهن بررسی شده است. همانگونه که از نمودارهای شکل ۸ قابل مشاهده است، با افزایش شدت میدان مغناطیسی، قطر الیاف کاهش یافته است. برای بررسی درجه بلورینگی از روش پراش اشعه X استفاده شده است که نمودارهای آن در شکل

۲-۳ تأثیر نانوذرات مغناطیسی

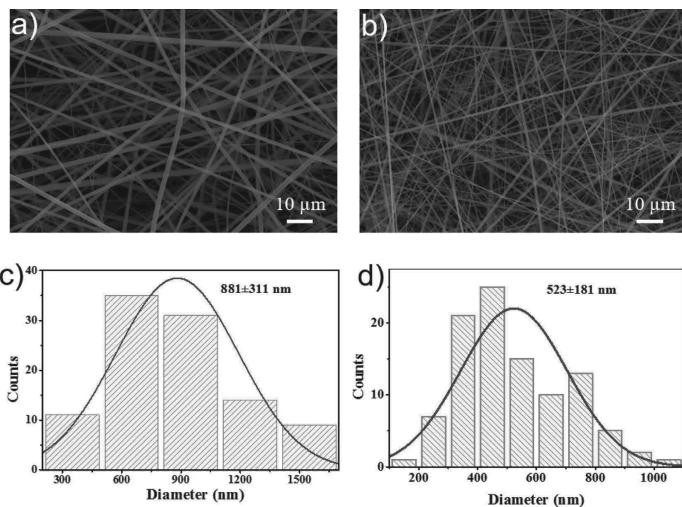
الکتروریسی پلیمر پلی کاپرولاتکتون و نانوذرات مغناطیسی اکسید آهن در حضور دو آهن رسای الکتریکی نعل اسی توسط سانچز (Sanchez) و همکارانش مورد بررسی قرار گرفت. طرح واره این فرایند در شکل ۱۲ نشان داده شده است. در این آزمایش تفاوت نحوه توزیع ذرات اکسید آهن به وسیله الکتروریسی متداول (در غیاب میدان مغناطیسی) و الکتروریسی در حضور میدان مغناطیسی



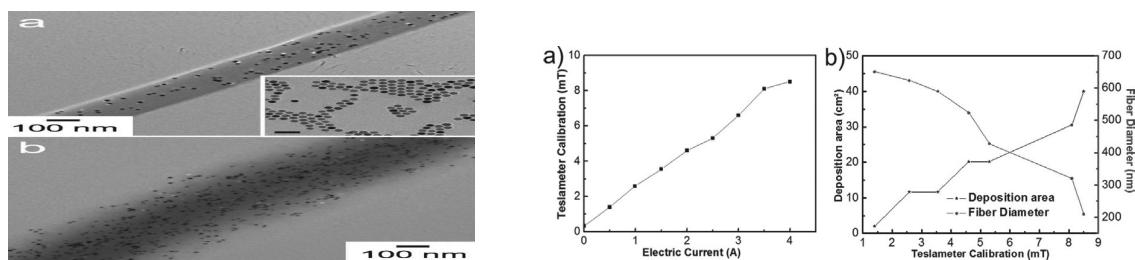
شکل ۹ تأثیر حضور میدان مغناطیسی در محدوده ریستندگی بر بلورینگ نانوایاف PVA (نمودار پراش اشعه ایکس) [۱۵].



شکل ۸ تأثیر حضور میدان مغناطیسی در محدوده ریستندگی بر قطر نانوایاف PVA برای شدت‌های میدان مغناطیسی (الف) صفر (ب) ۹/۵ (ج) ۱۶/۲ و (د) ۲۷/۲ میلی‌تسلا [۱۵].

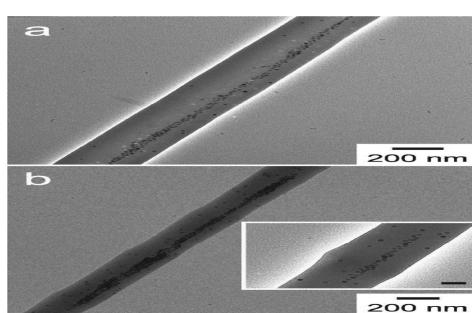


شکل ۱۰ تأثیر حضور میدان مغناطیسی در حین فرایند الکتروریسمی بر قطر نانو الیاف [۱۶].

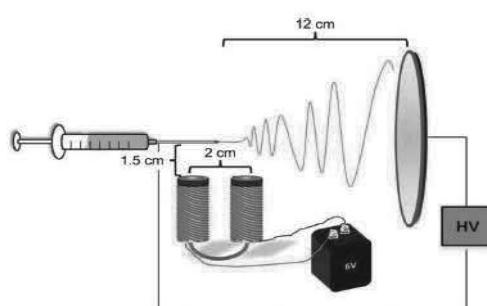


شکل ۱۳ تصاویر نانو الیاف الکتروریسمی شده pcl و نانوذرات اکسید آهن با نسبت a / ۵(b / ۵) ۲/۵ درصد حجمی [۱۷].

شکل ۱۱ تأثیر حضور میدان مغناطیسی در حین فرایند الکتروریسمی بر پراکندگی نانو الیاف [۱۶].

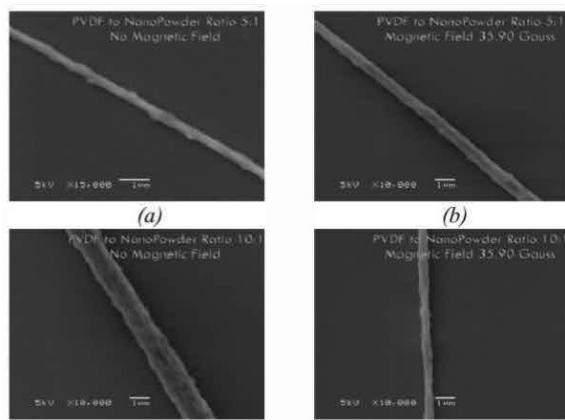


شکل ۱۴ تصاویر نانو الیاف الکتروریسمی شده pcl و نانوذرات اکسید آهن در حضور میدان مغناطیسی با نسبت a / ۵(b / ۵) ۲/۵ درصد حجمی [۲۰].



شکل ۱۲ طرح واره نحوه قرارگیری آهن ربای الکتریکی در فرایند الکتروریسمی [۱۷].

گرفت، از پلیمر PVA و ذرات Fe_3O_4 استفاده شده است. تحلیل نظری با توجه به اثر میدان مغناطیسی بر روی مقدار گرمای تولید شده در جت که نقش اساسی در تعیین قطر آن دارد بررسی شده است. مولفه های موثر بر این تحلیل عبارتند از شارژ الکتریکی، سرعت جت و چگالی شار مغناطیسی که بر خاصیت مغناطیسی تأثیر داشته اند. در این تحقیق برای ایجاد میدان مغناطیسی از آهن ریا دائمی استفاده شده است. با اعمال میدان مغناطیسی، دایره گردابی جت که به سمت جمع کننده در حال حرکت است صاف می شود که این موضوع با اتصال انرژی کمتر، باعث ذخیره انرژی بیشتری در فرایند الکتروریسی و افزایش انرژی جنبشی جت شده می شود. افزایش انرژی جنبشی، سبب افزایش سرعت حرکت جت می شود. در شرایط یکسان محلول پلیمری با افزایش شدت مغناطیسی، شعاع جت کوچک تر شده است. علاوه بر این اثر میدان مغناطیسی بر روی توزیع قطر الیاف الکتروریسی به صورت تجربی بررسی شده است. تجزیه و تحلیل ها نشان داده که میدان مغناطیسی، نقش اساسی در اندازه قطر و توزیع قطر نانو الیاف ایفا کرده است. در شکل ۱۷ بهبود توزیع قطر نانو الیاف در حضور میدان مغناطیسی نشان داده شده است [۱۹].



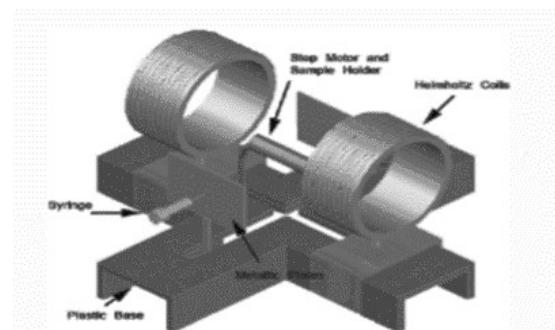
شکل ۱۶ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (b) و (d) در حضور میدان مغناطیسی (a) و (c) در غیاب میدان مغناطیسی [۱۹].

بررسی شده است. در شکل های ۱۳ و ۱۴ چگونگی توزیع نانوذرات اکسید آهن در الیاف نشان داده شده است.

نتایج حاصل از این تصاویر نشان می دهد که در غیاب میدان مغناطیسی نانوذرات به طور تصادفی در طول نانوالیاف پراکنده شده اند. یکی دیگر از عوامل موثر بر آرایش یافتگی نانوالیاف در فرایند الکتروریسی، غلظت آن ها است. نیروهای جاذبه که ممانع دوقطبی هستند باید برای غلبه بر گرانش محلول پلیمری کافی باشند. در نتیجه می توان غلظت محلول پلیمری، مقدار نانوذرات موجود در محلول، فاصله بین دو آهن ریا و همچنین فاصله بین افسانک تا آهن ریا را جزو موارد مهم برای تولید نانو الیاف همگن و آرایش یافته نام برد [۱۷].

در پژوهشی که در سال ۲۰۱۳ صورت گرفت برای تولید نانو الیاف پلیمری پلی وینیلیدین فلورید (Polyvinylidenefluoride-PVDF) (حاوی ذرات Fe_3O_4) با روش الکتروریسی از میدان مغناطیسی یکنواخت ناشی از دو سیم پیچ هلمهولتز استفاده شده است (شکل ۱۵). محدوده قطر نانوالیاف تولید شده بین ۷۰۰-۱۰۰ نانومتر به دست آمد. پس از فرایند الکتروریسی تصاویر نانوالیاف از میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی شد. با توجه به شکل ۱۶ بدون حضور میدان مغناطیسی در الیاف کلوخه ایجاد شده اما در حضور میدان مغناطیسی الیاف با یکنواختی بیشتری تولید شده اند [۱۸].

همچنین در تحقیقی که به منظور تجزیه و تحلیل نظری و تجربی الکتروریسی، تحت میدان مغناطیسی صورت



شکل ۱۵ طرح واره فرایند الکتروریسی با استفاده از سیم پیچ هلمهولتز برای اعمال میدان مغناطیسی [۱۸].

۳ شبیه سازی

میدان مغناطیسی در فرایند الکتروریسمی اعمال شود، جریان درون جت تحت تأثیر میدان مغناطیسی، نیروی مرکزگرایی تولید می کند که جهت آن به سمت کم شدن شعاع چرخه گردبادی است. در نتیجه پایداری فرایند الکتروریسمی به طور قابل ملاحظه ای بهبود می یابد. اما این ایده در مقاله آن ها تنها به طور نظری مطرح شده است [۲۳].

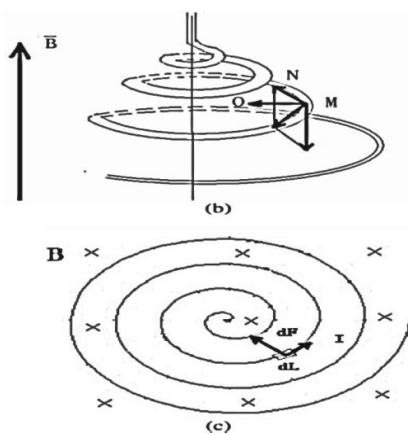
به منظور تولید نانو الیاف پلیمری، دستگاه های الکتروریسمی جدیدی طراحی شده است؛ با این حال، مدل نظری واحدی برای توصیف فرایند الکتروریسمی تحت نیروهای مختلف وجود ندارد. در پژوهشی که صورت گرفت مدلی نظری برای درک بهتر برخی از مولفه های فیزیکی ارائه شده است. این مدل از جت الکتروریسمی تحت تأثیر میدان الکتریکی، میدان مغناطیسی و نیروی ارتعاشی برای اولین بار به دست آمده است. طرح واره این فرایند در شکل ۱۹ نشان داده شده است [۲۴].

در تحقیق دیگری، با اعمال میدان مغناطیسی توسط سیم پیچ در فرایند الکتروریسمی، مدل ریاضی گسته ای از روند الکتروریسمی مغناطیسی ارائه شده است. فرایند الکتروریسمی با استفاده از میدان مغناطیسی در این پژوهش نیز مانند شکل ۱۹ است. در این مدل برای توصیف جت الکترومغناطیسی از مدل رنکر استفاده شده

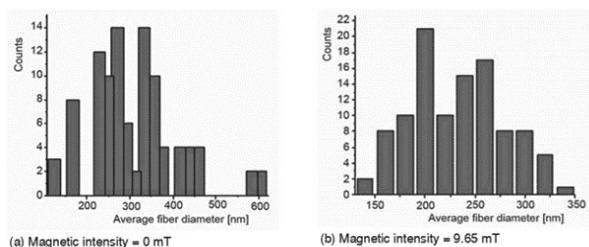
تاکنون مطالعات زیادی بر شبیه سازی مسیر حرکت نانو الیاف در حین فرایند الکتروریسمی تحت تأثیر میدان مغناطیسی و عوامل موثر بر میدان مغناطیسی انجام شده است که اولین مطالعات انجام شده توسط رنکر (Reneker)، هی (He) و همکارانشان بوده که در این مطالعات ناپایداری خمی جت الکتروریسمی از لحاظ شکل و نیروهای مؤثر بر آن مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته و همچنین به طور سیستماتیک ناپایداری فرایند الکتروریسمی بررسی شده و برای هر سطح از چرخه گردبادی معادله ای براساس شعاع چرخه و فاصله از افسانک پیش بینی شده است [۲۰-۲۲]. سایر تحقیقات با دسته بندی هایی که در شکل ۱ بیان شده است، مورد بررسی قرار گرفته است.

۴-۱ تأثیر میدان مغناطیسی

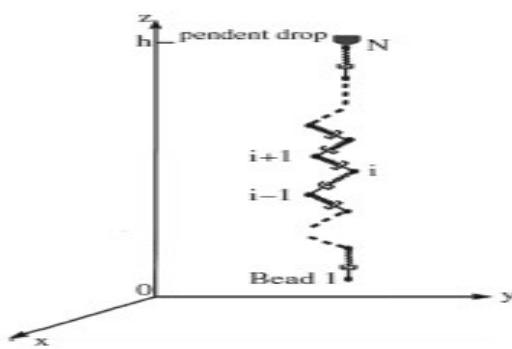
ویو (Wu) و همکارانش اولین کسانی بودند که برای کنترل پایداری در فرایند الکتروریسمی استفاده از میدان مغناطیسی را پیشنهاد کردند. بر اساس نتایج به دست آمده استفاده از روش مغناطیسی مؤثرترین و مقرن به صرفه ترین راه برای کنترل بی ثباتی فرایند الکتروریسمی است. اگر میدان مغناطیسی در فرایند الکتروریسمی مطابق شکل ۱۸ قرار داده شود در نتیجه جریان موجود در جت پلیمر، نیروی df که بر المان طول (dl) تأثیر می گذارد تولید می شود. هرگاه ا جریان الکتریسیته درون جت و b مقدار شدت میدان مغناطیسی القا شده باشد، هنگامی که



شکل ۱۸ (b) تحلیل مکانیکی الکتروریسمی در حضور میدان مغناطیسی
(c) نیروی اعمال شده از میدان مغناطیسی بر جت در فرایند الکتروریسمی [۲۳].



شکل ۱۷ توزیع قطر الیاف الکتروریسمی با شدت مغناطیسی مختلف [۱۹].



شکل ۲۰ طرح واره جت الکتروریسی [۲۵].

شده است [۲۵]. نتایج به دست آمده از شکل ۲۲ نیز نشان می‌دهد با افزایش جریان تحریک‌های مختلف در سیم پیچ که باعث اعمال میدان مغناطیسی قوی‌تر می‌شود، قطر جت الکتروریسی کاهش پیدا می‌کند. مقایسه نتایج با داده‌های تجربی نشان می‌دهد، شبیه‌سازی عددی مؤثر بوده و رویکرد استفاده از میدان مغناطیسی، روشی مؤثر برای کنترل بی‌ثباتی است.

رن (Ren) و همکارانش نیروی مغناطیسی حاصل از شکل حرکت جت را به عنوان اثری پایدار بر فرایند الکتروریسی مطرح کردند. آن‌ها بیان کردند حرکت الیاف

است. جت الکتروریسی با جرم m و مقدار شارژ e توسط عناصر گرانوکشسان مطابق شکل ۲۰ شبیه‌سازی شده است.

مدل ریاضی گسسته ایجاد شده به صورت زیر است:

$$m = \frac{d^2 \mathbf{r}_i}{dt^2} = F_C + F_E + F_{ve} + F_B + F_q \quad (3)$$

i موقعیت جت

F_C نیروی کولمیک

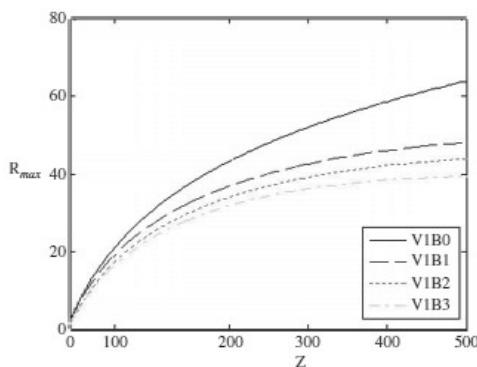
F_E نیروی میدان الکتریکی

F_{ve} نیروی گرانوکشسان

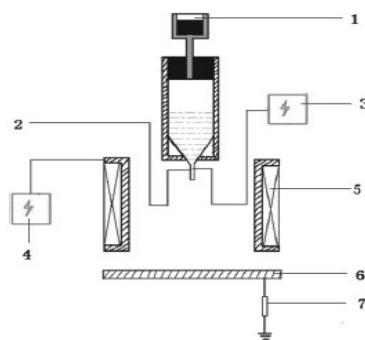
F_B نیروی کشش سطحی

F_q نیروی لورنزا

در این مدل تحلیل رفتار جت در حال حرکت نشان داده است که میدان مغناطیسی باعث ایجاد نیروی لورنزا در جت و کاهش ناپایداری جت شده است. روابط از نوسان جت و فاصله آن با جریان‌های مختلف تحریک به دست آمده است. از معادلات، نتیجه گرفته شده است که دامنه نوسان جت در حضور میدان مغناطیسی، کوچک‌تر از عدم حضور آن است. نتایج شبیه‌سازی در مقایسه با داده‌های تجربی نشان می‌دهد که افزایش میدان مغناطیسی در فاصله مناسب بین افشارک و صفحه جمع کننده می‌تواند تأثیر بهتری بر روی نوسان جت داشته باشد. نتایج به دست آمده در شکل ۲۱ نشان داده



شکل ۲۱ نمودار حداکثر نوسان جت و فاصله افشارک از صفحه جمع کننده با استفاده از جریان‌های مختلف. (R) حداکثر نوسان جت، (Z) فاصله افشارک از صفحه جمع کننده، (V1) ولتاژ اعمال شده به میزان ۱۵ کیلوولت. B3-B2-B1-B0 جریان تحریک‌های مختلف که به ترتیب B0-A-2A-3A-4A می‌باشد [۲۵].

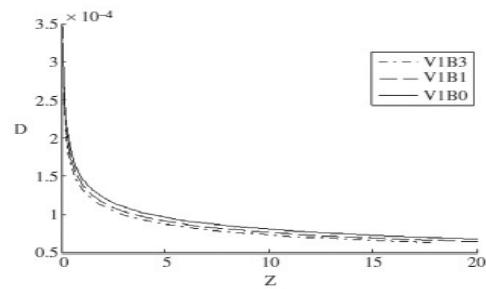


شکل ۱۹ طرح واره فرایند الکتروریسی در حضور میدان مغناطیسی

(۱) پمپ، ۲. افشارک، ۳. ولتاژ، ۴. منابع ولتاژ، ۵. سیم پیچ، ۶. صفحه جمع کننده) [۲۴].

جست الکتروریسمی بعد از حرکت بر روی خط مستقیم، شروع به خمیدگی کرده، سپس در مسیر گردبادی حرکت می‌کند. هر قسمت خمیدگی، حامل جریانی است که میدان مغناطیسی در فضا ایجاد می‌کند و در عوض نیروهای مغناطیسی که توسط سایر لایه‌های جت القا شده، بر آن تأثیر می‌گذارند؛ بنابراین علاوه بر نیروهای الکتریکی، نیروهای مغناطیسی هم در آنجا وجود دارند. بر اساس یافته‌های رن و همکارانش در مورد شکل‌گیری حرکت گردبادی جت، بخش خمیده جت تحت تأثیر میدان مغناطیسی در فضا به طور تصادفی حرکت نمی‌کند. با عمل کردن نیروهای جاذبه مغناطیسی، بخش‌های خمیده در جهت‌های یکسان، کنار هم قرار می‌گیرند. تحت تأثیر نیروهای مغناطیسی، بخش‌های خمیده دایره مانند لیف تمایل دارند که یکدیگر را در جهت جریان پوشانند. نیروی حاصل از نیروی الکتریکی و نیروی حاصل از گرانش پلیمر که مسیرهای گردبادی جت را می‌سازد، بزرگ و بزرگ‌تر می‌شود [۲۶].

حال اگر در چنین شرایطی، میدان مغناطیسی خارجی، هم چنان‌که در شکل ۲۴ الف و ۲۴ ب دیده می‌شود در اطراف ناحیه الکتروریسمی اعمال شود؛ آنگاه نیروهای اعمال شده به حلقه‌ای از نانوالیاف در حال تنشین شدن به گونه‌ای که در شکل ۲۴ ج نشان داده شده، است. از آنجایی که جست الکتروریسمی دارای دو قسمت یکی قسمت مستقیم (همیک) و دیگری قسمت مارپیچ است، بایستی این دو قسمت را به صورت مجزا از هم

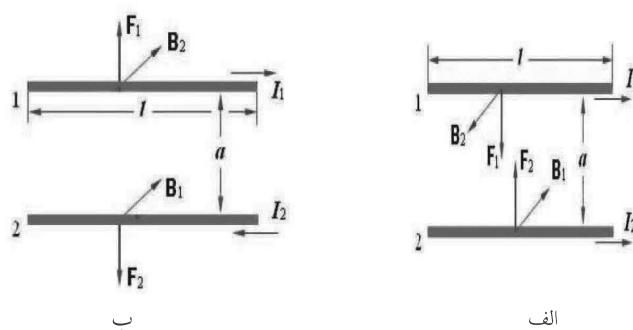


شکل ۲۲ روابط بین قطر جت و فاصله افشاگر از صفحه جمع کننده با استفاده از جریان‌های مختلف. (D) قطر جت، (Z) فاصله افشاگر از صفحه جمع کننده (V1) و لیاز اعمال شده به میزان ۱۵ کیلوولت. B3-B2-B1-B0، [۲۵] ۴A-3A-2A-0A جریان تحریک‌های مختلف که به ترتیب ۴A-3A-2A-0A.

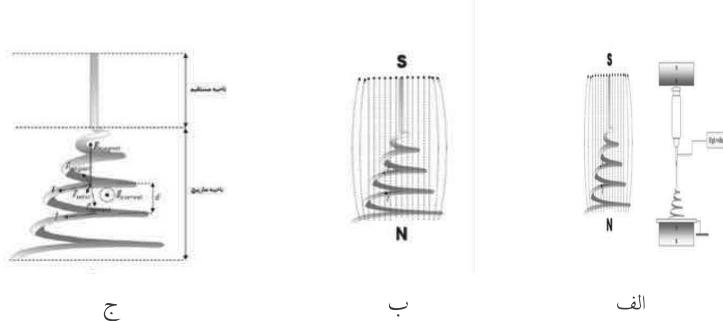
در طول مسیر الکتروریسمی مانند مارپیچی مخروطی است؛ به طوری که فرایند الکتروریسمی پایین ترین سطح انرژی را حفظ می‌کند.

مطابق اصول الکترومغناطیس، دو جریان الکتریکی نزدیک به هم، به یکدیگر نیروی مغناطیسی اعمال می‌کنند. همان طور که در شکل ۲۳ مشاهده می‌شود، دو جریان مجزای طولانی نامحدود، مستقیم، موازی با فاصله a و جریان‌های I_1 و I_2 به طور هم‌جهت، به یکدیگر نیروی جاذبه وارد می‌کنند. جریان I_2 میدان مغناطیس B_2 را در محل جریان I_1 ایجاد می‌کند. نیروی مغناطیسی بر طول l از جریان I_1 برابر است با:

$$F_1 = I_1 l \times B_2$$



شکل ۲۳ نیروهای مغناطیسی ناشی از جریان‌های نزدیک به هم. الف) دو جریان موازی هم‌جهت ب) دو جریان موازی غیرهم‌جهت [۲۶].



شکل ۲۴ الف) طرح واره الکتروریسی تحت میدان مغناطیسی خارجی. ب) خطوط میدان مغناطیسی خارجی. ج) نیروهای مغناطیسی وارد بر نانوالیاف در حین الکتروریسی [۲۶].

و بی ثباتی جریان گردابی شود. پس از اصلاح بی ثباتی تا حد امکان، نشان داده شد که اعمال میدان مغناطیسی به صورت عمود تا حذیزیادی باعث تنظیم جت پلیمری بر روی جمع کننده می شود [۲۷].

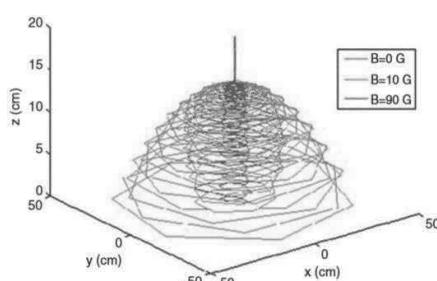
هانگ و همکارانش مدل الکتروریسی بدون سوزن برای تولید نانو الیاف مغناطیسی از پلیمر PVP و نانوذرات Fe_3O_4 تحت تأثیر میدان مغناطیسی و الکتریکی به صورت همزمان ارائه دادند. نتایج حاصل نشان داد مخروط تیلور خروجی بی ثبات را می توان تحت تأثیر میدان مغناطیسی قرارداد. هر دو میدان مغناطیسی و الکتریکی بر روی ناپایداری مخروط تأثیر داشتند و باعث کشیده شدن جت سیال می شدند. جت سیالی که از روش الکتروریسی بدون سوزن تولید می شود نازک تر

مورد بررسی قرارداد. در قسمت اهمیک به دلیل آنکه که جریان بار الکتریکی بر روی پلیمر سیال با میدان الکتریکی خارجی در یک راستا است، هیچ نیرویی از طرف میدان خارجی به آن وارد نمی شود اما در قسمت مارپیچ همچنان که در شکل ۲۴ ج نشان داده شده نیروی F_{total} به هر حلقه از الیاف وارد می شود که این نیرو برایند نیروهای F_{current} (نیرویی که میدان حاصل از جریان به بار وارد می کند) و نیروی F_{magnet} (نیرویی که میدان مغناطیسی به بار وارد می کند) که اندازه این نیرو برابر است با:

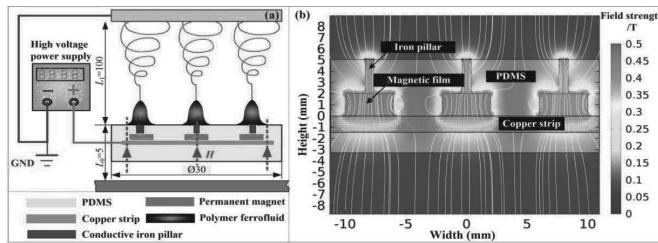
$$F_1 = I_1 I_2 / 2\pi d = I \mu_0 I / 2\pi d$$

همان طور که در شکل ۲۴ ج مشاهده می شود نیروی نهایی اعمال شده به هر حلقه لیف در جهتی است که سبب می شود شعاع حلقه مارپیچ کاهش یافته، در نتیجه شعاع نشست شبکه کم شود [۲۶].

از آنجایی که یکی از مشکلات اساسی در تولید نانو الیاف، توزیع غیرقابل پیش بینی آنها است در پژوهشی که در سال ۲۰۱۴ صورت گرفت مدلی ریاضی برای فرایند الکتروریسی مغناطیسی بر اساس مجموعه ای از معادلات ارائه شد. سپس با توجه به مدل بدست آمده رفتار جت مولکولی در روش رانگ - کاتا (Rung-Kutta) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. فرض بر این بود که جت، متشکل از تعدادی از ذرات گسسته متصل به بخش های گرانشی است. همان طور که در شکل ۲۵ نشان داده شده است نتایج نشان داد که اعمال میدان مغناطیسی مناسب می تواند به طور قابل توجهی باعث کاهش شعاع



شکل ۲۵ مسیر کامل جت برای شدت های مختلف مغناطیسی (MF) [۲۷].



شکل ۲۶ طرح واره و مدل المان محدود انجام شده برای ریستنگی بدون نازل تحت میدان مغناطیسی [۲۸].

تغییر شکل می‌دهد. نحوه چینش المان‌ها و تصویری از سامانه الکتروریسمی در حال کار در شکل ۲۸ نشان داده شده است [۲۹].

۳-۳ تأثیر الکترود پایه

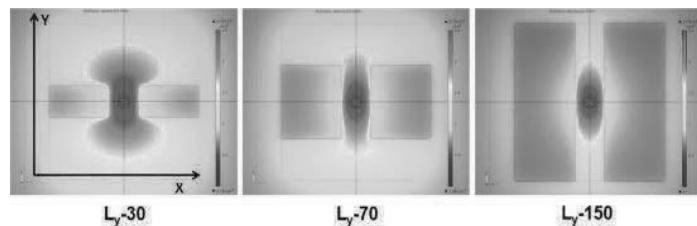
در پژوهش‌های مختلفی با استفاده از الکترود پایه، نحوه قرارگیری جت بر روی جمع‌کننده و نحوه و میزان ولتاژ اعمالی در حین فرایند الکتروریسمی مورد بررسی قرار گرفته است که نتایج حاصل نشان می‌دهد استفاده از الکترود پایه باعث ایجاد میدان یکنواخت‌تر و همچنین جت الکتروریسمی پایدارتر می‌شود. همچنین با توجه به نتایج حاصل از تغییر اندازه قطر الکترود پایه که در جدول ۳ نشان داده شده است با افزایش اندازه دیسک، میزان رسوب در نرخ ثابت ۰/۵ میلی لیتر در ساعت کاهش پیدا می‌کند.

همچنین دریافتند که با افزایش میزان ولتاژ ثابت و افزایش قطر الکترود پایه ممکن است به دلیل قدرت نامناسب میدان الکتریکی برای غلبه بر کشش سطحی محلول اصلاً هیچ جتی تشکیل نشود. همچنین نتایج

شده و در نهایت به عنوان نانو الیاف مغناطیسی روی جمع‌کننده جمع آوری می‌شود. نانو الیاف تهیه شده توسط روش الکتروریسمی بدون سوزن، ریزساختار مشابه را در مقایسه با الکتروریسمی معمول نشان می‌دهند. ذرات Fe_3O_4 در داخل و بر روی سطح الیاف پخش شده‌اند. با توجه به نتایج آزمایش، میانگین قطر نانو الیاف تولیدی $258 \pm 557 \text{ nm}$ ، $250 \pm 645 \text{ nm}$ ، $249 \pm 464 \text{ nm}$ برای غلظت‌های $0/2 \text{ g/ml}$ و $0/2 \text{ Fe}_3\text{O}_4 \text{ g/ml}$ بدون سوزن، $0/2 \text{ g/ml}$ بدون سوزن و $0/2 \text{ g/ml}$ با سوزن است که در شکل ۲۶ نشان داده شده است [۲۸].

۳-۲ تغییر شکل میدان مغناطیسی

هوانگ و همکاران (Hwang) با استفاده از قطعه‌هایی به ابعاد $30 \times 70 \times 70 \text{ nm}^3$ ، از جنس پلاستیک اکریلیک که به صورت موازی و با فاصله هوایی مایبن رشتہ‌ساز و جمع‌کننده قرار گرفته بود، میدان الکتریکی را تغییر شکل دادند. بر اساس مدل‌سازی میدان انجام شده شکل ۲۷ با قرار دادن قطعه‌ها در ناحیه الکتروریسمی میدان از نمای بالا از حالت دایره‌ای به حالت بیضی



شکل ۲۷ مدل‌سازی تغییر شکل میدان الکتریکی در حضور قطعه‌های عایق اکریلیکی [۲۹].

جدول ۳ مقایسه قطر ناحیه رسوب نانوالیاف (cm) با تغییر قطر الکتروودها دیسکی در فاصله ولتاژ مختلف در حین فرایند الکتروریسی پلی اکریلونیتریل (Polyacrylonitrile-PAN)

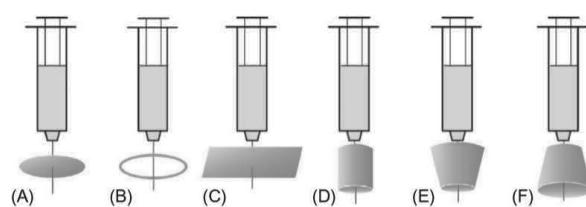
فاصله الکتروریسی (سانتی متر)	۶			۱۲			۱۸		
ولتاژ اعمالی (کیلوولت)	۱۲	۱۶	۲۰	۱۲	۱۶	۲۰	۱۲	۱۶	۲۰
قطر دیسک (۲ سانتی متر)	۴	۳/۵	۳/۲	۹	۷	۵/۵	۱۱/۵	۱۱/۵	۹
قطر دیسک (۴ سانتی متر)	۲/۹	۲/۵	۲/۵	۵	۵/۵	۵/۵	۴/۵	۵	۶/۵
قطر دیسک (۶ سانتی متر)	۲/۳	۲/۴	۱	۴	۳	۴	-	۴/۵	۶
قطر دیسک (۸ سانتی متر)	۰/۵	۱/۱	۱	۱/۵	۲	۲/۵	-	۴/۵	۶

پایه استوانه‌ای شکل است [۳۹-۳۵]. در شکل ۲۹ تأثیر الکتروود پایه در شکل‌های مختلف بر روی جت الکتروریسی نشان داده شده است.

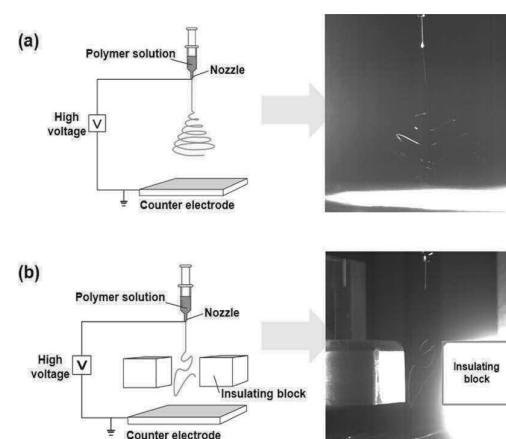
همچنین در تحقیق‌های دیگری با قراردادن الکتروودهای مختلف با ولتاژهای متفاوت در مسیر حرکت جت، سعی بر کنترل مسیر و رسوب آن دارند که نمونه‌ای از آن‌ها استفاده از صفحه آلومینیومی مستطیل شکل با ولتاژ مشابه جت است که در فاصله ۵ سانتی‌متری از نوک افشارانک قرار گرفته، باعث منحرف شدن جت سیال و دور شدن آن از صفحه آلومینیومی می‌شود و طبق گزارش، تأثیر کمی بر کنترل رسوب جت دارد که در شکل (A) ۳۰ نشان داده شده است [۳۶]. بهمین دلیل برای تأثیرگذاری بیشتر بر کنترل مسیر جت مطابق شکل (B) از دو صفحه با ولتاژ مشابه جت در دو طرف مسیر حرکت جت و افشارانک استفاده کردند که رسوب جت در این حالت عمدتاً در محدوده بین

حاصل نشان داده است که با استفاده از الکتروود پایه باعث افزایش ولتاژ اعمالی برای الکتروریسی می‌شود؛ ولی تأثیری بر ریزساختار سطح نانوالیاف ندارد و شاید تأثیر اندکی بر قطر الیاف الکتروریسی شده داشته باشد [۳۰-۳۲]. همچنین شکل الکتروود پایه نیز بر فرایند الکتروریسی تأثیرگذار است. چنانچه الکتروود، پایه دیسکی باشد باعث هدایت بهتر و کاهش منطقه رسوب می‌شود [۳۳ و ۳۰، ۳۱].

در صورت استفاده از الکتروود حلقه‌ای شکل، شروع شکل‌گیری جت در فاصله بیشتری از نوک افشارانک اتفاق می‌افتد و استفاده از آن برای کنترل جت در مرحله آغازین پیشنهاد می‌شود [۳۰-۳۴]. بهترین نوع الکتروود پایه برای ایجاد پایدارترین جت الکتروریسی، الکتروود



شکل ۲۹ اشکال مختلف الکتروود پایه: (A) دیسکی شکل [۳۰-۳۱-۳۳] (B) حلقه‌ای شکل [۳۰-۳۴] (C) صفحه‌ای شکل [۳۰-۳۶] (D) استوانه‌ای شکل [۳۹-۳۶] و (E، F) مخروطی شکل [۳۶-۳۷].

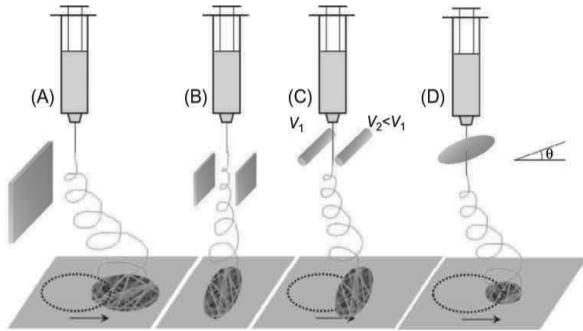


شکل ۲۸ طرح واره و تصویری از نحوه چینش الکتروریسی پایه و الکتروریسی با هدایت میدان الکتریکی توسط قطعه‌های عایق [۲۹].

روی جمع کننده تأثیر دارد که در شکل (D) ۳۰ نشان داده شده است [۴۱-۴۲].

۴ نتیجه‌گیری

با مرور پژوهش‌های انجام شده درباره تأثیر عوامل خارجی بر ریزساختار الیاف در حین فرایند الکتروریسمی مشخص شد که با استفاده از میدان مغناطیسی و تغییر شدت آن می‌توان فرایند الکتروریسمی کنترل شده تری انجام داد و همچنین می‌توان آرایش یافتنگی و قطر الیاف تولیدی توسط این فرایند را کنترل کرد؛ همچنین، با بررسی تحقیقاتی که در آن اثر الکترورود پایه بر فرایند الکتروریسمی را مورد بررسی قرار دادند نتیجه گرفته شد که در صورت استفاده از الکترورود پایه، میدان یکنواخت تری ایجاد می‌شود و جت الکتروریسمی پایدارتری تولید می‌شود که به همین دلیل می‌توان نحوه رسوب نانو الیاف را بر روی بستر جمع کننده کنترل کرد. همچنین از دیگر نتایج بدست آمده از این تحقیقات می‌توان به این مورد اشاره کرد که در صورت استفاده از الکترورود پایه نیاز به ولتاژ اعمالی بیشتری خواهد بود ولی تأثیر کمی بر ریزساختار نهایی نانو الیاف خواهد داشت.



شکل (۳۰) (A) میدان الکتریکی عرضی برای انحراف [۳۱] (B) [۴۱] و (C D) کنترل و جابه‌جایی مسیر حرکت جت و منطقه رسوب نانو الیاف [۴۱-۴۲].

دو صفحه محدود شده است [۴۰، ۳۱ و ۴۱]. همین طور می‌توان با تغییر اندازه میدان و فاصله صفحات یا پتانسیل آن‌ها نحوه رسوب نانو الیاف را کنترل کرد [۴۱-۴۲]. در نمونه مشابه دیگری با استفاده از دو جفت الکترورود با پتانسیل‌های مختلف، شکل منطقه رسوب به صورت خطی درآمده، بیضی شکل می‌شود و به سمت الکترورود پتانسیل بیشتر کشیده می‌شود. همچنین زاویه قرارگیری الکترورود پایه بر نحوه قرارگیری رسوب بر

مراجع

1. Sill T. J., and von Recum, H. A. Electrospinning: Applications in Drug Delivery and Tissue Engineering, *j. Biomaterials.*, 29, 1989-2006, **2008**.
2. Ignatova M., Rashkov I., and Manolova N., Drug-loaded Electrospun Materials in Wound-Dressing Applications and in Local Cancer Treatment, *J. Expert Opinion on Drug Delivery.*, 10, 469- 483, **2013**.
3. Ramakrishna S., Fujihara K., Teo W. E., Lim T. C. and Ma Z., An Introduction to Electrospinning and Nanofibers, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore, **2005**
4. Balta A.B., Development of Natural Compound-Loaded Nanofibers by Electrospinning., MSc Thesis, İzmir Institute of Technology, Turkey, **2010**.
5. Durney Carl H., and Johnson Curtis C., Introduction to Modern Electromagnetics. McGraw Hill Financial, Iran, ISBN 0-07-018388-0, **1969**.
6. Payvandy P., Latifi M., and Agha-Mirsalim M., Interlacing Metallic Filaments by Rotational Permanent Magnetic Field, *J.Fibers and Polymers.*, 9, 583-587, **2008**.
7. Payvandy P., Latifi M., Agha-Mirsalim M., and Shokrollahi-Moghani J., Rotational Electro-Magnetic Field Aided False Twisting of Metallic Filaments, *J.Textile Institute.*, 101, 514-519, **2010**.
8. Reneker D. H., Kataphinan W., Theron A., Zussman E., & Yarin A. L. Nanofiber Garlands of Polycaprolactone by Electrospinning., *Polymer*, 43, 6785-6794, **2002**.
9. Liu Y., Zhang X., Xia Y., and Yang H., Magnetic Field Assisted Electrospinning of Aligned Straight and Wavy Polymeric Nanofibers, *J.Advanced Materials.*, 22, 2454-2457, **2010**.
10. Yang D., Zhang J., Zhang J., and Nie J., Aligned Electrospun Nanofibers Induced by Magnetic Field, *J.Applied Polymer Science.*, 110, 3368-3372, **2008**.
11. Liu H. Y., Xu L., Tang X. P., and Sun Z. Q., Effect of Fe_3O_4 Nanoparticles on Magnetic Electrospun Nanofibers, *J. Textile Institute.*, 106, 503-509, **2015**.
12. م. جمشیدیان، پ. پیوندی، م. هادی زاده، م. اطیفی، اویین کنفرانس ملی علوم و فناوری نانو، طراحی روشنی نوین جهت کنترل فرایند الکترونافریسی با استفاده از میدان مغناطیسی خارجی، کنفرانس ملی علوم و فناوری نانو، یزد، ۱۳۸۹.
13. م. خواص، پ. پیوندی، م. ع. توانایی، یازدهمین کنفرانس ملی نساجی، بررسی تأثیر میدان مغناطیسی بر ریزساختار نانو الیاف در فرایند الکترونافریسی، کنفرانس ملی نساجی، گیلان، ۱۳۹۷.
14. م. خواص، «بررسی تأثیر میدان مغناطیسی بر ریزساختار نانو الیاف در فرایند الکترونافریسی»، کارشناسی ارشد، دانشگاه یزد، ۱۳۹۷.
15. Liu H.Y., XuL., Tang X.P., and Sun Z. Q., Effect of Fe_3O_4 Nanoparticles on Magnetic Electrospun Nanofibers, *The Journal of The Textile Institute*, 106, 503-509, **2015**.
16. Xu J., Liu X., Zhang Z., Wang L., Tan R., and Zhang D. Controllable Generation of Nanofibers Through a Magnetic-Field-Assisted Electrospinning Design, *Materials Letters*, 247, 19-24, **2019**.
17. Roskov K. E., AtkinsonJ. E., Bronstein L. M., and Spon-tak R. J., Magnetic Field-Induced Alignment of Nanoparticles in Electrospun Microfibers, *J.RSC Advances.*, 2, 4603-4607, **2012**.
18. Sanchez J. A. G., Furlan R., Valle R. L., Valle P., and da Silva A. N. R., Influence of a Magnetic Field in the Electrospinning of Nanofibers Using Solutions with PVDF, DMF, Acetone and Fe_3O_4 Nanoparticles, in 28th Symposium on Microelectronics Technology and Devices., Brazil, **2013**.
19. Liu H. Y., Xu L., and Si N., Effect of Magnetic Intensity on Diameter of Charged jets in Electrospinning, *J.Thermal Science.*, 18, 1451-1454, **2014**.
20. Reneker D.H., YarinA.L., Fong h., Koobhongse s., Bending Instability of Electrically Charged Liquid jets of Polymer Solutions in Electrospinning, *J.Applied Physics.*, 87,4531-4547, **2000**.
21. Yarin A. L., Koombhongse S., and Reneker D. H., Bending Instability in Electrospinning of Nanofibers, *J. Applied Physics.*, 89, 3018-3026, **2001**.
22. He J.-H. and Y-Q. Wan., Allometric Scaling and Instability in Electrospinning, *J.Nonlinear Sciences and Numerical Simulation.*, 5, 243-252, **2004**.
23. Wu Y., Yu J. Y., He J. H., and Wan Y. Q., Controlling Stability of the Electrospun Fiber by Magnetic Field, *J. Chaos, Solitons & Fractals.*, 32, 5-7, **2007**.
24. Xu L., A Mathematical Model for Electrospinning Process under Coupled Field Forces, *J. Chaos, Solitons & Fractals.*, 42, 1463-1465, **2009**.
25. Xu L., Wu Y., and Nawaz Y., Numerical Study of Magnetic Electrospinning Processes, *J. Computers & Mathematics with Applications.*, 61, 2116-2119, **2011**.
26. Ren Z. F., Liu B. Z., Liu G. Q., Kang Y. X., Fan H. Y., and Li, H. M., Effect of Magnetic Force on Stability of the Electrospinning Process, *J.Textile Institute.*, 101, 571-574, **2010**.
27. Badieyan, S. S., and Janmaleki, M., Nanofiber Formation in

- the Presence of an External Magnetic Field in Electrospinning, *J.Polymer Engineering.*, 35, 587-596, 2015.
28. Huang W., Liu B., Chen Z., Wang H., Ren L., Jiao J., and Jiang L., Fabrication of Magnetic Nanofibers by Needleless Electrospinning from a Self-assembling Polymer Ferrofluid Cone Array, *J. Nanomaterials.*, 7, 277, 2017.
29. Hwang W., Pang C., and ChaeH., Fabrication of Aligned Nanofibers by Electric-Field-Controlled Electrospinning: Insulating-Block Method, *Nanotechnology*, 27, 435301, 2016.
30. Yousefzadeh M., Ramakrishna S., Modeling Performance of Electrospun Nanofibers and Nanofibrous Assemblies, In *Electrospun Nanofibers*, 13, 303-337, 2017.
31. Bunyan N.N., Julie C., Chen I., and Farboodmanesh S. Electrostatic Effects on Electrospun Fiber Deposition and Alignment. In *ACS Symposium Series*, 918, 106-120, 2006.
32. Yang Y., Jia Z., Liu J., Li Q., Hou L., Wang L., and Guan Z. Effect of Electric Field Distribution Uniformity on Electrospinning, *Journal of Applied Physics*, 103, 104307-11, 2008.
33. Shin Y. M., Hohman M. M., BrennerM. P., and Rutledge G. Experimental Characterization of Electrospinning: the Electrically Forced Jet and Instabilities, *Polymer*, 42, 09955-09967, 2001.
34. Buttafoco L., Kolkman N. G., Engbers-Buijtenhuijs P., Poot A. A., Dijkstra P. J., Vermes I., and Feijen J., Electrospinning of Collagen and Elastin for Tissue Engineering Applications. *Biomaterials*, 27, 724-734, 2006.
35. Santos J., Fernández M., Fontechá J., Matatagui D., Sayago I., Horrillo M., and Gracia I., Nanocrystalline Tin Oxide Nanofibers Deposited by a Novel Focused Electrospinning Method. Application to the Detection of TATP Precursors, *Sensors*, 14, 24231-24243, 2014.
36. Kim G. H., Electrospinning Process using Field/Controllable Electrodes. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 44, 1426-1433, 2006.
37. Kim G. H., Han H., Park J. H., and Kim W. D. An Applicable Electrospinning Process for Fabricating a Mechanically Improved Nanofiber mat. *Polymer Engineering & Science*, 47, 707-712, 2007.
38. Kim G. H., Electrospun PCL Nanofibers with Anisotropic Mechanical Properties as a Biomedical Scaffold, *Biomedical Materials*, 3, 025010, 2008.
39. Lee H., Yoon H., and Kim G. Highly Oriented Electrospun Polycaprolactone Micro/Nanofibers Prepared by a Field-Controllable Electrode and Rotating Collector, *Applied Physics A*, 97, 559, 2009.
40. Doshi J., and Reneker D. H., Electrospinning Process and Applications of Electrospun Fibers, *Journal of Electrostatics*, 35, 151-160, 1995.
41. Arras M. M., Grasl C., Bergmeister H., and Schima H., Electrospinning of Aligned Fibers with Adjustable Orientation using Auxiliary Electrodes, *Science and Technology of Advanced Materials*, 13, 035008, 2012.
42. Nurfaizey A. H., Stanger J., Tucker N., Buunk N., Wood A. R., and Staiger M. P., Control of Spatial Deposition of ElectrospunFiber Using Electric Field Manipulation, *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 9, 155-163, 2014.