

## تولید پوشش متخلخل از الیاف پلی وینیل پیرولیدون به روش الکترورسی با اثر القای فارادی

رضا رسولی<sup>۱\*</sup>، سیده فرناز موسوی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

<sup>۲</sup>دانشکده فیزیک، دانشگاه آزاد واحد تهران مرکز، تهران، ایران

### چکیده

الکترورسی روش سریع، ساده و کارآمد در تولید الیاف به‌شمار می‌رود. در این مقاله، نتایج حاصل از الکترورسی فیبرهایی از پلیمر نارسای پلی وینیل پیرولیدون حلال اتانول در حضور میدان مغناطیسی متغیر ارائه می‌گردد. با بررسی نمونه‌ها مشخص شد اعمال میدان مغناطیسی متغیر در حین ساخت فیبر موجب پیچیده شدن آن‌ها، می‌شود درحالی‌که در غیاب میدان الیاف با ساختاری تصادفی و غیر مارپیچ شکل می‌گیرند. بررسی میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد اعمال میدان مغناطیسی متغیر موجب یک شکل شدن و پایداری فیبرهای رسیده شده می‌گردد. همچنین نتایج نشان داد که قطر این فیبرها و نیز پیچش فیبرها تابعی از شدت و فرکانس تغییر میدان مغناطیسی هستند.

**کلیدواژگان:** الیاف، الکترورسی، میدان مغناطیسی

### مقدمه

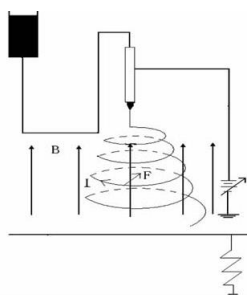
این رشته در اثر میدان الکتریکی شتاب گرفته و روی صفحه جمع کننده رسانا جمع می‌گردد [۷]. پوشش‌های متخلخل بر پایه فیبرها نقش مؤثری در فناوری نانو به‌منظور افزایش بازدهی ادوات نانو در کاتالیزورها، جاذب‌ها و حسگرها دارند [۵-۳]. این پوشش‌ها در ساخت غشاها به‌منظور جداسازی محلول‌ها و مخلوط‌های گازی و مهندسی بافت به‌عنوان داربست مصنوعی برای رشد بافت مورد استفاده قرار می‌گیرند [۶ و ۷]. همچنین این پوشش‌ها در ساخت محافظ‌های جامد برای کاتالیست‌ها، حسگرهای گازی، ماتریس‌های محافظ الکتروود در باتری‌های لیتیومی و نیز الگوی ساخت نانومواد توخالی به‌کار می‌رود [۸ و ۹]. با شکل دهی فیبرهای حاصل از الکترورسی می‌توان پوشش‌های متخلخل تری ایجاد نمود. با اعمال نیروهای الکتریکی و مغناطیسی

فیبرها کاربردهای گسترده‌ای در پوشش‌های محافظتی [۱]، نانو الکترونیک [۲]، ساخت نانو کاتالیزورها [۳]، خازن‌ها [۴] و فیلترها [۵] دارند. الکترورسی روش سریع، ساده و کارآمد برای تولید الیاف در محدوده میکرون تا نانومتر است [۶]. در این روش به‌کمک نیروی الکتروستاتیک، فیبرهایی از محلول پلیمر یا پلیمر مذاب رسیده می‌شود. برای این منظور ولتاژی از مرتبه چند کیلو ولت به قطره‌ای از محلول پلیمر در نوک نازل اعمال می‌شود. در اثر یونیزاسیون مولکولی و باردار شدن پلیمر در نوک نازل، مخروط تیلور شکل می‌گیرد و رشته‌ای از محلول خارج می‌شود.

\*نویسنده مسئول: r\_rasuli@znu.ac.ir

تعیین دامنه پایداری فرآیندی ارائه کردند که در آن قطر فیبر الکتروریسی شده را می‌توان توسط جریان محلول پلیمری و ولتاژ اعمال شده کنترل کرد [۱۴].

در این مقاله، رهیافت جدیدی بر پایه اثر القای فارادی به‌منظور شکل دهی فیبرهای ریسیده شده ارائه می‌گردد. بدین منظور فیبرها در حضور میدان الکتریکی گردابی ناشی از میدان مغناطیسی متغیر با زمان به محلول پلیمر نارسانای PVP<sup>۳</sup>-اتانول ریسیده شد. نتایج نشان داد ضمن متخلخل شدن فیبرها، قطر الیاف با اعمال میدان گردابی کاهش یافته و آرایش مارپیچی از فیبرها شکل می‌گیرد.



شکل ۱. تأثیر میدان مغناطیسی ثابت بر الکتروریسی.

### مواد و روش‌ها

محلول مورد نیاز برای الکتروریسی از حل کردن پودر پلیمر PVP با وزن مولکولی ۴۰۰۰۰ گرم بر مول (از شرکت Sigma-Aldrich) در اتانول تهیه شد. محلول PVP پنج درصد وزنی (۵% wt.) در دمای اتاق به مدت ۹۰ دقیقه هم‌زده شد تا محلول همگنی به دست آید. محلول پلیمر حاصل در نازلی با ظرفیت ۱ ml و قطر سوزن اندازه ۳۰ قرار گرفت. به‌منظور انجام الکتروریسی، نوک نازل به منبع تغذیه ولتاژ بالا و ولتاژ

می‌توان تخلخل پوشش‌های حاصل از الکتروریسی را افزایش داد. گزارش شده است که الکتروریسی در میدان مغناطیسی ثابت، مطابق شکل ۱، نیروی  $d\vec{F}$  که بر واحد طول  $d\vec{l}$  وارد می‌شود از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$d\vec{F} = Id\vec{l} \times \vec{B}$$

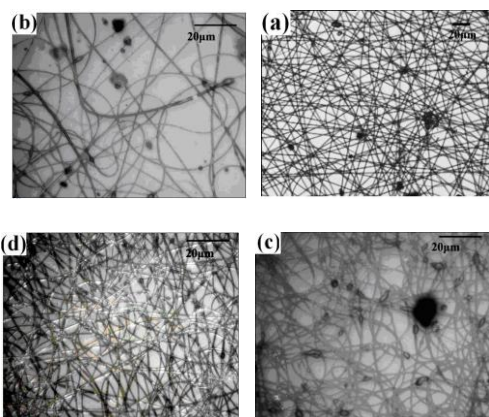
در رابطه فوق  $I$  جریان برقرار شده در نوک نازل و  $B$  شدت میدان مغناطیسی است. این نیرو به‌همراه سایر نیروها سبب کاهش ناپایداری‌های رشته پلیمری می‌شود [۱۰-۱۲]؛ از این نیرو می‌توان فیبرهای حاصل را شکل داده و پوشش‌هایی با تخلخل کنترل شده‌تر تولید نمود. همچنین می‌توان با اعمال همزمان نیروی مغناطیسی و الکتریکی شکل ریسیده شدن فیبرها را کنترل کرد. بدین منظور می‌توان از میدان مغناطیسی وابسته به‌زمان استفاده کرد. میدان متغیر با زمان طبق قوانین ماکسول می‌تواند میدان الکتریکی گردابی ایجاد کند. این میدان الکتریکی نقش مؤثری در شکل دهی فیبرهای ریسیده شده خواهد داشت. خو<sup>۱</sup> و همکاران برای توصیف باریکه الکتروریسی شده مغناطیسی از مدل رنکر<sup>۲</sup> استفاده کرده‌اند. آن‌ها باریکه را شبیه سیستمی از دانه‌های دارای بار  $e$  و جرم  $m$  که توسط مواد ویسکوالاستیک به‌هم متصل شده‌اند، در نظر گرفتند و مشاهده کردند که دامنه نوسانات با میدان مغناطیسی، کمتر از حالت بدون میدان مغناطیسی است و با افزایش جریان القایی قطر باریکه‌ها کاهش می‌یابد [۱۳]. در پژوهشی دیگر کراماریوک و همکاران به‌منظور افزایش کنترل قطر فیبرها روشی را برای

<sup>1</sup> Xu

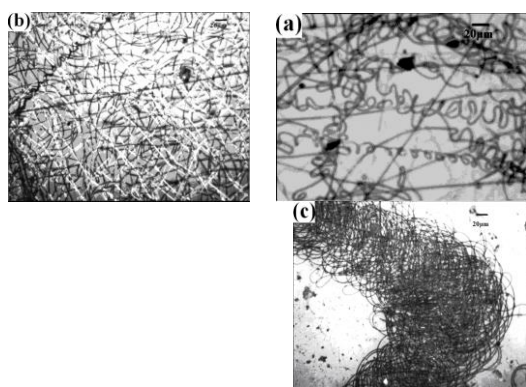
<sup>2</sup> Renker

<sup>3</sup> Poly Vinyl Pyrrolidone

تصادفی و غیر مارپیچ هستند. این در حالی است که در شکل‌های ۳(b) تا ۳(d) با افزایش جریان مؤثر تولید کننده میدان مغناطیسی پیچ خوردگی فیبرها افزایش یافته و پوشش حاصل بیشتر متخلخل می‌شود. جریان مستقیم یک آمپر با چیدمان آزمایش میدان مغناطیسی در حدود ۲۶۰ میلی‌تسلا تولید می‌کند.

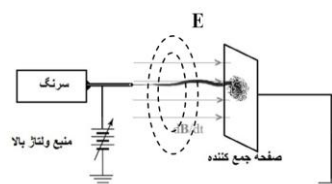


شکل ۳. تصاویر میکروسکوپ نوری نمونه‌های آماده شده از محلول ۵٪ wt. در ولتاژ ۱۶ kV و فاصله بین نازل و جمع کننده ۱۰cm، در میدان مغناطیسی متغیر با فرکانس ۵۰ Hz و جریان مؤثر (a) صفر (b) ۰٫۷۵ A (c) ۱A، و (d) ۱٫۲۵ A.



شکل ۴. تصاویر میکروسکوپ نوری نمونه‌های آماده شده در ولتاژ ۱۲kV و فاصله نازل تا جمع کننده ۱۰ cm جریان ۱ A و فرکانس‌های مختلف (a) ۱۰ Hz، (b) ۵۰ Hz، (c) ۱۰۰Hz.

مستقیم حدود ۱۰ kV متصل شد. صفحه جمع کننده‌ای از جنس لامل شیشه به همراه فویل آلومینیومی در فاصله ۱۰ cm از نازل قرار داده شد. به منظور ایجاد میدان الکتریکی گردابی، سیم پیچی با تعداد دور ۵۰۰ با جریان متناوب مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۲). فیبرهای رسیده شده با استفاده از میکروسکوپ نوری از شرکت الیمپوس و میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل Mira 3-XMU مورد مطالعه قرار گرفت.



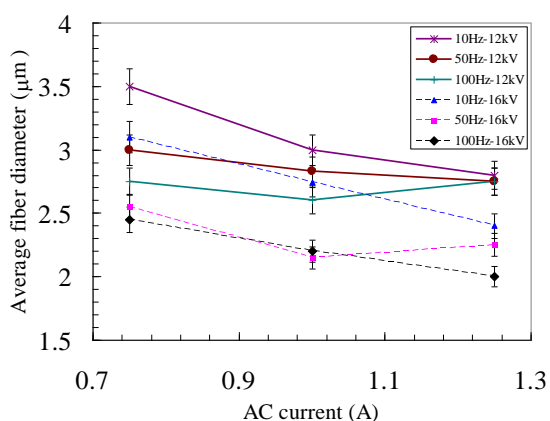
شکل ۲. چیدمان الکترونیسی در حضور میدان مغناطیسی متغیر، خط چین‌ها میدان الکتریکی گردابی را نشان می‌دهد.

## بحث و نتایج

میکروسکوپ نوری ابزاری کم هزینه و غیر مخرب در مطالعه شکل و آرایش فیبرهای پلیمری است. از آنجا که ضخامت تقریبی الیاف تولید شده به روش الکترونیسی در محدوده میکرو تا نانومتر است، میکروسکوپ‌هایی با بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر نیز برای مطالعه شکل و آرایش فیبرها مناسب هستند. به منظور مطالعه اثر فارادی بر فیبرهای رسیده شده، تصاویر متعددی از نمونه‌ها در شدت میدان‌های مغناطیسی و فرکانس‌های مختلف گرفته شد. شکل ۳ نمونه‌ای از تصاویر گرفته شده را در دامنه‌های مختلف جریان تولید کننده میدان مغناطیسی نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ۳(a) نشان داده شده است فیبرهای رسیده شده بدون میدان مغناطیسی متغیر به صورت

نرم افزار ImageJ تعیین گردید. قطر فیبرها در نمودار شکل ۵ آمده است. همانگونه که ملاحظه می شود با افزایش شدت میدان مغناطیسی متغیر میانگین قطر فیبرها کاهش می یابد. این نتایج در توافق با پیش بینی های نظری است [۱۳].

شکل ۶(a) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه های رسیده شده در حضور میدان مغناطیسی متغیر و شکل ۶(b) بدون میدان مغناطیسی را نشان می دهد. همانگونه که ملاحظه می گردد فیبرهای رسیده شده بدون میدان مغناطیسی از پایداری نسبی کمتری برخوردارند و این مطلب از اعوجاج لبه فیبرها به وضوح مشخص است. مقایسه شکل های ۶(a) و ۶(b) نشان می دهد که حضور میدان مغناطیسی موجب پایداری جت پلیمر و در نهایت رسیده شدن فیبرها با قطر یکنواخت می شود. این در توافق با مطالعات قبلی است [۱۳].



شکل ۵. تغییرات قطر برحسب جریان متغیر در فاصله ثابت ۱۰ cm برای محلول ۰.۵%wt. نقاط متصل شده با خط و نقطه چین به ترتیب فیبرهای الکترورسی شده در ولتاژ ۱۶ kV و ۱۲ kV هستند.

شکل ۴ تصاویر گرفته شده از نمونه های رسیده شده در میدان مغناطیسی متغیر با فرکانس های ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ هرتز را نشان می دهد. طبق اثر القای فارادی اعمال میدان مغناطیسی متغیر سبب ایجاد میدان الکتریکی گردابی می شود و شدت این میدان گردابی با بیشتر شدن فرکانس افزایش می یابد. هنگامی که باریکه باردار از محلول در میدان الکتریکی برآیند میدان الکترورسی و این میدان قرار می گیرد در امتداد آن کشیده شده و حلقه های مارپیچی شکل می گیرد. به این ترتیب حرکت های تصادفی باریکه پلیمری کنترل شده و حالت فر مانند به خود می گیرد (شکل ۴(a) و ۴(b)). به این ترتیب در مقیاس نشان داده شده محدوده جمع شدن فیبرها محدود شده و مانند شکل ۴(c) می شود.

میدان مغناطیسی متغیر به سه صورت بر شکل فیبرها در حین رسیدن اثر می گذارد. اولین اثر میدان مغناطیسی متغیر در شکل دهی مارپیچ های فیبر است. نتایج نشان می دهند که در مقیاس نشان داده شده در شکل ۴ در غیاب میدان مغناطیسی متغیر فیبرها اغلب به صورت خطوط مستقیم شکل تولید می شوند در حالی که با اعمال میدان مغناطیسی متغیر، فیبرها شکل مارپیچ به خود می گیرند. نتایج نشان داد که افزایش فرکانس میدان مغناطیسی موجب کاهش شعاع انحنای مارپیچ ها شده و در فرکانس های بالاتر از ۵۰۰ هرتز تقریباً تأثیری بر فیبرها ندارد. دوم اینکه میدان های گردابی موجب کاهش قطر فیبرها می شوند. به این منظور قطر فیبرهای رسیده شده با استفاده از پردازش تصویر میکروسکوپ نوری نمونه ها به کمک

[2] S. Ramakrishna, K. Fujihara, W.E. Teo, T.C. Lim, Z. Ma, An introduction to electrospinning and nanofibres. World Scientific Singapore (2005).

[3] Y.K. Wang, T. Yong, S. Ramakrishna, Nanofibres and their influence on cells for tissue regeneration, *Australian Journal of Chemistry* 58 (2005) 704-712.

[4] Z. Fang, Y. Changzhou, Z. Jiajia, W. Jie, Z. Xiaogang, L. Xiong Wen David, Flexible Films Derived from Electrospun Carbon Nanofibers Incorporated with  $\text{Co}_3\text{O}_4$  Hollow Nanoparticles as Self-Supported Electrodes for Electrochemical Capacitors, *Advanced Functional Materials* 23 (2013) 3909-3915.

[5] M.G. Hajra, K. Mehta, G.G. Chase, Effects of humidity, temperature, and nanofibers on drop coalescence in glass fiber media, *Separation and Urification Technology* 30 (2003) 79-88.

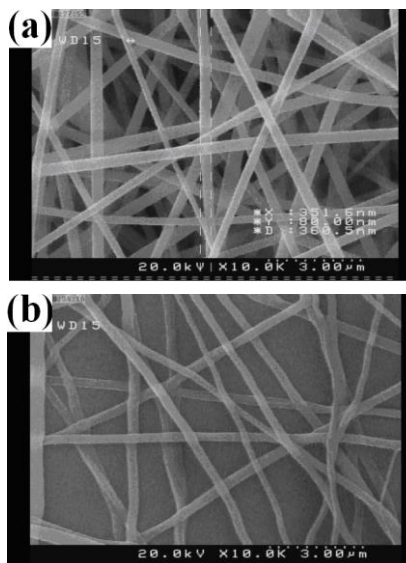
[6] D. Li, Y. Xia, "Electrospinning of nanofibers: reinventing the wheel?" *Advanced Materials*, 16 (2004) 1151-1170.

[7] Z.M. Huang, Y.Z. Zhang, M. Kotaki, S. Ramakrishna, A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in anocomposites, *Composites Science and Technology* 63 (2003) 2223-2253.

[8] S. Virji, J. Huang, R.B. Kaner, B.H. Weiller, Polyaniline nanofiber gas sensors: examination of response mechanism, *Nano Letter* 4 (2004) 491-496.

[9] L. Wang, Y. Yu, P.C. Chen, D.W. Zhang, C.H. Chen, Electrospinning synthesis of  $\text{C}/\text{Fe}_3\text{O}_4$  composite nanofibers and their application for high performance lithium-ion batteries, *Journal of Power Sources* 183 (2008) 717-723.

[10] Y. Liu, X. Zhang, Y. Xia, and H. Yang, Magnetic-Field-Assisted electrospinning of Aligned Straight and Wavy Polymeric Nanofibers, *Advanced Materials* 22 (2010) 2454-2457.



شکل ۶. تصاویر SEM به‌دست آمده از نمونه در ولتاژ ۱۶ kV و فاصله ۱۰ cm و (a) جریان ۱/۲۵ A و فرکانس ۱۰۰ Hz و (b) بدون میدان مغناطیسی متغیر.

## نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از اعمال میدان مغناطیسی متغیر به فرآیند الکتروریسی پلیمر نارسانای پلی وینیل پیرولیدون حل شده در اتانول ارائه گردید. مشاهده شد بدون اعمال میدان مغناطیسی متغیر، فیبرهای تصادفی با شعاع انحنا بیش از ۱۰۰ میکرومتر، با پایداری کمتر تولید می‌گردد. با بررسی ریخت فیبرها مشاهده شد که با افزایش شدت جریان عامل میدان مغناطیسی متغیر در الکتروریسی، قطر فیبرها و همچنین شعاع انحنا مارپیچ‌ها کاهش می‌یابد.

## مرجع‌ها

[1] D. Hussain, F. Loyal, A. Greiner, J.H. Wendorff, Structure property correlations for electrospun nanofiber nonwovens, *Polymer* 51 (2010) 3989-3997.

[11] H. Wi, R. Zhang, X. Liu, D. Lin, and W. Pan, Electrospinning of Fe,Co, and Ni Nanofibers: Synthesis, Assembly, and Magnetic Properties, *Chemistry of materials* 19 (2007) 3506-3511.

[12] Y. Wu, J.Y. Yu, J.H. He, Y.Q. Wan, Controlling stability of the electrospun fiber by magnetic field, *Chaos Solitons Fractals* 32 (2007) 5-7.

[13] L. Xua, Y. Wu, Y. Nawaz, Numerical study of magnetic electrospinning processes, *Computers & Mathematics with Applications* 61 (2011) 2116-2119.

[14] B. Cramariuc, R. Cramariuc, R. Scarlet, L.R. Manea, I.G. Lupu, O. Cramariuc, Fiber diameter in electrospinning process, *Journal Electrostatics* 71 (2013) 189-198.