

# تولید یک مرحله‌ای ساده نانوالیاف پلیمری کوتاه از طریق الکترورسی

مترجم: مسعود هاشمی

## چکیده

نانوالیاف پلیمری کوتاه بطور موفقیت‌آمیزی توسط الکترورسی محلول متشکل از استات سلولز پلیمری، استون، و دی‌متیل استامید تولید شدند. غلظت پلیمر در محلول از ۱۳ تا ۱۵ درصد وزنی محدوده‌بندی شد و مهم‌ترین عامل در تولید نانوالیاف کوتاه بود. طول نانوالیاف کوتاه از طریق نرخ یا دبی جریان محلول پلیمری و همچنین ولتاژ کاربردی، تغییر می‌کرد. طول الیاف با افزایش نرخ یا دبی جریان محلول افزایش یافت و با افزایش در ولتاژ کاربردی کاهش یافت، که در نتیجه طول نانوالیاف کوتاه می‌توانست در ۶۷۰-۳۷ میکرومتر کنترل شود. جت محلول پلیمری از نوک سوزن بصورت مستقیم خارج می‌شد، ولی سپس به دلیل آشفتگی یا اختلالات عرضی روی سطح محلول پلیمری، پخش شد. افزایش سریع در نیروی دافعه بواسطه بارهای سطحی در ترکیب با نیروهای طولی بواسطه ولتاژ کاربردی، جت محلول را از هم جدا کرده و نانوالیاف را قطعه‌قطعه کردند.

## ۱- مقدمه

تولید الیاف کوتاه به عنوان پرکننده، به دلیل قابلیت بهبود استحکام کششی، مقاومت در برابر خوردگی و پایداری حرارتی کامپوزیت‌های پلیمری، که دارای کاربردهای بسیاری: در صنعت هوافضا و در صنعت اتومبیل، برای جلوگیری از فرسایش و در نمایش‌گرهای انعطاف‌پذیر، به عنوان الکترودها و غیره هستند، توجه وسیعی را به خود جلب کرده است. پارامتر کلیدی در بهبود خواص کامپوزیت پلیمری، بستگی به قطر و طول الیاف کوتاه به عنوان پرکننده دارد. روش‌های زیادی که برای تهیه الیاف کوتاه بکار می‌روند از تکنیک رشد-بخاری استفاده می‌کنند. با این تکنیک، کنترل طول و قطر الیاف کوتاه توسط تغییر اندازه کاتالیست، پردازش درجه حرارت و فعالیت کاتالیست صورت می‌گیرد. اما، این تکنیک که برای کاربردهای صنعتی استفاده می‌شود با موانع گوناگونی روبرو است، مثل فرایند شیمیایی و فراوری‌های بعدی طولانی‌مدت، که برای بهبود خواص فیزیکی الیاف کربن لازم است. این مشکلات خیلی از محققان را به یافتن روش‌های مؤثرتری برای تولید الیاف کوتاه ترغیب کرده است.

الکترورسی ساده‌ترین و قابل‌اطمینان‌ترین تکنیک مورد استفاده برای تولید الیافی می‌باشد که قطری در محدوده میکرو تا نانو دارند. با این تکنیک، یک ولتاژ بالا روی محلول پلیمری ویسکوز به منظور ایجاد یک جت محلول پلیمری بکار می‌رود. جت مورد نظر که توسط دافعه الکترواستاتیک بین بارهای سطحی و حلال قابل‌تبخیر، بصورت پیوسته کشیده می‌شود، تشکیل الیاف پلیمری مداوم را می‌دهد. انتخاب حلال، غلظت حلال پلیمری و حلالیت پلیمر

در حلال مهم هستند و تبدیل الکترواسپری را به الکترورسی ممکن می‌کنند و طرح‌های قابلیت ریسندگی-حلالیت برای محلول پلی‌متیل سیلکسیکویگزان (PMSQ) و پلی‌کاپرولاکتان (PCL) توسط لو و همکارانش طراحی شده بودند. به منظور تولید الیاف کوتاه از الیاف الکترورسی شده مداوم، فرایندهای ثانویه بکار گرفته شده‌اند. برای تولید الیاف کوتاه، استویلوکویج و همکارانش، مفهوم واکنش اتصال عرضی از طریق نور را، به عنوان فرایند ثانویه بعد از تابش UV به کار بردند. پیش‌ماده مورد نظر برای الکترورسی، پلیمرهای دارای پیوند دوگانه به همراه اتصال‌دهنده عرضی حساس به نور و آغازگر نوری بودند. الیاف تازه رسیده شده مداوم در حضور روزه پوششی تحت نور UV قرار گرفتند، که باعث می‌شد که الیاف پوشش نیافته اتصال عرضی دهند و نامحلول شوند، درحالی‌که الیاف پوشش یافته اتصال عرضی ندهند و در محلول مناسب حل شوند. الیاف کوتاه توسط غوطه‌ور کردن الیاف تحت تابش قرار گرفته در حلال مناسب بدست آمدند. طول الیاف می‌توانست از ۲۰ تا ۱۵۰ میکرومتر توسط تنظیم پهنا یا عرض روزه پوششی کنترل شود. یوشیکاوا و همکارانش برش مکانیکی الیاف الکترورسی شده معلق در آب را با استفاده از یکنواخت‌کننده به عنوان فرایند ثانویه بکار بردند. طول نانوالیاف کوتاه توسط تنظیم زمان برش در آب کنترل شده بود.

تولید مستقیم میکروالیاف کوتاه توسط تغییر وزن مولکولی PMSQ و استفاده از حلال فرار قبلاً گزارش شده بود، اما قطر الیاف کوتاه در مقیاس میکرو بود. وزن مولکولی کم PMSQ، سبب نسبت کم طول به عرض برای لیف شده



استون در حین الکتروریسی مخلوط شد. محلول پلیمری پلیمر و حلال که در بطری شیشه‌ای مخلوط شده بود، سپس با استفاده از همزن مغناطیسی به مدت چندین ساعت همزده شد، تا اینکه محلول همگن بدست آید. غلظت‌های پلیمر در محلول پلیمری از ۹ تا ۱۸ درصد تغییر داده شد.

## ۲-۲- الکتروریسی محلول پلیمری:

تجهیزات الکتروریسی مرسوم برای تولید الیاف پلیمری مورد استفاده قرار گرفت. درون یک سرنگ ۱۰۰۰ سی سی (TTL 2-432, Hamilton Company) با سوزن ضدزنگ (OD ۰/۴۶ mm, ID ۰/۳۶ mm) از محلول پلیمری پر شد. یک منبع تغذیه ولتاژ بالا (HER-15P5-LV, Matsusada Precision Inc.) به منظور القای الکتروریسیته به محلول پلیمری، به سوزن ضد زنگ متصل شد. نرخ یا دبی جریان محلول پلیمری از طریق یک پمپ سرنگ (ESP64, Ei-Com Corporation) کنترل شد. یک ورقه آلومینیومی با ابعاد ۳۰ mm × ۳۰ mm برای جمع‌آوری الیاف مورد استفاده قرار گرفت، که به زمین متصل شد و یک قرص سیلیکون در ابعاد ۳ mm × ۳ mm جهت مشاهده الیاف روی آن نصب شد. فاصله بین نوک سوزن و ورقه آلومینیوم در ۹۰ میلی متر تنظیم شد. محیط و رطوبت با استفاده از دستگاه کنترل کننده دما و رطوبت‌دهنده (PAU-300S, Apiste Corporation) به ترتیب در ۲۰ درجه سانتیگراد و ۶۰ درصد نگاه داشته شد. ولتاژ مورد نیاز برای الکتروریسی از ۰ تا ۱۲ کیلوولت تغییر داده شد و نرخ یا دبی جریان محلول پلیمری از ۰/۱ تا ۰/۷ میکرولیتر بر دقیقه تغییر داده شد. سرنگ قبل از هر تعویض محلول با استون شسته شد.

## ۲-۲- مشاهده و بررسی الیاف الکتروریسی شده:

توزیع یا پراکندگی قطرها و طول‌های الیاف پلیمری الکتروریسی شده، با استفاده از تابع خط‌کش نرم‌افزار پردازش عکس در حین مشاهده با میکروسکوپ دیجیتال در وضوح ۱۱/۲ مگاپیکسل (VH-8000, Keyence Corporation) محاسبه شدند.

دو نوع لنز با محدوده بزرگنمایی از ۲۵ تا ۳۰۰× (VH-Z450 Keyence Corpo-) ration) برای مشاهده استفاده شدند. توزیع یا پراکندگی و میانگین طول الیاف الکتروریسی شده برای بیشتر از ۲۰۰ الیف تعیین شدند.

شکل نانوالیاف کوتاه، با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) (JSM-6340F, JEOL Ltd) با ضریب بزرگنمایی ۶۵۰۰۰× و وضوح ۱/۲ نانومتر در

بود. اما، مکانیزمی برای تشکیل میکروالیاف کوتاه معرفی نشده بود و محدوده طول قابل کنترل برای میکروالیاف کوتاه بواسطه وزن مولکولی محدود شده بود، که در طول فرایند الکتروریسی نمی‌توانست تغییر کند. روشی که به وسیله آن نانوالیاف می‌توانند از طریق فرایند دوران با فشار کنترل شده در کنار الکتروریسی تولید شوند قبلاً گزارش شده بود و با این روش طول نانوالیاف می‌توانست از ۲۰۰ تا ۸۰۰ نانومتر بوسیله تغییر سرعت چرخش تغییر کند. این روش دارای این امتیاز بود که نیاز به ولتاژ چندان بالایی نداشت و امکان تولید انبوه نیز وجود داشت، ولی طول نانوالیاف برای استفاده به عنوان فیلتر بسیار بلند بود. ما تولید یک مرحله‌ای الیاف کوتاه را با استفاده از جرقه الکتریکی به منظور بریدن الیاف در طول الکتروریسی گزارش کرده بودیم. طول الیاف کوتاه وابسته به فرکانس جرقه الکتریکی بود؛ هرچند محدوده مورد نظر برای طول کنترل شده الیاف کوتاه، به دلیل مشکلات فرکانس جرقه الکتریکی محدود بود.

در مطالعه پیش‌رو، تولید یک مرحله‌ای نانوالیاف پلیمری کوتاه توسط الکتروریسی تحت بررسی قرار گرفت. اثر غلظت محلول پلیمری، ولتاژ کاربردی، و نرخ یا دبی جریان محلول پلیمری روی تولید الیاف کوتاه تحت بررسی قرار گرفت. مقادیر طول و قطر الیاف پلیمری کوتاه تولید شده، به منظور همبسته‌سازی شرایط ریسندگی اندازه‌گیری شدند. بدین منظور، ما مشاهدات خود را روی شکل نانوالیاف و شرایط محلول پلیمری خروجی یادداشت کردیم و مکانیزم تولید را شرح دادیم؛ افزایش سریع در نیروی دافعه، ایجاد یک اختلال یا پریشانی می‌کرد که جت محلول پلیمری را پخش می‌کرد. افزایش سریع در نیروی دافعه به واسطه بارهای سطحی به همراه نیروهای طولی به واسطه ولتاژ کاربردی، جت محلول پلیمری را دو نیم یا جدا از هم می‌کرد و نانوالیاف را قطعه قطعه می‌کرد.

## ۲- تجربیات

### ۱- تهیه محلول پلیمری:

پلیمر استات سلولز (CA, Sigma Aldrich, UK) با میانگین عددی وزن مولکولی ۳۰۰۰۰ به عنوان لیف پلیمری الکتروریسی شده استفاده شد. استون ( $> 99.5\%$ , Kanto Chemical, Japan) و N,N-دی‌متیل استامید (DMAC) ( $> 99.5\%$ , Wako Chemical, Japan) در نسبت حجمی ۲:۱ به عنوان حلال مخلوط شدند و پودر پلیمری استات سلولز به ۱۵ میلی‌لیتر حلال در بطری شیشه‌ای اضافه شد. N,N-دی‌متیل استامید به منظور تأخیر در تبخیر



شکل ۱- الیاف الکتروریسی شده از محلول پلیمری با غلظت‌های مختلف: (a) ۹ wt%، (b) ۱۳ wt%، (c) ۱۸ wt%، ولتاژ ۴/۴ کیلوولت و نرخ جریان محلول پلیمری ۰/۳ میکرولیتر بر دقیقه بود.



شکل ۲- عکس‌های میکروسکوپی نوری الیاف کوتاه تولیدشده از محلول‌های پلیمری با غلظت‌های مختلف: (a) ۱۳، (b) ۱۴ و (c) ۱۵ درصد وزنی. ولتاژ ۵/۵ کیلوولت، و نرخ جریان ۰/۱ میکرولیتر بر دقیقه بود.

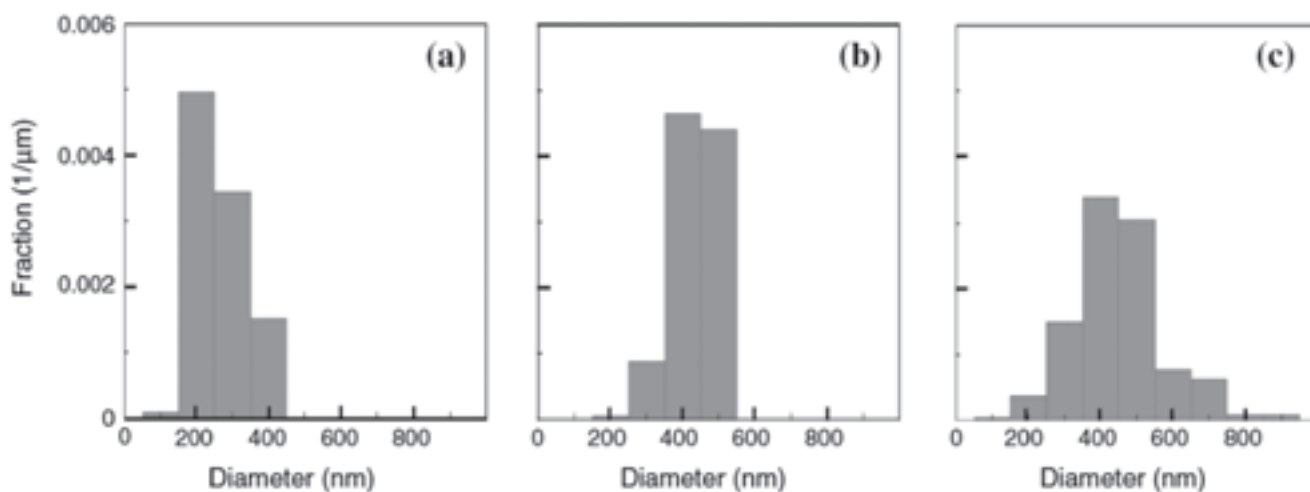
میکروسکوپی نانوالیاف بدست‌آمده از محلول‌های پلیمری را با غلظت‌های ۱۳ تا ۱۵ درصد وزنی نشان می‌دهد. ولتاژ ۵/۵ کیلوولت و نرخ جریان ۰/۱ میکرولیتر بود. شکل ۳، توزیع یا پراکندگی قطر نانوالیاف کوتاهی که در شکل ۲ نشان داده شدند را نمایش می‌دهد در غلظت پلیمری ۱۳ درصد وزنی، قطر میانگین الیاف کوتاه، ۳۲۰ نانومتر با یک پراکندگی باریک بود (شکل ۳a). هنگامی که غلظت پلیمر به ۱۴ و ۱۵ درصد وزنی افزایش یافت، پراکندگی قطر به ترتیب به میانگین ۴۹۰ و ۵۱۰ نانومتر افزایش یافت (شکل ۳b,c). شکل ۴، پراکندگی‌های طول الیاف کوتاه مربوط به شکل ۲ را نشان می‌دهد. الیاف کوتاه تولیدی از محلول پلیمری ۱۳ درصد وزنی دارای طول متوسط یا میانگین ۱۳۰ میکرومتر با یک پراکندگی باریک بودند (شکل ۴a). با افزایش غلظت پلیمر به ۱۴ و ۱۵ درصد وزنی، طول متوسط به ترتیب به ۱۸۰ و ۲۳۰ میکرومتر افزایش یافت و پراکندگی یا توزیع پهن شد (شکل ۴b,c). شکل ۵، طول متوسط نانوالیاف کوتاه تولیدشده در غلظت‌های مختلف پلیمر را نشان می‌دهد و همچنین مورفولوژی‌های آنها را نیز به نمایش می‌گذارد. خط‌ها یا ستون‌های خطا، انحراف معیار داده‌های محاسبه‌شده را نشان می‌دهند. طول متوسط نانوالیاف کوتاه در یک رفتار خطی با غلظت پلیمر افزایش یافت و توانست با افزایش تنها ۲ درصد وزنی در غلظت، دو برابر شود. از آنجایی که محلول‌های پلیمری با غلظت بیشتر، دارای درهم‌رفتگی‌های زنجیر پلیمری متراکم‌تری هستند، جت محلول پلیمری قبل

ولتاژ شتاب‌دهنده ۲۰ کیلوولت روئیت شدند. قطرهای در مرکز و لبه‌های نانوالیاف کوتاه، به منظور تأیید کشش الیاف اندازه‌گیری شدند. عملیات جت محلول پلیمری، با استفاده از دوربین CCD با وضوح ۰/۴ مگاپیکسل، با بزرگنمایی دیجیتال دوبرابر، و درخشندگی ۰/۸ لاکس با روشنایی حداقل (MTV-73x11HN, Mintron Enterprise Co., Ltd) ملاحظه شد. لنزها یا عدسی‌های نوری تک‌چشمی با قطر ۵۰ میلی‌متر، و ضریب بزرگنمایی ۸ (M0850, Specwell) روی دوربین CCD مربوطه، نصب شدند. عکسها با سرعت ۳۰ فریم در ثانیه (fps) گرفته شدند و روی کامپیوتر شخصی بایگانی شدند.

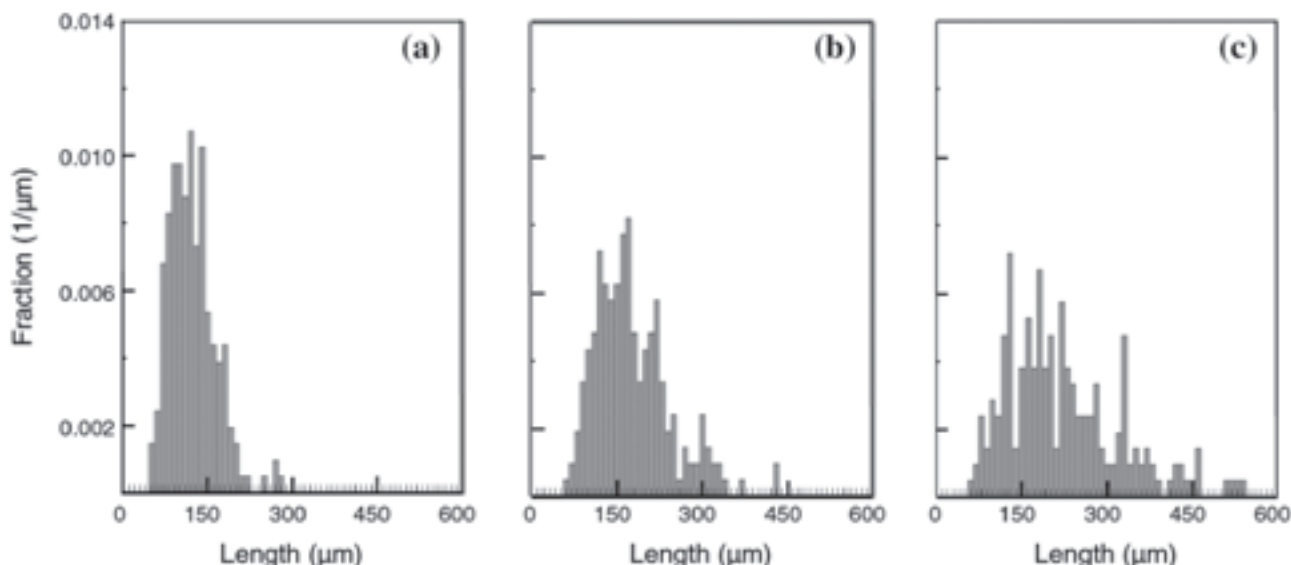
### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- اثر غلظت پلیمر در محلول پلیمری

قطر الیاف کوتاه تولیدی در ولتاژ ۴/۴ کیلوولت و نرخ یا دبی جریان ۰/۳ میکرولیتر بر دقیقه (شکل ۱b)، همچنان برای کاربردهای نانومواد بزرگ بود و باعث ایجاد شکل مُجعد شد. به منظور تعیین شرایط بهینه جهت تولید الیاف کوتاه مستقیم و در اندازه نانو، آزمایشات بیشتری انجام شدند. این آزمایشات نشان دادند که الیاف کوتاه با قطر در حد نانو و شکل مستقیم توانستند توسط افزایش ولتاژ و کاهش نرخ جریان محلول پلیمری تولید شوند. شکل ۲، میکروگراف یا عکس‌های



شکل ۳- توزیع یا پراکندگی قطرهای الیاف کوتاه تولیدشده از محلول‌های پلیمری با غلظت‌های مختلف: (a) ۱۳، (b) ۱۴ و (c) ۱۵ درصد وزنی. ولتاژ ۵/۵ کیلوولت، و نرخ جریان ۰/۱ میکرولیتر بر دقیقه بود.



شکل ۴- پراکندگی طول الیاف کوتاه از محلول‌های پلیمری با غلظت‌های مختلف: (a) ۱۳، (b) ۱۴ و (c) ۱۵ درصد وزنی. ولتاژ ۵/۵ کیلوولت، و نرخ جریان ۰/۱ میکرولیتر بر دقیقه بود.

بدست‌آمده در نرخ جریان ۰/۲، ۰/۰۸، و ۰/۴ میکرولیتر بر دقیقه را نشان می‌دهد. نانوالیاف کوتاه کمی در نرخ جریان ۰/۲ میکرولیتر بر دقیقه مشاهده شدند و طول متوسط نانوالیاف کوتاه ۶۵ میکرومتر بود (شکل ۶a). در نرخ جریان ۰/۰۸ میکرولیتر بر دقیقه، طول متوسط برابر با ۱۲۰ میکرومتر بود و تولید الیاف کوتاه افزایش پیدا کرد (شکل ۶b). با افزایش نرخ جریان تا ۰/۴ میکرولیتر بر دقیقه، طول متوسط ۱۵۰ میکرومتر و تولید الیاف کوتاه با افزایش نرخ جریان، بیشتر افزایش یافت (شکل ۶c). نانوالیاف کوتاه تولیدشده تحت این شرایط، اساساً به شکل مستقیم بودند، اگرچه نرخ جریان به مقدار زیادی تغییر کرده بود.

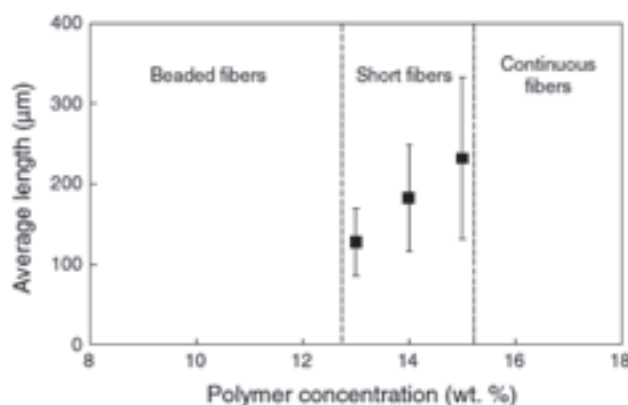
شکل ۷ طول‌های متوسط نانوالیاف کوتاه بدست‌آمده در نرخ‌های جریان در محدوده ۰/۲ تا ۰/۴۸ میکرولیتر بر دقیقه را نشان می‌دهد. در نرخ جریان ۰/۰۱ میکرولیتر بر دقیقه، از آنجایی که محلول روی نوک سوزن به سرعت منجمد شد و به دلیل انتقال کم محلول سوراخ سوزن بسته شد، هیچگونه نانوالیاف کوتاهی نتوانست تولید شود. با افزایش نرخ جریان از ۰/۰۲ به ۰/۰۶ میکرولیتر بر دقیقه، طول متوسط بطور نسبی از ۶۵ به ۱۳۵ میکرومتر افزایش یافت. در محدوده نرخ جریان ۰/۰۷-۰/۴۸ میکرولیتر بر دقیقه، شیب رشد یا افزایش میانگین طول نانوالیاف کوتاه کم بود، و طول نانوالیاف کوتاه در ۰/۴۸ میکرولیتر بر دقیقه تا ۱۷۰ میکرومتر افزایش یافت. بالاتر از نرخ جریان ۰/۵۰ میکرولیتر بر دقیقه، الیاف کوتاه نتوانستند تولید شوند، اما الیاف مداوم توانستند. بنابراین، طول نانوالیاف کوتاه می‌توانست توسط تغییر نرخ جریان کنترل شود و الیاف مستقیم می‌توانستند با بکارگیری ولتاژی به بزرگی ۵/۵ کیلوولت بدست آیند، همانطور که در شکل ۲ دیده می‌شود.

الکتروریسی محلول پلیمری ۱۳ درصد وزنی، در نرخ جریان ۰/۱ میکرولیتر بر دقیقه انجام شد و ولتاژ بتدریج از ۰ تا ۱۲ کیلوولت تغییر داده شد. شکل ۸، عکس‌های میکروسکوپ نوری نانوالیاف کوتاه تولیدشده در ولتاژهای ۴/۵، ۴/۷، و ۷ کیلوولت را به ترتیب نشان می‌دهد. شکل ۹ ارتباط بین طول متوسط و ولتاژ را نمایش می‌دهد. هنگامی که ولتاژ از ۰ به ۴ کیلوولت افزایش داده شد،

از پارگی، به مقدار بیشتری کشیده خواهد شد. هنگامی که نانوالیاف کوتاه تولیدشده در غلظت‌های پلیمر ۱۳، ۱۴ و ۱۵ درصد وزنی، در ولتاژ ۵/۵ کیلوولت و نرخ جریان ۰/۱ میکرولیتر بر دقیقه با یکدیگر مقایسه شدند، محلول پلیمری ۱۳ درصد وزنی، طول کوتاه‌تر و قطر کوچکتر، با پراکندگی طول و قطر بسیار باریک ایجاد کرده بود، همانطور که در شکل ۳ و ۴ دیده می‌شود. با توجه به این نتایج، قابلیت کنترل طول نانوالیاف کوتاه، بیشتر با استفاده از محلول پلیمری ۱۳ درصد وزنی مورد بررسی قرار گرفت.

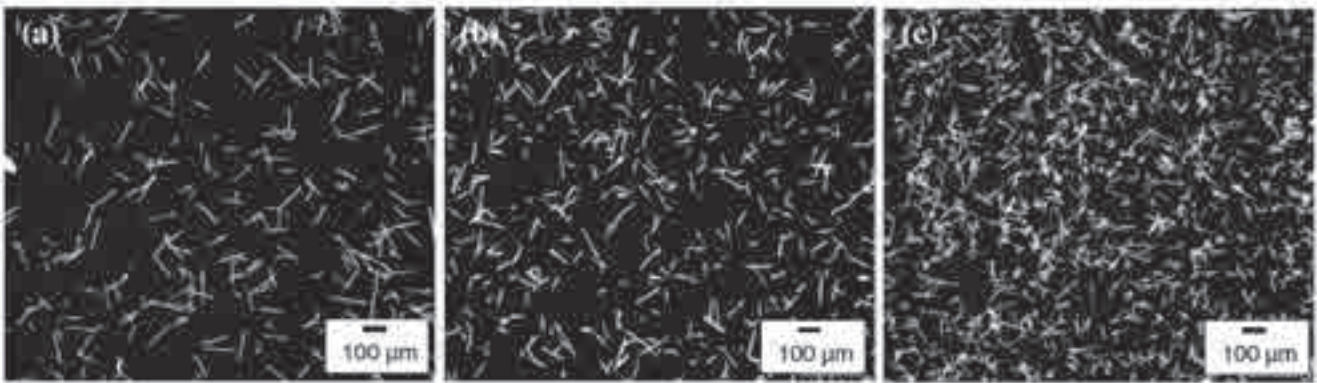
### ۳-۲- اثر نرخ جریان و ولتاژ روی طول نانوالیاف کوتاه

اثر نرخ جریان و ولتاژ روی طول نانوالیاف کوتاه با استفاده از محلول‌های پلیمری با غلظت ۱۳ درصد وزنی بررسی شد. نرخ جریان از ۰/۱۰ تا ۰/۷ میکرولیتر بر دقیقه تغییر داده شد و ولتاژ در ۵/۵ کیلوولت نگاه داشته شد. شکل ۶ عکس‌های میکروسکوپ نوری نانوالیاف



شکل ۵- طول متوسط نانوالیاف کوتاه تولیدشده از محلول‌های پلیمری با غلظت‌های مختلف. ولتاژ ۵/۵ کیلوولت، و نرخ جریان محلول ۱/۰ میکرولیتر بر دقیقه بود. مورفولوژی‌های الیاف تولید شده در شکل نشان داده شده‌اند.





شکل ۶- عکس‌های میکروسکوپی نوری نانوالیاف کوتاه تولیدشده در نرخ‌های جریان مختلف محلول پلیمری: (a)  $0.02$ ، (b)  $0.08$  و (c)  $0.14$  میکرولیتر بر دقیقه. غلظت محلول پلیمری  $13$  درصد وزنی بود و ولتاژ  $5/5$  کیلوولت بود.

الیاف می‌توانست از  $37$  تا  $670$  میکرومتر تغییر کند (شکل ۸ و ۹). هر چند قطر الیاف تولیدشده توسط کاربرد ولتاژ کم، با اینکه الیاف کوتاه در طول بلندتر بودند، بزرگ بود و شکل الیاف مجعد بود. هنگامی که ولتاژ افزایش یافت، نانوالیاف کوتاه مسقیم‌تر توانستند تولید شوند.

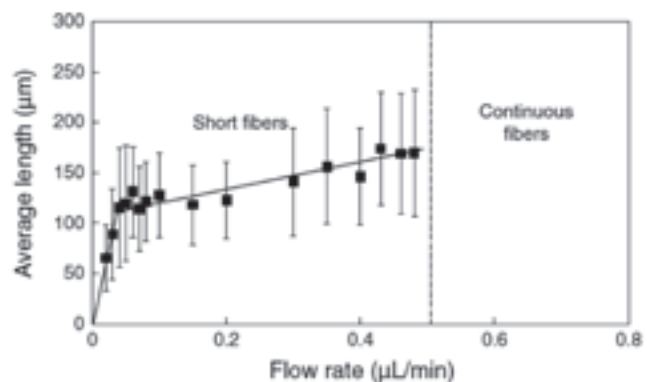
### ۳-۳- مکانیزم تشکیل نانوالیاف کوتاه

مکانیزم تولید برای نانوالیاف کوتاه، بر پایه مشاهده و معاینه نانوالیاف کوتاه و همچنین شرایط الکتروریسی در اینجا بحث شده است. شکل ۱۰، مورفولوژی نانوالیاف کوتاه نمونه تولیدشده در نرخ جریان  $0.1$  میکرولیتر بر دقیقه با ولتاژ  $5/5$  کیلوولت را نشان می‌دهد. شکل، مرکز را (شکل  $10b$ ) با انتهای (شکل  $10c, d$ ) نانوالیاف کوتاه مقایسه می‌کند. قطر دو انتهای نانوالیاف کوتاه، باریکتر از قطر قسمت مرکزی بود. این امر نشان می‌دهد که لیف بطور موضعی کشیده شده بود و به همین دلیل منجر به باریکتر شدن قطر لیف و گسیختگی آن شده بود. این امر به دلیل نیروی دافعه بارهای سطحی و نیروی طولی (در راستای طول) بواسطه میدان الکتریکی خارجی بود.

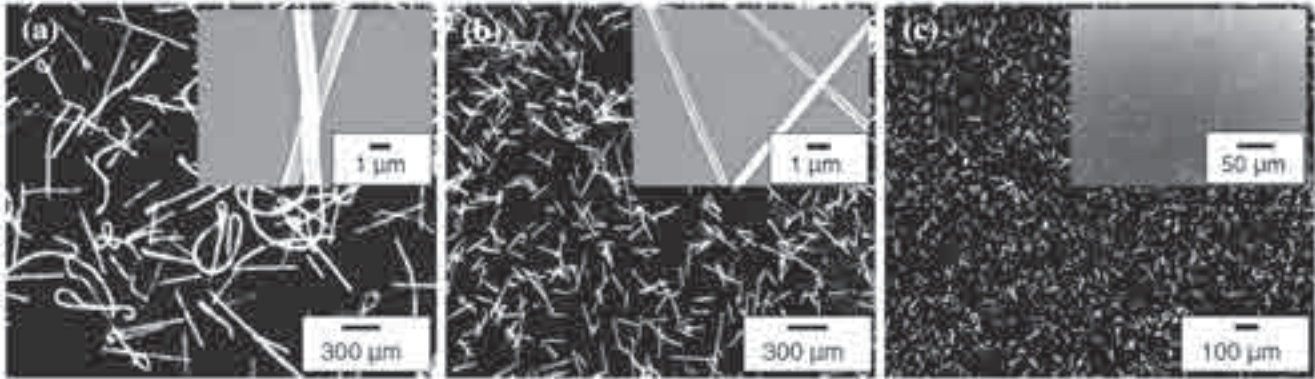
شرایط جت محلول پلیمری خارج‌شده از نوک سوزن، برای تعیین نقطه‌ای که در آن الیاف گسیخته می‌شوند، تحت ملاحظه قرار گرفت. شکل ۱۱ شرایط جتهای محلول پلیمری را به غلظتهای پلیمری  $9$  و  $13$  درصد وزنی نشان می‌دهد، که در آنها به ترتیب الیاف دارای بید و نانوالیاف کوتاه تولید شدند. در حین تولید الیاف مداوم، جت محلول پلیمری بطور کلی تا فاصله مشخصی مسیر مستقیم خود را حفظ کرد و سپس ریسندگی و مسیر پیچیده‌تری را اتخاذ کرد. هر چند، جتهای محلول پلیمری در غلظتهای پلیمری  $9$  و  $13$  درصد وزنی، دارای قسمتهای مستقیم با طول تقریباً  $2$  میلی‌متر بودند، و سپس به ترتیب به زوایای  $37$  و  $15$  درجه پخش یا پراکنده شدند. پراکندگی یا پخش، به دلیل پخشانی یا اختلال عرضی ناشی از نیروهای دافعه بین بارهای سطحی جت محلول پلیمری القای الکتریکی شده بود. این امر بایستی ویژگی تولید نانوالیاف کوتاه باشد که منجر به گسیختگی الیاف می‌شود. اختلاف در زوایای پخش برای این دو شرایط، ناشی از ویسکوزیته محلول پلیمری بود که به نوبه خود ناشی از اختلافات در غلظت پلیمر بود. هنگامی که غلظت پلیمر  $9$  درصد وزنی بود، زاویه پخش جت محلول پلیمری، به دلیل ویسکوزیته کم پهن بود و به دلیل کمبود الاستیسیته یا کشسانی در جت محلول پلیمری، بیدها یا برجستگی‌هایی

جت محلول پلیمری نتوانست توسط میدان الکتریکی کشیده شود، و بنابراین الیاف نتوانستند تولید شوند. در ولتاژ  $4/5$  کیلوولت، الیاف گسسته بلندی با طول متوسط  $670$  میکرومتر، توانستند بوجود آیند (شکل  $8a$ ). قطر متوسط نانوالیاف کوتاه  $750$  نانومتر بود، و الیاف دارای شکل مجعدی بودند که ناشی از نیروی کششی ضعیف بواسطه ولتاژ کاربردی بود. هنگامی که ولتاژ تا  $4/7$  کیلوولت افزایش یافت، نانوالیاف کوتاه توانستند با قطر  $380$  نانومتر تولید شوند و طول متوسط نانوالیاف کوتاه به سرعت به  $250$  میکرومتر کاهش یافت (شکل  $8b$ ). با تغییر دادن ولتاژ از  $4/9$  تا  $5/5$  کیلوولت، دامنه تغییرات طول متوسط نانوالیاف کوتاه از  $170$  تا  $127$  میکرومتر بود. طول نانوالیاف کوتاه، در ولتاژ  $6$  تا  $8/5$  کیلوولت، تقریباً ثابت بود. طول متوسط نانوالیاف کوتاه تولیدشده در ولتاژ  $7$  کیلوولت،  $40$  میکرومتر با شکل مستقیم بود (شکل  $8c$ ). بالاتر از ولتاژ  $8/5$  کیلوولت، به دلیل عدم تعادل بین الیاف کشیده توسط میدان الکتریکی قوی و نرخ جریان کم، امکان ایجاد الیاف وجود نداشت.

در نتیجه، اینگونه تأیید شد که غلظت پلیمر در محلول، مهم‌ترین عامل در تولید نانوالیاف کوتاه بود. نانوالیاف کوتاه توانستند با استفاده از محلول پلیمری  $13$  تا  $15$  درصد وزنی تولید شوند. با استفاده از محلول پلیمری  $13$  درصد وزنی، طول نانوالیاف، می‌توانست در محدوده  $65$  تا  $170$  میکرومتر، توسط تغییر نرخ جریان محلول پلیمری کنترل شود (شکل  $6$  و  $7$ )، درحالی‌که با تغییر ولتاژ کاربردی، طول



شکل ۷- طول متوسط نانوالیاف کوتاه در نرخ‌های جریان مختلف. غلظت پلیمر  $13$  درصد وزنی و ولتاژ  $5/5$  کیلوولت بود. مورفولوژی‌های الیاف برای هر محدوده، در شکل شرح داده شده است.



شکل ۸- عکسهای میکروسکوپی نوری نانوالیاف کوتاه در ولتاژهای مختلف: (a) ۴/۵، (b) ۴/۷، (c) ۷ کیلوولت. نرخ جریان ۰/۱ میکرولیتر و غلظت پلیمر ۱۳ درصد وزنی بود.

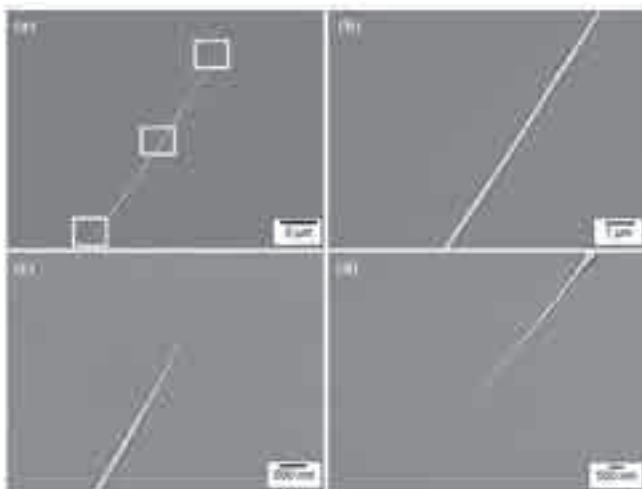
کنشش متقابل مولکول‌های پلیمری و برهم کنش حلال-پلیمر در جت محلول پلیمر بود. غلظت بالای پلیمر می‌توانست کنشش متقابل مولکول‌های پلیمر، و بنابراین استحکام کششی را افزایش دهد، درحالی‌که انتخاب حلال با کنشش سطحی کم می‌توانست استحکام کششی را کاهش دهد.  $\Delta F$  نیرو در جهت طول به دلیل ولتاژ کاربردی می‌باشد.  $F_L$  نیرو به دلیل نیروی دافعه ( $F_R$ ) بین بارهای سطحی یکسان است که ایجاد اختلال یا پریشانی عرضی می‌کند. زاویه  $\theta$ ، از محور جت محاسبه می‌شود. جت محلول پلیمری در مسیر عبوری مستقیم بعد از خروج از سوزن، دارای یک قطر ضخیم با شکلی مستقیم یا راست بود و در یک مسیر تکی جریان داشت.  $\Delta F$  مربوط به ولتاژ کاربردی و نیروی دافعه ( $F_R$ ) بارهای سطحی روی جت محلول پلیمری، جت مورد نظر را می‌کشند و آن را به سمت جلو می‌برند (شکل ۱۲a). در مسیر مستقیم تنها قبل از اینکه جت پخش شود، به دلیل اینکه دارای قطر ضخیمی می‌باشد و  $\Delta F$  و نیروی دافعه بارهای سطحی ( $F_R$ ) برای گسستن جت محلول پلیمری ناکافی می‌باشند ( $F_L < F_R + \Delta F$ )، جت محلول پلیمری نمیتواند گسسته شود. به محض اینکه جت محلول پلیمری بیشتر به جلو حرکت می‌کند، قطر آن

روی الیاف تشکیل شدند. هنگامی که غلظت پلیمر ۱۳ درصد وزنی بود، با اینکه زاویه پخش محلول پلیمری، به دلیل ویسکوزیته بالاتر نسبتاً باریک بود، محلول بواسطه نیروی طولی میدان الکتریکی خارجی باز هم گسسته شد. هرچند، جابه‌جایی یا حرکت محلول پلیمری در جت محلول مشکل بود، که منجر به نانوالیاف کوتاه با دو انتهای کشیده‌شده شد، بطوری که در شکل ۱۰ دیده می‌شود.

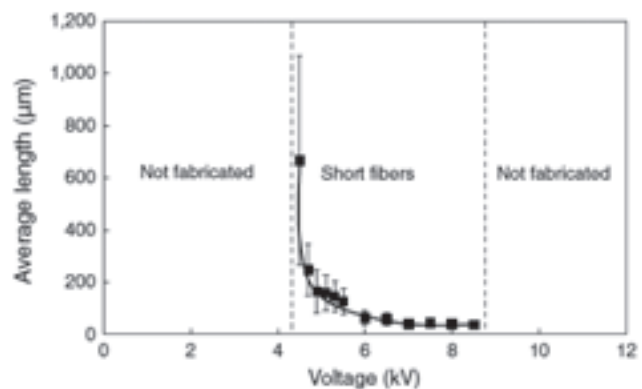
بر اساس مشاهده و بررسی نانوالیاف کوتاه (شکل ۱۰)، و بر پایه شرایط جت محلول پلیمری از نوک سوزن (شکل ۱۱) و گزارشات نظری، عامل اصلی که منجر به تولید نانوالیاف کوتاه می‌شود، تعادل یا توازن بین استحکام کششی محلول پلیمری، نیروی طولی، و اختلال یا پریشانی عرضی بار سطحی روی جت محلول پلیمری بود. شکل ۱۲ مکانیزم تولید نانوالیاف کوتاه و دیگرام نیرو در مسیر مستقیم بعد از خروج محلول و در نقطه پارگی یا گسستگی را نشان می‌دهد. رابطه ۱ این عوامل را تحت شرایط تعادل روی مساحت سطح مقطع جت محلول پلیمری شرح می‌دهد:

$$\text{رابطه (۱)}$$

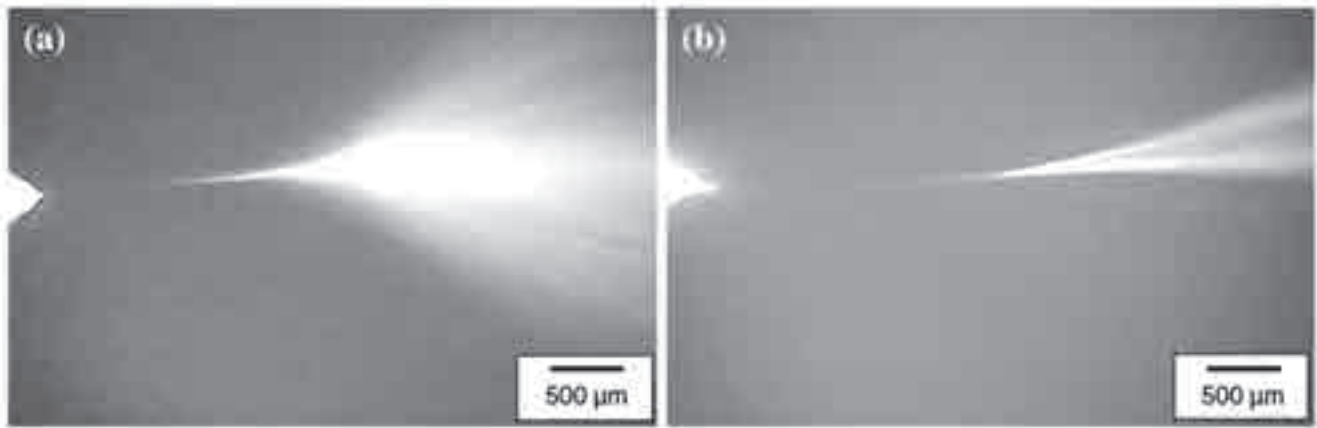
بطوریکه  $F_L$  نشان‌دهنده استحکام کششی، نیروی بیشینه‌ای است که جت محلول پلیمری می‌تواند هنگام کنشش، قبل از پارگی تحمل کند. این نیرو تحت تأثیر



شکل ۱۰- نانوالیاف کوتاه نمونه تولیدشده از محلول پلیمری ۱۳ درصد وزنی: (a) یک نانوالیاف کوتاه؛ (b) قسمت مرکزی؛ (c) قسمت انتهایی بالایی؛ (d) قسمت انتهایی پایینی. ولتاژ ۵/۵ کیلوولت، و نرخ جریان ۰/۱ میکرولیتر بر دقیقه بود.



شکل ۹- مورفولوژی‌ها و طول‌های میانگین الیاف در ولتاژهای مختلف و نرخ جریان ۰/۱ میکرولیتر بر دقیقه برای محلول‌های پلیمری ۱۳ درصد وزنی.



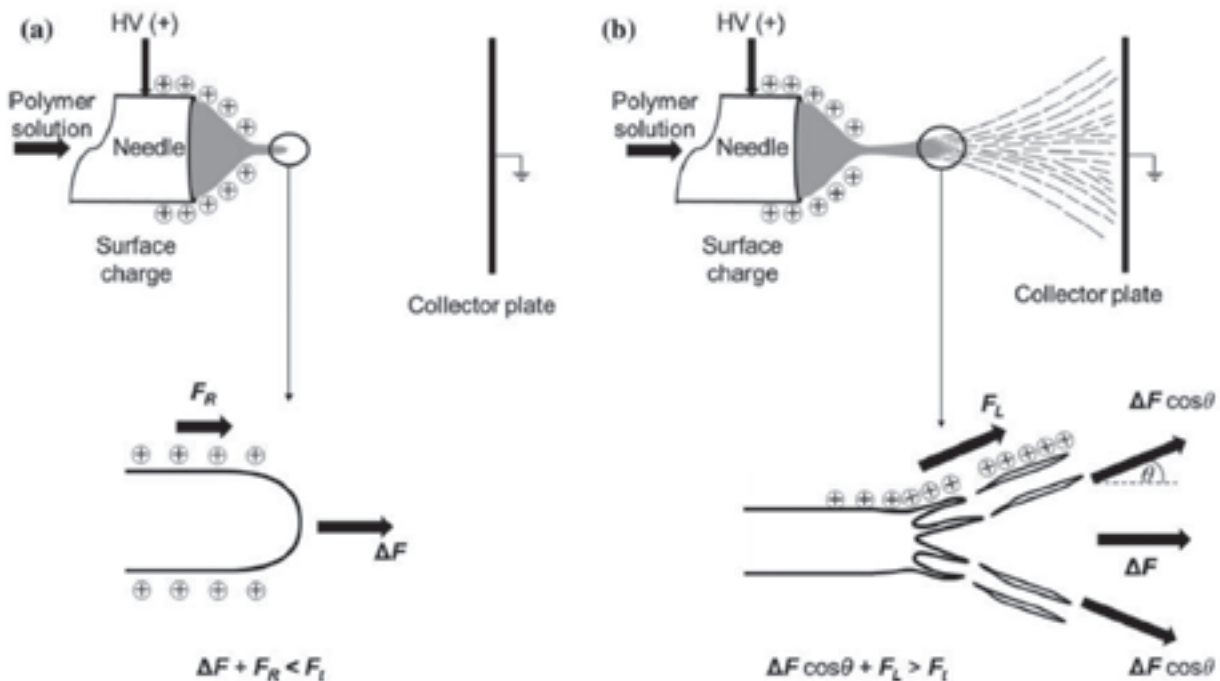
شکل ۱۱- جت‌های محلول پلیمری خارج شده از نوک سوزن: (a) غلظت پلیمری ۹ درصد وزنی (الیاف دارای بید تولید شدند)؛ (b) غلظت پلیمری ۱۳ درصد وزنی (نانوالیاف کوتاه تولید شدند). ولتاژ ۵/۵ کیلوولت، و نرخ جریان ۰/۳ میکروآمپر بود.

پلیمر در محلول، که از ۱۳ تا ۱۵ درصد محدوده‌بندی شده بود، مهمترین عامل در تولید نانوالیاف کوتاه بود. طول نانوالیاف کوتاه می‌توانست بر حسب نرخ جریان محلول و ولتاژ کاربردی تغییر کند. طول با نرخ جریان محلول افزایش یافت و با افزایش در ولتاژ کاربردی کاهش یافت، که منجر به این شد که طول نانوالیاف کوتاه می‌توانست در ۳۷ تا ۶۷۰ میکرومتر کنترل شود. انتهای نانوالیاف کوتاه بواسطه کشش باریکتر شده بود. ملاحظه و بررسی جت محلول پلیمری که از سر سوزن خارج شده بود، نشان داد که جت در مسیر مستقیم عبور می‌کرد، سپس به دلیل اختلالات عرضی روی سطح آن پراکنده می‌شد. گسستگی یا پارگی الیاف به نانوالیاف کوتاه، به دلیل نیروی دافعه بواسطه بارهای سطحی و نیروی طولی بواسطه ولتاژ کاربردی رخ داد، که بزرگتر از استحکام کششی جت محلول پلیمری بودند.

باریکتر شده، و افزایش در دانسیته بارهای سطحی منجر به افزایش در نیروی دافعه ( $F_R$ ) می‌شود. افزایش سریع در  $F_R$ ، ایجاد اختلال عرضی ( $F_L$ ) می‌کند، که جت محلول پلیمری را پخش می‌کند. بنابراین، نانوالیاف کوتاه توسط پارگی یا گسستگی الیاف به دلیل نیروی برابری  $F_L$  و  $\Delta F \cos \theta$  که بزرگتر از استحکام کششی جت محلول پلیمری هستند ( $\Delta F \cos \theta + F_L > F_t$ )، بوجود می‌آیند (شکل ۱۲b).

#### ۴- نتیجه‌گیری

تولید یک مرحله‌ای نانوالیاف کوتاه توسط الکترووریسی بررسی شد. درون یک سرنگ از محلول پلیمری پر شده، و سپس توسط کاربرد ولتاژ بالا تزریق شد. اثر غلظت محلول پلیمری، ولتاژ کاربردی، و نرخ جریان محلول پلیمری جهت تأثیر آنها روی تولید نانوالیاف کوتاه بررسی شد و نتایج ذیل بدست آمدند. غلظت



شکل ۱۲- دیاگرام مربوط به نیروی جت محلول پلیمری: (a) عبور مستقیم بعد از خروج؛ (b) در نقطه پارگی یا گسستن.