



دانشگاه یزد

دانشکده فنی مهندسی

گروه مهندسی نساجی

پایان نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

مهندسی تکنولوژی نساجی

بررسی کنترل فرآیند الکتروریسی با استفاده از میدان مغناطیسی

استادان راهنما: دکتر پدرام پیوندی - دکتر محسن هادیزاده

استاد مشاور: دکتر مسعود لطیفی

پژوهش و نگارش: مریم جمشیدیان

اسفندماه ۱۳۸۹

چکیده

در سال‌های اخیر، الکتروریسی موفقیت‌های زیادی در تکنولوژی شکل‌گیری نانوالیاف از محلول‌های پلیمری، داشته است. یکی از معایب این روش ناپایداری خمشی جریان شتاب‌دار مایع در آن است، بنابراین لازم است که حرکت جت (جریان شتاب‌دار مایع) در الکتروریسی به نحوی کنترل گردد.

در این تحقیق یک روش جدید جهت کنترل ناپایداری جت الکتروریسی با استفاده از میدان مغناطیسی خارجی ارائه شده است. بدین منظور نمونه آزمایشگاهی براساس تئوری ارائه شده طراحی و ساخته شد. سپس از وب‌های نانوالیاف تولید شده در شرایط الکتروریسی عادی و نیز الکتروریسی تحت میدان مغناطیسی عکسبرداری شده و مساحت آن‌ها بوسیله پردازش تصویر محاسبه شده است. در نهایت میانگین مساحت‌های بدست آمده مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفته است.

طبق نتایج بدست آمده مشخص شد که بکارگیری یک میدان مغناطیسی خارجی اثر چشمگیری بر کاهش مساحت وب جمع‌آوری شده داشته که این کاهش مساحت قاعدتاً ناشی از کاهش شعاع مارپیچ حرکت جت و کنترل ناپایداری خمشی آن بوده است.

کلمات کلیدی: الکتروریسی - جت - ناپایداری خمشی - میدان مغناطیسی

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل اول: معرفی الکتروریسی و پارامترهای مؤثر بر آن
۲	۱-۱-مقدمه
۲	۲-۱-الکتروریسی
۳	۳-۱-پارامترهای مؤثر بر الکتروریسی
۴	۱-۳-۱-پارامترهای محلول
۴	۱-۳-۱-۱-وزن مولکولی و ویسکوزیته محلول
۵	۱-۳-۱-۲-کشش سطحی
۶	۱-۳-۱-۳-ضریب هدایت الکتریکی محلول
۶	۱-۳-۱-۴-تأثیر محتوای نمک
۷	۲-۳-۱-پارامترهای فرآیند الکتروریسی
۸	۱-۲-۳-۱-ولتاژ و میدان الکتریکی
۱۲	۲-۲-۳-۱-نرخ تغذیه
۱۲	۳-۲-۳-۱-تأثیر جمع کننده
۱۳	۴-۲-۳-۱-فاصله نازل از جمع کننده
۱۴	۵-۲-۳-۱-اثرات قطبیت بر الکتروریسی
۱۵	۳-۳-۱-عوامل محیطی
۱۶	۱-۳-۳-۱-دما
۱۶	۲-۳-۳-۱-رطوبت
۱۷	۳-۳-۳-۱-نوع جو
۱۷	۴-۳-۳-۱-فشار
۱۸	فصل دوم: مروری بر تحقیقات گذشته
۱۹	۱-۲-مقدمه
۱۹	۲-۲-روش‌های اصلاح شده الکتروریسی برای تولید الیاف آرایش یافته
۲۰	۱-۲-۲-اصلاح الکتروریسی با تغییر جمع کننده یا افزودن المان کمکی
۲۰	۱-۱-۲-۲-میدان الکتریکی کمکی
۲۲	۲-۱-۲-۲-جمع کننده سیلندری با سرعت بالا
۲۵	۳-۱-۲-۲-چرخ نازک با لبه چاقویی
۲۶	۲-۲-۲-روش‌های اصلاح شده الکتروریسی با تأثیر بر حرکت جت الکتروریسی

۲۷	۱-۲-۲-۲- الکتروریسی با استفاده از جمع‌کننده‌های موازی و رسانا
۲۹	۲-۲-۲-۲- استفاده از قاب جمع‌کننده
۲۹	۳-۲-۲-۲- استفاده از یک جفت میدان الکتریکی در الکتروریسی
۳۰	۴-۲-۲-۲- استفاده از میدان مغناطیسی در الکتروریسی
۳۲	۳-۲- روش‌های اصلاح شده الکتروریسی برای کنترل ناپایداری
۳۲	۱-۳-۲- حرکت جت و ناپایداری خمشی آن
۳۳	۲-۳-۲- کنترل ناپایداری خمشی
۳۶	۱-۲-۳-۲- استفاده از میدان الکتریکی کمکی
۳۸	۴-۲- ضرورت و هدف تحقیق
۴۰	فصل سوم: تجربیات
۴۱	۱-۳- بررسی‌های تئوری انجام شده
۵۱	۲-۳- آزمایشات انجام شده
۵۱	۱-۲-۳- مشخصات مواد مورد استفاده
۵۲	۲-۲-۳- مشخصات دستگاه‌های مورد استفاده
۵۲	۱-۲-۲-۳- دستگاه الکتروریسی
۵۳	۲-۲-۲-۳- آهن‌رباهای ایجادکننده میدان مغناطیسی
۵۷	۳-۲-۲-۳- سنسور اثر هال
۵۸	۴-۲-۲-۳- دستگاه کوتینگ یا پوشش‌دهنده به روش کندوپاش
۵۹	۵-۲-۲-۳- دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM
۶۰	۳-۲-۳- روش انجام آزمایش
۶۰	۱-۳-۲-۳- تهیه محلول الکتروریسی
۶۰	۲-۳-۲-۳- انجام الکتروریسی
۶۳	۳-۳-۲-۳- اندازه‌گیری چگالی شار میدان مغناطیسی بین نازل و جمع‌کننده
۶۴	۴-۳-۲-۳- محاسبه سطح وب نانوالیاف جمع‌آوری شده
۶۶	۳-۳- بحث و نتایج
۶۹	نتایج و پیشنهادات
۷۰	۱-۴- نتیجه‌گیری
۷۱	۲-۴- پیشنهادات
۷۲	پیوست‌ها

٧٤ پیوست ٣

٨٠ پیوست ٤

٨١ مراجع

فهرست جداول

شماره جدول	صفحه
جدول ۱-۳- مؤلفه نیروهای مغناطیسی وارد بر جت الکتروریسی در جهت محورهای مختصات به همراه اندازه هر نیرو	۴۶
جدول ۲-۳- بعضی از مشخصات پلی‌وینیل‌الکل	۵۱
جدول ۳-۳- مشخصات آهن‌رباهای ساخته شده برای این تحقیق	۵۷
جدول ۴-۳- محدوده ولتاژ و چگالی شار مغناطیسی اندازه‌گیری شده توسط سنسور اثر هال	۵۸
جدول ۵-۳- شرایط حضور میدان مغناطیسی برای الکتروریسی در این تحقیق	۶۲
جدول ۶-۳- شرایط یکسان در نظر گرفته شده برای انجام آزمایشات	۶۲
جدول ۷-۳- چگالی شار مغناطیسی (B) بر حسب تسلا	۶۳
جدول ۸-۳- مساحت و ب‌های الکتروریسی شده	۶۵

فهرست اشکال

شماره شکل	صفحه
شکل ۱-۱- نمای شماتیکی از دستگاه الکتروریسی	۳
شکل ۱-۲- مدل‌های میدان الکتریکی: (A) میدان الکتریکی نقطه به صفحه، (B) میدان الکتریکی نقطه به نقطه، (C) میدان الکتریکی صفحه به نقطه، (D) میدان الکتریکی صفحه به صفحه	۱۱
شکل ۱-۳- تصاویر SEM از وب الکتروریسی شده در میدان‌های الکتریکی (الف) نقطه به صفحه، (ب) نقطه به نقطه، (ج) صفحه به نقطه، (د) صفحه به صفحه	۱۱
شکل ۱-۴- افزایش اندازه دانه تسبیحی‌ها در الیاف پلی‌کاپریلونیتریل با افزایش نرخ تغذیه	۱۲
شکل ۱-۲- الکترودهای کمکی (نوارهای موازی) به منظور آرایش دادن الیاف	۲۱
شکل ۲-۲- مقایسه تصاویر SEM از آرایش‌یافتگی نانوالیاف تولید شده از کوپلیمر پلی‌کاپرولاکتان- پلی‌لاکتیک اسید (با نسبت ۷۵:۲۵) (الف)- بدون استفاده از الکترودهای کمکی (ب)- با استفاده از الکترودهای کمکی	۲۱
شکل ۲-۳- نمای شماتیکی از دستگاه الکتروریسی با جمع‌کننده سیلندری، (ب) تصویر SEM از آرایش‌یافتگی نانوالیاف کلاژن نوع ۱ با استفاده از جمع‌کننده سیلندری	۲۳
شکل ۲-۴- استوانه سیمی با سرعت ۱ دور بر دقیقه به عنوان جمع‌کننده در الکتروریسی	۲۴
شکل ۲-۵- تصاویر SEM از نانوالیاف جمع‌آوری شده بر روی استوانه سیمی (الف) پس از ۵ دقیقه، (ب) پس از ۱۵ دقیقه	۲۴
شکل ۲-۶- سیلندر دوار با پین نوک تیز داخل آن برای کنترل جهت الیاف نشسته شده روی آن	۲۵
شکل ۲-۷- نمای شماتیکی از دیسک دوار جمع‌کننده و مسیر جت در نزدیک آن (ب) تصویر SEM از نانوالیاف پلی‌کاپرولاکتان آرایش‌یافته توسط دیسک جمع‌کننده	۲۶
شکل ۲-۸- نمای شماتیکی از دستگاه الکتروریسی با دو جمع‌کننده موازی، (ب) بردارهای میدان الکتریکی در محدوده بین نازل و جمع‌کننده، (ج) تحلیل نیروی الکترواستاتیکی نانولیف بردار پل زده در فضای بین دو جمع‌کننده	۲۸
شکل ۲-۹- الف- نانوالیاف آرایش‌یافته با استفاده از یک قاب با زاویه A نسبت به صفحه جمع‌کننده، ب- نانوالیاف پیوسته با استفاده از جمع‌کننده چندقابی	۲۹
شکل ۲-۱۰- الف- نمای شماتیکی از الکتروریسی با دو میدان الکتریکی عمود برهم، (ب)- تصویر SEM از نانوالیاف آرایش‌یافته در الکتروریسی با دو میدان عمود برهم	۳۰
شکل ۲-۱۱- الف- نمای شماتیکی از دستگاه الکتروریسی با آهن‌رباهای موازی در دو سمت صفحه جمع‌کننده	۳۱
شکل ۲-۱۲- الف- تحلیل مکانیکی الکتروریسی در حضور میدان مغناطیسی (ب) نیروی اعمال شده از میدان مغناطیسی بر جت الکتریکی در الکتروریسی	۳۶
شکل ۲-۱۳- روش چند میدانی برای کنترل الکتروریسی با استفاده از چند حلقه مسی	۳۷
شکل ۲-۱۴- تصویر توزیع بار با افزودن یک رسانای خارجی در فرآیند الکتروریسی	۳۸

شکل ۲-۱۵- الکتروود کمکی سیلندری متصل به سوزن نازل	۳۸
شکل ۳-۱- (الف) نمای شماتیک الکترووریسی تحت میدان مغناطیسی خارجی- (ب) خطوط میدان مغناطیسی خارجی	۴۱
شکل ۳-۲- نیروهای مغناطیسی وارد بر نانوالیاف در حین الکترووریسی و برآیند آنها	۴۲
شکل ۳-۳- نیروهای مغناطیسی مؤثر بر قسمت ماریچ جت الکترووریسی	۴۳
شکل ۳-۴- نیروهای مغناطیسی ناشی از جریان‌های نزدیک به هم (الف)- دو جریان موازی هم‌جهت (ب)- دو جریان موازی ناهم‌جهت	۴۴
شکل ۳-۵- بررسی نیروهای مغناطیسی تأثیرگذار بر شعاع حرکت جت (الف) در حالت عدم حضور میدان مغناطیسی خارجی- (ب) و (ج) در حالت حضور میدان مغناطیسی خارجی	۴۸
شکل ۳-۶- دستگاه الکترووریسی مورد استفاده در این تحقیق	۵۲
شکل ۳-۷- نمای شماتیکی از آهن‌رباهای الکتریکی طراحی شده و میدان مغناطیسی ناشی از آنها	۵۳
شکل ۳-۸- توزیع میدان مغناطیسی خارجی ناشی از آهن‌رباها در محدوده الکترووریسی	۵۶
شکل ۳-۹- آهن‌رباهای ساخته و استفاده شده برای ایجاد میدان مغناطیسی خارجی در این تحقیق	۵۷
شکل ۳-۱۰- سنسور اثر هال	۵۸
شکل ۳-۱۱- دستگاه لایه نشانی طلا	۵۹
شکل ۳-۱۲- میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)	۵۹
شکل ۳-۱۳- دستگاه الکترووریسی تحت تأثیر میدان مغناطیسی خارجی	۶۱
شکل ۳-۱۴- نمونه‌ای از وب‌های تولیدی بر روی ورق آلومینیوم الف: بدون میدان مغناطیسی خارجی، ب: در حضور میدان مغناطیسی خارجی	۶۱
شکل ۳-۱۵- نمونه‌ای از وب‌های جمع‌آوری شده (الف) بدون میدان مغناطیسی، (ب): تحت میدان با چگالی شار مغناطیسی ۰,۰۶۸ تسلا، (ج): تحت میدان با چگالی شار مغناطیسی ۰,۰۷۴ تسلا	۶۵
شکل ۳-۱۶- نمودار روند کاهش میانگین مساحت وب‌های جمع‌آوری شده بدون آهن‌ربا و با آهن‌ربا	۶۶
شکل ۳-۱۷- تصاویر SEM نانوالیاف ریسیده شده با بزرگنمایی ۱۰۰۰۰ برابر در شرایط: الف- با میدان ۰,۰۶۸ تسلا، ب- با میدان ۰,۰۷۴ تسلا، ج- بدون میدان مغناطیسی، با بزرگنمایی ۵۰۰۰ برابر در شرایط: د- با میدان ۰,۰۶۸ تسلا، ه- با میدان ۰,۰۷۴ تسلا، و- بدون میدان مغناطیسی	۶۸

فصل اول

معرفی الکتروریسی
و پارامترهای مؤثر بر آن

۱-۱- مقدمه

الکتروریسی روش مفیدی برای تولید الیاف پلیمری با قطر نانومتر یا زیر میکرون (معمولاً بین ۵ تا ۱۰۰ نانومتر) است. این روش برای اولین بار توسط Formals در سال ۱۹۳۴ به ثبت رسید [۱].

الکتروریسی موفقیت‌های زیادی در تکنولوژی شکل‌گیری نانوالیاف از محلول‌های پلیمری با گرانروی زیاد، داشته است. روش‌های مختلفی برای تولید نانوالیاف وجود دارد. اما هنگامی که به امکانات تجاری، تنوع پلیمرها و کاربردهای تجاری آن‌ها، سادگی فرآیند تولید و کاربرد آن در تکنولوژی‌های مختلف تولید توجه شود، الکتروریسی به عنوان کارآمدترین روش برای تولید نانوالیاف شناخته می‌شود [۲]. از عوامل دیگری که این روش را مورد توجه قرار می‌دهد کنترل قطر، تولید نانوالیاف با مورفولوژی‌های مختلف، داشتن تنوع در مواد اولیه (پلیمرهای طبیعی، مصنوعی، پلیمرهایی که در روش‌های معمولی نمی‌توان برای تولید الیاف استفاده کرد) می‌باشد [۳]. نانوالیاف تولید شده با روش الکتروریسی محدوده وسیعی از کاربردهای بالقوه در بسیاری میادین مانند فیلتراسیون هوا، فیلتراسیون آب، زیست‌شناسی، داروسازی (به بافت مورد نظر)، مهندسی بافت و نانوسیم‌ها، دارد [۴-۱].

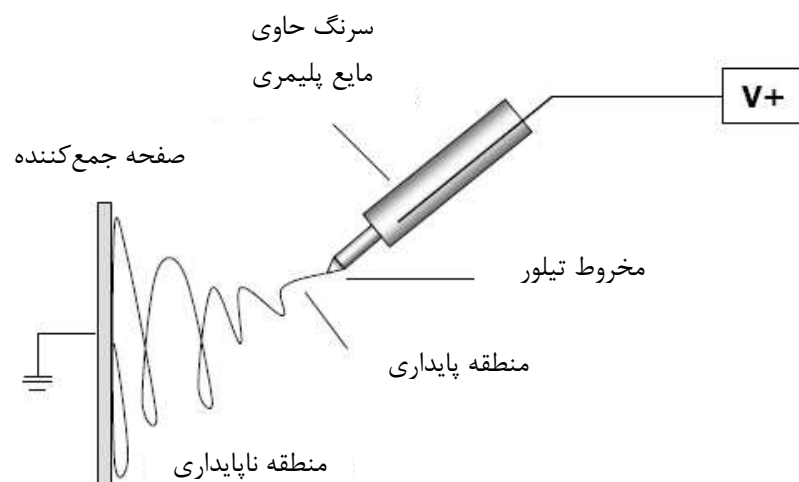
۱-۲- الکتروریسی

الکتروریسی در منابع مختلف به عنوان روشی که در آن نانوالیاف از مایعات پلیمری با استفاده از میدان الکتریکی تهیه می‌شوند، تعریف شده است. شایان ذکر است که هم محلول‌های پلیمری و هم پلیمرهای مذاب می‌توانند الکتروریسی شوند.

در فرآیند الکتروریسی یک میدان الکترواستاتیکی بین یک نازل و یک جمع‌کننده ایجاد می‌گردد، در حقیقت ولتاژ بالایی به یک پلیمر سیال اعمال می‌شود تا توسط آن سیال باردار گردد. در اثر نیروی الکتریکی، محلول پلیمری از نازل به سمت جمع‌کننده خارج می‌شود بدین ترتیب که

وقتی بارهای الکتریکی در سیال به مقداری بحرانی برسد، یک جریان شتاب‌دار محلول که "جت" نامیده می‌شود از قطره نوک سوزن در اثر شکل‌گیری مخروط تیلور با شتاب خارج می‌شود. جت الکتروریسی به سمت منطقه با پتانسیل کمتر، که در بیشتر موارد صفحه جمع‌کننده‌ای است که به زمین متصل شده، حرکت می‌کند سپس حلال از میان جت پلیمر تبخیر می‌شود، علاوه بر این جت، ناپایداری‌هایی را تحمل می‌کند که عمدتاً بوجود آورنده اندازه نانویی قطرلیف هستند و بر مورفولوژی الیاف تولید شده نیز اثر می‌گذارد [۴،۷].

اجزاء متداول دستگاه الکتروریسی اساساً شامل یک سرنگ پر از محلول یا مذاب پلیمری، یک صفحه جمع‌کننده وب نانوالیاف و یک منبع تغذیه ولتاژ بالا برای تأمین نیروی الکتریکی مورد نیاز برای کشیدن جت مایع، می‌باشد. در شکل ۱-۱ نمای شماتیکی از الکتروریسی نشان داده شده است.



شکل ۱-۱- نمای شماتیکی از دستگاه الکتروریسی [۶]

۱-۳- پارامترهای مؤثر بر الکتروریسی

طیف گسترده‌ای از پارامترها که شامل پارامترهای محلول، پارامترهای فرآیند و پارامترهای محیطی است بر فرآیند الکتروریسی و خصوصیات وب نانوالیاف در آن اثر می‌گذارد [۸-۱۳]. خصوصیات الیاف، همچنین تأثیرگذاری یک یا تعدادی پارامتر بر ابعاد الیاف و خصوصیات وب تولید شده در الکتروریسی، توسط گروه‌های تحقیقاتی زیادی بررسی شده است.

معمولاً عواملی که بر الکتروریسی اثر می‌گذارند را می‌توان به سه دسته تقسیم نمود:

۱. اولین دسته از عوامل مربوط می‌شود به پارامترهای محلول مانند غلظت، ویسکوزیته،

کشش سطحی، محتوای نمک موجود و رسانایی محلول پلیمری

۲. دومین دسته مربوط می‌شود به عوامل فرآیند مانند ولتاژ بکار رفته، اندازه نازل و نرخ

تغذیه، نوع جمع‌کننده و فاصله بین نوک نازل و جمع‌کننده (TCD)^۱

۳. سومین دسته مربوط می‌شود به عوامل محیطی مانند: دما، رطوبت و فشار هوای اطراف

دستگاه

۱-۳-۱- پارامترهای محلول

خصوصیات محلول‌های پلیمری بیشترین تأثیر را بر فرآیند الکتروریسی و مورفولوژی الیاف

بدست آمده دارد که در ادامه به آن‌ها اشاره می‌گردد [۴،۷].

۱-۳-۱-۱- وزن مولکولی و ویسکوزیته محلول

ویسکوزیته محلول نقش مهمی در تعیین اندازه لیف و مورفولوژی آن طی الکتروریسی الیاف

از مایع پلیمری دارد. با ویسکوزیته بسیار پایین شکل‌گیری الیاف ممتد بوقوع نخواهد پیوست

همچنین ویسکوزیته پایین سبب تشکیل دانه تسبیحی در وب جمع‌آوری شده، می‌شود. از طرفی

هنگامی که ویسکوزیته بالا باشد پرتاب جت از محلول پلیمری دشوار می‌شود، همچنین ویسکوزیته

بالا سبب گیر کردن محلول در نوک سوزن شده و حتی ممکن است محلول در نوک سوزن و قبل

از شروع الکتروریسی خشک شود. از این‌رو، ویسکوزیته مناسب برای الکتروریسی یک امر ضروری

^۱ - tip and collector distance

است [۵]. نتایج بسیاری از تحقیقات نشان می‌دهد که مورفولوژی لیف به شدت به ویسکوزیته سیال پلیمری وابسته است [۱۳-۱۰، ۷].

در مواردی که مایع پلیمری تنها شامل یک پلیمر و یک حلال می‌شود، ویسکوزیته با غلظت نسبت مستقیم دارد، اما چون ویسکوزیته به تمامی برهم کنش‌های بین مولکولی در محلول بستگی دارد، نوع حلال و افزودنی‌های ممکن مانند نمک نیز احتمالاً بر آن تأثیر می‌گذارد [۷].

وزن مولکولی پلیمر تعداد درگیری‌های زنجیره‌های پلیمر در محلول و در نتیجه ویسکوزیته محلول را نشان می‌دهد. شبکه‌های درگیر شده زنجیره پلیمری نقش مهمی را در فرآیند الکترورسی ایفا می‌کند. از این رو حتی وقتی غلظت پلیمر پایین است، وزن مولکولی بالا می‌تواند تعداد کافی از این شبکه‌های زنجیری پلیمری را تأمین کند. همچنین در صورتی که واکنش‌های بین مولکولی بتواند جایگزینی برای رسانایی بین زنجیره‌ها که از طریق شبکه‌های زنجیری فراهم می‌شود باشد، وزن‌های مولکولی بالا برای فرآیند الکترورسی ضروری نیست [۱۵، ۱۴].

وزن مولکولی پلیمر همچنین نقش بسزایی بر سایر خصوصیات مکانیکی و الکتریکی نظیر کشش سطحی، و رسانایی محلول دارد [۵].

در هر حال افزایش ویسکوزیته مایع پلیمری، چه در اثر وزن مولکولی بالای پلیمر و چه در اثر افزایش غلظت محلول، قطر لیف نهایی را افزایش می‌دهد، به جز هنگامی که روزنه نازل کمی گرفته شده یا جریان به طریقی کاهش یافته باشد بطوری که یک قطره کامل برای انجام فرآیند در دسترس نباشد [۸].

۱-۳-۱-۲- کشش سطحی

شروع الکترورسی به محلول باردار شده نیاز دارد، تا بر کشش سطحی آن غلبه کند. در حین الکترورسی وقتی جریان به سمت صفحه جمع‌کننده حرکت می‌کند، کشش سطحی ممکن است باعث شکل گرفتن دانه‌تسبیحی‌ها در طول جت گردد. کشش سطحی، سطح بر واحد جرم سیال را کاهش می‌دهد. در این مورد، هنگامی که تراکم مولکول‌های آزاد حلال زیاد است، مولکول-

های محلول بیشتر تمایل دارند تا دور هم جمع شوند و یک شکل کروی (در اثر کشش سطحی) را بوجود آورند. بنابراین می‌توان با افزایش غلظت محلول (ویسکوزیته)، تا حدودی بر این کشش سطحی غلبه نمود [۴].

۱-۳-۱-۳-ضریب هدایت الکتریکی محلول

در عملیات الکتروروسی در اثر بارهای الکتریکی، کشش بر سطح محلول اعمال شده و ذرات محلول از هم فاصله می‌گیرند. بنابراین اگر ضریب هدایتی محلول افزایش یابد، بار بیشتری بوسیله جت الکتروروسی می‌تواند حمل شود [۴]. اکثر پلیمرها رسانا هستند، به جز تعداد کمی از آن‌ها که دی‌الکتریک هستند. یون‌های باردار در محلول پلیمری تأثیر زیادی در تشکیل جت دارند. رسانایی محلول به‌طور عمده بوسیله نوع پلیمر و حلال بکار رفته و قابلیت یونیزه شدن نمک‌ها، مشخص می‌شود [۵]. با افزایش رسانایی الکتریکی محلول، کاهش قابل توجهی در قطر نانوالیاف الکتروروسی شده بوجود می‌آید، بطور کلی نانوالیافی با قطر کم با رسانش الکتریکی بالا بدست می‌آیند در حقیقت با محلولی با رسانایی کم ازدیاد طول کافی برای یک جت با نیروی الکتریکی فراهم نمی‌شود تا بتواند تشکیل لیف بدهد، و امکان مشاهده دانه‌تسبیحی‌ها نیز زیاد است. محلول‌های با رسانش بالا به شدت در حضور میدان‌های الکتریکی ناپایدارند که منجر به ناپایداری خمشی بیشتر شده و طول مسیر عبور جت آن‌ها افزایش می‌یابد [۴،۵،۸].

۱-۳-۱-۴-تأثیر محتوای نمک

مرور مقالات نشان می‌دهد که تأثیر نمک موجود در محلول یک موضوع کاملاً مبهم باقی مانده است. Zong و همکارانش (۲۰۰۲) تأثیر یون‌ها را با افزودن نمک‌های یونی بر مورفولوژی و قطر لیف الکتروروسی شده بررسی نموده‌اند و دریافتند که با افزودن نمک‌های یونی مانند NaCl، لیاف بدون دانه‌تسبیحی با قطر نسبتاً کم در حدود ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر تولید می‌شود. افزایش رسانایی محلول با استفاده از افزودن نمک برای سایر پلیمرها هم استفاده شده است مانند POE

توسط Fong و همکارانش (۱۹۹۹)، 1-POE نوع کلاژن توسط Huang و همکارانش (۲۰۰۲)، PA6 توسط Mit-Uppatham و همکارانش (۲۰۰۴)، PVA توسط Zhang و همکارانش (۲۰۰۵)، PAA توسط Kim و همکارانش (۲۰۰۵). با استفاده از نمک‌ها یکنواختی الیاف افزایش یافته و در کل دانه‌تسبیحی‌ها کاهش می‌یابند [۵]. اما در تحقیق Heikkil و همکارانش (۲۰۰۸) نمک درون محلول بطور ناگهانی و غیر منتظره قطر لیف را افزایش داده است [۷].

مشاهداتی که نشان می‌دهد افزودن نمک در محلول باعث کاهش قطر لیف می‌شود، بیشتر از مشاهداتی است که نتایج آن‌ها مبنی بر افزایش قطر با افزایش نمک است. توضیحات مختلفی برای این تناقض وجود دارد:

اولاً نمک‌های متفاوت با فرمول شیمیایی و اندازه مولکولی متفاوت می‌توانند بطور متفاوتی نیز عمل کنند و بدین ترتیب اثر مفیدی که در نتیجه استفاده از یک نمک معین تولید شده احتمالاً با نمک دیگر ناپیوستی ایجاد شود. نمک‌های متفاوت احتمالاً اثرات متقابل متفاوتی با مولکول‌های پلیمر و حلال دارند، و این تأثیرات متقابل است که می‌تواند ویسکوزیته محلول را تحت تأثیر قرار داده و بدین ترتیب بطور غیر مستقیم قطر لیف را نیز تحت تأثیر خود قرار دهد. ثانیاً مقدار نمکی که به محلول ریسندگی اضافه شده است از چند صدم تا چند درصد متغیر بوده است. از سوی دیگر، اثر نمک بر روی قطر ممکن است به نوع پلیمر نیز وابسته باشد [۷].

۱-۳-۲- پارامترهای فرآیند الکترورسی

عوامل مهم دیگری که روی فرآیند الکترورسی تأثیر می‌گذارد عواملی خارجی‌ای است که روی جریان شتاب‌دار محلول الکترورسی اعمال می‌شود. این عوامل شامل ولتاژ، نرخ تغذیه، نوع صفحه جمع‌کننده، قطر سوزن و فاصله بین نوک سوزن و صفحه جمع‌کننده می‌باشد. این پارامترها، با این‌که تأثیر مشخصی روی مورفولوژی لیف دارند اما اثر آن‌ها نسبت به تأثیر پارامترهای محلول از اهمیت کمتری برخوردار است.

یکی از عناصر مهم الکتروریسی، ولتاژ بالایی است که برای رسیدن محلول بکار رفته است. ولتاژ قوی بار الکتریکی لازم را روی محلول القا کرده و همراه با میدان الکتریکی خارجی، فرآیند الکتروریسی را، زمانی که نیروهای الکترواستاتیکی درون محلول بر کشش سطحی محلول غلبه می- کند، آغاز می‌نماید [۴].

(۱) اثر میدان الکتریکی و ولتاژ

ولتاژ می‌تواند به عنوان ضروری‌ترین پارامتر در الکتروریسی اطلاق شود، زیرا سبب ایجاد جت شده و نیز باعث ایجاد ناپایداری‌هایی که جت را کشش می‌دهند، می‌شود. ولتاژ، متوسط شدت میدان الکتریکی در فاصله بین نازل و جمع‌کننده را مشخص می‌کند. اثر پارامترهای میدان الکتریکی بر روی فرآیند الکتروریسی و تشکیل الیاف، متنوع است. در مورد تأثیر افزایش ولتاژ بر روی تغییر قطر الیاف تولیدی نتایج متفاوتی در مطالعات محققان ذکر شده است. به عبارت دیگر افزایش ولتاژ و در نتیجه افزایش میدان الکتریکی، در برخی موارد قطر لیف را کاهش و در موارد دیگر افزایش داده است. کاهش قطر لیف که در نتیجه ولتاژ بالا یا میدان الکتریکی بالا است را می‌توان این‌گونه توضیح داد که ولتاژ بالاتر، نیروهای الکترواستاتیک بیشتری را به جت القا می‌کند و نیروهای دافع بزرگ‌تر تمایل به تشکیل الیاف ظریف‌تر دارند. افزایش قطر نیز می‌تواند به آسانی توضیح داده شود، زیرا میدان الکتریکی بزرگ‌تر می‌تواند سبب جریان جرمی بیشتری شود که منتهی به تولید الیاف کلفت‌تر می‌گردد [۵،۷].

یکی از جدی‌ترین مشکلات در کاربردهای الکتروریسی ایجاد دانه‌تسبیحی‌ها بر روی الیاف است. تشکیل دانه‌تسبیحی‌ها کارایی محصولات را نامطلوب می‌کند. بطور کلی در ولتاژ بالا تمایل بیشتری به تشکیل دانه‌تسبیحی‌ها وجود دارد [۶،۴،۲]. تشکیل دانه‌تسبیحی‌ها به شدت میدان الکتریکی وابسته است. Kadomae و همکارانش (۲۰۰۶) بر روی رابطه بین بارهای الکتریکی بر روی نوک نمونه خارج شده از نازل و تشکیل دانه‌تسبیحی‌ها، متمرکز شده‌اند. آن‌ها به بررسی

تشکیل دانه‌تسبیجی‌ها در الکتروریسی با تغییر در شدت میدان الکتریکی، بوسیله تغییر ولتاژ و TCD پرداخته و اعلام نموده‌اند که تشکیل دانه‌تسبیجی‌ها بوسیله جریان الکتریکی بالاتر شدت می‌یابد [۲].

میدان الکتریکی و عوامل مؤثر در آن یعنی ولتاژ و فاصله، مهمترین پارامترهایی هستند که میزان تولید را مشخص می‌کنند. شدیدترین میدان الکتریکی و بنابراین بیشترین ولتاژ و کوتاه‌ترین فاصله بیشترین میزان تولید را می‌دهد، که بطور عمده مربوط می‌شود به افزایش جریان الکتریکی و فشار الکترواستاتیکی که باعث بیرون کشیدن میزان مایع بیشتری از نازل می‌گردد [۷].

در حالی که بطور معمول ولتاژ ورودی DC برای الکتروریسی به کار می‌رود، اما ممکن است برای الکتروریسی از پتانسیل AC نیز استفاده شود. در شروع حرکت محلول شتابدار، کشیدن و ناپایداری خمشی به دلیل بارهای الکتریکی موجود در محلول است. باردار کردن محلول بسیار سریع است و شروع جریان شتابدار محلول قبل از تغییر تناوب ولتاژ در یک ورودی AC اتفاق می‌افتد. وقتی جریان شتابدار محلول به سمت صفحه جمع‌کننده حرکت می‌کند، قطعه‌های منظمی از جریان محلول شامل بارهای مثبت یا منفی روی آن خواهند بود. چون ناپایداری خمشی در نتیجه نیروهای کولمبی دافع در جت محلول است، قطعه‌های منظم در جریان شتابدار محلول با ولتاژ مثبت یا ولتاژ منفی نیروهای دافعه را کاهش داده و در نتیجه ناپایداری خمشی جت کاهش می‌یابد. چون ناپایداری خمشی کمتر و کشیدگی کمتر در جریان شتابدار محلول وجود دارد، الیاف بدست آمده دارای قطر بیشتری نسبت به الیافی که با ولتاژ ورودی برابر اما از نوع DC تشکیل می‌شوند، می‌باشند. مزیت دیگر ولتاژ ورودی AC این است که تمایل کمتری برای انباشتگی بارهای الکتریکی مشابه روی لیف بعد از ته‌نشینی وجود دارد. بنابراین، یک لایه ضخیم‌تر از الیاف الکتروریسی شده، مخصوصاً وقتی صفحه جمع‌آوری عایق مورد استفاده قرار می‌گیرد، می‌تواند جمع شود [۴].

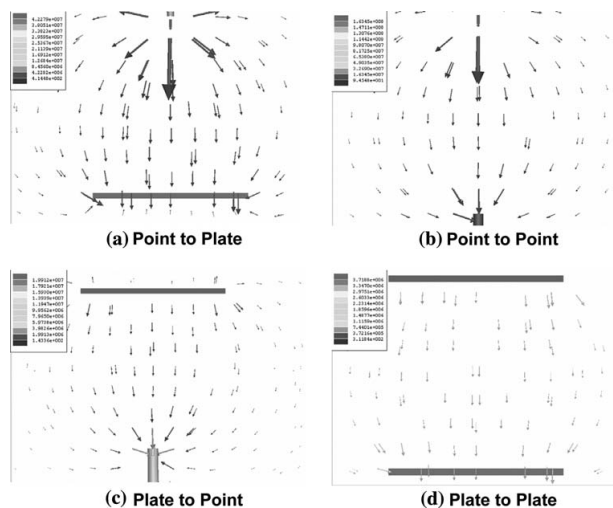
۲) طراحی میدان الکتریکی

دانستن اثرات یک میدان الکتریکی بر روی مسیری که جت از قطره در برابر الکتروود خارج می‌شود، بسیار مهم است. در این قسمت اثرات میدان الکتریکی بر روی شکل‌گیری لایه‌های وب نانو، آورده شده است. به خاطر اختلافات طراحی‌ای که در الکتروودها وجود دارد، جت‌های خارج شده که بر روی صفحه جمع‌کننده می‌نشینند، بطور متفاوت ظاهر شده و یا خصوصیات متفاوتی نشان می‌دهند [۹].

طراحی میدان الکتریکی یک عامل بسیار مهم برای کنترل شکل‌گیری وب نانوالیاف می‌باشد. شکل ۱-۲ مدل چهار میدان الکتریکی اصلی را نشان داده است. میدان الکتریکی برای الکتروودهای نقطه به صفحه در قسمت (الف) مدل شده، برای نقطه به نقطه در قسمت (ب)، صفحه به نقطه در قسمت (ج) و صفحه به صفحه در قسمت (د) با ولتاژ ثابت 20 kV بکار رفته مدل شده است.

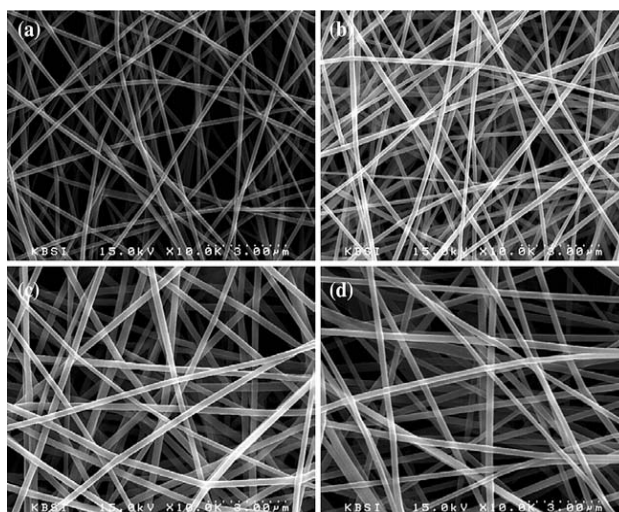
از آنجایی که میدان الکتریکی یک کمیت برداری است، در شکل ۱-۲ با بردار پیکان‌دار نشان داده شده است. پیکان‌ها جهت میدان الکتریکی را نشان می‌دهند و طول آن‌ها نسبت شدت میدان الکتریکی را در آن محل نشان می‌دهد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود جهت‌گیری‌های بردارها در چهار مدل مختلف، متفاوت است. به عنوان مثال بردارهای میدان الکتریکی در الکتروود نازل در مدل نقطه به صفحه تنها با نقطه مرکز جمع‌کننده منطبق نیست، بلکه با لبه‌های الکتروود صفحه‌ای مقابل نیز ارتباط دارد. در حالی - که در مورد میدان الکتریکی صفحه به صفحه، بردارهای همسان و عمودی بین دو صفحه بزرگ بردار تشکیل شده است.



شکل ۱-۲- مدل‌های میدان الکتریکی: (a) میدان الکتریکی نقطه به صفحه، (b) میدان الکتریکی نقطه به نقطه، (c) میدان الکتریکی صفحه به نقطه، (d) میدان الکتریکی صفحه به صفحه [۹]

در مورد میدان نقطه به صفحه و نقطه به نقطه، اگر جت خارج شده که الکترون‌هایی بر روی سطح قطره دارد، به سمت الکتروود مقابل در طول خطوط نیروی الکتریکی پرواز کند، احتمال رسوب کردن یک وب الکتروورسی شده با ضخامت زیاد وجود دارد. به دلیل مشابه، میدان الکتریکی در طرح صفحه به نقطه می‌تواند وب‌هایی با ضخامت کمتر ایجاد کند. شکل ۱-۳ تصاویر SEM نانوالیاف تولید شده در این مدل میدان را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۳- تصاویر SEM از وب الکتروورسی شده در میدان‌های الکتریکی (الف) نقطه به صفحه، (ب)

نقطه به نقطه، (ج) صفحه به نقطه، (د) صفحه به صفحه در فاصله ۲۰ cm [۹]