

بررسی و مدل سازی تأثیر شکل میدان مغناطیسی بر فرآیند الکتروریسی

Investigating and modeling the effect of magnetic field shape on electrospinning process

محمد رضا فلاح زاده^۱، پدram پیوندی^{۱*}، محمد علی توانایی^۲

۱- یزد، دانشگاه یزد، مجتمع فنی و مهندسی، دانشکده مهندسی نساجی، صندوق پستی ۷۴۱ - ۸۹۱۹۵

۲- تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی نساجی، صندوق پستی ۴۴۱۳ - ۱۵۸۷۵

چکیده

میدان مغناطیسی، منجر به جهت گیری ذرات متحرک باردار می شود. بر این اساس جهت کنترل مسیر حرکت الیاف در فرآیند الکتروریسی می توان از میدان مغناطیسی به عنوان یک المان خارجی استفاده کرد. در این مطالعه جهت هدایت و کنترل ناپایداری در سیستم الکتروریسی، از تجهیزات مغناطیسی شامل یک فریم نگه دارنده و چند آهنربا استفاده گردید. افزودن تجهیزات مغناطیسی موجب تغییر در مسیر حرکت و مساحت نشست الیاف بر صفحه جمع کننده می شود. نتایج حاصل از مدل سازی عددی میدان های الکتریکی و مغناطیسی و مشاهدات تجربی نشان داد که تجهیزات میدان مغناطیسی علاوه بر ایجاد میدان مغناطیسی و تأثیر بر بارهای حمل شده بر روی جت، بر میدان الکتریکی هم مؤثر هستند. استفاده از تجهیزات مغناطیسی موجب افزایش ۲۰ درصدی شدت میدان الکتریکی در نوک سوزن، انحراف و افزایش ۱۰ درصدی میدان الکتریکی به سمت لبه های تجهیزات و یکنواختی میدان در محدوده تجهیزات مغناطیسی است. تغییرات میدان الکتریکی موجب افزایش انرژی اعمالی به الیاف و در نتیجه کاهش ۸۰ درصدی مساحت وب نانوالیاف می شود. بالاترین تغییر شکل و مساحت وب نانوالیاف با استفاده از یک جفت آهنربا که به صورت قرینه نصب شده اند به دست آمد.

۱- مقدمه

پایه شامل یک نازل متصل به منبع الکتریکی و لنتا؛ بالا که محلول پلیمری یا مذاب را با سرعت ثابت تغذیه می کند و در مقابل آن جمع کننده رسانا در فاصله ای خاص از نازل متصل شده به قطب دیگر الکتریکی منبع تغذیه یا به زمین است. در فرآیند الکتروریسی، جت تحت تأثیر ناپایداری های شلاقی^۱ قرار می گیرد، که تجمع هدفمند و ترجیحی نانوالیاف را دشوار می کند. استفاده از ساختارهای تصادفی نانو و بدون محور، توسط محققان در کاربردهای مختلف مانند قاب های تصفیه میکرونی هوای وسایل نقلیه [۷]، سنسورها [۸] و غشاهای پزشکی جهت ترمیم زخم [۹] معرفی شده است. علیرغم کاربردهای مختلف اشاره شده برای غشاهای نانولیفی تصادفی، تغییر ساختارهای نانولیفی می تواند کاربردهای بالقوه و

در چند دهه گذشته، دستیابی به مواد در مقیاس نانو موجب تحولات شگرف در علوم مختلف شده است [۱]. از جمله کاربردهای نانوفناوری، نانوالیاف، نانو ذرات، نانولوله ها و نانوسیم ها در زیست پزشکی، انرژی، الکترونیک و تصفیه و محافظت محیط زیست است [۱]. در میان روش های تولید نانوالیاف روش الکتروریسی به علت تولید مداوم، سادگی عمل و سازگاری با مواد متفاوت به عنوان وسیع ترین و قدرتمندترین روش برای تشکیل لایه های نانولیفی استفاده می شود [۲-۴]. مهم ترین چالش در فرآیند الکتروریسی، دستیابی به یک لایه نانولیفی یکنواخت است. جت الکتروریسی در طول فرایند، رفتارهای مختلفی را نشان می دهد [۵-۶]. الکتروریسی

کلمات کلیدی

الکتروریسی،
میدان الکتریکی،
میدان مغناطیسی،
کنترل و مهندسی نانوالیاف

1. Whipping instability

* مسئول مکاتبات، پیام نگار: peivandi@yazd.ac.ir

شدن الیاف در مسیر الکتروروسی می شود. در بررسی تجربی صورت گرفته، در حضور میدان مغناطیسی، کاهش قطر و تغییر توزیع قطر الیاف به سمت نمودار نرمال مشاهده شده است. بادیان و جانملکی [۲۴] مدل را برای ذرات باردار و اتصالات ویسکوالاستیک در نظر گرفته اند. در رابطه اولیه فرض شده مجموعه نیروهای الکترواستاتیکی، نیروی میدان الکتریکی و مغناطیسی بر بارها، نیروی ویسکوزی و کشش سطحی منجر به انرژی جنبشی می شود. سپس با توجه به مدل به دست آمده رفتار مولکولی جت به روش رانگ-کوتا^۱ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. این مدل اثر تغییر در میدان مغناطیسی بر رفتار جت و شعاع ناپایداری را بررسی می کند. هانگ^۲ و همکاران [۲۵] مدلی برای الکتروروسی بدون نازل با پارامترهای میدان مغناطیسی و الکتریکی ارائه دادند. برای مدل سازی میدان الکتریکی و مغناطیسی و تأثیر بر آیند میدان ها از روش المان محدود استفاده شده است.

در مطالعات تجربی میدان مغناطیسی در محل های مختلف و به شکل های متفاوت اعمال شده است. یکی از محبوب ترین آزمایش ها، استفاده از دو آهنربا در ناحیه جمع کننده با فاصله هوایی است. دو تحقیق مشابه توسط یانگ^۳ و همکاران [۲۶] و لئو و همکاران [۲۷] انجام شده است با این تفاوت که تحقیق یانگ و همکاران با استفاده از آهنربای فریت صورت گرفته که عایق الکتریکی است و اثرات جانبی آهنربا بر میدان الکتریکی را به حداقل می رساند.

بر اساس مطالعه راسکوف و همکاران [۲۸] میدان مغناطیسی حاصل از آهنربای الکتریکی نعلی شکل، موجب آرایش و قرارگیری نانو ذرات مغناطیسی اکسید آهن در مرکز نانوالیاف شده است. یافته های لئو و همکاران [۲۹] کاهش قطر و افزایش درجه کریستالیت نانوالیاف را با افزایش میدان مغناطیسی آهنربای الکتریکی نعلی نشان می دهد. بر اساس تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) به دست آمده حاصل از مطالعه سانچز^۴ و همکاران [۳۰]، حضور میدان مغناطیسی حاصل از سیم پیچ هلمهولتز^{۱۰} موجب کاهش ابعاد و افزایش نظم در قرارگیری نانو ذرات آهن بر سطح نانوالیاف شده است. در مقاله حاضر تأثیر میدان مغناطیسی بر الیاف در حال الکتروروسی و اثرات جانبی تجهیزات مغناطیسی بر میدان الکتریکی بررسی می شود. جهت انجام آزمایش ها از آهنرباهای نئودیم نصب شده به صورت کمر بند بر ناحیه ریسندگی الیاف استفاده شده است. صفحه جمع کننده الیاف به عنوان تصویر حرکت جت و تغییر مسیر حرکتی آن در نظر گرفته شده و با استفاده از مدل های عددی تغییرات مشاهده شده توصیف می شود.

جدیدی را به ارمغان آورد. برای مثال در مهندسی بافت با طراحی هندسه قرارگیری و آرایش نانوالیاف، انتقال مواد مغذی به داخل و خروج مواد زائد از میکروبیوراکتورها تسهیل می شود [۱۰].

جهت اصلاح ساختار الکتروروسی و دستیابی به ساختارهای هدفمند، از روش های متفاوتی استفاده می شود. افزودنی ها [۱۱-۱۳]، اصلاح رشته ساز [۱۴]، تغییر شکل میدان الکتریکی با افزودن المان های اضافه [۱۵-۱۷] و در نهایت تغییر مجموعه جمع کننده [۱۸-۱۹] روش هایی است که تا به حال برای اصلاح الکتروروسی مورد استفاده قرار گرفته است. بر اساس قوانین الکترومغناطیس، نیروی لورنتس^۲ توسط میدان مغناطیسی به ذره باردار متحرک وارد می شود. نیروی لورنتس حاصل ضرب برداری میدان مغناطیسی و سرعت ذره باردار تعریف می شود. بر این اساس تحقیقاتی جهت کنترل مسیر حرکت الیاف در فرآیند الکتروروسی توسط میدان مغناطیسی صورت گرفته است. وو^۳ و همکاران [۲۰] برای اولین بار استفاده از میدان مغناطیسی جهت کنترل ناپایداری در فرآیند الکتروروسی را پیشنهاد دادند. در مدل اولیه ارائه شده میدان مغناطیسی هم جهت با میدان الکتریکی الکتروروسی فرض شده است. در این مدل حرکت جت الکتروروسی به صورت یک مارپیچ مخروطی فرض شده که جریان ثابت الکترونی از آن عبور می کند؛ در نتیجه با اعمال میدان مغناطیسی نیرویی مرکزگرا به جت الکتروروسی وارد می شود. در مدل ارائه شده توسط ژو و همکاران [۲۱] مجموعه کاملی از نیروهای وارد بر سیستم الکتروروسی مورد بررسی قرار گرفته است. نیروی ارتعاشی اعمال شده به محلول توسط پمپ، نیروی میدان الکتریکی الکتروروسی، میدان الکتریکی خارجی، میدان مغناطیسی خارجی و تغییرات انرژی حرارتی و کشش هوا به صورت همزمان بررسی شده است. در این مدل الکتروروسی یک سیستم باز فرض شده است بنابراین مجموعه نیروهای ارتعاشی، میدان های الکتریکی و مغناطیسی به انرژی های تلف شده کشش هوا و حرارتی تبدیل می شود. فرض ژو^۴ و همکاران [۲۲] برای مدل سازی جریان جت سیال به عنوان یک سیستم متشکل از ذرات باردار و عناصر ویسکوالاستیک (فتر-پیستون) در نظر گرفته شده است. در این مدل همانند مدل قبل اثر چند پارامتر بررسی شده است اما تأثیرات متقابل میدان الکتریکی، میدان مغناطیسی و تغییرات حرارتی را در نظر نمی گیرد. نیروی الکترواستاتیک (وارد شده از طرف یک بار بر بار دیگر)؛ نیروی میدان های الکتریکی و مغناطیسی (نیروی میدان مغناطیسی بر بار نقطه ای) نیروی ویسکوالاستیک و کشش سطحی مورد بررسی قرار گرفته است. مدل فتر-پیستون-بار و آزمایش ها نشان می دهد که با افزایش جریان تحریک (افزایش میدان مغناطیسی) شعاع جت کاهش می یابد. به طور مشابه، کاهش قطر جت با افزایش جریان تحریک مشاهده شده است.

در تحلیل لئو^۵ و همکاران [۲۳] نیروهای وارد بر یک حلقه جت سیال در محدوده ریسندگی موجب اعمال دو نیرو در جهت های متفاوت و ایجاد گشتاور می شود. بر اساس این تحلیل، گشتاور ایجاد شده توسط میدان مغناطیسی خارجی، موجب نزدیک شدن حلقه ها به مرکز و کاهش قطر دایره گردابی جت در حال حرکت به سمت جمع کننده شده است. کاهش قطر دایره گردابی سبب اتلاف انرژی کمتر و افزایش انرژی جنبشی جت شده و افزایش انرژی جنبشی سبب افزایش سرعت حرکت جت و صاف

1. Microbioreactor

2. Lorentz force

3. Wu

4. Xu

5. Liu

6. Rung-kutta

7. Huang

8. Yang

9. Sanchez

10. Helmholtz coil

جدول ۱: مواد و وسایل مورد استفاده

مشخصه سیستم	مقادیر	مشخصات مواد تجهیزات مربوطه
محلول	۷ درصد وزنی	پلی وینیل الکل با وزن ملکولی ۷۸۰۰۰ گرم بر مول و آب مقطر تهیه شده به روش تقطیر
نازل	سوزن با گیج ۱۸	
صفحه جمع کننده	قطر ۲۰ سانتیمتر	مس به ضخامت ۲ میلی متر
ولتاژ اعمالی	۱۸ کیلوولت	مدل HV35P O.C
نرخ تغذیه	۰/۲ میلی لیتر بر ساعت	SP110
آهنربا	ابعاد 5X10X50 میلی متر	نئودیموم از گرید ۴۲ (۱۳۰۰ میلی تسلا)
تصویربرداری	۱۲۰۰ dpi	HP Deskjet 3050

۲- تجربیات

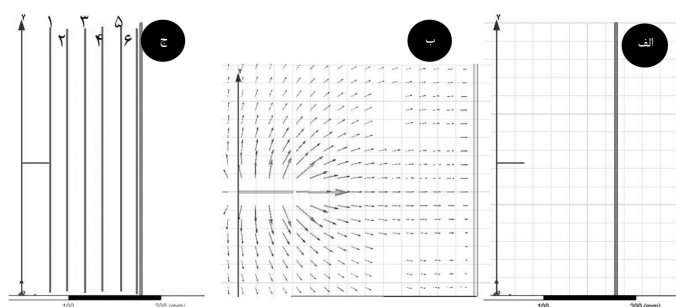
۲-۱- مواد و وسایل

در جدول ۱ مواد و وسایل مورد استفاده آورده شده است.

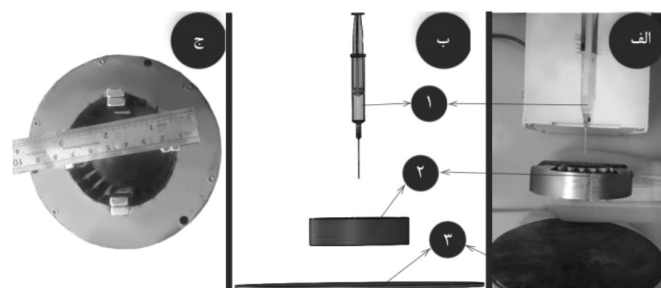
۲-۲- روش آزمایش

در شکل ۱ چینش سیستم الکتروریسی مورد استفاده در حضور مجموعه آهنربا نشان داده شده است. فاصله نوک سوزن تا صفحه جمع کننده ۱۰ سانتیمتر و تجهیزات مغناطیسی در حد واسط سوزن تا صفحه جمع کننده قرار گرفته است.

در دو حالت نخست، میدان مغناطیسی به مجموعه اضافه نشده است به گونه ای که در حالت اول، نمونه در الکتروریسی با چینش متداول و بدون هیچ گونه تجهیزات اضافی و در حالت دوم، تنها اثر قاب آهنی نگه دارنده آهنرباها آزمایش شده است. شکل های متفاوت میدان مغناطیسی توسط چینش متفاوت آهنرباها به وجود می آید. جدول ۲ آزمایش های انجام شده را نشان می دهد.



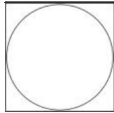
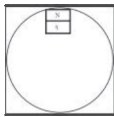
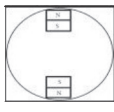
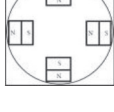
شکل ۲: مدل سازی میدان الکتریکی در الکتروریسی؛ الف: طراحی دوبعدی از یک سیستم الکتروریسی متداول؛ ب: نمایش خطوط میدان الکتریکی؛ ج: افزودن خطوط فرضی برای استخراج عددی میدان مدل شده



شکل ۱: چینش الکتروریسی؛ الف: تصویری از چینش سیستم الکتروریسی؛ ب: طرح چینش الکتروریسی (بخش ۱: مجموعه تغذیه، بخش ۲: مجموعه مغناطیسی، بخش ۳: صفحه جمع کننده)؛ ج: تصویر مقطعی از مجموعه مغناطیسی با حضور ۴ جفت آهنربای نئودیموم

1. Maxwell 16.0
2. Electrostatic
3. Magnetostatic

جدول ۲: طراحی آزمایش ها

کد آزمایش	قاب نگه دارنده آهنرباها	تعداد آهنربا	طرحواره تجهیزات میدان مغناطیسی
B0	×	۰	
B1	✓	۰	
M1Sup	✓	۱	
M2SS	✓	۲	
M2SN	✓	۲	
M3S	✓	۳	
M4NS	✓	۴	
M4S	✓	۴	

الف و ب طراحی مدل میدان مغناطیسی آهنربا در دو دید جانبی و روبه رو را نشان می دهد. نصب آهنربا بر روی قاب فلزی و هادی میدان مغناطیسی موجب تغییراتی در شکل و قدرت میدان در فواصل هوایی می شود؛ بنابراین مدل میدان برای آهنربا در حضور قاب نگه دارنده آن بررسی شد.

شکل ۳-ج و شکل ۳-د مدل میدان مغناطیسی را برای آزمایش M1S در دو نمای جانبی و روبه رو نشان می دهد. شار مغناطیسی وارد شده به نرم افزار مدل سازی، با استفاده از آزمایش تجربی تعیین و سپس با مقایسه نتایج حاصل از مدل و نتایج حاصل از سنجش تجربی، صحت مدل میدان مغناطیسی سنجیده و تأیید شد.

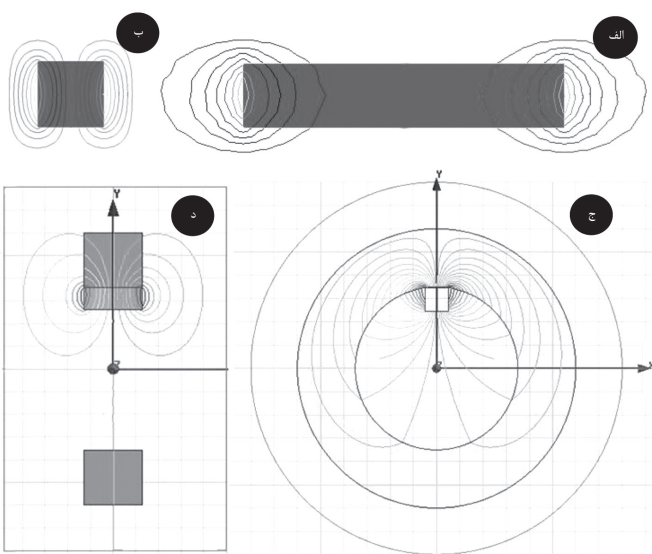
۲-۴- پردازش تصاویر و استخراج اطلاعات

تصاویر اسکن شده به دست آمده از صفحه جمع کننده توسط نرم افزار متلب نسخه ۲۰۱۸ پردازش شد. در شکل ۴ روندنمای^۱ مراحل و شکل ۵ تصاویر استخراج شده از پردازش تصویر آزمایش B1 آورده شده است.

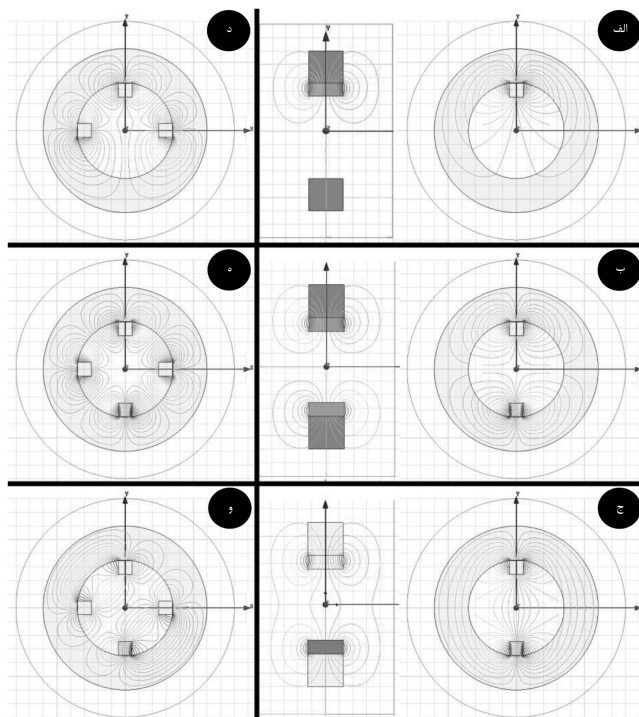
۳- نتایج و بحث

در این مقاله با هدف کنترل جریان ناپایدار در سیستم الکترونیسی از میدان مغناطیسی در مسیر جریان الیاف استفاده گردید. شکل های متفاوت میدان مغناطیسی با تغییر تعداد آهنربا و جهت آن ها (N-S) ایجاد شد. بر اساس مشاهدات، شکل میدان مغناطیسی بر مسیر حرکت الیاف و نشست الیاف بر سطح جمع کننده مؤثر است. از مدل های عددی میدان الکتریکی جهت تحلیل اثر تجهیزات مغناطیسی بر حرکت جت باردار و مدل های عددی میدان مغناطیسی به منظور تحلیل نیروهای وارد بر ذره باردار استفاده شده است. شکل ۶ تصویر خروجی از مدل سازی میدان مغناطیسی در حالت های متفاوت را نشان می دهد.

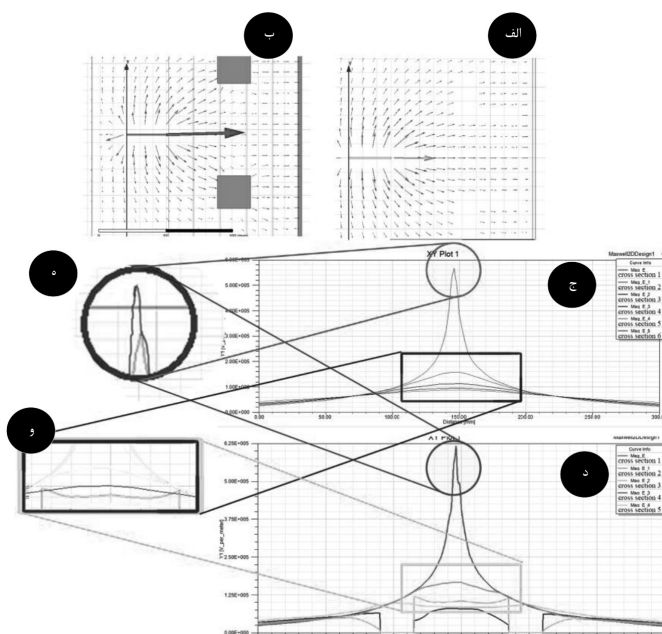
شکل ۷ نتایج حاصل از مدل عددی میدان الکتریکی در سیستم الکترونیسی ارائه می دهد. در شکل های ۷-الف و ۷-ب مدل سازی میدان الکتریکی به صورت بردار نشان داده شده است. همان گونه که در شکل ۷-ب مشاهده می شود با افزودن المان های میدان مغناطیسی، خطوط میدان الکتریکی تحت تأثیر قرار گرفته و به سمت المان های خارجی متمایل می شوند. نتایج عددی استخراج شده از سطوح متفاوت الکترونیسی متداول و در حضور تجهیزات مغناطیسی در بخش های ج



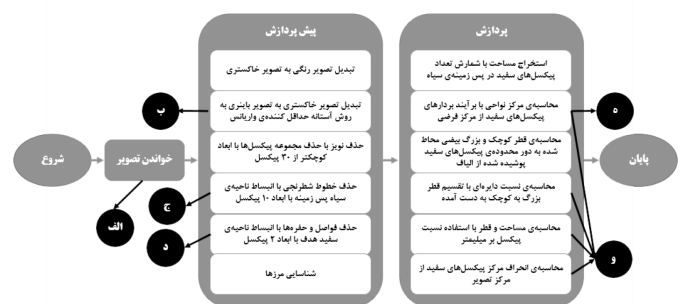
شکل ۳: مدل سازی میدان مغناطیسی؛ الف: میدان مغناطیسی آهنربای آزاد در نمای جانبی؛ ب: میدان مغناطیسی آهنربای آزاد در نمای روبه رو؛ ج: مدل میدان مغناطیسی آهنربای نصب شده بر قاب فلزی



شکل ۶: مدل میدان مغناطیسی برای آزمایش‌های الف: M1S، ب: M2S، ج: M2NS، د: M3S، ه: M4S، و: M4NS



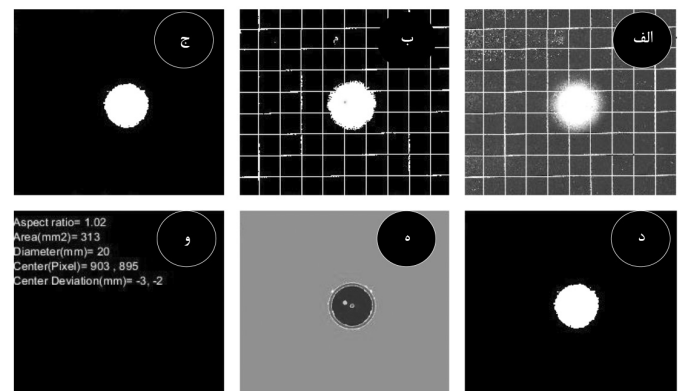
شکل ۷: مدل سازی عدی میدان الکتریکی الکترونیسی مورد استفاده؛ الف نمایش میدان الکتریکی در یک الکترونیسی متداول؛ ب: نمایش میدان الکتریکی سیستم الکترونیسی در حضور تجهیزات مغناطیسی؛ ج: نمودار میدان الکتریکی مقاطع فرضی برای یک الکترونیسی متداول؛ د: نمودار میدان الکتریکی مقاطع فرضی برای الکترونیسی با تجهیزات مغناطیسی؛ ه: انطباق میدان الکتریکی در نوک سوزن در دو سیستم الکترونیسی پایه و در حضور تجهیزات مغناطیسی؛ و: انطباق میدان الکتریکی در فاصله ۴ سانتیمتری از نوک سوزن و مقطع اولیه تجهیزات میدان مغناطیسی به عنوان مقطع بحرانی در دو سیستم الکترونیسی پایه و در حضور تجهیزات مغناطیسی



شکل ۴: روندنمای فرایند پردازش تصویر و نتایج خروجی

و د شکل ۷ نشان داده شده است. جهت مقایسه و شفاف سازی تأثیر تجهیزات بر میدان الکتریکی در دو سطح اول (نوک سوزن) و سطح سوم (به فاصله ۴ سانتیمتر از نوک سوزن که مقطع ابتدایی تجهیزات است)، بزرگنمایی و انطباق‌هایی به شکل‌های ۷-ه و ۷-و انجام شده است. بر اساس نتایج مدل و انطباق نمودارها در شکل ۷-ه، تجهیزات مغناطیسی موجب افزایش ۲۰ درصدی میدان الکتریکی در نوک سوزن می‌گردد. در شکل ۷-و ایجاد نقاط بحرانی در لبه‌های داخلی تجهیزات میدان مغناطیسی مشاهده می‌شود. انحراف ۱۰ درصدی میدان الکتریکی و تمایل جهت میدان (قابل مشاهده از شکل ۷-ب) امکان کشش الیاف به سمت نقاط بحرانی و لبه‌های داخلی تجهیزات فراهم می‌آورد که با افزایش میدان الکتریکی یا کاهش قطر تجهیزات، این انحراف افزایش می‌یابد. در داخل تجهیزات مغناطیسی، میدان الکتریکی تقریباً یکنواخت است. در حدفاصل تجهیزات مغناطیسی تا جمع‌کننده، میدان الکتریکی همانند بخش ابتدایی تجهیزات مغناطیسی و با شدت تغییرات کمتر، دارای نواحی بحرانی حاشیه‌ای است.

در آزمایش‌های تجربی، استفاده از ۴ آهنربا (M4S و M4NS) از عبور الیاف جلوگیری نموده و پلیمر خارج شده از نوک سوزن به صورت قطره از آن چکیده و یا بر تجهیزات نشست می‌کند. محدوده نشست الیاف بر سطح جمع‌کننده برای این آزمایش‌ها به حدی محدود است که طی فرایند پردازش تصویر به عنوان نویز شناخته شده و حذف می‌گردد. در شکل ۸-الف و ۸-ب به ترتیب صفحه جمع‌کننده آزمایش‌های M4S

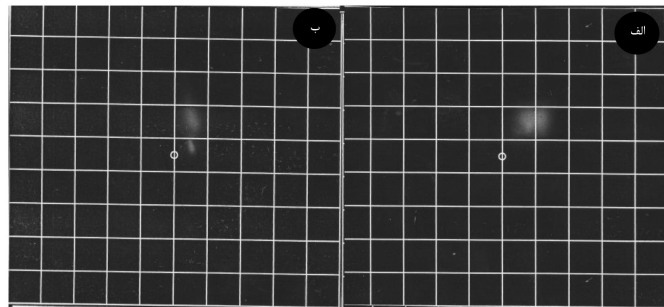


شکل ۸: مراحل انجام پردازش تصویر و استخراج اطلاعات؛ الف: تصویر اولیه ورودی، ب: تصویر باینری، ج: حذف شبکه شطرنجی، د: حذف نویزهای تصویر، ه: استخراج اطلاعات و رسم دایره متناظر با تصویر، و: نمایش اطلاعات استخراج شده

تشکیل الیاف تغییر فرم یافته و یک فرورفتگی در بالا تشکیل می شود. در آزمایش M2S الیاف در محدوده خنثی میان دو حوزه میدان مغناطیسی قطب های همنام آهنرباها عبور می کنند. برای حالت M2NS، پیوستگی حوزه های میدان مغناطیسی در مرکز تجهیزات به وجود می آید و در نتیجه الیاف به طرفین حرکت کرده و در مرکز نقطه کم ضخامت ایجاد می شود. در حالت M3S الیاف در سمت پایین و بخش بدون آهنربا تشکیل می شود. در حالت های ۴ قطبی میدان مغناطیسی به شدت قوی شده که از عبور الیاف جلوگیری می کند.

شکل ۱۰ میدان مغناطیسی ایجاد شده توسط یک آهنربا را به صورت دقیق تر در دو مقطع نشان می دهد. مقطع اول (A) به موازات جهت حرکت الیاف و مقطع دوم (B) عمود بر جهت حرکت الیاف در نظر گرفته شده است. علت انتخاب این مقاطع تفاوت در جهت میدان های ایجاد شده توسط آهنربا نسبت به حرکت الیاف و تأثیرات متفاوت ایجاد کننده بر الیاف در حال حرکت است. در شکل ۱۱-الف نیروی وارد بر الیاف در حال حرکت با سرعت «V»، تحت میدان مغناطیسی بخش ابتدایی و در مقطع A نشان داده شده است. در مقطع B، جهت حرکت الیاف به صورت عمود بر صفحه بوده و نیروهای وارد بر جت در شکل ۱۱-ب نشان داده شده است. مسیر حرکتی قابل تصور برای یک صفحه نازک شبیه سازی شده در شکل ۱۱-ج (تصویر سه بعدی) و شکل ۱۱-د (نمای بالا) نشان داده شده است.

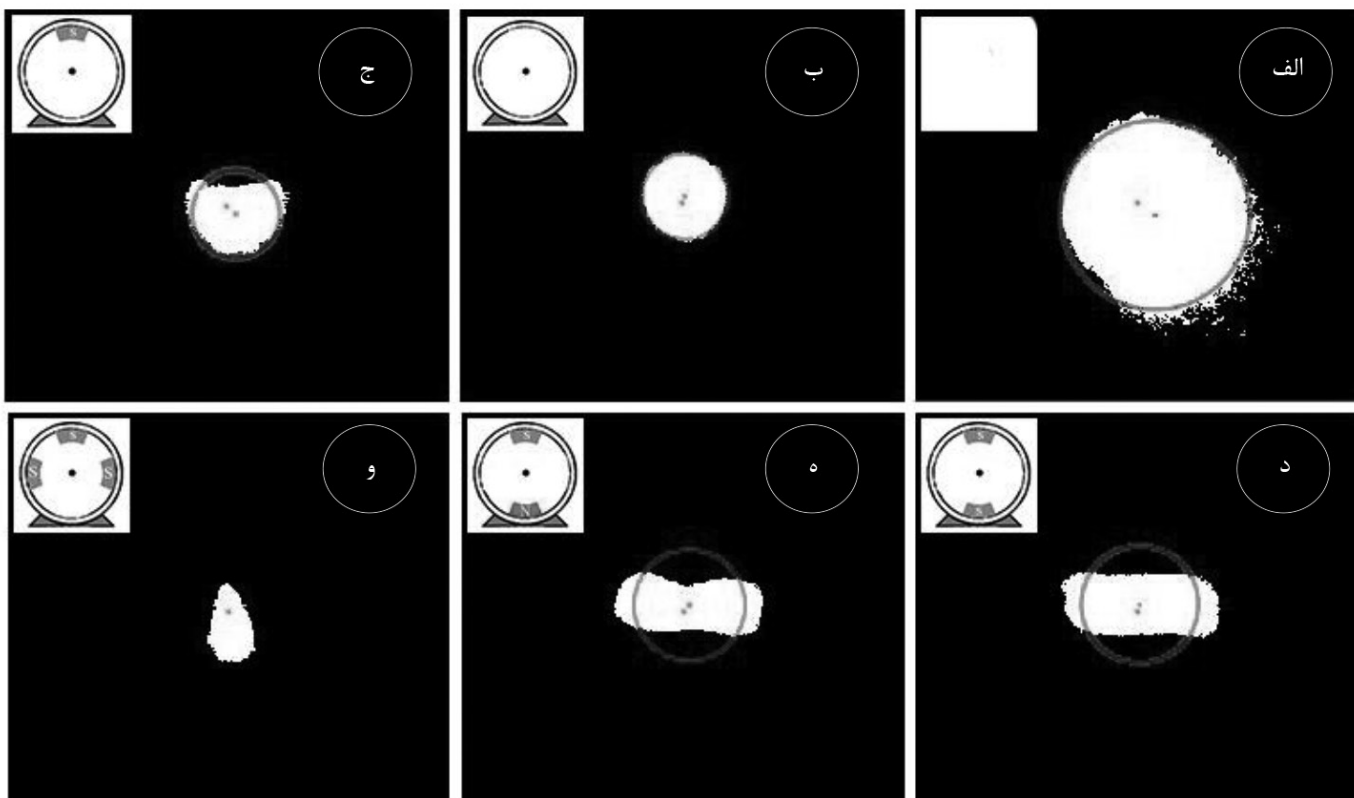
بر اساس اطلاعات نشان داده شده در شکل ۱۱-د، الیاف در تمامی نواحی میدان مغناطیسی تحت نیروهای جانبی قرار گرفته و به طرفین هدایت



شکل ۸: تصویر صفحه جمع کننده برای آزمایش های الف: M4SS و ب: M4NS

و M4NS نشان داده شده است. در شکل ۹ تصاویر استخراج شده سایر آزمایش ها پس از پیش پردازش، نشان داده شده است. در جدول ۳ نتایج آزمایش ها به صورت عددی ارائه شده است.

همان گونه که در مدل سازی میدان الکتریکی اشاره شد، تجهیزات مغناطیسی موجب افزایش ۲۰ درصدی میدان الکتریکی در نوک سوزن می شود که در نتیجه بار روی جت و نیروی اعمالی بر آن افزایش می یابد. در صورت ثبات شرایط الکتروریسی افزایش کشش الیاف، موجب کاهش شعاع تجمع الیاف بر سطح جمع کننده می شود. با مقایسه شکل های ۹ الف و ب و ردیف های اول و دوم جدول ۳ مربوط به آزمایش ها B0 و B1 کاهش قطر تجمع الیاف قابل مشاهده است. با افزودن آهنرباها محدودیت عبور جت الکتروریسی از محدوده میدان مغناطیسی به وضوح مشخص است. برای مثال در شکل ۹-ج با یک حوزه میدان مغناطیسی ناحیه



شکل ۹: تصاویر استخراج شده حاصل از آزمایش ها: الف: B0؛ ب: B1؛ ج: M1S؛ د: M2SS؛ ه: M2SN؛ و: M3S

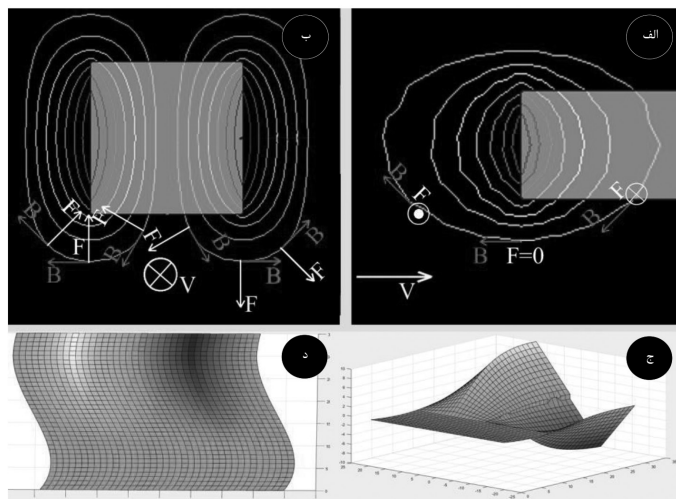
جدول ۳: نتایج عددی استخراج شده از پردازش تصویر

کد آزمایش	نسبت دایره‌ای بودن (بزرگ‌ترین به کوچک‌ترین قطر)	مساحت پر شده (میلی متر مربع)	قطر دایره تقریب شده (میلی متر)	اختلاف مرکز دایره تقریبی تا مرکز کاغذ (میلی متر)
B_0	۱/۱۲	۱۳۵۸	۴۲	(۴ و ۳)
B_1	۱/۰۴	۲۷۹	۱۹	(۱ و ۱)
M1S	۱/۳۸	۲۷۲	۱۹	(۲ و ۲)
M2SS	۲/۵۳	۴۱۶	۲۶	(۱ و ۲)
M2SN	۲/۸	۳۴۸	۲۵	(۱ و ۱)
M3S	۱/۷۸	۱۲۷	۱۳	(۱ و ۳)
M4NS	≈ ۲	≈ ۵۰	≈ ۵	$\approx (۵ و ۱۰)$
M4S	≈ ۱	≈ ۱۰۰	≈ ۱۰	$\approx (۱۰ و ۱۰)$

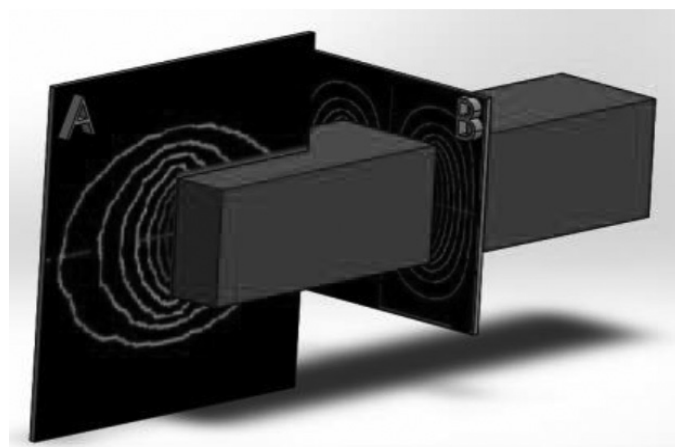
میدان، موجب اعمال نیروی برآیند به الیاف شده که از ورود الیاف به نواحی حوزه‌های میدان مغناطیسی جلوگیری می‌کند. اثر این شکل از میدان و حضور نواحی خنثی در شکل ۹-د و ۹-و برای آزمایش‌ها M2S و M3S قابل مشاهده است. برای آزمایش M2S که آزادی حرکت برای دو سمت تجهیزات وجود دارد هدایت الیاف به حاشیه‌ها و نواحی ضعیف‌تر میدان مشهود است. برای نمونه M3S که تنها ناحیه پایین تجهیزات فاقد حوزه میدان مغناطیسی است، فضای تشکیل الیاف به صورت قطره‌ای و محدود به بخش پایینی تجهیزات می‌شود. در آزمایش با قطب‌های غیر همنام، میدان‌های مغناطیسی به یکدیگر متصل شده و نواحی خنثی وجود ندارد؛

میدان مغناطیسی موجب هدایت الیاف به طرفین شده و تصویری از محدوده میدان را به صورت فرورفتگی در قسمت بالایی محل تجمع الیاف نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۱-ج در بخش‌های میانی آهنربا، نیروهای خلاف جهت به صفحه الیاف وارد می‌شود که در صورت اثرگذاری چولگی در تقارن الیاف به وجود می‌آید. در شکل ۹-ج، اثر این دسته از نیروها قابل مشاهده نیست؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت بخش ابتدایی میدان مغناطیسی آهنربا موجب پراکنده‌سازی الیاف و ممانعت از ورود الیاف به بخش‌های میانی آهنربا و تأثیر نیروهای ثانویه می‌گردد.

در آزمایش‌های M2S، M3S و M4S به علت همنام بودن قطب‌ها، حوزه‌های میدان مغناطیسی در یکدیگر تداخل و ورود نمی‌کنند و همان‌طور که قبلاً اشاره شد محدوده‌های خنثی در میان حوزه‌های مغناطیسی وجود خواهد داشت؛ بنابراین بر اساس توضیح ارائه شده برای یک آهنربا، حضور چند



شکل ۱۱: نیروی وارد بر الیاف در حال حرکت، الف: نیروهای حاصل از میدان بر الیاف در مقطع A؛ ب: نیروهای حاصل از میدان بر الیاف در مقطع B؛ ج: تصویر صفحه فرضی الیاف تحت نیروهای مغناطیسی؛ د: نمای بالا از صفحه فرضی الیاف تحت نیروهای میدان مغناطیسی



شکل ۱۰: میدان مغناطیسی ایجاد شده توسط یک آهنربا

در مدل سازی های میدان الکتریکی است. در عمل، تمرکز میدان بر لبه ها و کاهش و یکنواختی میدان در محدوده تجهیزات مغناطیسی موجب تمایل نشست الیاف بر لبه های تجهیزات و آهنرباها می شود؛ بنابراین در صوتی که نسبت قطر داخلی تجهیزات به ضخامت تجهیزات مناسب در نظر گرفته نشود الیاف بر لبه ها نشست می کنند.

با استفاده از شکل خطوط میدان مغناطیسی حاصل از مدل سازی، تغییرات تجمع الیاف قابل توضیح است. بر اساس مدل سازی، مشاهدات و آنالیز تصاویر، حوزه های میدان مغناطیسی محدودیت های حرکتی برای الیاف در حال الکتروریسی ایجاد می کند. در حضور یک آهنربا، تجمع الیاف از حالت منظم و دایره ای تغییر شکل یافته و از جهت نفوذ میدان مغناطیسی به مسیر حرکت الیاف حالتی فرورفته به وجود می آید. در حضور دو آهنربا با قطب مخالف که به صورت قرینه نصب شده اند الیاف به محدوده میان آن ها کشیده می شود. استفاده از دو آهنربا با قطب های غیر همنام موجب اتصال حوزه های مغناطیسی شده و تجمع در مرکز را کاهش می دهد و شکل تجمع به حالت دمبلی تغییر می یابد. حضور سه آهنربا با قطب های همنام با چینش غیرمتمارن و با اختلاف زاویه ۹۰ درجه، الیاف را متراکم تر از دو حالت قبل کرده و شکل تجمع را به حالت قطره ای تغییر می دهد. استفاده از چهار آهنربا با قطب های هم نام و غیر همنام با چینش متمارن، از عبور الیاف جلوگیری نموده و تجمع الیاف بر صفحه جمع کننده را مختل می سازد؛ بنابراین با استفاده از تجهیزات مغناطیسی و در صورت تنظیم میدان هر یک از حوزه های مغناطیسی، می توان تجمع الیاف را کنترل نمود. در مجموع استفاده از دو آهنربا بالاترین تغییرات شکلی و بالاترین مساحت تجمع الیاف در حضور تجهیزات مغناطیسی را نشان داد.

مراجع

1. Afshari, M., Electrospun nanofibers. Woodhead Publishing, 2016.
2. Ciechanska, D., Multifunctional bacterial cellulose/chitosan composite materials for medical applications, *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, 12(4), 69-72, 2004.
3. Fang, J., Niu, H., Lin, T., Wang, X., Applications of electrospun nanofibers, *Chinese science bulletin*, 53(15), 2265-2286, 2008.
4. Wang, C., Cheng, Y.-W., Hsu, C.-H., Chien, H.-S., Tsou, S.-Y., How to manipulate the electrospinning jet with controlled properties to obtain uniform fibers with the smallest diameter?—a brief discussion of solution electrospinning process, *Journal of Polymer Research*, 18(1), 111-123, 2011.
5. Beachley, V., Wen, X., Polymer nanofibrous structures: Fabrication, biofunctionalization, and cell interactions, *Progress in polymer science*, 35(7), 868-892, 2010.

بنابراین در مرکز تجهیزات مغناطیسی هم حوزه های میدان وجود دارد. همان گونه که در شکل ۹-۵ مشهود است؛ اثر حضور میدان مغناطیسی در مرکز تجهیزات مغناطیسی موجب هدایت الیاف مرکزی شده و حالت دمبلی به ناحیه تشکیل الیاف می دهد. استفاده از چهار آهنربا، میدان های قوی تر و فشردگی بالاتری ایجاد کرده است به گونه ای که در دو آزمایش مربوطه عبور الیاف از مرز تجهیزات مغناطیسی کمتر شده و نشست الیاف بر سطح جمع کننده به شدت کاهش یافته است.

۴- نتایج

در این مطالعه اثر شکل میدان مغناطیسی حاصل از تعداد و برهمکنش آهنرباها بر حرکت آزادانه الیاف در فرآیند الکتروریسی بررسی شد. بر اساس مدل سازی های عددی انجام شده برای میدان های الکتریکی و مغناطیسی در نرم افزار ماکسول، حضور تجهیزات مغناطیسی موجب افزایش و تمرکز میدان الکتریکی بر نوک سوزن می شود. افزایش و تمرکز میدان الکتریکی بر نوک سوزن موجب کاهش ۸۰ درصدی مساحت نشست الیاف بر سطح جمع کننده شده است. کاهش قدرت میدان الکتریکی در محدوده قاب فلزی و تمرکز میدان الکتریکی بر لبه های تجهیزات نکات قابل توجه دیگر

6. Mazoochi, T., Hamadianian, M., Ahmadi, M., Jabbari, V., Investigation on the morphological characteristics of nanofibrous membrane as electrospun in the different processing parameters, *International Journal of Industrial Chemistry*, 3(1), 7-14, 2012.
7. Pawlowski, K., Belvin, H., Raney, D., Su, J., Harrison, J., Siochi, E., Electrospinning of a micro-air vehicle wing skin, *Polymer Engineering*, 44(4), 1309-1314, 2003.
8. Santos, J. P., Fernández, M. J., Fontecha, J. L., Matatagui, D., Sayago, I., Horrrillo, M. C., Gracia, I., Nanocrystalline tin oxide nanofibers deposited by a novel focused electrospinning method. Application to the detection of TATP precursors, *Sensors*, 14(12), 24231-24243, 2014.
9. Kim, G., Yoon, H., Lee, H., Park, G.-M., Koh, Y., Polycaprolactone ultrafine fiber membrane fabricated using a charge-reduced electrohydrodynamic process, *Macromolecular research*, 17(7), 533-537, 2009.
10. Barry, C., Chen, J., Mead, J., *Nanomanufacturing Handbook: Nanomanufacturing processes using polymeric materials*, CRC Press, 324-361, 2006.
11. Yarin, A. L., Koombhongse, S., Reneker, D. H., Bending in-

- stability in electrospinning of nanofibers, *Journal of applied physics*, 89(5), 3018-3026, 2001.
12. Yuan, H., Zhao, S., Tu, H., Li, B., Li, Q., Feng, B., Peng, H., Zhang, Y., Stable jet electrospinning for easy fabrication of aligned ultrafine fibers, *Journal of Materials Chemistry*, 22(37), 19634-19638, 2012.
 13. Zhou, Q., Bao, M., Yuan, H., Zhao, S., Dong, W., Zhang, Y., Implication of stable jet length in electrospinning for collecting well-aligned ultrafine PLLA fibers, *Polymer Engineering*, 54(25), 6867-6876, 2013.
 14. Wu, Y.-H., Li, H.-P., Shi, X.-X., Wan, J., Liu, Y.-F., Yu, D.-G., Effective utilization of the electrostatic repulsion for improved alignment of electrospun nanofibers, *Journal of Nanomaterials*, 2016, 8, 2016.
 15. Shin, Y., Hohman, M., Brenner, M., Rutledge, G., Experimental characterization of electrospinning: the electrically forced jet and instabilities, *Polymer Engineering*, 42(25), 09955-09967, 2001.
 16. Yousefzadeh, M., Latifi, M., Amani-Tehran, M., Teo, W.-E., Ramakrishna, S., A Note on the 3D Structural Design of Electrospun Nanofibers, *Journal of Engineered Fabrics*, 7(2), 2012.
 17. Hwang, W., Pang, C., Chae, H., Fabrication of aligned nanofibers by electric-field-controlled electrospinning: insulating-block method, *Nanotechnology*, 27(43), 9, 2016.
 18. Mi, S., Kong, B., Wu, Z., Sun, W., Xu, Y., Su, X., A novel electrospinning setup for the fabrication of thickness-controllable 3D scaffolds with an ordered nanofibrous structure, *Materials Letters*, 160, 343-346, 2015.
 19. Zernetsch, H., Repanas, A., Rittinghaus, T., Mueller, M., Alfred, I., Glasmacher, B., Electrospinning and mechanical properties of polymeric fibers using a novel gap-spinning collector, *Fibers Polymers*, 17(7), 1025-1032, 2016.
 20. Wu, Y., Yu, J. Y., He, J. H., Wan, Y. Q., Controlling stability of the electrospun fiber by magnetic field, *Chaos, Solitons and Fractals*, Article 32(1), 5-7, 2007.
 21. Xu, L., A mathematical model for electrospinning process under coupled field forces, *Chaos, Solitons and Fractals*, Article 42(3), 1463-1465, 2009.
 22. Xu, L., Wu, Y., Nawaz, Y., Numerical study of magnetic electrospinning processes, *Computers and Mathematics with Applications*, Article 61(8), 2116-2119, 2011.
 23. Liu, H.-Y., Xu, L., Si, N., Effect of magnetic intensity on diameter of charged jets in electrospinning, *Thermal Science*, 18(5), 1451-1454, 2014.
 24. Badieyan, S. S., Janmaleki, M., Nanofiber formation in the presence of an external magnetic field in electrospinning, *Journal of Polymer Engineering*, 35(6), 587-596, 2015.
 25. Huang, W., Liu, B., Chen, Z., Wang, H., Ren, L., Jiao, J., Zhuang, L., Luo, J., Jiang, L., Fabrication of magnetic nanofibers by needleless electrospinning from a self-assembling polymer ferrofluid cone array, *Nanomaterials*, 7(9), 12, 2017.
 26. Yang, D., Zhang, J., Zhang, J., Nie, J., Aligned electrospun nanofibers induced by magnetic field, *Journal of applied polymer science*, 110(6), 3368-3372, 2008.
 27. Liu, Y., Zhang, X., Xia, Y., Yang, H., Magnetic-field-assisted electrospinning of aligned straight and wavy polymeric nanofibers, *Advanced Materials*, 22(22), 2454-2457, 2010.
 28. Roskov, K. E., Atkinson, J. E., Bronstein, L. M., Spontak, R. J., Magnetic field-induced alignment of nanoparticles in electrospun microfibers, *RSC Advances*, 2(11), 4603-4607, 2012.
 29. Liu, H.-Y., Xu, L., Tang, X.-P., Sun, Z. Q., Effect of Fe₃O₄ nanoparticles on magnetic electrospun nanofibers, *The Journal of The Textile Institute*, 106(5), 503-509, 2015.
 30. Sanchez, J. A. G., Furlan, R., Valle, R. L., Valle, P., da Silva, A. N. R., Influence of a magnetic field in the electrospinning of nanofibers using solutions with PVDF, DMF, acetone and Fe₃O₄ nanoparticles, 28th Symposium on Microelectronics Technology and Devices, Curitiba-Brazil, IEEE, 1-3, 2013.

Investigating and modeling the effect of magnetic field shape on electrospinning process

Mohammad Reza Fallahzade¹, Pedram Payvandy^{1*}, Mohammad Ali Tavanaie²

1-Department of Textile Engineering, Yazd University, P.O. Box: 89195-741, Yazd, Iran

2-Department of Textile Engineering, Amirkabir University of Technology, P.O. Box: 15875-4413, Tehran, Iran

Abstract

The magnetic field changes the direction of the moving charged particles. Thus, the magnetic field can be used as an external force to control the movement direction of the polymer jet in the electrospinning process. In this study, a piece of magnetic equipment, including a frame with several magnets, was used to control the electrospun polymer jet stability. Numerical modeling of the electric and magnetic fields and experimental observations showed that the magnetic equipment creates the magnetic field and affects the movement direction of the charged jet, and the electric field. The use of magnetic equipment caused a 20% increase in the intensity of the electric field at the tip of the needle and a 10% increase in the electric field towards the edges of the equipment and evenness of the field within the magnetic equipment range. Changes in the electric field increase the energy applied to the fibers and thereby reduce the area of the nanofibrous web by 80%. The highest deformation and the most extensive area of the web area were obtained using a pair of magnets that were placed symmetrically along a common axis on both sides of the electrospinning needle.

Keywords

Electrospinning,
Electric field,
Magnetic field,
Control and engineer of
nanofibers

(*) Address Correspondence to P. Payvandy, E-mail: peivandi@yazd.ac.ir