مجله علوم و فناوری نساجی
سال سوم، شماره ۱، شماره پیاپی ۶
صفحه ۲۲-۱۷، ۱۳۹۲
ISSN: ۲۱۵۱-۷۱۶۲

# تولید کامپوزیت‌های نانوالیاف پلی‌آمید-نقره پوسته مغزی

## Fabrication of Core-Shell Polyamide/Silver Nanofibers Composites

امیر بهرام قراگوزلو بهرامی، رامین خواجوی*، لاله ملک‌نیا

تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، دانشکده فنی و مهندسی واحد تهران جنوب، گروه مهندسی نساجی، صندوق پستی ۱۳۶۵۱-۱۷۷۷۶

تاریخ دریافت: ۹۱/۱۲/۰۹ تاریخ پذیرش: ۹۲/۰۲/۲۵

## چکیده

در این پژوهش، نانوالیاف پلی‌آمیدی (نایلون ۶) پوسته مغزی با پوسته غنی از نانوذرات نقره تولید شده است. هدف این پژوهش، دستیابی به الیاف با خواص ضدمیکروبی یکسان حاوی مقادیر کمتر نانوذرات نقره و نیز بهبود خاصیت ضدمیکروبی بوده است. برای تولید این الیاف از دستگاه الکتروریسی دوجزئی هم‌محور استفاده شد. محلول ریسندگی پوسته و مغزی از حل‌کردن پلی‌آمید ۶ ( کاپرولاکتام) در حلال فرمیک اسید یا مخلوط آن با استیک اسید و افزودن نانوذرات نقره به برخی نمونه‌ها تهیه شد. شکل‌شناسی نمونه‌ها با میکروسکوپ الکترونی پویشی (SEM) مشاهده و خواص ضدباکتری آن‌ها بر اساس آزمون استاندارد AATCC 100 معین شد. برای حصول اطمینان از وجود عنصر نقره در نمونه‌ها از آزمون EDAX استفاده شد. نتایج نشان داد، نانوالیاف پوسته مغزی حاوی مقدار یکسان نانوذرات نقره با موفقیت تولید شدند. نمونه‌های نانوالیاف پوسته مغزی با پوسته غنی از مواد ضدمیکروب خواص ضدباکتری مشابهی در مقایسه با نانوالیاف با توزیع یکسان مواد ضدمیکروبی در پوسته و مغزی دارند. این اثر در برابر باکتری گرم (-) *E. Coli* و گرم (+) *S. Aureus* ارزیابی شد.

**کلمات کلیدی**

پلی‌آمید ۶،
ضدباکتری،
نانوالیاف پوسته مغزی،
*اشریشیا کلی*،
*استافیلوکوکوس اورئوس*

### مقدمه

با توجه به گسترش جوامع بشری و نیاز روزافزون به افزایش سطح سلامت جوامع نیاز به ارتقای سطح بهداشت عمومی بسیار مورد توجه است. یکی از این راهکارها تکمیل ضدباکتری روی منسوجات یا تولید الیاف ضدباکتری است. ایجاد عفونت در محیط‌های بیمارستانی و بهداشتی و همچنین گسترش عفونت در بدن مجروحان میدان‌های جنگ، دلیل اصلی مرگ بیماران و سربازان است. از این رو، لزوم مبارزه با عوامل بیماری‌زا مشخص می‌شود. اما، محدودیت‌های بسیاری برای تولید این منسوجات وجود دارد. از این محدودیت‌ها می‌توان هزینه زیاد تولید، مشکلات زیست‌محیطی، کاهش خاصیت ضدباکتری به مرور زمان و ایجاد حساسیت برای مصرف‌کننده را نام برد. مواد شیمیایی که به عنوان مواد ضدباکتری به‌کار برده می‌شوند، به دو گروه کلی دسته‌بندی می‌شوند [۱]:

گروه اول مواد شیمیایی را شامل می‌شود که رهایش کنترل شده آن‌ها سبب از بین رفتن میکروب‌ها شده یا مانع از رشد آن‌ها می‌شود. این مواد با داشتن اثر مناسب روی میکروب‌ها، کاستی‌هایی دارند. به عنوان مثال، به مرور زمان ذخایر این مواد تمام شده و بدون استفاده می‌شوند. از طرفی روی تمام باکتری‌ها اثرگذارند و حتی سبب نابودی باکتری‌های مفید نیز می‌شوند [۴-۲].

گروه دوم، موادی هستند که با سطح الیاف تماس برقرار کرده یا به‌طور شیمیایی با پارچه ارتباط برقرار می‌کنند. این گروه برخلاف گروه اول روی محیط بی‌اثرند و فقط بر رشد میکروب روی سطح اثر می‌گذارند. این مواد مقاومت

*مسئول مکاتبات، پیام‌نگار: khajavi@azad.ac.ir

شست‌وشوی (مکانیکی - شیمیایی) زیادتری نسب به گروه اول دارند، ولی همچنان به مرور زمان با اعمال تنش‌های مکانیکی از منسوج جدا می‌شوند [۲-۴].

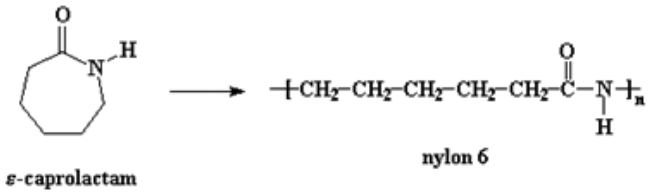
تکمیل‌های ضدمیکروبی که رشد و پخش میکروب‌ها را کنترل می‌کنند، Biostats نامید می‌شوند، مثل Bacteriostats و محصولاتی که میکروب‌ها را می‌کشند به نام زیست‌کش‌ها (Biocids) شناخته می‌شوند مانند باکتری‌کش‌ها (Bacteriocides) و قارچ‌کش‌ها (Fungicides) [۱،۵].

پلی‌آمیدها، فراورده‌های تراکمی هستند که سازه زنجیر خطی آنها یک گروه آمید است. الیاف حاصل شباهت و استحکامی همانند ابریشم طبیعی دارند [۶،۷]. در حقیقت نایلون نام تجاری است که شرکت DuPont برای محصول خود درنظر گرفت [۸].

سنتز نایلون ۶ در ابتدا با مولکول ویژه کاپرولاکتام آغاز می‌شود [۸]. هنگامی که کاپرولاکتام تا ۵۳۳ K در محیط مملو از ماده بی‌اثر نیتروژن در حدود ۵ h-۴، گرما داده می‌شود، حلقه‌های آن شکسته شده و پلیمرشدن آغاز می‌شود. کاپرولاکتام در محیط واکنش به مقدار بسیار زیادی یافت می‌شود، ولی $Na_2NH_2$، به عنوان آغازگر به مقدار کمی در محیط وجود دارد [۹]. حین پلیمرشدن، پیوند پای درون هر مولکول کاپرولاکتام شکسته شده و مولکولی با دو گروه فعال در دو طرف زنجیر، مونومرهای نایلون را تشکیل می‌دهد (طرح ۱).

از مزایای پلی‌آمیدها (نایلون‌ها) می‌توان به مواردی مثل سفتی و سختی، مقاومت سایشی زیاد، ضربه‌پذیری، مقاومت ترکیدگی زیاد و مقاومت ترک‌خوردگی زیاد درخم‌شدن‌های متوالی اشاره کرد. از سوی دیگر، معایب پلی‌آمیدها شامل گران‌بودن، جذب رطوبت کم (باید توجه داشت که جذب آب سبب کاهش مدول، استحکام کششی و مقاومت الکتریکی و افزایش استحکام ضربه‌ای می‌شود)، نداشتن مقاومت در برابر اسیدهای قوی، خواص ضعیف لغزشی (slip)، نفوذناپذیری یا نفوذ کم بخار آب به داخل فیلم‌های آن (که این ضعف اغلب به کمک روکش PVDC بهبود می‌یابد) است. از دیگر خواص این ترکیبات، نفوذناپذیری عالی در برابر بوها، اکسیژن، نیتروژن و کربن دی‌اکسید، مقاومت در برابر روغن‌ها، مقاومت شیمیایی عالی، مقاومت در برابر بنزین، مقاومت در برابر حلال‌های آلی، مقاومت در برابر آب نمک و محیط‌های دریایی و خواص نوری خوب را می‌توان برشمرد [۵].

برای تولید نانوالیاف از فرایند الکتروریسی بهره برده می‌شود. این فرایند برای تولید انواع نانوالیاف و میکروالیاف از محلول‌های مواد پلیمری، سرامیکی یا محلول‌های کامپوزیتی متشکل از پلیمر- نانوذرات و همچنین مذاب‌های مواد مزبور است. نانوالیاف تولید شده از راه الکتروریسی دارای مزایای چشمگیری از جمله قطر کوچک (۱۰ μm - ۵۰۰ nm و حتی ظریف‌تر)،




طرح ۱- بازشدن حلقه کاپرولاکتام و پلیمرشدن زنجیرها در سنتز نایلون ۶ [۵].

نسبت زیاد طول به قطر، سطح ویژه زیاد (نسبت سطح جانبی به حجم)، خواص شیمی‌فیزیکی بی‌نظیر، قابلیت طراحی سطوح انعطاف‌پذیر فیزیکی و شیمیایی و همچنین اضافه‌شدن به سایر کامپوزیت‌ها هستند [۱۰-۱۳]. روش‌های مختلفی مانند کشش، قالب‌سازی، جداسازی فازی، تولید خودبه‌خودی و الکتروریسی [۱۴] برای تولید نانوالیاف بررسی‌شده است، ولی در بین روش‌های زیاد سنتز و تولید، الکتروریسی، روشی ساده، ارزان و سریع برای تولید نانوالیاف بلند و نانوالیاف کامپوزیتی یک‌شکل و سازگار با بسیاری از کامپوزیت‌هاست [۱۱]. در این روش، باید اختلاف پتانسیل زیاد (بیش از ۶ kV) بین سر سوزن و الکترود صفحه جمع‌آوری ایجاد شود تا یک قطره حلال آویزن از سر سوزن به دلیل تنش سطحی باردار شده، در مسیر خود کشیده و روی صفحه جمع‌آوری پخش شود. پارامترهای الکتروریسی به‌طور کلی به دو گروه دسته‌بندی می‌شوند [۱۵،۱۶]:

- پارامترهای محلول، شامل نوع پلیمر و وزن مولکولی، رسانایی الکتریکی، گرانروی، نوع حلال، غلظت محلول، چگالی و کشش سطحی است.
- پارامترهای سامانه الکتروریسی شامل اختلاف پتانسیل و فاصله بین سوزن و صفحه جمع‌آوری، سرعت تغذیه، ظرافت سوزن، جنس و شکل صفحه جمع‌آوری، دما، رطوبت و فشار است.

تمام عوامل گفته شده باید به دقت تنظیم شود تا شرایط بهینه برای ایجاد الیاف دلخواه ایجاد شود. در این پژوهش، هدف تولید نانوالیاف پلی‌آمید است که ساختار پوسته آن غنی از مواد ضدباکتری باشد. سپس اثبات این فرضیه که خاصیت ضدباکتری نانوذرات نقره فقط وابسته به ذرات موجود روی پوسته است و ذراتی که در ساختار مغزی الیاف قرار می‌گیرند، کاملا در خاصیت ضدباکتری الیاف بی‌اثرند و فقط سبب افزایش هزینه و مقدار استفاده ذرات می‌شوند و مشکلات زیست‌محیطی بیشتری به دنبال خواهند داشت.

## تجربی

### مواد

فرمیک اسید (۱۰۰٪-۹۸٪) و استیک اسید (۹۸٪) از شرکت Merck آلمان خریداری شد. پلی‌آمید ۶ (MW=۲۰،۰۰۰) از کارخانه Asia Fiber Public فراهم شد. پودر نانوذرات نقره با خلوص ۹۹/۵٪ و اندازه ذرات ۳۵nm از شرکت کیمیاگستر پویش تهیه شد. باکتری‌های *استافیلوکوکوس اورئوس* (*Staphylococcus aureus* ATML:6538) و *اشریشیا کلی* (*Escherichia coli* ATML:11303) از انستیتو پاستور تهران فراهم شد.

### دستگاه‌ها

دستگاه الکتروریسی ساخت فناوران نانومقیاس با توان ایجاد اختلاف پتانسیل ۳۵ kV و دقت تزریق ۴ μL/h بود. از دستگاه فراصوت Universal Ultrasonic Cleaner مدل DSA-100-SK$_2$-4.0l با توان ۱۰۰ W و بسامد ۴۰ kHz بهره برده شد.

ترازوی آزمایشگاهی با دقت ۰/۰۱ mg، میکروسکوپ الکترونی پویشی

(SEM) مدل KYKY-EM3200 و دستگاه EDAX محصول شرکت IROST چک به‌کار گرفته شد.

## روش‌ها

باتوجه‌به‌پژوهش‌های‌پیشین [۱۷] محلول‌های‌ریسندگی‌باغلظت‌های٪۱۵ و ٪۲۰wt از پلی‌آمید تهیه شد. برای تهیه محلول ٪۲۰wt فقط از فرمیک اسید و برای محلول ٪۱۵wt از مخلوط فرمیک اسید و استیک اسید به عنوان حلال استفاده شد. محلول به مدت ۹۰ min در دمای محیط روی همزن قرار گرفت تا پلی‌آمید به‌خوبی حل و محلولی شفاف و همگن ایجاد شود. سپس به ازای هر ۲۰ g پلی‌آمید، ۰/۱ g پودر نانوذرات نقره افزوده شد. پس از آن محلول حاوی پودر نانوذرات نقره به مدت ۴۰ minداخل حمام فراصوت (توان ۱۰۰ W و بسامد ۴۰ kHz) قرار داده شد.

باید توجه داشت که دمای سامانه همواره در محدوده دمای محیط (۲۵°C) باشد، زیرا در دماهای زیاد احتمال تجمع نانوذرات نقره وجود دارد. برای تهیه محلول ٪۱۵wt از نسبت ۴:۱ استیک اسید: فرمیک اسید بهره گرفته شد. مقدار نقره در هر دو غلظت برابر است. پس از آماده‌سازی محلول‌ها، برای الکتروریسی فاصله سوزن با صفحه جمع‌آوری ۱۵ cm، سرعت تغذیه ۱ mL/h و اختلاف پتانسیل ۲۵ kV انتخاب شد [۱۷].

برای بررسی شکل‌شناسی، نمونه‌های ۱×۱ cm از وب تولید شده جدا، روی پایه نمونه‌گیر دستگاه چسبانده و با لایه طلا پوشانده می‌شود. آزمون EDAX نیز روی الیاف انجام شد. برای تهیه تصویر سطح مقطع به دو روش عمل شد. در روش اول نمونه‌ها داخل نیتروژن مایع شکسته شده و در روش دوم به کمک تیغ، وب برش داده شد. برای آزمون ضدمیکروبی از روش پور پلیت (pour plate) که به آن روش رقت سریال در پلیت حاوی آگار (serial dilution-agar plate technique) نیز گفته می‌شود، استفاده شد. در این روش تعلیق میکروبی را به شکل متوالی رقیق کرده، به نمونه وب تولید شده داخل لوله آزمایش اضافه می‌کنند و به‌شدت هم می‌زنند. در هر مرحله مقداری از محلول رقیق شده در محیط کشت جامد مناسبی کشت می‌شود. هر کلنی تولید شده بر سطح محیط کشت جامد مربوط به حداقل یک باکتری بوده و بدین روش تعداد باکتری‌های زنده موجود در محیط را محاسبه می‌کند.

برای رقیق‌کردن معمولا از آب مقطر استفاده می‌شود، اما از آنجا که برخی از میکروارگانیسم‌ها در آب مقطر از بین می‌روند، بهتر است از محلول رینگر (محلولی که در بیوشیمی برای نگه‌داری سلول‌ها یا بافت‌های زنده یا تنظیم‌الکترولیت به‌کار می‌رود). یا محلول ٪۱ پپتون در آب (پپتون، محصول آبکافت پروتئینی و عصاره‌ها بوده و از منابع اصلی نیتروژن و ویتامین‌ها در محیط کشت است.) یا PBS (phosphate buffered saline) استفاده شود [۳-۵].

### نحوه رقیق‌کردن تعلیق میکروبی

چند لوله آزمایش که هریک حاوی ۹ mL از ماده رقیق‌کننده استریل است انتخاب، شماره‌گذاری و با اتوکلاو استریل می‌شود. باید توجه داشت که حجم محلول به علت تبخیر کم نشود. سپس، ۱ mL از باکتری مورد آزمون به لوله آزمایش یک اضافه و مخلوط می‌شود. رقت در لوله آزمایش اول ۰/۱ رقت باکتری تهیه شده خواهد بود. از لوله اول ۱ mL به لوله آزمایش دوم اضافه می‌شود. بنابراین، رقت لوله آزمایش دوم ۰/۰۱ خواهد بود. پس از هم‌زدن محیط، ۱ mL از لوله آزمایش دو به لوله آزمایش سه اضافه می‌شود، این عمل مرتبا تا لوله آزمایش آخر تکرار می‌شود. برای اینکه حجم تمام لوله‌های آزمایش با هم برابر شود، از لوله آزمایش آخری ۱ mL بیرون می‌ریزند. در واقع نسبت رقت هر لوله آزمایش، با لوله آزمایش قبل و بعد از خود ۰/۱ اختلاف دارد. بدین ترتیب رقت‌های متوالی تهیه می‌شود.

در این روش باید توجه داشت، تعداد لوله‌ها به تعداد اولیه باکتری‌ها بستگی دارد (تعداد باکتری‌های اولیه طبق استاندارد AATCC100 است). اگر در نمونه مورد آزمون تعداد باکتری‌ها زیاد باشد، باید از لوله‌های بیشتری استفاده شود و نیز در هر مرحله از پیپت تمیز استریل جداگانه استفاده شود. پس از آماده‌سازی به روش گفته شده نمونه وب مورد بررسی به لوله‌های آزمایش اضافه شده و به‌شدت هم زده می‌شود. سپس، برای هر لوله یک پلیت استریل مجزا درنظر گرفته می‌شود. داخل هر پلیت ۱ mL از هر یک از رقت‌های مربوط ریخته و به آن ۱۵ تا ۲۰ mL از محیط plate count agar محلول با دمای ۴۵ °C اضافه می‌شود. پلیت‌ها را با حرکت دورانی در جهت عقربه‌های ساعت و خلاف آن تکان می‌دهند تا نمونه با محیط کشت به‌خوبی مخلوط شود. پس از جامدشدن محیط کشت، پلیت‌ها در دمای مناسب به مدت ۲۴ تا ۲۸ h قرار می‌گیرد. پس از رشد کلنی‌ها روی محیط، به وسیله Colony Counter تعداد آنها شمارش شده و از معادله (۱) تعداد باکتری‌ها در هر میلی‌لیتر از نمونه به‌دست می‌آید [۲،۳،۱۷]:

$$\text{تعداد باکتری‌ها در هر میلی‌لیتر نمونه} = \frac{\text{تعداد کلنی}}{\text{رقت}} \quad (۱)$$

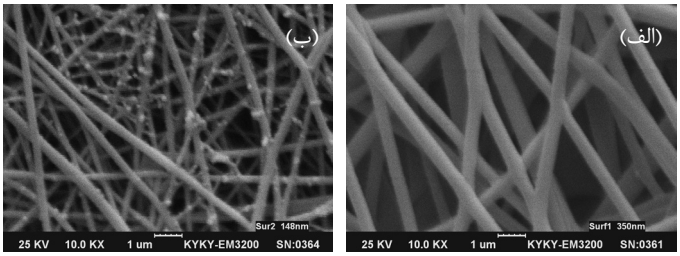
برای گزارش، پلیت‌هایی را درنظر می‌گیرند که تعداد کلنی در آنها بین ۳۰ تا ۳۰۰ عدد باشد. زیرا در این رقت‌ها هر باکتری می‌تواند تشکیل یک کلنی را بدهد. همچنین پلیت‌هایی که بیش از ۳۰۰ کلنی داشته باشند، درنظر نمی‌گیرند، زیرا به دلیل رقابت برای مواد غذایی و مکان، همه باکتری‌ها قادر به رشد نخواهند بود. بنابراین تعداد کلنی‌ها از حد واقعی کمتر است. افزون بر این، پلیت‌هایی که کمتر از ۳۰ کلنی داشته باشند، درنظر نمی‌گیرند. چون ممکن است، همه باکتری‌ها قدرت تشکیل کلنی را نداشته باشند. درصد کاهش تعداد کلنی‌ها که بیان‌کننده قابلیت نمونه‌ها در کاهش رشد باکتری‌هاست، از معادله (۲) محاسبه می‌شود [۲،۳،۱۷]:

$$\text{درصد کاهش} = \frac{\text{تعداد کلنی پس از مجاورت با نمونه} - \text{تعداد کلنی باکتری پیش از مجاورت با نمونه}}{\text{تعداد کلنی پیش از مجاورت با نمونه}} \times ۱۰۰ \quad (۲)$$

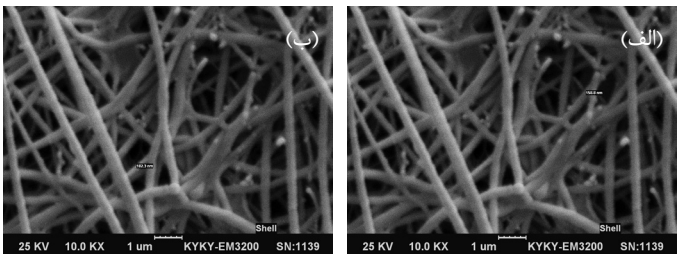
## نتایج و بحث

### تصاویر SEM

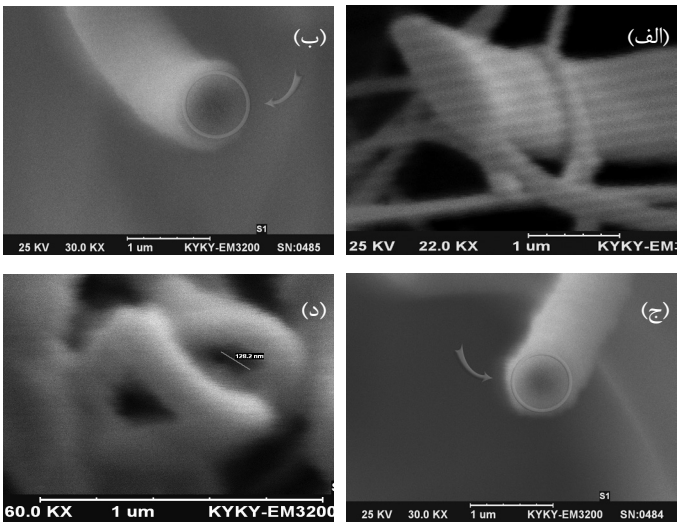
تصاویر میکروسکوپ الکترونیکی پویشی (SEM) تهیه شده از سطح جانبی و سطح مقطع الیاف در شکل ۱ نشان داده شده است. با مقایسه شکل ۱- الف و ب مشخص است، متوسط قطر الیاف در غلظت ٪۱۵wt




شکل ۱- تصاویر SEM اندازه زده شده از محلول: (الف) wt.٪ ۲۰ و (ب) wt.٪ ۱۵.




شکل ۲-کاهش ظرافت الیاف در حالت بدون مغزی با قطر لیف علامت گذاری شده: (الف) در حدود nm ۱۵۹ و (ب) در حدود nm ۱۸۲.

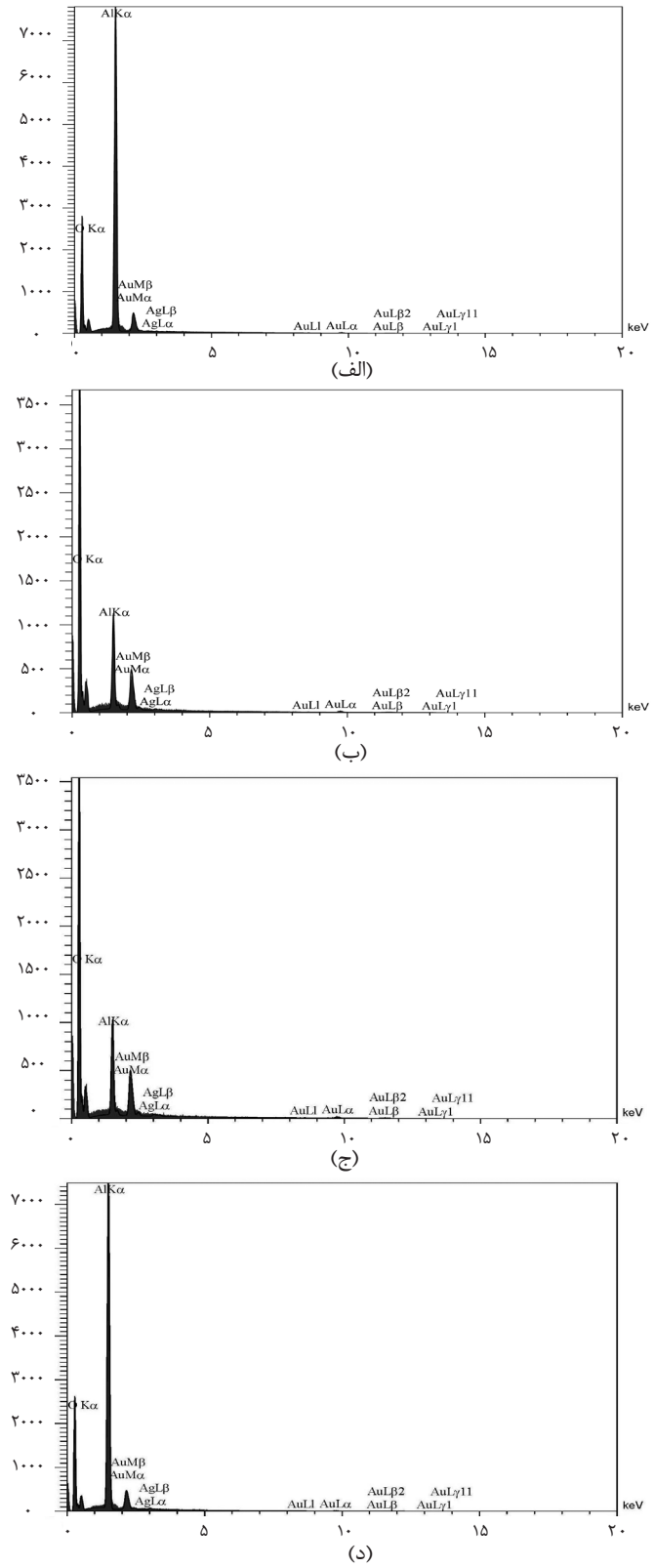



شکل ۳- تصاویر SEM از سطح مقطع الیاف الکتروریسی شده: (الف) محلول wt.٪ ۲۰ تهیه شده با اکسترودر معمولی، (ب) محلول wt.٪ ۱۵ پوسته مغزی، (ج) محلول wt.٪ ۲۰ پوسته مغزی و (د) محلول wt.٪ ۱۵ پوسته بدون مغزی.

کمتر از غلظت wt.٪ ۲۰ است. متوسط قطر الیاف در غلظت wt.٪ ۲۰ حدود ۳۰۰ تا nm ۴۰۰ است، در حالی که در غلظت wt.٪ ۱۵ به حدود nm ۲۰۰ کاهش یافته اســـت. برای استخراج قطر الیاف از هر نمونه حدود ۱۰ لیف انتخاب شد که متوسط آن‌ها گزارش شده است.

پس از انتخاب محلـــول wt.٪ ۱۵ به عنوان نمونه اصلی در این پروهش تصمیم گرفته شد، با ثابت نگه‌داشتن تمام پارامترها یک بار دیگر الکتروریسی انجام شود، با این تفاوت که فقط سامانه محلول wt.٪ ۱۵ همراه با نانوذرات نقره در پوسته تزریق شود و مغزی تزریقی نداشته باشد.

در این حالت تا حدودی از قطر الیاف نسبت به الیاف حاوی مغزی کاسته شد، زیرا پس از خارج‌شـــدن محلول پوسته به دلیل نبود محلول مغزی،




شـــکل ۴- آزمون EDAX از نمونه‌های: (الف) کنترل منفی پوسته و مغزی با غلظت wt .٪۱۵ و عاری از نانوذرات نقره، (ب) الیاف پوسته مغزی با غلظت wt .٪۱۵ و مغزی حاوی نانوذرات نقره و پوسته عاری از نانوذرات نقره، (ج) الیاف پوسته مغزی با غلظت wt .٪۱۵ و مغزی عاری از نانوذرات نقره و پوســـته حاوی نانوذرات نقره و (د) الیاف با غلظت wt .٪۱۵ پوسته و مغزی حاوی نانوذرات نقره.

جدول ۱- درصد وزنی یون نقره در نمونه‌های بررسی شده.

| نمونه | مقدار (wt٪) |
|---|---|
| a | حدود صفر |
| b | ۰/۰۹ |
| c | ۰/۳۴ |
| d | ۰/۴۱ |

مخروط تیلور تا حدودی جمع می‌شود (شکل ۲).

برای مشخص‌شدن ساختار پوسته مغزی باید تصاویر SEM از سطح مقطع این الیاف تهیه می‌شد. بدین منظور نمونه‌ها داخل نیتروژن مایع شکسته شدند و پس از انجام مراحل آماده‌سازی داخل دستگاه SEM قرار گرفتند. نتایج به‌دست آمده در شکل ۳ مشاهده می‌شود. با مقایسه شکل ۳- ب تا د دیده می‌شود، ساختار پوسته - مغزی در نانوالیاف شکل ۳- ب و ج تشکیل شده است، ولی این ساختار در شکل ۳- الف دیده نمی‌شود. همچنین، در شکل ۳- د ساختار میان تهی الیاف تهیه شده به روش الکتروریسی قابل مشاهده است. در این حالت فقط محلول پوسته حاوی نانوذرات به داخل سامانه پمپ شد و محلولی در مغزی وارد نشده است.

### آزمون EDAX

برای بررسی و اطمینان از وجود عنصر نقره در الیاف، آزمون EDAX روی نمونه‌ها انجام شد. نتایج این آزمون در شکل ۴ و جدول ۱ آمده است.

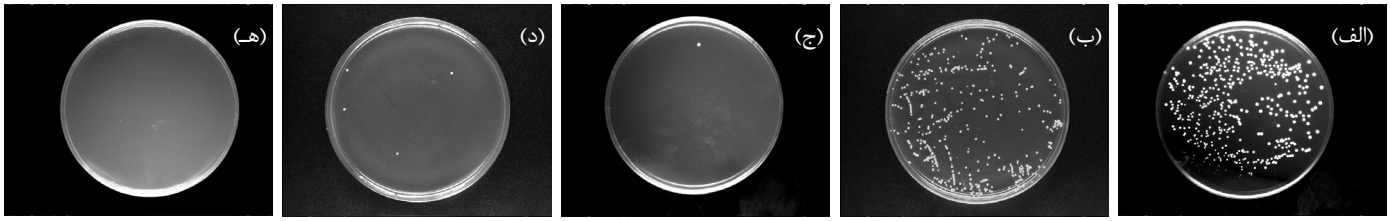
باید توجه داشت که مقدار کم نقره در نمونه‌ای که پوسته عاری از نانوذرات نقره بوده و مغزی حاوی این ذرات است (شکل ۴-ب) می‌تواند به دلیل مهاجرت مقدار محدودی از این ذرات از لایه مغزی به پوسته پیش از خشک‌شدن نمونه باشد. در شکل ۴- الف نیز به مقدار ناچیزی نانوذرات نقره دیده می‌شود، این موضوع می‌تواند ناشی از خطای سامانه یا مهاجرت نانوذرات نقره تثبیت نشده از سایر نمونه‌ها روی این نمونه به دلیل قرارگرفتن نمونه‌ها در مجاورت یکدیگر باشد. همچنین دیده می‌شود، در صورت وجود مغزی مقداری از نانوذرات از پوسته به سمت مغزی مهاجرت می‌کند و غلظت این ذرات روی نمونه کاهش می‌یابد.

### آزمون ضدباکتری

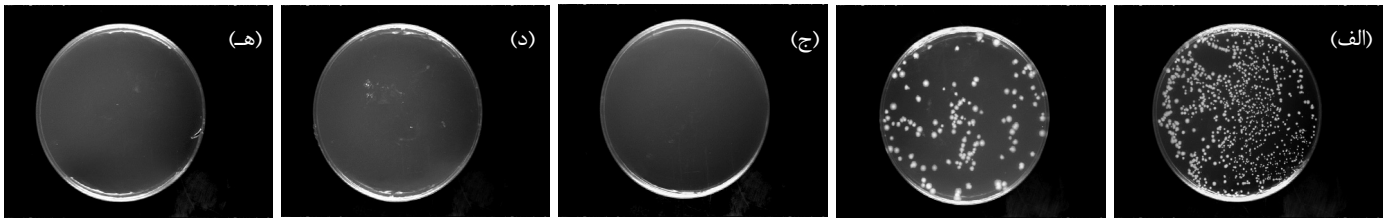
شایان ذکر است، در شکل‌های ۵ و ۶ فقط تصاویر کشت باکتری با غلظت ۰/۱ آمده است، زیرا در غلظت‌های کمتر هیچ رشد باکتری دیده نشد. همچنین همان‌طور که در نتایج آزمون EDAX قابل مشاهده است، مقدار نانوذرات نقره در نمونه‌ای که مغزی حاوی نانوذرات نقره بوده و پوسته عاری از آن است و نمونه پوسته مغزی عاری از نانوذرات نقره است، بسیار ناچیز و قابل اغماض است.

همان‌طور که در شکل‌های ۵ و ۶ دیده می‌شود، الیاف پوسته مغزی پلی‌آمید wt.٪ ۱۵ حاوی نانوذرات نقره و همچنین الیاف پوسته فقط حاوی نانوذرات نقره به‌خوبی از رشد باکتری اشریشیا کُلی (گرم منفی) و باکتری *استافیلوکوکوس اورئوس* (گرم مثبت) جلوگیری کرده‌اند. همچنین، تفاوت آشکار و قابل گزارشی بین نمونه‌هایی که نانوذرات نقره هم در پوسته و هم در مغزی وجود دارند (شکل‌های ۵ - ج و ۶ - ج) با نمونه‌ای که نانوذرات نقره فقط در پوسته یافت می‌شوند (شکل‌های ۵ - ج و ۶- ج) دیده نمی‌شود.

باید توجه داشت که مقدار نانوذرات نقره در نمونه‌هایی که هم پوسته و هم مغزی حاوی این ذرات هستند، ۰/۲ g در هر ۴۰ g محلول پلی‌آمید است که این مقدار دو برابر بیشتر از نمونه‌هایی است که فقط پوسته حاوی نانوذرات نقره است. جالب است، هنگامی که مغزی حذف می‌شود، احتمالا سطح




شکل ۵- کشت باکتری اشریشیا کلی: (الف) کنترل منفی پوسته و مغزی با غلظت wt.٪ ۱۵، فاقد نانوذرات نقره، (ب) الیاف پوسته مغزی با غلظت wt.٪ ۱۵ و مغزی حاوی نانوذرات نقره و پوسته عاری از نانوذرات نقره، (ج) الیاف پوسته مغزی با غلظت wt.٪ ۱۵، مغزی عاری از نانوذرات نقره و پوسته حاوی نانوذرات نقره، (د) الیاف با غلظت wt.٪ ۱۵ پوسته و مغزی حاوی نانوذرات نقره و (ه) نمونه پوسته توخالی حاوی نانوذرات نقره.




شکل ۶- کشت باکتری استافیلوکوکوس اورئوس: (الف) کنترل منفی پوسته و مغزی با غلظت wt.٪ ۱۵ و عاری از نانوذرات نقره، (ب) الیاف پوسته مغزی با غلظت wt.٪ ۱۵، مغزی حاوی نانوذرات نقره و پوسته عاری از نانوذرات نقره، (ج) الیاف پوسته مغزی با غلظت wt.٪ ۱۵، مغزی عاری از نانوذرات نقره و پوسته حاوی نانوذرات نقره، (ه) الیاف با غلظت wt.٪ ۱۵ پوسته و مغزی حاوی نانوذرات نقره و (و) نمونه پوسته توخالی حاوی نانوذرات نقره.

مقطع از حالت مدور خارج می‌شود و سطح ویژه افزایش می‌یابد. این موضوع سبب افزایش خاصیت ضدباکتری می‌شود. در نمونه‌هایی که مغزی وجود دارد، احتمال می‌رود، نانوذرات نقره به سمت مغزی مهاجرت کنند و از تراکم آن‌ها روی پوسته کاسته شود. به بیان دیگر، نانوذرات نقره پراکنده شده در ماتریس مغزی ساکن‌سازی شده‌اند و به همین علت خاصیت ضدباکتری ندارند. عدم رشد این باکتری‌ها روی الیاف پوسته به‌خوبی بیان‌کننده قدرت ضدباکتری این الیاف است و نشان می‌دهد، وجود نانوذرات نقره در ساختار مغزی اثری روی خاصیت ضدباکتری الیاف ندارد (شکل‌های ۵ و ۶).

## نتیجه‌گیری

با توجه به پژوهش‌های گذشته پارامترهای الکتروریسی تنظیم شدند. با دقت به تصاویر SEM از سطح جانبی و سطح مقطع الیاف، غلظت ۱۵ wt.٪ انتخاب و به کمک فرمیک اسید و استیک اسید با نسبت ۴:۱ از پلی‌آمید ۶ با وزن مولکولی ۲۰،۰۰۰ تهیه شد. با مقایسه تصاویر SEM از سطح جانبی و مقطع الیاف، شکل‌شناسی الیاف مشخص شده و دیده می‌شود که ساختار پوسته مغزی و میان تهی با موفقیت تهیه شده است.

با تغییر ساختار الیاف الکتروریسی شده و تبدیل آن‌ها به الیاف پوسته مغزی و همچنین الیاف میان‌تهی (صرفا پوسته) مشخص شد که می‌توان با مقدار بسیار ناچیزی از نانوذرات نقره (۰/۱ g نانوذرات نقره در هر ۴۰ g پلی‌آمید) خاصیت ضدباکتری مطلوبی به‌دست آورد. این پدیده بیانگر این واقعیت است که فقط نانوذرات موجود روی سطح الیاف (لایه پوسته) در ایجاد خاصیت ضدباکتری مؤثرند و ترکیب مغزی در این مهم کاملا بی‌اثر است. همچنین با ایجاد الیاف میان‌تهی یا تغییر در شکل سطح مقطع، سطح ویژه الیاف افزایش یافته است، بنابراین سطح جانبی که حاوی نانوذرات نقره بوده در تماس بیشتری با محیط پیرامون خود قرار گرفته که نتیجه آن افزایش خاصیت ضدباکتری وب بوده است.

به بیان ساده‌تر می‌توان با قراردادن نانوذرات نقره در ساختار پوسته الیاف با کاهش مقدار نانوذرات به خاصیت ضدباکتری مشابهی نسبت به حالتی که نانوذرات نقره هم در پوسته و هم در مغزی وجود دارند، دست یافت. این روش به طور کاملا مؤثری هم از هزینه‌های تولید الیاف ضدباکتری می‌کاهد و هم مشکلات زیست‌محیطی کمتری به دنبال دارد.

## مراجع


1. Lashen E.S., New method for evaluating antibacterial activity directly on fabric, *Appl. Environ. Microb.*, 21, 771-773, 1971.

۲. بروکس جی. اف، بوتل جی. اس، مورس اس. ای، کارول کی. سی، *میکروب شناسی پزشکی* جاوتز، ملنیک، آدلبرگ، آییژ، ۱۷۷-۱۵۱، زمستان ۱۳۸۷.

۳. رحیمی م.ک، *فشرده میکروبیولوژی پزشکی*، آییژ، ص ۵۷-۴۲، بهار ۱۳۸۳.

4. Jantas R. and Górna K., Antibacterial finishing of cotton fabrics, *Fibres Text. East. Eur.*, 14, 55, 88-91, 2006.

5. Rouette H.K., *Encyclopedia of Textile Finishing*, Springer, 86-89, 2000.

۶. مک اینتایر جی.ای.، *الیاف مصنوعی: پلی‌آمید، پلی‌استر، آکریلیک، پلی‌اولفین*، ترجمه: سمنانی رهبر، ر.، جهاد دانشگاهی دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۸۲-۷۵، ۱۳۸۷.

7. Olmsted J. and Gregory M.W., *Chemistry: The Molecular Science*, 3 th ed., Wiley, 72-74, December 2001.

8. Mark H. and Whitby G.S., *Collected Papers of Wallace Hume Carothers on High Polymeric Substances* I, Interscience, New York, 131, 1940.

9. Kauffman G.B., Nylon at 50, *Chem. Tech.*, 17, 725-731, 1988.

10. Anton A., *Encyclopedia of Chemical Technology,* 19, 4th ed., 520, 1992.

11. Li D. and Xia Y., Electrospinning of Nanofibers: Reinventing the Wheel?, *Adv. Mater.*, 16, 1151-1170, July 2004.

12. Chen R., Zhao S., Han G., and Dong J., Fabrication of the silver/polypyrrole/polyacrylonitrile composite nanofibrous mats, *Mater. Lett.*, 62, 4031-4034, 2008.

13. Demir M.M., Yilgor I., Yilgor E., and Erman B., Electrospinning of polyurethane fibers, *Polymer*, 43, 3303-3309, 2002.

14. Lin J., Qiu S., Lewis K., and Klibanov A.M., Mechanism of bactericidal and fungicidal activities of textiles covalently modified with alkylated polyethylenimine, *Biotechnol. Bioeng.*, 83, 168-172, 2003.

15. Beachley V. and Wen X., Effect of electrospinning parameters on the nanofiber diameter and length, *Mater. Sci. Eng.*, 29, 663-668, 2009.

16. Ramakrishna S., Fujihara K., Teo W.E., Lim T.C., and Ma Z., An introduction to electrospinning and nanofibers, *World Scientific*, 90-112, 2005.

۱۷. ملک‌زاده ش.ب.، تهیه نانوالیاف الکتروریسی نایلون ضدمیکروب به روش سنتز هم‌زمان نانونقره از نیترات نقره، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی علوم و تحقیقات، ۳۴-۳، شهریور ۱۳۹۰.

Journal of
Textile Science
and Technology
Vol. 3, No.1, 17-22
Spring 2013
ISSN: 2151-7162

# Fabrication of Core-Shell Polyamide/Silver Nanofibers Composites

**A.B. Gharagozloo Bahrami, R. Khajavi*, and L. Maleknia**

Department of Textile Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, P.O. Box: 17776-13651, Tehran, Iran

Received 27 February 2013; Accepted 15 May 2013

## Abstract

Polyamide nanofibers (nylon 6) were fabricated as core-shell structures with enriched silver nanoparticles in their shells. The main purpose of this study was to produce nanofibers with reduced silver nanoparticles content while maintaining or enhancing their antibacterial effectiveness. The coaxial electrospinning was used to fabricate the nanofibers. The core-shell solutions consisted of polyamide (caprolactam) in formic acid or acetic acid and adding silver nanoparticles into the solutions. The morphology of samples was characterized by scanning electron microscope (SEM) and the AATCC100 standard test method was used to determine the antibacterial properties of the fibers. EDAX was used to test the presence of silver nanoparticles in the samples. Finally, the new fibers' antibacterial quality was tested on Gram (-) bacteria *E.Coli* and Gram (+) bacteria *S. Aureus*. The results showed that the core-shell nanofibers were successfully produced with uniform concentration of silver nanofibers in their shells and displayed the same degree of antibacterial activity as samples with uniform distribution of nanoparticles in both the core as well as the shell structures.

## Keywords

polyamide 6,
antibacterial,
core-shell nanofibers,
*Esherichia coli,*
*Staphylococcus aureus*

(*) Address Correspondence to R. Khajavi, Email: khajavi@yazd.ac.ir