

واژه‌های کلیدی:

الکتروریسی
میدان مغناطیسی
نانوالیاف
ریزساختار

بررسی اثر میدان مغناطیسی بر فرایند الکتروریسی نانوالیاف پلیمری

فاطمه پارسى مود^۱، پدرام پیوندی^{*۳،۱}، محمدعلی توانایی^{۳،۲}

۱ دانشگاه یزد، دانشکده مهندسی نساجی

۲ دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی نساجی

۳ دانشگاه یزد، هسته علمی بینایی ماشین در صنعت نساجی و پوشاک

چکیده ...

امروزه نانو الیاف به‌عنوان یکی از مهم‌ترین محصولات فناوری نانو در بسیاری از حوزه‌ها به‌ویژه پزشکی، مهندسی بافت، دارویی و صنایع نظامی کاربرد قابل توجهی دارد. از آنجایی‌که الکتروریسی یکی از بهترین روش‌های تولید نانو الیاف تاکنون شناخته شده است، لازم است تولید نانو الیاف با این روش و نیز نحوه آرایش یافتگی آن‌ها در شبکه ایجادشده به‌نحوی اصلاح و کنترل شود. از جمله روش‌هایی که می‌توان برای کنترل 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 مقالات در زمینه تأثیر اعمال نیروی مغناطیسی بر فرایند الکتروریسی پرداخته شده است.

*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:

peivandi@yazd.ac.ir

۱ مقدمه

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:

(۲)

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

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 قرار گرفتن این فرایند در میدان مغناطیسی، نیرویی مطابق 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 [۶-۷].

۲ مطالعات تجربی

۲-۱ ناپایداری خمشی 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 به دست 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 واردشونده 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 ربای نواری به ابعاد (۱۵×۲/۵×۲/۵ cm) و اندازه میدان مغناطیسی ۰/۲ تسلا انجام شد. طرح وارده و نحوه قرارگیری دستگاه الکتروریسی در حضور میدان مغناطیسی

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 [۱-۲].

روش های مختلفی برای تولید نانو الیاف وجود دارد که برخی از آن ها شامل کشش، جداسازی الیاف چندجزئی، روش قالب، جدایش فازی، خودآرایی درشت مولکول ها، الکتروریسی و غیره 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 گرانیوی زیاد، داشته است [۳]. از عوامل دیگری که این روش را مورد توجه قرار می دهد کنترل قطر، تولید نانو الیاف با ریزساختارهای 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].

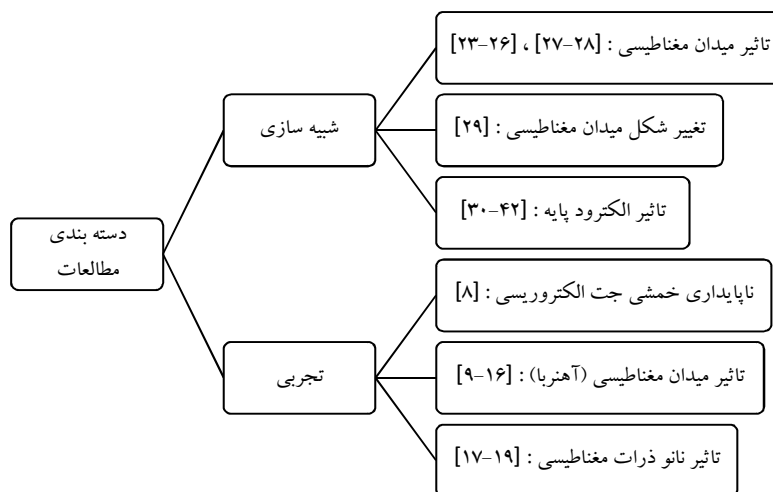
مولفه های موثر بر الکتروریسی عبارتند از عوامل مختلف فرایندی (ولتاژ، دبی محلول و ...)، محیطی (دما و رطوبت محیط) و محلول (رسانایی، گرانیوی و ...). یکی از روش های کنترل نانو الیاف اعمال نیروی مغناطیسی است. این نیرو به همراه سایر نیروها سبب کاهش ناپایداری های رشته پلیمری می شود و در نهایت می توان محصول کنترل 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:

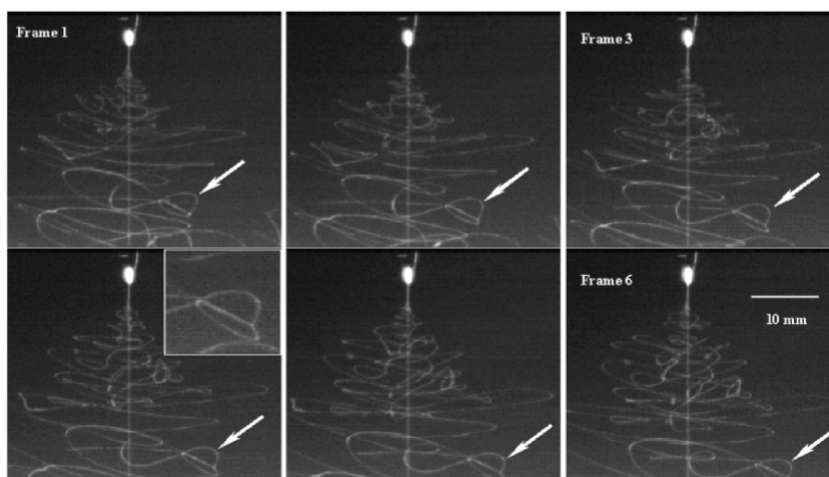
(۱)

$$F = BLI$$

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



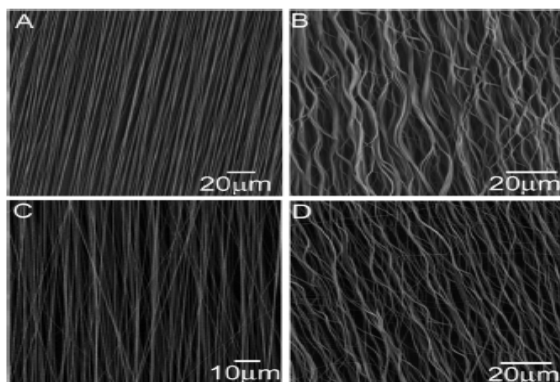
شکل ۱ نمودار دسته بندی مطالعات انجام شده بر روی تأثیر میدان مغناطیسی بر فرایند الکتروریسی.



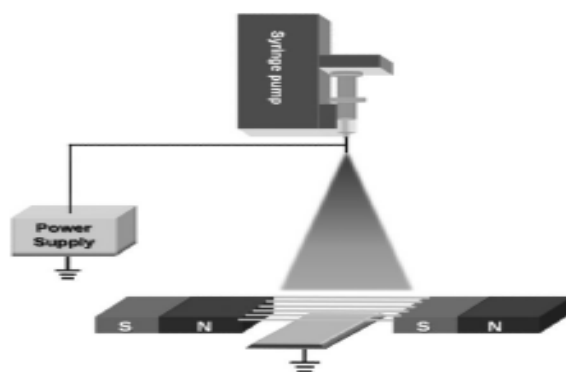
شکل ۲ حلقه های کوچک و گاهی پیچیده که بلافاصله بعد از شروع بی ثباتی خمشی در جت های ۱۵% PCL ایجاد می شود. فلش، حلقه ای دوتایی را نشان می دهد. خط عمودی ناشی از نور پراکنده از نوک است. (۵ کیلوولت، ۱۴۰ میلی متر، ۵۰۰ فریم در ثانیه) [۸].

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

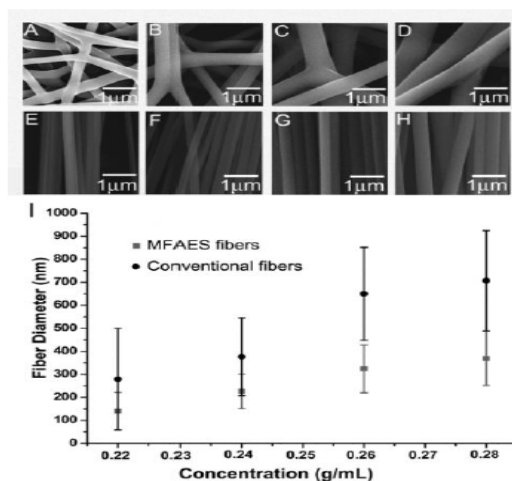
کمکی در شکل ۳ نشان داده شده است. فاصله بین دو آهن ربا در محدوده ۴-۵/۵ سانتی متر متغیر بوده است. در این پژوهش از دو پلیمر پلی لاکتیک کو گلیکولیک اسید (Poly lactic-co-glycolic acid-PLGA) و پلی وینیل پیرولیدون (Polyvinylpyrrolidone-PVP) استفاده شده است. به منظور اعمال ولتاژ به جت الکتروریسی محلول پلیمری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



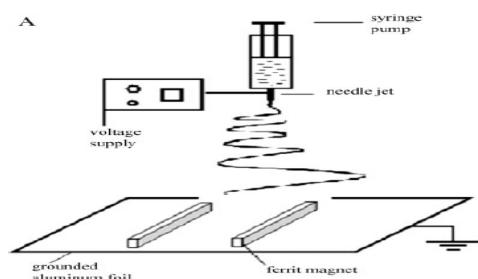
شکل ۴ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (A-B) پلیمر PLGA و (C-D) پلیمر PVP با استفاده از میدان مغناطیسی در فرایند الکترورسی. (نرخ تغذیه (A): ۵ (ml/h) ، (B) ۳، (C) ۱، (D) ۲) [۹].



شکل ۳ طرح‌واره قرارگیری آهن ربا در فرایند الکترورسی [۹].



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



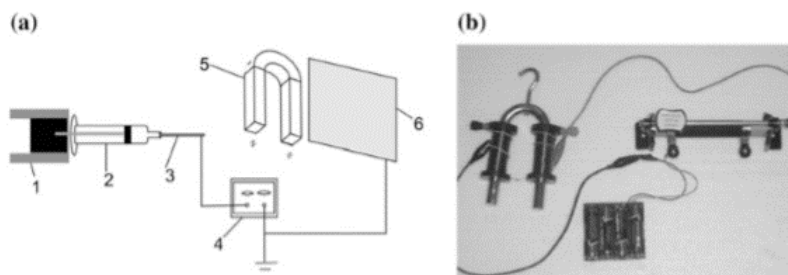
شکل ۶ طرح‌واره فرایند الکترورسی با استفاده از آهن ربا بر روی صفحه جمع‌کننده [۱۰].

اثرات متقابل الکترواستاتیک بین بخش‌های مختلف جت عنوان شده است. با استفاده از میدان مغناطیسی نیروهای دافعه در جت از اثر متقابل الکترواستاتیک بیشتر شده، در نتیجه منجر به تولید الیاف بدون انشعاب و آرایش یافته می‌شود. نمونه‌ای از این الیاف در شکل ۴ آورده شده است. همچنین نتایج نشان داد که می‌توان نانو الیاف موج بدون انشعاب با افزایش نرخ جریان محلول پلیمری تولید کرد.

در پژوهش انجام‌شده گزارش شده است که با تغییر غلظت محلول پلیمری می‌توان قطر و ریزساختار الیاف را نیز کنترل کرد. با توجه به شکل ۵ با افزایش غلظت محلول حتی در حضور میدان مغناطیسی قطر نانو الیاف افزایش می‌یابد [۹].

یانگ و همکارانش روش جدیدی مبنی بر الکترورسی برای تولید نانو الیافی آرایش یافته در یک جهت ارائه کرده‌اند. در مطالعه آن‌ها نانو الیاف در طول محور بین دو تیغه آهن ربای نارسانای فریت منظم شده‌اند. این دستگاه از لحاظ اصول همان شکل متداول را دارد؛ به جز جمع‌کننده که مجهز به دو نوار مغناطیسی فریت است که توسط شکافی از هم جدا شده‌اند. طرح‌واره این فرایند در شکل ۶ نشان داده شده است [۱۰].

در بررسی‌های انجام شده برای تهیه نانوالیاف با آرایش یافتگی بیشتر، از فرایند ساده الکترورسی مغناطیسی استفاده شد. در مقایسه با دستگاه‌های الکترورسی مرسوم، یک آهن ربای دائمی U شکل مورد استفاده قرار گرفت که با یک رئوستا کاربردی شده است که طرح‌واره آن



شکل ۷ دستگاه الکترورسی جدید مغناطیسی (a-b): (۱) پمپ، (۲) سرنگ، (۳) سوزن، (۴) منبع تغذیه ولتاژ بالا، (۵) ژنراتور میدان مغناطیسی و (۶) صفحه جمع کننده [۱۱].

آهن ربای دائمی در موقعیت های مختلف، الکترورسی نانو الیاف در حضور میدان مغناطیسی صورت گرفت. سپس با استفاده از میکروسکوپ الکترونی تصاویری از شبکه های تولید شده تهیه شد و مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان می دهد حضور میدان مغناطیسی موجب کاهش الیاف در موقعیت های مکانی مختلف شده است که تأثیر چشمگیری در بهبود تولید نانو الیاف و آرایش یافتگی آن ها داشته است [۱۳]. تأثیر قرارگیری آهن ربای دائمی، در موقعیت های مختلف در حین فرایند الکترورسی مورد بررسی قرار گرفته است و با بررسی نتایج و تجزیه تحلیل داده ها مشخص شد که حضور میدان مغناطیسی موجب کاهش ۲۸ تا ۴۲ درصدی اندازه پخش مواد و ۲۰ تا ۲۸ درصدی قطر نانو الیاف در موقعیت های مکانی مختلف شده است که تأثیر چشمگیری در بهبود تولید نانو الیاف و آرایش یافتگی آن ها 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 الکل (Polyvinyl Alcohol-PVA) و PVA/Fe_3O_4 به وسیله الکترورسی مغناطیسی تولید شدند. آرایش یافتگی و ریزساختار الیاف با استفاده از میکروسکوپ الکترونی (SEM) بررسی شد. نتایج نشان داد که میدان مغناطیسی می تواند قطر الیاف را کاهش و نظم و بلوری بودن الیاف را افزایش دادند و افزودن Fe_3O_4 آرایش یافتگی الیاف را افزایش می دهد. 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 جمع آوری شده بر روی صفحه جمع کننده با به کارگیری میدان مغناطیسی پرداخته شده که مشخص شد با به کارگیری میدان مغناطیسی خارجی می توان پایداری حرکت جت در فرایند الکترورسی 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 تسلا)	PVA			PVA/ Fe_3O_4		
	میانگین قطر (D) (نانومتر)	انحراف معیار (σ) (نانومتر)	فاصله اطمینان (نانومتر)	میانگین قطر (D) (نانومتر)	انحراف معیار (σ) (نانومتر)	فاصله اطمینان (نانومتر)
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±

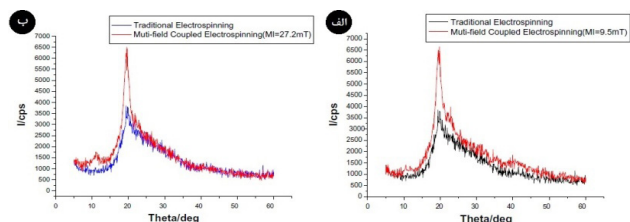
جدول ۲ تحلیل آماری موقعیت‌های مکانی مختلف آهن ربا [۱۴]

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

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

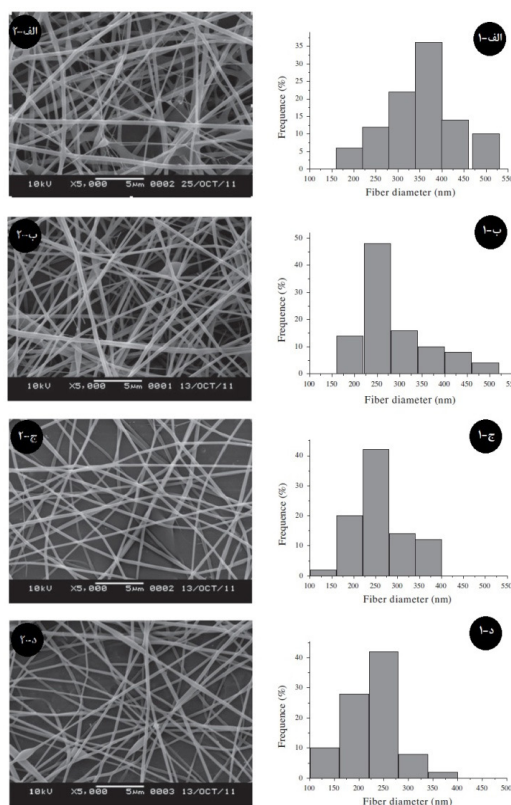
۳-۲ تأثیر نانوذرات مغناطیسی

الکترورسی پلیمر پلی کاپرولاکتون و نانوذرات مغناطیسی اکسید آهن در حضور دو آهن ربای الکتریکی نعل اسبی 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 الکترورسی متداول (در غیاب میدان مغناطیسی) و الکترورسی در حضور میدان مغناطیسی

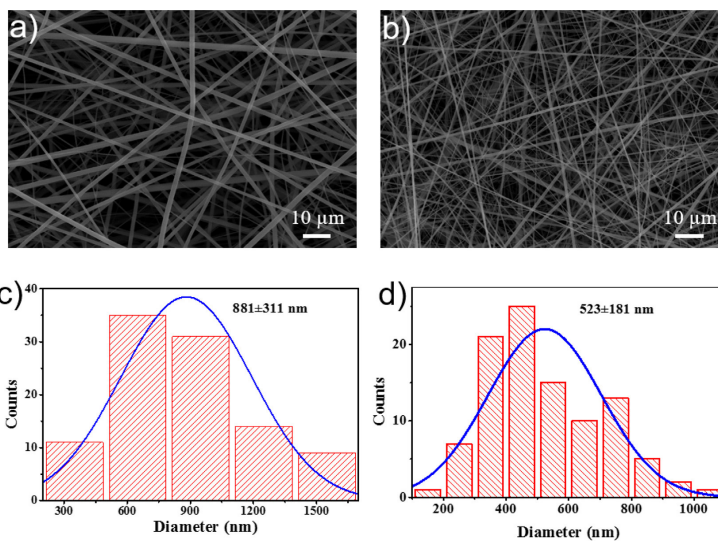


شکل ۹ تأثیر حضور میدان مغناطیسی در محدوده ریسندگی بر بلورینگی PVA (نمودار پراش اشعه ایکس) [۱۵].

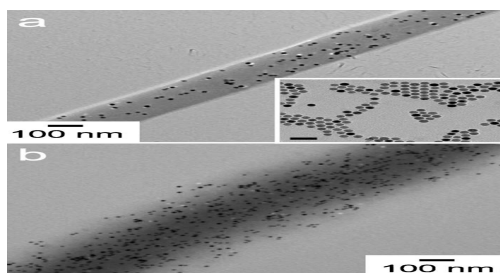
همچنین در پژوهش دیگری تأثیر شدت میدان مغناطیسی بر قطر و بلورینگی نانو الیاف پلی وینیل الکل و نانوذرات مغناطیسی اکسید آهن بررسی شده است. همانگونه که از نمودارهای شکل ۸ قابل مشاهده است، با افزایش شدت میدان مغناطیسی، قطر الیاف کاهش یافته است. برای بررسی درجه بلورینگی از روش پراش اشعه X استفاده شده است که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



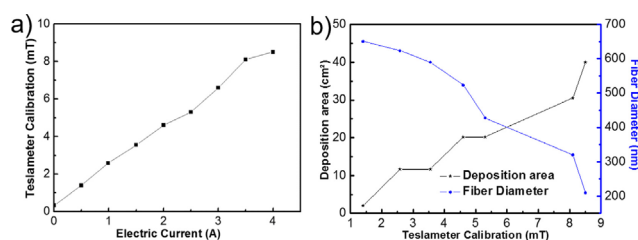
شکل ۸ تأثیر حضور میدان مغناطیسی در محدوده ریسندگی بر قطر نانوالیاف PVA برای شدت‌های میدان مغناطیسی (الف) صفر (ب) ۹/۵، (ج) ۱۶/۲ و (د) ۲۷/۲ میلی‌تسلا [۱۵].



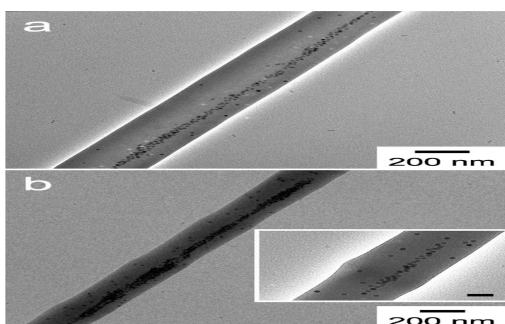
شکل ۱۰ تأثیر حضور میدان مغناطیسی در حین فرایند الکتروریسی بر قطر نانو الیاف [۱۶].



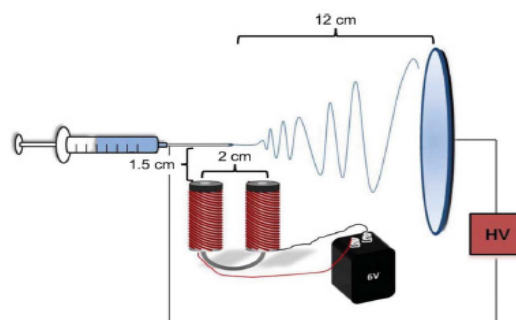
شکل ۱۳ تصاویر نانو الیاف الکتروریسی شده pcl و نانوذرات اکسید آهن با نسبت (a) ۰/۵ (b) ۲/۵ درصد حجمی [۱۷].



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

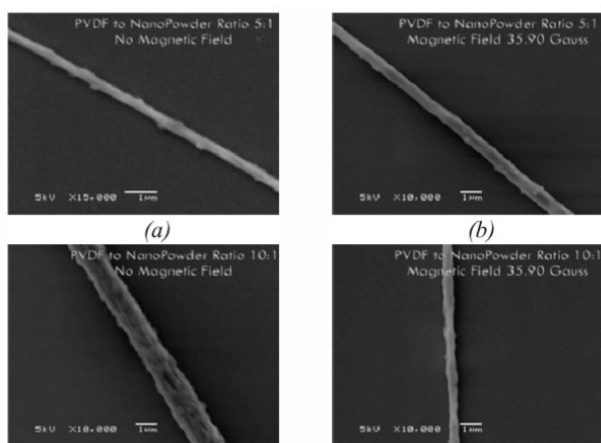


شکل ۱۴ تصاویر نانوالیاف الکتروریسی شده pcl و نانوذرات اکسید آهن در حضور میدان مغناطیسی با نسبت (a) ۰/۵ (b) ۲/۵ درصد حجمی [۲۰].



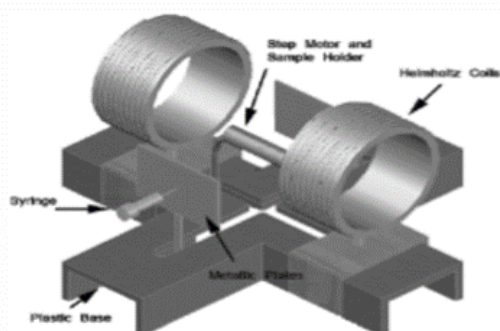
شکل ۱۲ طرح واره نحوه قرارگیری آهن ربای الکتریکی در فرایند الکتروریسی [۱۷].

گرفت، از پلیمر PVA و ذرات Fe_3O_4 استفاده شده است. تحلیل نظری با توجه به اثر میدان مغناطیسی بر روی مقدار گرمای تولیدشده در جت که نقش اساسی در تعیین قطر آن دارد بررسی شده است. مولفه‌های موثر بر این تحلیل عبارتند از شارژ الکتریکی، سرعت جت و چگالی شار مغناطیسی که بر خاصیت مغناطیسی تأثیر داشته‌اند. در این تحقیق برای ایجاد میدان مغناطیسی از آهن ربای دائمی استفاده شده است. با اعمال میدان مغناطیسی، دایره گردابی جت که به سمت جمع‌کننده در حال حرکت است صاف می‌شود که این موضوع با اتلاف انرژی کمتر؛ باعث ذخیره انرژی بیشتری در فرایند الکترورسی و افزایش انرژی جنبشی جت شده می‌شود. افزایش انرژی جنبشی، سبب افزایش سرعت حرکت جت می‌شود. در شرایط یکسان محلول پلیمری با افزایش شدت مغناطیسی، شعاع جت کوچک‌تر شده است. علاوه بر این اثر میدان مغناطیسی بر روی توزیع قطر الیاف الکترورسی به صورت تجربی بررسی شده است. تجزیه و تحلیل‌ها نشان داده که میدان مغناطیسی، نقش اساسی در اندازه قطر و توزیع قطر نانوالیاف 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 شکل‌های ۱۳ و ۱۴ چگونگی توزیع نانوذرات اکسید آهن در الیاف نشان داده شده است. نتایج حاصل از این تصاویر نشان می‌دهد که در غیاب میدان مغناطیسی نانوذرات به طور تصادفی در طول نانوالیاف پراکنده شده‌اند. یکی دیگر از عوامل موثر بر آرایش یافتگی نانوالیاف در فرایند الکترورسی، غلظت آن‌ها است. نیروهای جاذبه که ممان دوقطبی هستند باید برای غلبه بر گرانشی محلول پلیمری کافی باشند. در نتیجه می‌توان غلظت محلول پلیمری، مقدار نانوذرات موجود در محلول، فاصله بین دو آهن ربا و همچنین فاصله بین افشانک تا آهن ربا را جزء 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 پلی‌وینیلیدین فلورید (Polyvinylidene fluoride-PVDF) حاوی ذرات Fe_3O_4 با روش الکترورسی از میدان مغناطیسی یکنواخت ناشی از دو سیم پیچ هلمهولتز استفاده شده است (شکل ۱۵). محدوده قطر نانوالیاف تولیدشده بین ۱۰۰-۷۰۰ نانومتر به دست آمد. پس از فرایند الکترورسی 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 شده‌اند [۱۸]. همچنین در تحقیقی که به منظور تجزیه و تحلیل نظری و تجربی الکترورسی، تحت میدان مغناطیسی صورت



شکل ۱۵ طرح‌واره فرایند الکترورسی با استفاده از سیم پیچ هلمهولتز برای اعمال میدان مغناطیسی [۱۸].

۳ شبیه سازی

تاکنون مطالعات زیادی بر شبیه سازی مسیر حرکت نانو الیاف در حین فرایند الکتروریسی 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 خمشی جت الکتروریسی از لحاظ شکل و نیروهای مؤثر بر آن مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته و همچنین به طور سیستماتیک ناپایداری فرایند الکتروریسی بررسی شده و برای هر سطح از چرخه گردبادی معادله ای براساس شعاع چرخه و فاصله از افشانک پیش بینی شده است [۲۰-۲۲]. سایر تحقیقات با دسته بندی هایی که در شکل ۱ بیان شده است، مورد بررسی قرار گرفته است.

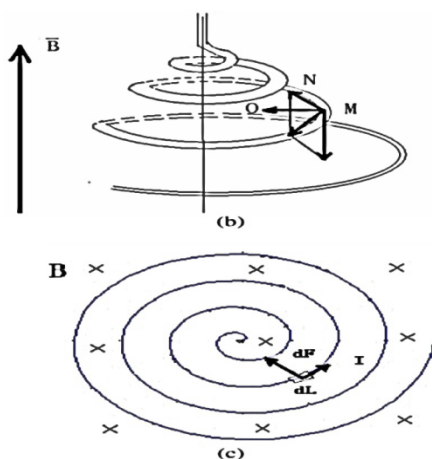
۳-۱ تأثیر میدان مغناطیسی

ویو (Wu) و همکارانش اولین کسانی بودند که برای کنترل پایداری در فرایند الکتروریسی استفاده از میدان مغناطیسی را پیشنهاد کردند. بر اساس نتایج به دست آمده استفاده از روش مغناطیسی مؤثرترین و مقرون به صرفه ترین راه برای کنترل بی ثباتی فرایند الکتروریسی است. اگر میدان مغناطیسی در فرایند الکتروریسی 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 i جریان الکتروسیسته درون جت و b مقدار شدت میدان مغناطیسی القا شده باشد، هنگامی که

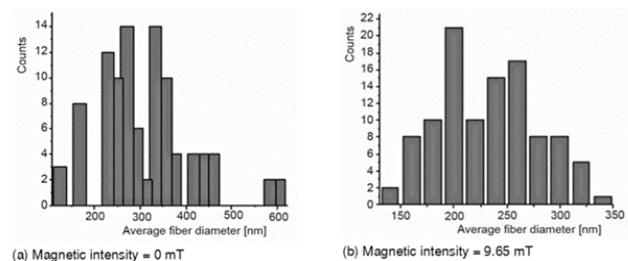
میدان مغناطیسی در فرایند الکتروریسی اعمال شود، جریان درون جت تحت تأثیر میدان مغناطیسی، نیروی مرکزگرایی تولید می کند که جهت آن به سمت کم شدن شعاع چرخه گردبادی است. در نتیجه پایداری فرایند الکتروریسی به طور قابل ملاحظه ای بهبود می یابد. اما این ایده در مقاله آنها تنها به طور نظری مطرح شده است [۲۳].

به منظور تولید نانو الیاف پلیمری، دستگاه های الکتروریسی جدیدی طراحی شده است؛ با این حال، مدل نظری واحدی برای توصیف فرایند الکتروریسی 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 الکتروریسی 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].

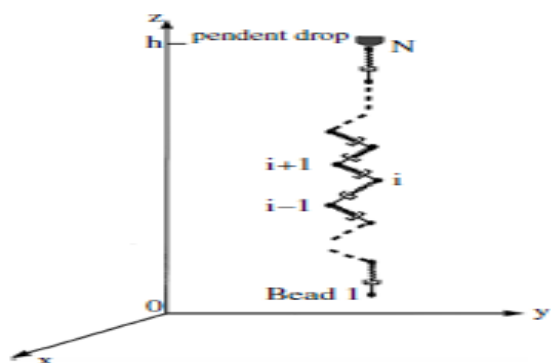
در تحقیق دیگری، با اعمال میدان مغناطیسی توسط سیم پیچ در فرایند الکتروریسی، مدل ریاضی گسسته ای از روند الکتروریسی مغناطیسی ارائه شده است. فرایند الکتروریسی با استفاده از میدان مغناطیسی در این پژوهش نیز مانند شکل ۱۹ است. در این مدل برای توصیف جت الکترومغناطیسی از مدل رنکر استفاده شده



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



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



شکل ۲۰ طرح‌واره جت الکتروریسی [۲۵].

شده است [۲۵].

نتایج به‌دست آمده از شکل ۲۲ نیز نشان می‌دهد با افزایش جریان تحریک‌های مختلف در سیم‌پیچ 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 به‌عنوان اثری پایدار بر فرایند الکتروریسی مطرح کردند. آن‌ها بیان کردند حرکت الیاف

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

مدل ریاضی گسسته ایجاد شده به‌صورت زیر است:

$$m = \frac{d^2 \mathbf{r}_i}{dt^2} = F_C + F_E + F_{ve} + F_B + F_q \quad (۳)$$

F_i موقعیت جت

F_C نیروی کولمبیک

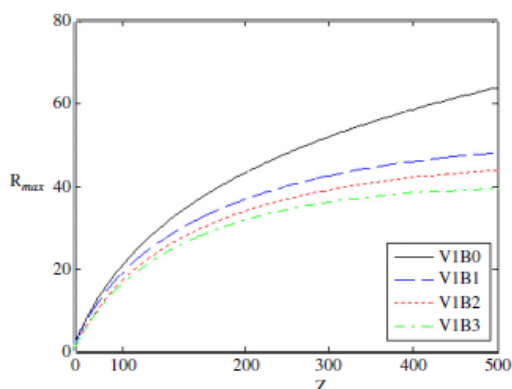
F_E نیروی میدان الکتریکی

F_{ve} نیروی گرانش و کشسان

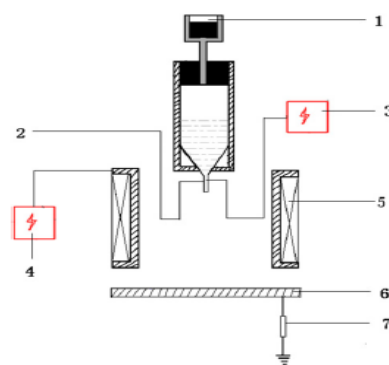
F_B نیروی کشش سطحی

F_q نیروی لورنز

در این مدل تحلیل رفتار جت در حال حرکت نشان داده است که میدان مغناطیسی باعث ایجاد نیروی لورنز در جت و کاهش ناپایداری جت شده است. روابط از نوسان جت و فاصله آن با جریان‌های مختلف تحریک به‌دست 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 افشانک و صفحه جمع‌کننده می‌تواند تأثیر بهتری بر روی نوسان جت داشته باشد. نتایج به‌دست آمده در شکل ۲۱ نشان داده



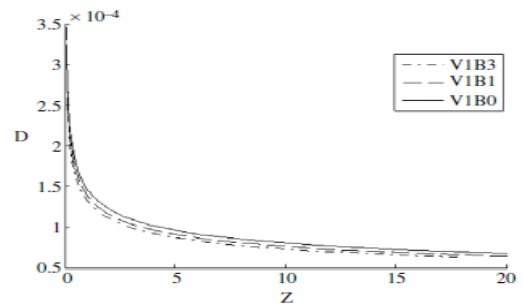
شکل ۲۱ نمودار حداکثر نوسان جت و فاصله افشانک از صفحه جمع‌کننده با استفاده از جریان‌های مختلف (R) حداکثر نوسان جت، (Z) فاصله افشانک از صفحه جمع‌کننده، (V) ولتاژ اعمال شده به میزان ۱۵ کیلوولت. B3-B2- B1-B0 جریان تحریک‌های مختلف که به ترتیب 4A-3A-2A-0A [۲۵].



شکل ۱۹ طرح‌واره فرایند الکتروریسی در حضور میدان مغناطیسی (۱) پمپ، ۲. افشانک، ۳ و ۴. منابع ولتاژ، ۵. سیم‌پیچ، ۶. صفحه جمع‌کننده [۲۴].

جت الکتروریسی 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 گردابی جت، بخش خمیده جت تحت تأثیر میدان مغناطیسی در فضا به‌طور 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 ببوشانند. 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، هم‌چنان‌که در شکل ۲۴ الف و ۲۴ ب دیده می‌شود در اطراف ناحیه الکتروریسی اعمال شود؛ آنگاه نیروهای اعمال‌شده به حلقه‌ای از نانوالیاف در حال ته‌نشین شدن به‌گونه‌ای که در شکل ۲۴ ج نشان داده شده، است. از آنجایی‌که جت الکتروریسی دارای دو قسمت یکی قسمت مستقیم (اهمیک) و دیگری قسمت مارپیچ است، بایستی این دو قسمت را به‌صورت مجزا از هم

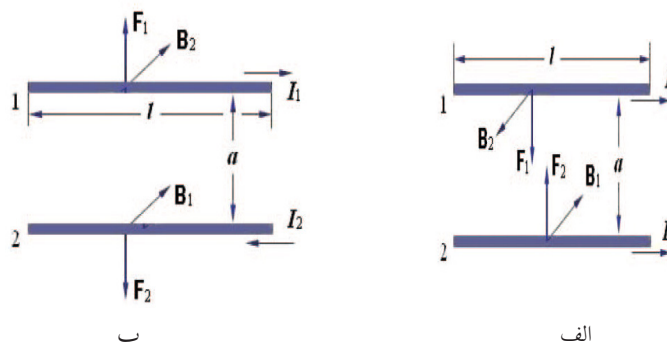


شکل ۲۲ روابط بین قطر جت و فاصله افشانک از صفحه جمع‌کننده با استفاده از جریان‌های مختلف. (D) قطر جت، (Z) فاصله افشانک از صفحه جمع‌کننده، (V) ولتاژ اعمال‌شده به میزان ۱۵ کیلوولت. B3-B2-B1-B0 جریان تحریک‌های مختلف که به ترتیب 4A-3A-2A-0A [۲۵].

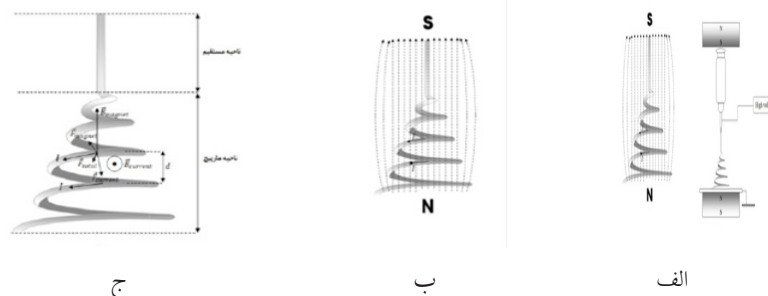
در طول مسیر الکتروریسی مانند مارپیچی مخروطی است؛ به طوری‌که فرایند الکتروریسی پایین‌ترین سطح انرژی را حفظ می‌کند.

مطابق اصول الکترومغناطیس، دو جریان الکتریکی نزدیک به هم، به یکدیگر نیروی مغناطیسی اعمال می‌کنند. همان‌طور که در شکل ۲۳ مشاهده می‌شود، دو جریان مجزای طولانی نامحدود، مستقیم، موازی با فاصله d و جریان‌های I_1 و I_2 به‌طور 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 الکترونیسی تحت میدان مغناطیسی خارجی. ب) خطوط میدان مغناطیسی خارجی. ج) نیروهای مغناطیسی وارد بر نانویاف در حین الکترونیسی [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 حد زیادی باعث تنظیم جت پلیمری بر روی جمع کننده می شود [۲۷].

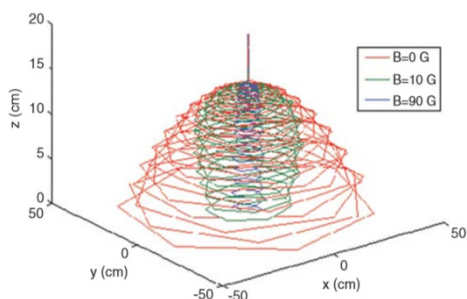
هانگ و همکارانش مدل الکترونیسی بدون سوزن برای تولید نانو یاف مغناطیسی از پلیمر PVP و نانوذرات Fe_3O_4 تحت تأثیر میدان مغناطیسی و الکتریکی به صورت همزمان ارائه دادند. نتایج حاصل نشان داد مخروط تیلور خروجی بی ثبات را می توان تحت تأثیر میدان مغناطیسی قرارداد. هر دو میدان مغناطیسی و الکتریکی بر روی ناپایداری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

مورد بررسی قرارداد. در قسمت اهمیتیک 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 هم چنان که در شکل ۲۴ ج نشان داده شده نیروی F_{total} به هر حلقه از یاف وارد می شود که این نیرو بر ایند 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:

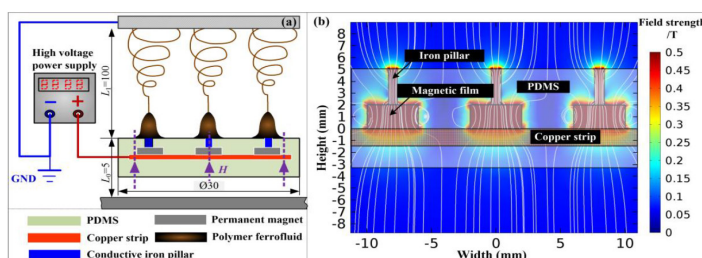
$$F_1 = I_1 B_2 = I_1 I_2 (\mu_0 / 2\pi d) = I \mu_0 I_1 I_2 / 2\pi d$$

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 یاف، توزیع غیر قابل پیش بینی آن ها است در پژوهشی که در سال ۲۰۱۴ صورت گرفت مدلی ریاضی برای فرایند الکترونیسی مغناطیسی بر اساس مجموعه ای از معادلات ارائه شد. سپس با توجه به مدل به دست 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 گرانروی 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 ریسندگی بدون نازل تحت میدان مغناطیسی [۲۸].

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

۳-۳ تأثیر الکتروود پایه

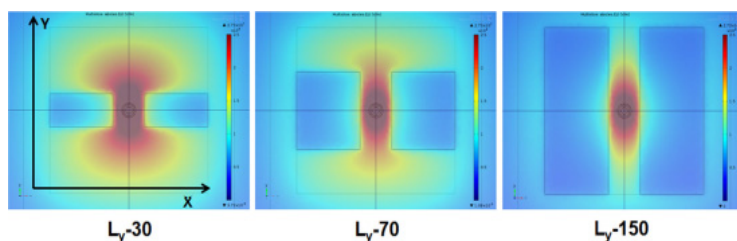
در پژوهش‌های مختلفی با استفاده از الکتروود پایه، نحوه قرارگیری جت بر روی جمع‌کننده و نحوه و میزان ولتاژ اعمالی در حین فرایند الکتروریسی مورد بررسی قرار گرفته است که نتایج حاصل نشان می‌دهد استفاده از الکتروود پایه باعث ایجاد میدان یکنواخت‌تر و همچنین جت الکتروریسی پایدارتر می‌شود. همچنین با توجه به نتایج حاصل از تغییر اندازه قطر الکتروود 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 الکتروود 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 جمع‌آوری می‌شود. نانوالیاف تهیه شده توسط روش الکتروریسی بدون سوزن، ریزساختار مشابهی را در مقایسه با الکتروریسی معمول نشان می‌دهند. ذرات Fe_3O_4 در داخل و بر روی سطح الیاف پخش شده‌اند. با توجه به نتایج آزمایش، میانگین قطر نانوالیاف تولیدی $258 \pm 557 \text{ nm}$ ، $340 \pm 645 \text{ nm}$ ، $249 \pm 464 \text{ nm}$ برای غلظت‌های $0/2 \text{ g/ml}$ Fe_3O_4 بدون سوزن، $0/25 \text{ g/ml}$ 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 $30 \times 70 \times 70$ ، از جنس پلاستیک اکریلیک که به صورت موازی و با فاصله هوایی مابین رشته‌ساز 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 الکتروریسی 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 الکترودها دیسکی در فاصله ولتاژ مختلف در حین فرایند الکتروریسی پلی اکریلونیتریل (PAN-Polyacrylonitrile)

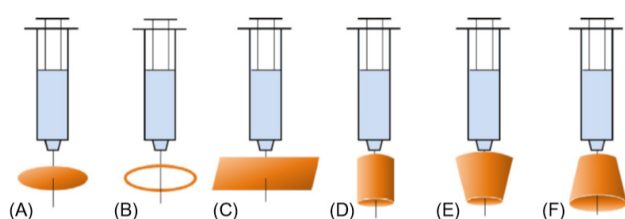
فاصله الکتروریسی (سانتی متر)	۶			۱۲			۱۸		
	۱۲	۱۶	۲۰	۱۲	۱۶	۲۰	۱۲	۱۶	۲۰
ولتاژ اعمالی (کیلوولت)	۱۲	۱۶	۲۰	۱۲	۱۶	۲۰	۱۲	۱۶	۲۰
قطر دیسک (۲سانتی متر)	۴	۳/۵	۳/۲	۹	۷	۵/۵	۱۱/۵	۱۱/۵	۹
قطر دیسک (۴سانتی متر)	۲/۹	۲/۵	۲/۵	۵	۵/۵	۵/۵	۴/۵	۵	۶/۵
قطر دیسک (۶سانتی متر)	۲/۳	۲/۴	۱	۴	۳	۴	-	۴/۵	۶
قطر دیسک (۸سانتی متر)	۰/۵	۱/۱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

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

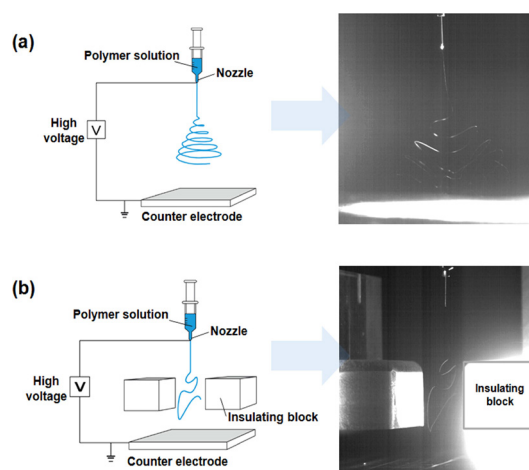
همچنین در تحقیق‌های دیگری با قراردادن الکترودهای مختلف با ولتاژهای متفاوت در مسیر حرکت جت، سعی بر کنترل مسیر و رسوب آن دارند که نمونه‌ای از آن‌ها استفاده از صفحه آلومینیومی مستطیل شکل با ولتاژ مشابه جت است که در فاصله ۵ سانتی متری از نوک افشانک قرار گرفته، باعث منحرف شدن جت سیال و دور شدن آن از صفحه آلومینیومی می‌شود و طبق گزارش، تأثیر کمی بر کنترل رسوب جت دارد که در شکل (A) ۳۰ نشان داده شده است [۳۱]. به همین دلیل برای تأثیرگذاری بیشتر بر کنترل مسیر جت مطابق شکل (B) ۳۰ از دو صفحه با ولتاژ مشابه جت در دو طرف مسیر حرکت جت و افشانک استفاده کردند که رسوب جت در این حالت عمدتاً در محدوده بین

حاصل نشان داده است که با استفاده از الکترودها 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 [۳۰-۳۱-۳۲]. همچنین شکل الکترودها پایه نیز بر فرایند الکتروریسی تأثیرگذار است. چنانچه الکترودها پایه دیسکی باشد باعث هدایت بهتر و کاهش منطقه رسوب می‌شود [۳۰، ۳۱ و ۳۳].

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



شکل ۲۹ اشکال مختلف الکترودها پایه: (A) دیسکی شکل [۳۰-۳۱-۳۳]، (B) حلقه‌ای شکل [۳۰-۳۴]، (C) صفحه‌ای شکل [۳۵-۳۸]، (D) استوانه‌ای شکل [۳۶-۳۷] و (E, F) مخروطی شکل [۳۶-۳۷].

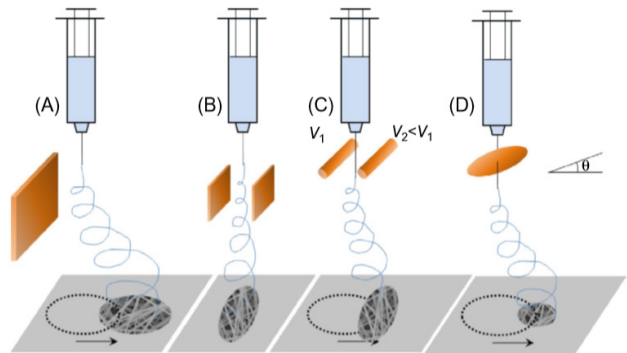


شکل ۲۸ طرح‌واره و تصویری از نحوه چینی الکتروریسی پایه و الکتروریسی با هدایت میدان الکتریکی توسط قطعه‌های عایق [۲۹].

روی جمع کننده تأثیر دارد که در شکل (D) نشان داده شده است [۳۱-۴۲].

۴ نتیجه گیری

با مرور پژوهش های انجام شده درباره تأثیر عوامل خارجی بر ریزساختار الیاف در حین فرایند الکترورسی مشخص شد که با استفاده از میدان مغناطیسی و تغییر شدت آن می توان فرایند الکترورسی کنترل شده تری انجام داد و همچنین می توان آرایش یافتگی و قطر الیاف تولیدی توسط این فرایند را کنترل کرد؛ همچنین، با بررسی تحقیقاتی که در آن اثر الکتروود پایه بر فرایند الکترورسی را مورد بررسی قرار دادند نتیجه گرفته شد که در صورت استفاده از الکتروود پایه، میدان یکنواخت تری ایجاد می شود و جت الکترورسی پایدارتری تولید می شود که به همین دلیل می توان نحوه رسوب نانوالیاف را بر روی بستر جمع کننده کنترل کرد. همچنین از دیگر نتایج بدست آمده از این تحقیقات می توان به این مورد اشاره کرد که در صورت استفاده از الکتروود 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) [۳۱-۴۲-۴۱] و (C D) کنترل و جابه جایی مسیر حرکت جت و منطقه رسوب نانوالیاف [۳۱-۴۲].

دو صفحه محدود شده است [۳۱، ۴۰ و ۴۱]. همین طور می توان با تغییر اندازه میدان و فاصله صفحات یا پتانسیل آن ها نحوه رسوب نانو الیاف را کنترل کرد [۴۱-۴۲]. در نمونه مشابه دیگری با استفاده از دو جفت الکتروود با پتانسیل های مختلف، شکل منطقه رسوب به صورت خطی درآمده، بیضی شکل می شود و به سمت الکتروود پتانسیل بیشتر کشیده می شود. همچنین زاویه قرارگیری الکتروود 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 Shokrolahi-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 Fe₃O₄ Nanoparticles on Magnetic Electrospun Nanofibers, *J. Textile Institute.*, 106, 503-509, **2015**.
۱۲. م. جمشیدیان، پ. پیوندی، م. هادی زاده، م. لطیفی، اولین کنفرانس ملی علوم و فناوری نانو، طراحی روشی نوین جهت کنترل فرایند الکترونانوریسی با استفاده از میدان مغناطیسی خارجی، کنفرانس ملی علوم و فناوری نانو، یزد، ۱۳۸۹.
۱۳. م. خواص، پ. پیوندی، م.ع. توانایی، یازدهمین کنفرانس ملی نساجی، بررسی تأثیر میدان مغناطیسی بر ریزساختار نانو الیاف در فرایند الکترونوریسی، کنفرانس ملی نساجی، گیلان، ۱۳۹۷.
۱۴. م. خواص، «بررسی تأثیر میدان مغناطیسی بر ریزساختار نانو الیاف در فرایند الکترونوریسی»، کارشناسی ارشد، دانشگاه یزد، ۱۳۹۷.
15. Liu H.Y., Xu L., Tang X.P., and Sun Z. Q., Effect of Fe₃O₄ 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., Atkinson J. E., Bronstein L. M., and Sponatak 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 Fe₃O₄ 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., Yarin A.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. Badiyan, 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 Chae H., 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., Brenner M. 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., Fontecha 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 Electrospun Fiber Using Electric Field Manipulation, *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 9, 155-163, **2014**.

