



## Investigating the possibility of producing electrospun cellulose fibers from cigarette filter waste

Ziba Fathi<sup>1</sup>, Ali Abdolkhani<sup>2\*</sup>, Yahya Hamzeh<sup>3</sup>, Alireza Ashori<sup>4</sup>, Alireza Shakeri<sup>5</sup> and Juha Lipponen<sup>6</sup>

1- PhD Student, Department of wood and paper science and technology, Faculty of Natural Resources, University College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

2-\* Corresponding author, Professor, Department of wood and paper science and technology, Faculty of Natural Resources, University College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: [abdolkhani@ut.ac.ir](mailto:abdolkhani@ut.ac.ir)

3- Professor, Department of wood and paper science and technology, Faculty of Natural Resources, University College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

4- Professor, Department of Chemical Technologies, Iranian Research Organization for Science and Technology (IROST), Tehran, Iran

5- Professor, Faculty of Chemistry, University of Tehran, Tehran, Iran

6- Professor, Department of Bioproducts and Biosystems, School of Chemical Engineering, Aalto University, FI-00076 Aalto, Finland

Received: May 2024

Accepted: August 2024

### Abstract

**Problem definition and objectives:** Environmental pollution resulting from massive waste production worldwide has become a significant global concern. Among these wastes, cigarette filters are notable for their non-biodegradable nature and the presence of toxic compounds such as nicotine, posing considerable environmental risks. Over 6 trillion cigarettes are estimated to be consumed annually worldwide, resulting in a substantial volume of cigarette filter waste. These wastes persist in the environment and can leach harmful substances into natural resources such as soil and water, causing ecological and health problems. This study investigates the potential of recycling cigarette filters as a raw material for producing cellulose fibers using electrospinning. The goal is to provide an innovative solution to mitigate the environmental impacts of these wastes while creating value from otherwise discarded materials.

**Methodology:** To achieve this, cigarette filters were collected and purified using a combination of various organic solvents. The purification process included the removal of tobacco, ash, and other contaminants from the filters. Subsequently, a 10% weight solution of cellulose acetate was prepared using a solvent mixture of acetone and dimethylacetamide, and the electrospinning process was carried out. The chemical and physical properties of the produced fibers were analyzed using advanced techniques such as gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) and Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR). The morphology and surface characteristics of the fibers were studied using field emission scanning electron microscopy (FESEM). Parameters such as

solution concentration, applied voltage, feed rate, and needle-to-collector distance were optimized to achieve ideal electrospinning conditions.

**Results:** The results of this study revealed that toxic compounds, such as nicotine, were effectively removed during the purification process, demonstrating the high efficiency of the applied method. Microscopic analyses showed that the morphology of fibers produced from cigarette filters was comparable to those made from commercial cellulose acetate powder, with no significant differences in surface uniformity and fiber diameter. The fiber diameters ranged from 150 to 400 nanometers, with a uniform distribution. Furthermore, FTIR analysis confirmed a high degree of overlap in the chemical compositions of fibers derived from recycled cigarette filters and commercial cellulose acetate powder.

**Conclusion:** In addition to addressing environmental concerns, producing cellulose fibers from cigarette filter waste offers the potential to create high-value materials. These fibers, with features such as uniform surface, suitable diameter, and stable chemical composition, can be utilized in various industries, including producing separation membranes, water and air filtration systems, and even medical applications such as bio-compatible wound dressings. This research demonstrates that recycling industrial waste for advanced material production is a crucial step in environmental conservation and contributes to sustainable economic development.

**Keywords:** Waste, Fiber, Cellulose Acetate, Cigarette Filter, Electrospinning.

## بررسی امکان تولید الیاف سلولزی الکتروریسی شده از پسماند فیلتر سیگار

زیبا فتحی<sup>۱</sup>، علی عبدالخانی<sup>۲\*</sup>، یحیی همزه<sup>۳</sup>، علیرضا عشوری<sup>۴</sup>، علیرضا شاکری<sup>۵</sup>، یوها لیپونن<sup>۶</sup>

۱ دانشجوی دکتری، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران،  
 \*۲ نویسنده مسئول، استاد، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

پست الکترونیک: [abdolkhani@ut.ac.ir](mailto:abdolkhani@ut.ac.ir)

۳- استاد، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۴- استاد، گروه بایو کامپوزیت، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، تهران، ایران.

۵- استاد، دانشکده شیمی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۶- استاد، گروه بایو سیستم و تولیدات زیستی، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه آلتو، فنلاند.

تاریخ پذیرش: تیر ۱۴۰۳

تاریخ دریافت: خرداد ۱۴۰۳

### چکیده

**بیان مساله و اهداف:** آلودگی محیط‌زیست ناشی از تولید انبوه پسماندها در سراسر جهان به یکی از نگرانی‌های عمده جهانی تبدیل شده است. از جمله این پسماندها، فیلتر سیگار است که به دلیل غیرقابل تجزیه بودن در طبیعت و حضور ترکیبات سمی نظیر نیکوتین، اثرات زیست‌محیطی قابل توجهی دارد. برآوردها نشان می‌دهند که سالانه بیش از ۶ تریلیون نخ سیگار در جهان مصرف می‌شود که این موضوع به تولید حجم عظیمی از فیلترهای سیگار به‌عنوان پسماند منجر می‌شود. این پسماندها نه تنها دیرتجزیه‌پذیر هستند، بلکه ترکیبات موجود در آن‌ها می‌توانند به منابع طبیعی مانند خاک و آب نفوذ کرده و مشکلات زیست‌محیطی و بهداشتی ایجاد کنند. افزایش مصرف جهانی سیگار نیز باعث افزایش حجم این پسماند خطرناک شده است. این پژوهش با هدف ارزیابی امکان بازیافت فیلترهای سیگار به‌عنوان ماده اولیه برای تولید الیاف سلولزی به روش الکتروریسی انجام شده است. این مطالعه تلاش می‌کند راهکاری نوآورانه برای کاهش اثرات زیست‌محیطی این پسماندها ارائه داده و ارزش افزوده‌ای برای این مواد بلااستفاده ایجاد کند.

**مواد و روشها:** برای این منظور، فیلترهای سیگار از محیط جمع‌آوری و طی فرآیندی شامل استفاده از ترکیب حلال‌های آلی مختلف پالایش شدند. فرآیند پالایش شامل حذف تنباکو، خاکستر، و سایر آلاینده‌ها از سطح فیلترها بود. سپس محلول ۱۰ درصد وزنی استات سلولز تهیه شده و با استفاده از حلال ترکیبی استون و دی‌متیل‌استامید، آماده‌سازی شد. برای بررسی ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی الیاف تولیدی، از تکنیک‌های پیشرفته‌ای نظیر کروماتوگرافی گازی-طیف‌سنج جرمی (GC-MS) و طیف‌سنج مادون قرمز (FTIR) استفاده شد. مورفولوژی و سطح الیاف نیز با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) مورد مطالعه قرار گرفت. در فرآیند الکتروریسی از پارامترهایی نظیر غلظت محلول، ولتاژ، نرخ تغذیه و فاصله نوک سوزن تا جمع‌کننده برای دستیابی به بهترین شرایط تولید استفاده شد.

**نتایج:** نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که ترکیبات سمی موجود در فیلتر سیگار، مانند نیکوتین، طی فرآیند پالایش به‌طور مؤثری حذف شده‌اند. این موضوع نشان‌دهنده کارایی بالای روش استفاده‌شده برای پالایش و آماده‌سازی فیلترها است. بررسی‌های میکروسکوپی نیز نشان داد که مورفولوژی الیاف تولیدی از فیلترهای سیگار، مشابه الیاف تولیدی از استات سلولز تجاری تولید شده از پودر استات سلولز است. قطر الیاف تولیدشده از هر دو منبع در محدوده ۱۵۰ تا ۴۰۰ نانومتر قرار داشت و توزیع قطر الیاف نیز یکنواخت بود. همچنین، طیف‌سنجی مادون قرمز نشان داد که ترکیبات شیمیایی الیاف تولیدشده از فیلترهای سیگار بازیافتی و پودر استات سلولز تجاری به میزان زیادی هم‌پوشانی دارند.

**نتیجه گیری:** نتایج نشان داد که تولید الیاف سلولزی از پسماند فیلتر سیگار علاوه بر کاهش اثرات زیست‌محیطی، امکان بهره‌گیری از موادی با ارزش افزوده بالا را فراهم می‌کند. این الیاف، به دلیل دارا بودن ویژگی‌هایی نظیر یکنواختی سطح، قطر مناسب و ترکیبات شیمیایی پایدار، می‌توانند در صنایع مختلفی از جمله تولید غشاءهای جداسازی، فیلتراسیون آب و هوا، و حتی کاربردهای پزشکی مانند تولید پانسمان‌های زیستی مورد استفاده قرار گیرند. این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از پسماندهای صنعتی برای تولید مواد پیشرفته نه تنها گامی موثر در حفظ محیط‌زیست است، بلکه می‌تواند به توسعه پایدار و اقتصادی نیز کمک کند.

**واژه های کلیدی:** پسماند، الیاف، استات سلولز، فیلتر سیگار، الکتروریسی.

## مقدمه

موردتوجه محققان قرار گرفته است [۹]. برای تولید الیاف به‌وسیله فرایند الکتروریسی باید ماده بسیار در حلال مناسب حل شود و پس از انتقال آن به سرنگ با اعمال ولتاژ زیاد، جت‌های بسیار ریزی از الیاف پس از خروج از نوک سوزن و قرارگیری در معرض میدان الکتریکی به سمت جمع کننده پرتاب می‌شوند. کشش سطحی مایع پلیمری توسط میدان الکتریکی و ولتاژ اعمال شده کنترل می‌شود تا در نهایت به‌صورت مخروط تیلور در نوک سوزن تشکیل گردد. تشکیل مخروط تیلور یک اصل مهم در الکتروریسی است که پس از آن جت‌های الیاف به‌صورت پیوسته و یکنواخت به‌سوی جمع کننده فلزی (دوار یا صفحه ثابت) حرکت می‌کنند [۱۰]. با تبخیر حلال و تشکیل تارهای الیاف روی جمع کننده لایه‌ای نا بافته<sup>۱</sup> (تشک)<sup>۱</sup> از الیاف تشکیل می‌شود [۱۴-۱۱]. فرایند الکتروریسی تحت تأثیر پارامترهای زیادی قرار دارد که شامل پارامترهای مرتبط با دستگاه (فاصله سوزن تا جمع کننده، ولتاژ اعمال شده، سرعت جریان خروجی از سوزن، دور جمع کننده و نوع آن)، ویژگی‌های محلول (غلظت محلول الکتروریسی، کشش سطحی و هدایت الکتریکی محلول) و پارامترهای محیطی (دما و رطوبت) است. بیشترین عامل مؤثر در قابلیت الکتروریسی یک محلول غلظت و کشش سطحی آن است، به‌عنوان مثال در صورتی که غلظت محلول بسیار کم باشد، الکتروریسی انجام نخواهد شد و فقط قطرات ریز از محلول پلیمری از سوزن خارج می‌شود که اصطلاحاً الکترواسپری نامیده می‌شود و

در سال‌های اخیر با برجسته شدن تدریجی مسائل انرژی و محیط‌زیست پژوهش‌های گوناگونی به‌منظور بررسی امکان تولید الیاف طبیعی بر پایه سلولز با ویژگی‌های برجسته از جمله: فراوانی ماده اولیه، تجدیدپذیر بودن، سبک بودن، مقاومت بالا و هزینه کم انجام گرفته است [۳،۲۰۱]. امروزه تولید نانو الیاف سلولزی و مواد زیستی بر پایه سلولز از موضوعات مهم به شمار می‌آید، چرا که نانو الیاف دارای سطح ویژه بسیار زیاد و انعطاف‌پذیری قابل قبولی می‌باشند [۴]. الیاف به روش‌های مختلفی از جمله جدایش فازی<sup>۱</sup>، سنتز قالب<sup>۲</sup>، خودآرایی<sup>۳</sup>، کشش<sup>۴</sup> و الکتروریسی<sup>۵</sup> تولید می‌شوند [۵]. در این میان طیف گسترده‌ای از تکنیک‌های الکتروریسی، مانند الکتروریسی محلول<sup>۶</sup>، الکتروریسی مذاب<sup>۷</sup>، الکتروریسی با جت چندگانه<sup>۸</sup>، الکتروریسی هم‌محور<sup>۹</sup> نیز در دو دهه اخیر توسعه‌یافته است [۷،۶]. الکتروریسی فنون الکترواستاتیکی رایج برای تولید نانو الیاف به‌طور گسترده است [۸]. نانو الیاف تهیه شده با این روش به دلیل تخلخل قابل قبول، سطح ویژه بیشتر و قطر کمتر الیاف که از مقیاس نانو تا میکرو متغیر است بسیار

<sup>1</sup> Phase separation

<sup>2</sup> Template synthesis

<sup>3</sup> Self-assembly

<sup>4</sup> Drawing

<sup>5</sup> Electrospinning

<sup>6</sup> Solution electrospinning

<sup>7</sup> Melt electrospinning

<sup>8</sup> Multiple jet electrospinning

<sup>9</sup> Coaxial

<sup>1</sup> Nonwoven 0

<sup>1</sup> Mat 1

در سراسر جهان به مقدار بسیار زیادی تولید می‌شوند. بر اساس آمارهای رسمی، هر ساله بیش از ۶/۵ تریلیون نخ سیگار در جهان مصرف می‌شود و این موجب تولید حجم زیادی از پسماند فیلتر سیگار می‌شود [۳۰]. پیش‌بینی می‌شود که این آمار تا سال ۲۰۲۵ به ۹ تریلیون نخ سیگار افزایش یابد [۳۱]. مطالعات انجام شده درباره تجزیه فیلترهای سیگار نشان می‌دهد که این پسماند توانایی ماندگاری در شرایط محیطی مختلف را دارد، که این امر نشان‌دهنده اثرهای زیست‌محیطی بسیاری برای موجودات زنده و منابع طبیعی است. به دلیل تحت تأثیر قرار گرفتن از عوامل محیطی، اجزای کاغذ و تنباکو به آسانی می‌توانند به موادی مضر مانند آرسنیک تجزیه شوند که می‌تواند به خشکی و آبراه‌ها نفوذ کند و منجر به ایجاد مشکلاتی برای سلامتی موجودات زنده شود [۳۲، ۳۳]. استات سلولز بلورگی کمتری نسبت به سلولز دارد و هرچه درجه استخلاف استات سلولز بیشتر باشد گروه‌های استیل بیشتری وجود دارد و بلورگی کمتر است [۳۴]. استات سلولز یک پلیمر قابل تجزیه نوری است [۳۵]، اما در محیط‌زیست به راحتی تجزیه نمی‌شود [۳۶]، بلکه به صورت میکرو پلاستیک‌ها تجزیه می‌شود [۳۷، ۳۸]، که این امر به‌عنوان یک چالش زیست‌محیطی مهم در مورد فیلتر سیگار پس از استفاده مطرح می‌شود. از این رو در این تحقیق از استات سلولز فیلتر سیگار پس از پالایش و رفع آلودگی‌ها به‌عنوان ماده اولیه استفاده شد و خواص لیاف تولید شده به روش الکترورسی مورد بررسی قرار گرفت.

### مواد و روش‌ها

فیلتر سیگار استفاده‌شده از محوطه اطراف دانشگاه آلتو فنلاند جمع‌آوری شد. استات سلولز پودری با وزن مولکولی ۳۰۰۰۰ گرم بر مول از شرکت سیگما آلدریج ایالت متحده آمریکا تهیه شد. همچنین استون به‌عنوان حلال اصلی استات سلولز با درجه خلوص ۹۹ درصد از شرکت مرک آلمان تهیه شد. دی متیل استامید با درجه خلوص ۹۹ درصد از شرکت مرک آلمان تهیه شد که به‌عنوان حلال کمکی در سیستم انحلال استات سلولز برای الکترورسی استفاده شد. از اتانول و تولوئن با درجه خلوص ۹۹/۹۹٪ تهیه شده از شرکت VWR کشور فنلاند

با افزایش غلظت محلول پلیمری در صورت ایده‌آل بودن سایر عوامل مؤثر بر الکترورسی به‌صورت جت لیاف به‌سوی جمع‌کننده پرتاب می‌شود، در صورتی که غلظت محلول بهینه نباشد و بسیار غلیظ باشد نیز الکترورسی انجام نخواهد شد و محلول به‌صورت قطرات سنگین در نوک سوزن جمع می‌شود. به‌منظور تولید نانو لیاف سلولزی با روش الکترورسی از پلیمرهای مختلفی مانند پلی‌وینیل الکل، پلی‌آکریل آمید، پلی‌کپرولاتون و پلی‌اتیلن گلیکول استفاده می‌شود [۴]. پلیمر سلولز که فراوان‌ترین پلیمرهای زیستی روی زمین است نیز جزء پلیمرهای جذاب برای تولید نانو لیاف به روش الکترورسی است، اما چالش الکترورسی سلولز عدم انحلال آن در حلال‌های رایج است که ناشی از حضور پیوند هیدروژنی است [۱۵]. استات سلولز هم یک استر سلولزی است که از واکنش سلولز با اسید استیک و انیدرید استیک در حضور کاتالیزگر اسیدسولفوریک یا اسید پرکلریک تولید می‌شود [۱۶]. طی این فرایند هیدروژن گروه‌های هیدروکسیل در سلولز با گروه‌های استیل جایگزین می‌شود [۱۷، ۱۸]. استات سلولز از منابع سلولزی مختلف مانند خمیر چوب، کاغذ بازیافتی، کلس برنج، باگاس و... تولید می‌شود [۱۹]. قابلیت انحلال استات سلولز در سیستم‌های انحلال مختلف موجب شده است این ماده با تعداد زیادی از پلیمرها و ترکیبات متنوع دیگر قابل اختلاط باشد [۲۰، ۲۱]. هم چنین الکترورسی آن فرایندی پیوسته و قابل کنترل بوده و به راحتی در سیستم‌های انحلال تکی و چند جزئی مانند (استیک اسید) [۲۲]، (استون، دی متیل استامید) [۲۳]، (استون، دی متیل فرم آمید) [۲۳]، تری فلوروواتیلن، دی کلرومتان و کلروفرم [۲۴] حل می‌شود. استات سلولز کاربردهای وسیعی در صنایع مختلف دارد که از جمله آن‌ها نساجی، فیلتر و غشاءهای جداسازی [۲۵]، فیلتر سیگار [۱۷]، دارورسانی [۲۶]، پانسمان زخم و مهندسی بافت است [۲۷]. تقریباً ۹۰ درصد از فیلترهای سیگار در سراسر جهان از استات سلولز تهیه می‌شوند [۲۸]، استات سلولز ماده اصلی در فیلترهای سیگار است [۲۹]. فیلتر سیگار به‌عنوان یکی از پسماندهای بسیار مهم،

<sup>1</sup> DMAc

2

<sup>1</sup> DMF

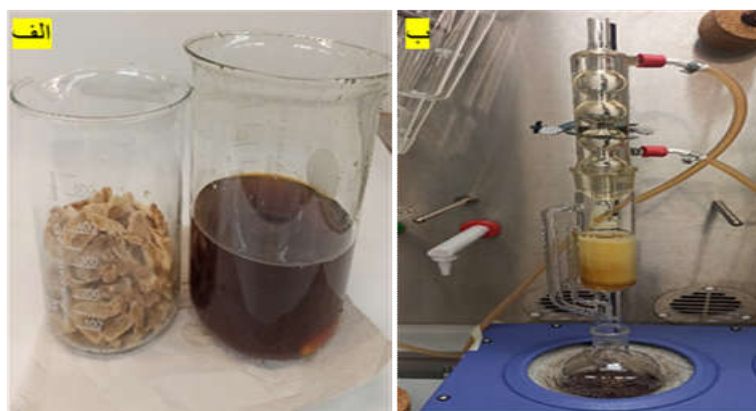
3

Heldolph مدل MR Hei- Standard همراه با دما (۶۰ درجه سانتی‌گراد) با سرعت ۵۰۰ دور بر دقیقه قرار داده شد، بعد از گذشت یک ساعت و جداسازی ذرات خاکستر و تنباکو از آن‌ها، فیلترهای سیگار آب‌گیری شد و به‌منظور خشک کردن در دمای اتاق در آزمایشگاه به مدت ۳ روز هوا خشک شد. برای پالایش نهایی فیلترهای سیگار از دستگاه استخراج سوکسله به‌وسیله ۲۰۰ میلی‌لیتر محلول تهیه شده از حلال‌های اتانول و تولوئن به نسبت حجمی یکسان ۱ به ۱ استفاده شد و به مدت ۷ ساعت متوالی و تعداد ۴ رفلاکس در هر ساعت تحت سوکسله قرار گرفت [۳۹]، (شکل ۱-الف).

برای پالایش فیلترهای سیگار استفاده‌شده به‌صورت ترکیبی در فرایند استخراج با سوکسله استفاده شد.

### آماده‌سازی ماده اولیه و تهیه محلول برای الکترورسی

ابتدا فیلترهای سیگار جمع‌آوری شد و به آزمایشگاه شیمی دانشگاه آلتو فنلاند منتقل شد، سپس تنباکو و خاکسترهای باقی‌مانده و همچنین کاغذ دور فیلترها از آن جدا شد. برای پالایش و رفع آلودگی فیلترهای سیگار جمع‌آوری شده، ابتدا فیلترهای سیگار در یک بشر حاوی آب مقطر روی همزن مغناطیسی ساخت شرکت



شکل ۱- فرایند سوکسله و استخراج آلودگی فیلترهای سیگار: الف- فیلترهای سیگار و مایع استخراجی تیره پس از سوکسله، ب- فرایند سوکسله

۴۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شد تا کاملاً خشک شد (شکل ۲ (الف و ب)).

پس از اتمام فرایند استخراج با سوکسله، فیلترهای سیگار مجدد با آب شست‌وشو داده شد تا مایع استخراجی کاملاً بی‌رنگ و شفاف حاصل شد، سپس در آون با دمای



شکل ۲- الف- تصویر فیلترهای سیگار شسته شده و مایع آب‌گیری شده از الیاف فیلتر سیگار پس از شست‌وشوی نهایی و ب- تصویر الیاف فیلتر سیگار خشک شده

۱۰٪ و ۱۵٪ استفاده شد که نمونه دارای ۱۰ درصد وزنی قابل الکتروروسی بود، سپس به منظور یافتن پارامترهای بهینه شرایط الکتروروسی مختلف مورد بررسی قرار گرفت تا شرایط بهینه مورد نظر برای تولید الیاف حاصل شد (جدول (۱)). به منظور الکتروروسی از دستگاه الکتروروسی موجود در آزمایشگاه گروه مهندسی شیمی دانشگاه آلتو مجهز به سیستم ولتاژ قوی تا ۳۰ کیلوولت، جمع کننده آلومینیومی (۱۵۰۰-۲۰ دور بر دقیقه) و پمپ سرنگ استفاده شد.

گرانروی و هدایت الکتریکی محلول برای فرایند الکتروروسی بسیار مهم است، به همین دلیل ابتدا قابلیت الکتروروسی با سیستم تک حلالی مورد بررسی قرار گرفت. برای آماده سازی محلول مورد نظر برای الکتروروسی در ابتدا تلاش شد که از استون به تنهایی برای الکتروروسی استفاده شود، اما به دلیل سرعت تبخیر بالای حلال استون الکتروروسی انجام نشد، سپس به منظور کاهش سرعت تبخیر حلال از سیستم حلال دوتایی استون و دی متیل استامید استفاده شد. به هدف یافتن غلظت بهینه الکتروروسی از درصدهای وزنی مختلف استات سلولز ۸٪،

جدول ۱- پارامترهای مختلف و شرایط الکتروروسی محلول ۱۰ درصد وزنی استات سلولز فیلتر سیگار در دمای ۲۴ درجه سانتی گراد و

رطوبت محیط ۱۸ درصد

کد تیمار	ولتاژ (Kv)	فاصله نوک سوزن تا جمع کننده (cm)	نرخ تغذیه (ml/hr)	دور جمع کننده (rpm)
A	۱۰	۱۵	۱	۵۰۰
B	۱۲	۱۴	۰/۶	۸۰۰
C	۱۴	۱۳/۵	۰/۹	۱۵۰۰
D	۱۳/۵	۱۲	۱/۵	۲۲۰۰
E	۱۶	۱۱	۰/۶	۶۰۰

محلول مورد نظر قبل از الکتروروسی تحت خلأ قرار گرفت تا حباب‌های موجود در محلول کامل از بین رفت، سپس محلول به سرنگ شیشه‌ای به حجم ۶ میلی لیتر انتقال داده شد و سوزن فلزی با قطر داخلی ۰/۹ میلی متر (G۲۰) استفاده شد [۴۰]، سایر شرایط الکتروروسی محلول در جدول ۲ ذکر شده است. همچنین محلول مشابه استات سلولز فیلتر سیگار برای پودر استات سلولز سیگما تهیه و الکتروروسی انجام شد که سایر شرایط و پارامترها برای هر دو محلول یکسان بود.

پس از بررسی قابلیت الکتروروسی محلول تهیه شده در شرایط الکتروروسی مختلف و بررسی لایه الیاف تهیه شده از نظر کیفیت الیاف، یکنواختی قطر الیاف و عدم وجود گره، در نهایت تیمار بهینه که تیمار با کد B بود به عنوان تیمار قابل قبول در نظر گرفته شد. به منظور تهیه محلول ابتدا محلول ۱۰ درصد وزنی استات سلولز فیلتر سیگار با حلال استون و دی متیل استامید به نسبت ۲ به ۱ تهیه شد و به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط روی همزن مغناطیسی با سرعت ۵۰۰ دور بر دقیقه قرار داده شد تا کاملاً محلول شفاف و یکنواخت حاصل شد. سپس

جدول ۲- پارامترهای بهینه مورد استفاده برای الکتروروسی

درصد وزنی (%W) محلول	ولتاژ (Kv)	فاصله نوک سوزن تا جمع کننده (cm)	نرخ تغذیه (ml/hr)	دور جمع کننده (rpm)	دما (°C)	رطوبت (%)
۱۰	۱۲	۱۴	۰/۶	۸۰۰	۲۴	۱۸

به منظور بررسی ترکیبات موجود در مایع استخراجی فیلترهای سیگار استفاده شده از دستگاه کروماتوگرافی گازی-طیف سنج جرمی، مجهز به GC2010 متصل به

آزمون‌ها و تجهیزات مورد استفاده

کروماتوگرافی گازی طیف سنج جرمی (GC-MS)

مقایسه الیاف استات سلولز سیگما و الیاف استات سلولز فیلتر سیگار از نظر تغییرات شیمیایی در نمونه‌ها استفاده شد.

## نتایج و بحث

### کروماتوگرافی گازی طیف‌سنج جرمی

ترکیب شاخص و اصلی در ترکیب فیلتر سیگار نیکوتین موجود در آن است که همراه با سایر ترکیبات سمی دیگر پس از استعمال سیگار در فیلتر سیگار وجود دارد، ترکیبات شناسایی شده توسط دستگاه همراه با زمان بازداری آن‌ها در جدول ۳ قابل مشاهده است.

کروماتوگرام گازی مواد استخراجی موجود در فیلتر سیگار و طیف جرمی نیکوتین موجود در آن در شکل ۳-الف وب نشان داده شده است. با توجه به شکل ۳-الف بیشترین فراوانی مربوط به حضور نیکوتین بود که در  $(m/z)$  ۸۴،  $m/z$  ۱۳۳ و  $m/z$  ۱۷۸ مشاهده شد. Franqui و همکاران (۲۰۱۵) سنتز و شناسایی بسیار جاذب مغناطیسی برای استخراج انتخابی نیکوتین و کوتینین از نمونه‌های ادرار به‌وسیله کروماتوگرافی گازی طیف‌سنج جرمی را بررسی کردند و پیک‌های مربوط به نیکوتین را در  $m/z$  ۸۴ (به‌عنوان پیک پایه)،  $m/z$  ۱۳۳ و  $m/z$  ۱۶۲ (پیک مولکولی) گزارش کردند [۳۹]. در پژوهشی دیگر Li و همکاران (۲۰۲۲)، تعیین مستقیم محتوای نیکوتین آزاد در تنباکو را به‌وسیله فنون کروماتوگرافی گازی طیف‌سنج جرمی بررسی کردند و ظهور پیک مربوط به نیکوتین را در زمان ۸ تا ۷ دقیقه از فرایند گزارش کردند [۴۰] و همان طور که در شکل ۳-ب مشاهده می‌شود فراوانی مربوط به نیکوتین در زمان ۵ تا ۶ دقیقه از فرایند توسط دستگاه ثبت شده است.

طیف‌سنج جرمی (PARVUM2) ساخت شرکت Shimadzu، کیوتو-ژاپن موجود در آزمایشگاه گروه مهندسی شیمی دانشگاه آلتو فنلاند استفاده شد. ۳ میلی-لیتر محلول به ویال شیشه‌ای کروماتوگرافی گازی (GC) منتقل شد و نمونه‌ها توسط سرنگ همیلتون به دستگاه تزریق شد، ستون به طول ۳۰ متر با قطر  $0.25 \mu\text{m}$  مورد استفاده قرار گرفته، دمای آغازین ستون  $80^\circ\text{C}$  بوده و با سرعت ۱۰ درجه در دقیقه به  $300^\circ\text{C}$  و به مدت ۱۵ دقیقه در آن دما نگهداری شد. پس از اتمام فرایند با استفاده از اطلاعات موجود در کتابخانه دستگاه نسبت به شناسایی ترکیبات تشکیل دهنده موجود در مایع استخراجی از فیلترهای سیگار اقدام شد.

### میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل

#### میدانی (FE-SEM)

به‌منظور بررسی مرفولوژیکی الیاف فیلتر سیگار قبل و بعد از پالایش و مشاهده قطر الیاف تولید شده پس از الکتروریسی از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (آلمان، FE-SEM, Zeiss Sigma VP) با ولتاژ ۳ کیلوولت موجود در دانشکده فیزیک دانشگاه آلتو فنلاند استفاده شد. نمونه‌ها در ابعاد ۱ در ۱ سانتی‌متر برش داده شد و با استفاده از نوار کربن رسانا روی قطعات آلومینیومی چسبانده شدند و با یک لایه فلز طلا / پالادیوم ۶ نانومتری با استفاده از روکش کندوپاش با خلأ زیاد Leica EM ACE600 پوشش داده شدند تا تصویر برداری تسهیل شود. همچنین توزیع قطر الیاف نیز با استفاده از نرم افزار ImageJ همزمان حین تصویر برداری با میکروسکوپ الکترونی تعیین شد.

### طیف‌سنجی مادون قرمز (ATR-FTIR)

طیف‌سنجی جذبی مادون قرمز (ATR) با استفاده از یک طیف‌سنج تک برد IR مدل (PerkinElmer Inc. MA, USA)، مجهز به کریستال ZnSe ATR و آشکارساز  $\text{LiTaO}_3$  انجام شد. طیف‌ها در محدوده  $4000-400 \text{ cm}^{-1}$  با وضوح  $8 \text{ cm}^{-1}$  ثبت شدند و طیف‌های به‌دست‌آمده با استفاده از نرم‌افزار Spectragryph (فریدریش منگر، آلمان) نرمال‌سازی شدند. از آنالیز طیف‌سنجی مادون قرمز برای

<sup>1</sup> mass divided by charge number ( $m/z$ )

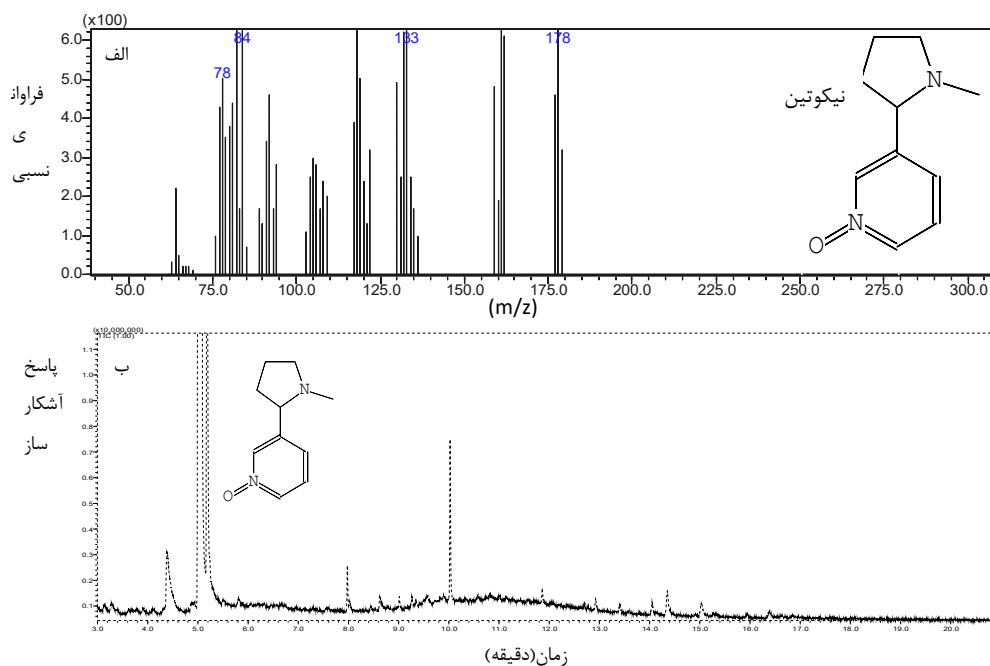
جدول ۳- ترکیبات شیمیایی موجود در محلول استخراجی حاصل از پالایش فیلتر سیگار استفاده شده

ترکیب شیمیایی	زمان بازداری
اکتا دیونیک اسید، فنیل متیل استر	۴/۱۱۸
گلیسرول، ۱ و ۲ دی استات	۴/۴
ایزوبرنیل استات	۴/۸۸۲
پیریدین، ۳-(۱-متیل-۲-پیرولیدینیل)، ۱-اکسید، - نیکوتین	۵/۲۱۷
بنزن پروپانول، آلفا-متیل، استات	۵/۸۱
اوکتادسین-۱	۷/۹۷۸
اسید پالمیتیک، مشتق تری متیل سیلیل	۹/۰۱۳
اکسای سیکلو [۴،۱،۰] هپتان، ۱-متیل-۴-(۲-متیل اوکسی رانیل)	۹/۲۶۳
تری بوتیل استر	۹/۳۴۷
بنزو فورانون، هگزهیدرو- ۴،۴،۷ تری متیل	۹/۵۷۷
تری بوتیل استیل سیترات	۱۰/۰۲۸
دوتریاکونتیل ایزوپروپیل اتر	۱۱/۸۶
پیریدین متیل پیرولیدین) N ۳-	۱۲/۷۰۵

در تنباکو را به وسیله فنون کروماتوگرافی گازی طیف سنج جرمی بررسی کردند و ظهور پیک مربوط به نیکوتین را در زمان ۸ تا ۷ دقیقه از فرایند گزارش کردند [۴۰] و همان طور که در شکل ۳-ب مشاهده می شود فراوانی مربوط به نیکوتین در زمان ۵ تا ۶ دقیقه از فرایند توسط دستگاه ثبت شده است.

با توجه به نتایج کروماتوگرافی گازی طیف سنج جرمی مشخص شد که آلودگی های مربوط به فیلتر سیگار به میزان قابل توجهی طی فرایند استخراج از فیلترها خارج شده و حلال تولوئن و اتانول برای پالایش و تصفیه فیلتر-های سیگار استفاده شده بسیار کارآمد است.

کروماتوگرام گازی مواد استخراجی موجود در فیلتر سیگار و طیف جرمی نیکوتین موجود در آن در شکل ۳-الف وب نشان داده شده است. با توجه به شکل ۳-الف بیشترین فراوانی مربوط به حضور نیکوتین بود که در (m/z) ۸۴، ۱۳۳ و ۱۷۸ مشاهده شد. Franqui و همکاران (۲۰۱۵) سنتز و شناسایی بسیار جاذب مغناطیسی برای استخراج انتخابی نیکوتین و کوتینین از نمونه های ادرار به وسیله کروماتوگرافی گازی طیف سنج جرمی را بررسی کردند و پیک های مربوط به نیکوتین را در (m/z) ۸۴ (به عنوان پیک پایه)، ۱۳۳ m/z و ۱۶۲ m/z (پیک مولکولی) گزارش کردند [۳۹]. در پژوهشی دیگر Li و همکاران (۲۰۲۲)، تعیین مستقیم محتوای نیکوتین آزاد

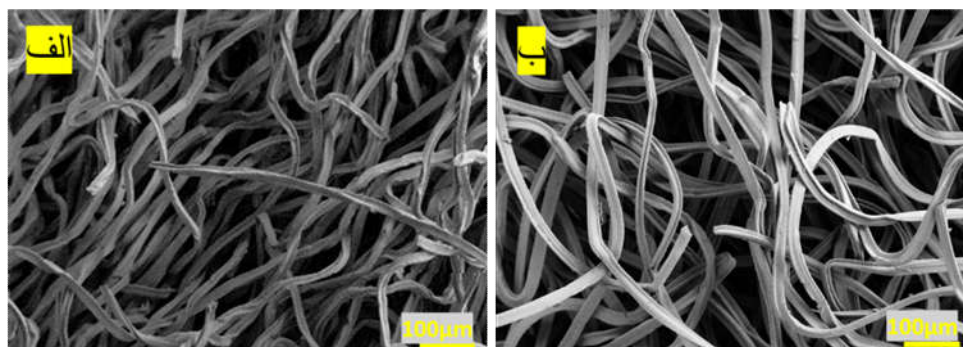


شکل ۳- الف- طیف جرمی مربوط به نیکوتین موجود در ماده استخراجی فیلتر سیگار، ب- کروماتوگرام گازی مواد استخراجی موجود در فیلتر سیگار

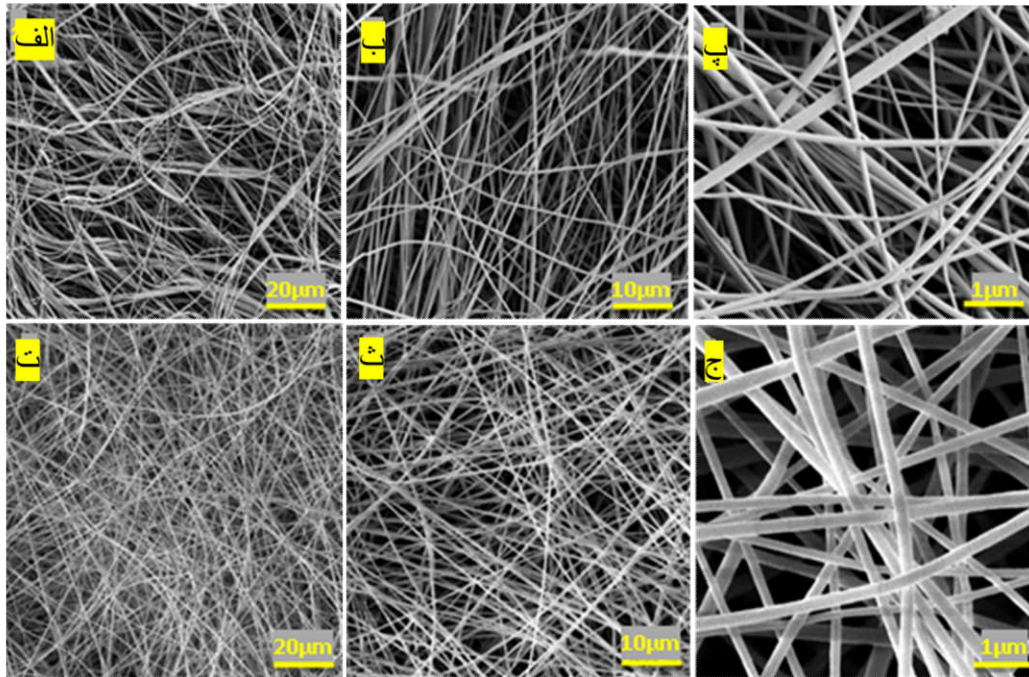
میکروسکوپ الکترونی الیاف فیلتر سیگار پس از پالایش است، همان‌طور که مشاهده می‌شود پالایش الیاف فیلتر سیگار استفاده‌شده خواص ظاهری و مرفولوژیکی الیاف را تحت تأثیر قرار نداد و تغییر خاصی در الیاف پس از پالایش مشاهده نشد.

### بررسی مرفولوژی فیلتر سیگار و الیاف الکتروریسی شده

پس از پالایش فیلترهای سیگار به‌منظور بررسی تأثیر پالایش بر خواص الیاف تصاویر میکروسکوپ الکترونی تهیه شد. شکل ۴- الف مرفولوژی الیاف فیلتر سیگار قبل از پالایش را نشان می‌دهد. همچنین شکل ۴- ب تصویر



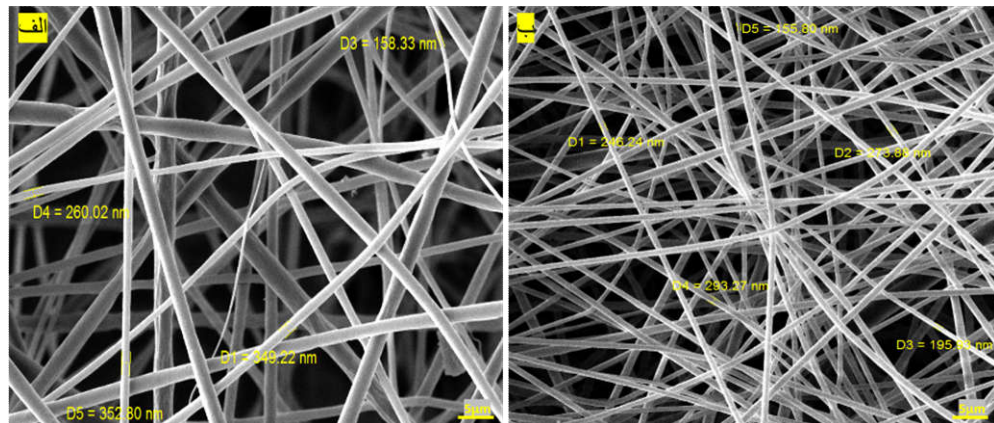
شکل ۴- الف- تصویر میکروسکوپ الکترونی الیاف فیلتر سیگار استفاده‌شده قبل از پالایش، ب- تصویر میکروسکوپ الکترونی الیاف فیلتر سیگار پس از پالایش



شکل ۵- تصاویر میکروسکوپی مربوط به الیاف تولید شده از استات سلولز بازیافتی فیلتر سیگار (الف، ب و پ) و پودر استات سلولز سیگما (ت، ث، ج) در سه بزرگنمایی مختلف

تولید شده از پودر استات سلولز سیگما مورد بررسی میکروسکوپی قرار گرفت که در شکل ۵-ت، ث و ج مشاهده می‌شود، با توجه به این تصاویر می‌توان گفت الیاف تولید شده دارای خواص سطحی یکسان بوده و هیچ گونه معایب ظاهری از جمله گره یا دانه در آن‌ها مشاهده نشد که به خوبی در تصاویر میکروسکوپی قابل مشاهده است، همچنین قطر الیاف تولید شده در شکل ۶-الف و ب قابل مشاهده است.

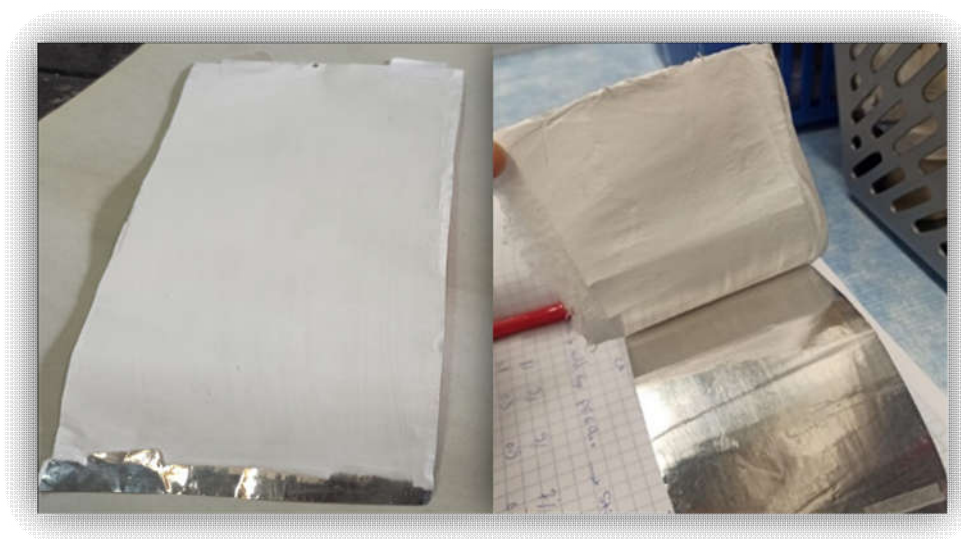
پس از تولید الیاف به روش الکترورسی لایه الیاف تشکیل شده دارای یکنواخت و همگن بود، همچنین تصاویر میکروسکوپ الکترونی الیاف تهیه شد که در شکل ۵ قابل مشاهده است. با توجه به شکل ۵-الف، ب و پ که تصاویر مربوط به نانو الیاف تولید شده از استات سلولز بازیافتی فیلتر سیگار در بزرگنمایی‌های مختلف است می‌توان دریافت که نانو الیاف تهیه شده کاملاً بدون دانه و به صورت یکنواخت تولید شده است، همچنین الیاف



شکل ۶- تصویر الکترونی ابعاد الیاف تولید شده از استات سلولز بازیافتی فیلتر سیگار (الف) و پودر استات سلولز سیگما (ب)

الیاف را کاهش داد در حالی که استفاده از دی متیل فرم آمید به تنهایی به عنوان حلال، موجب تولید الیاف پر از دانه با قطر زیاد شد، در پژوهش حاضر نیز نقش دی متیل استامید در ترکیب با استون مشابه دی متیل فرم آمید بوده و موجب ایجاد الیاف با قطر کم و بافت یکنواخت شد [۴۲]. نتایج آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی نشان داد که امکان تولید الیاف در محدوده میکرومتر از فیلترهای سیگار استفاده شده همانند الیاف تهیه شده از پودر استات سلولز سیگما وجود داشته و سیستم حلال دوتایی استون و دی متیل استامید بسیار مؤثر و کارآمد در جهت الکترورسی استات سلولز بازیافتی و پودری است. همچنین پالایش فیلترها قبل از استفاده برای الکترورسی بسیار کارآمد بوده و موجب ایجاد الیاف با ساختار فیزیکی قابل قبول شد که بدون نیاز به پیش تیمار خاصی (برای مثال قرار دادن لایه الیاف تشکیل شده در آب به منظور جداسازی از فویل) به راحتی از فویل جدا شد (شکل ۷).

با توجه به شکل ۶-الف وب مشاهده شد که قطر الیاف تولید شده از استات سلولز بازیافتی و پودر استات سلولز سیگما در محدوده نانو بوده و به طور میانگین ۴۰۰-۱۵۰ نانومتر است و پراکندگی قطر الیاف تقریباً یکنواخت است، همچنین پژوهش‌های مشابه از جمله Hemamalini و همکاران (۲۰۱۹)، دریافتند که حضور نیکوتین و سایر ناخالصی‌ها در فیلتر سیگار فرایند الکترورسی را تحت تأثیر قرار داده و موجب ایجاد دانه‌ها در سطح الیاف شده که همچنین قابلیت الکترورسی محلول را کاهش می‌دهد، در حالی که پس از کاهش آلودگی‌ها و تصفیه الیاف فیلتر سیگار، دانه‌ها کاهش یافت و الیاف به خوبی الکترورسی شد [۴۱]. Sinha-Ray و Kakoria (۲۰۲۲)، گزارش کردند که افزودن استون به عنوان حلال در الکترورسی الیاف فیلتر سیگار در کنار حلال دی متیل فرم آمید موجب ایجاد الیاف ظریف‌تر و کاهش مقدار دانه‌های تولید شده در سطح الیاف شد، افزودن دی متیل فرم آمید به استون با به تعویق انداختن سرعت تبخیر حلال، تشکیل دانه در



شکل ۷- لایه الیاف الکترورسی شده

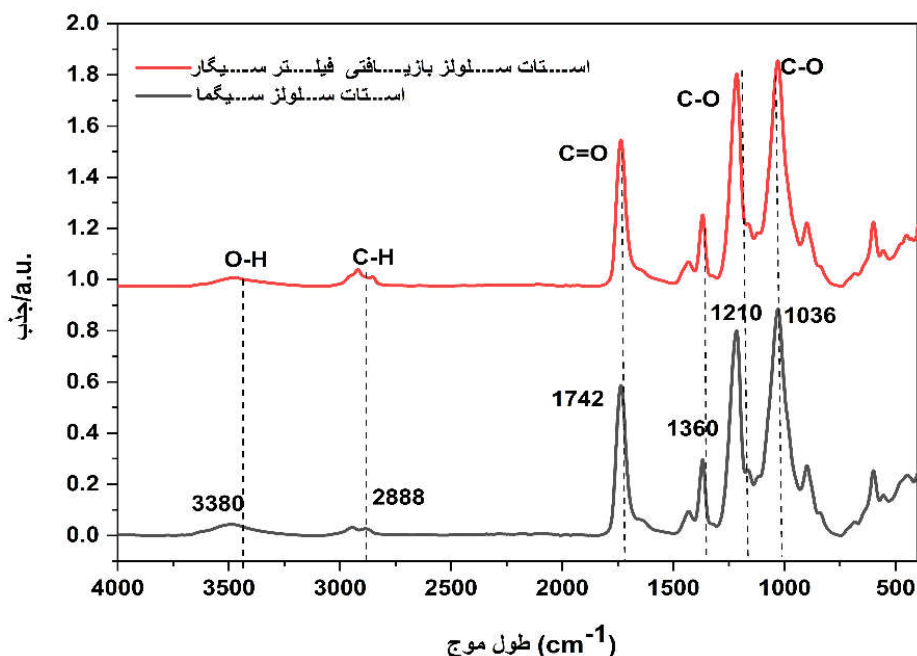
ارتعاشات کششی (O-H) گروه‌های هیدروکسیل در هر دو نمونه است که این مقدار در استات سلولز پودری بیشتر است که ممکن است به دلیل حضور رطوبت در پودر استات سلولز باشد. در مورد سلولز و مشتقات سلولزی محدوده اعداد موجی بین  $3600\text{ cm}^{-1}$  و  $3400\text{ cm}^{-1}$  به

#### طیف‌سنجی مادون قرمز (ATR-FTIR)

شکل ۸، طیف مربوط به پیوندهای شیمیایی موجود در الیاف تهیه شده از پودر استات سلولز سیگما و استات سلولز فیلتر سیگار بازیافتی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۸ پیک موجود در طول موج  $3380\text{ cm}^{-1}$  مربوط به

حضور پیک‌های شدید در محدوده طول موج  $1200\text{ cm}^{-1}$  مربوط به ارتعاشات کششی گروه استرات سلولز است، در حالی که پیک شدید و نسبتاً پهن‌تر در محدوده  $1030\text{ cm}^{-1}$  پیک‌های ضعیف در  $1150\text{ cm}^{-1}$  مربوط به ارتعاشات کششی (C-O) گروه‌های اتری است [۴۶]. پیک در طول موج حدودی  $800\text{ cm}^{-1}$  مشخصه پیوند خارج از صفحه C-O-H و پیوندهای  $\beta$ -گلوکوزیدی است [۴۵].

کشش گروه‌های هیدروکسیل نسبت داده می‌شود [۴۳]. وجود پیک FTIR در محدوده  $3400\text{ cm}^{-1}$  می‌تواند به پیوندهای هیدروژنی درون مولکولی در استرات سلولز مربوط باشد [۴۴]. طول موج  $2849-2959\text{ cm}^{-1}$  مربوط به ارتعاشات کششی (C-H) نامتقارن گروه‌های متیل و متیلن در زنجیره‌های پلیمری سلولز است. همچنین، وجود پیک نسبتاً شدید در طول موج  $1742\text{ cm}^{-1}$  مشخصه ارتعاشات کششی (C=O) گروه‌های استری است [۴۵].



شکل ۸- طیف مربوط به پیوندهای شیمیایی الیاف الکترورسی شده استرات سلولز فیلتر سیگار و پودر استرات سلولز سیگما

دارای خواص یکسان و مشابه با پودر استرات سلولز سیگما بود و تصاویر میکروسکوپ الکترونی تهیه شده از الیاف نشان داد که فرایند الکترورسی محلول ۱۰ درصد وزنی از هر دو نوع استرات سلولز بازیافتی و پودری بدون دانه و با الیاف کاملاً یکنواخت تولید شد. آنالیز طیف‌سنجی مادون قرمز این تشابه الیاف را از نظر شیمیایی نیز تأیید کرد و نشان داد خواص الیاف تهیه شده از دو منبع استرات سلولز تقریباً مانند یکدیگر است. با توجه به نتایج حاصل شده می‌توان امکان استفاده الیاف تهیه شده از فیلتر سیگار را برای کاربردهای مختلف از جمله فیلتراسیون و غشاءهای جداسازی یا موارد مشابه مورد بررسی قرار داد.

به‌طور کلی طیف مادون قرمز جذبی ثبت شده از الیاف الکترورسی شده نشان داد که پیوندهای شیمیایی استرات سلولز بازیافتی به‌دست آمده از فیلتر سیگار به میزان بالایی با پودر استرات سلولز سیگما شباهت دارد و تغییرات محسوسی در دو طیف وجود ندارد به‌ویژه در پیک‌های شاخص استرات سلولز که عیناً در مورد فیلتر سیگار نیز به همان صورت است و کاملاً یا یکدیگر همپوشانی دارد.

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش الیاف استرات سلولز با موفقیت از فیلتر سیگار بازیافتی به‌وسیله تکنیک الکترورسی تولید شد. الیاف فیلتر سیگار به خوبی پالایش شده و الیاف تهیه شده

- Methods, materials, and applications. Chemical Reviews, 119(8), pp.5298-5415.
- [11] Almetwally, A.A., El-Sakhawy, M., Elshakankery, M.H. and Kasem, M.H., 2017. Technology of nanofibers: Production techniques and properties-Critical review. Journal of Textile Association, 78(1), pp.5-14.
- [12] Barhoum, A., Pal, K., Rahier, H., Uludag, H., Kim, I.S. and Bechelany, M., 2019. Nanofibers as new-generation materials: From spinning and nanospinning fabrication techniques to emerging applications. Applied Materials Today, 17, pp.1-35.
- [13] Ibrahim, H.M. and Klingner, A., 2020. A review on electrospun polymeric nanofibers: Production parameters and potential applications. Polymer Testing, 90, p.106647.
- [14] Beachley, V. and Wen, X., 2010. Polymer nanofibrous structures: Fabrication, biofunctionalization, and cell interactions. Progress in Polymer Science, 35(7), pp.868-892.
- [15] Kondo, T., 1997. The relationship between intramolecular hydrogen bonds and certain physical properties of regioselectively substituted cellulose derivatives. Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics, 35(4), pp.717-723.
- [16] Fischer, S., Thümler, K., Volkert, B., Hettrich, K., Schmidt, I. and Fischer, K., 2008. Properties and applications of cellulose acetate. In: Macromolecular Symposia, 262(1), pp.89-96. Weinheim: Wiley-VCH Verlag.
- [17] Heyman, N., 2020. High Resolution 3D Printing with Cellulose Acetate.
- [18] Dufresne, A., 2017. Nanocellulose: From Nature to High Performance Tailored Materials. Berlin: Walter de Gruyter GmbH.
- [19] Ji, S.H. and Yun, J.S., 2022. Highly porous-cellulose-acetate-nanofiber filters fabricated by nonsolvent-induced phase separation during electrospinning for PM2.5 capture. Nanomaterials, 12(3), p.404.
- [20] Du, J. and Hsieh, Y.L., 2009. Cellulose/chitosan hybrid nanofibers from electrospinning of their ester derivatives. Cellulose, 16, pp.247-260.
- [21] Zhang, L. and Hsieh, Y.L., 2008. Ultrafine cellulose acetate fibers with nanoscale structural features. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 8(9), pp.4461-4469.
- [22] Olaru, N., Anghel, N., Pascariu, P. and Ailiesei, G., 2019. Synthesis and testing of cellulose acetate nicotinate as adsorbent for rhodamine B dye. Journal of Applied Polymer Science, 136(29), p.47772.
- [23] Zhang, Y., Zhang, C. and Wang, Y., 2021. Recent progress in cellulose-based electrospun nanofibers as multifunctional materials. Nanoscale Advances, 3(21), pp.6040-6047.

## سیاسگزاری

پژوهش حاضر با حمایت مالی گروه بایو مواد و تکنولوژی زیستی "Business Finland" دانشگاه آلتو فنلاند انجام شد که نویسندگان لازم می‌دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را برای این همکاری اعلام نمایند.

## منابع

- [1] Joshi, S.V., Drzal, L.T., Mohanty, A.K. and Arora, S., 2004. Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites? *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 35(3), pp.371-376.
- [2] Saba, N., Jawaid, M., Alothman, O.Y., Inuwa, I.M. and Hassan, A., 2017. A review on potential development of flame retardant kenaf fibers reinforced polymer composites. *Polymers for Advanced Technologies*, 28(4), pp.424-434.
- [3] Saba, N., Jawaid, M., Paridah, M.T. and Al-Othman, O.Y., 2016. A review on flammability of epoxy polymer, cellulosic and non-cellulosic fiber reinforced epoxy composites. *Polymers for Advanced Technologies*, 27(5), pp.577-590.
- [4] Ashtari, H., Janoobi, M., Yousefzadeh, M. and Hamze, Y., 2018. Preparation and characterization of electrospun polyvinyl alcohol nanofibers incorporating cellulose nanocrystals. *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, 33(3), pp.438-452. doi:10.22092/ijwpr.2018.121871.1475.
- [5] Ramakrishna, S., Fujihara, K., Teo, W., Lim, T. and Ma, Z., 2005. An Introduction to Electrospinning and Nanofibers. Singapore: World Scientific Publishing Co.
- [6] Zhao, Y., Qiu, Y., Wang, H., Chen, Y., Jin, S. and Chen, S., 2016. Preparation of nanofibers with renewable polymers and their application in wound dressing. *International Journal of Polymer Science*, 2016, pp.1-8.
- [7] Bachs-Herrera, A., Yousefzadeh, O., del Valle, L.J. and Puiggali, J., 2021. Melt electrospinning of polymers: blends, nanocomposites, additives and applications. *Applied Sciences*, 11(4), p.1808.
- [8] Shaban, N.Z., Kenawy, M.Y., Taha, N.A., El-Latif, A., Mona, M. and Ghareeb, D.A., 2021. Cellulose acetate nanofibers: Incorporating hydroxyapatite (HA), HA/berberine or HA/moghat composites, as scaffolds to enhance in vitro osteoporotic bone regeneration. *Polymers*, 13(23), p.4140.
- [9] Figen, A.K., 2020. History, basics, and parameters of electrospinning technique. In: *Electrospun Materials and Their Allied Applications*, pp.53-69.
- [10] Xue, J., Wu, T., Dai, Y. and Xia, Y., 2019. Electrospinning and electrospun nanofibers:

- [38] Shen, M., Li, Y., Song, B., Zhou, C., Gong, J. and Zeng, G., 2021. Smoked cigarette butts: Unignorable source for environmental microplastic fibers. *Science of the Total Environment*, 791, p.148384.
- [39] Belzagui, F., Buscio, V., Gutierrez-Bouzan, C. and Vilaseca, M., 2021. Cigarette butts as a microfiber source with a microplastic level of concern. *Science of the Total Environment*, 762, p.144165.
- [40] Arroyo, F.D., Castro-Guerrero, C.F. and León-Silva, U., 2020. Thin films of cellulose acetate nanofibers from cigarette butt waste. *Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology*, 36(1), pp.3-17.
- [41] Ji, S.H. and Yun, J.S., 2022. Highly porous-cellulose-acetate-nanofiber filters fabricated by nonsolvent-induced phase separation during electrospinning for PM2.5 capture. *Nanomaterials*, 12(3), p.404.
- [42] Franqui, L.S., Santos, M.G., Virtuoso, L.S., Maia, P.P. and Figueiredo, E.C., 2015. Synthesis and characterization of a magnetic molecularly imprinted polymer for the selective extraction of nicotine and cotinine from urine samples followed by GC-MS analysis. *Analytical Methods*, 7(21), pp.9237-9244.
- [43] Li, L., Zhang, H., Wen, J., Shen, Y., Li, D., Luo, C., Zheng, J. and Yang, J., 2022. Direct determination of free nicotine content in tobacco. *ACS Omega*, 7(27), pp.23061-23068.
- [44] Hemamalini, T., Karunakaran, S.A., Elango, M.K., Ram, T.S. and Dev, V.R., 2019. Regeneration of cellulose acetate nanofibrous mat from discarded cigarette butts.
- [45] Kakoria, A. and Sinha-Ray, S., 2022. Ultrafine nanofiber-based high-efficiency air filter from waste cigarette butts. *Polymer*, 255, p.125121.
- [46] Glugoski, L.P., de Jesus Cubas, P. and Fujiwara, S.T., 2017. Reactive Black 5 dye degradation using filters of smuggled cigarette modified with Fe<sup>3+</sup>. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, pp.6143-6150.
- [47] Marchessault, R.H. and Liang, C.Y., 1960. Infrared spectra of crystalline polysaccharides. III. Mercerized cellulose. *Journal of Polymer Science*, 43(141), pp.71-86.
- [48] Janković, B., Kojić, M., Milošević, M., Rosić, M., Waisi, H., Božilović, B. and Dodevski, V., 2023. Upcycling of the used cigarette butt filters through pyrolysis process: Detailed kinetic mechanism with bio-char characterization. *Polymers*, 15(14), p.3054.
- [49] Sharma, A. and Sharma, V., 2023. Forensic analysis of cigarette filter using non-destructive ATR-FTIR spectroscopy and chemometric methods. *Forensic Chemistry*, 32, p.100465.
- [50] Glugoski, L.P., Cubas, P.J. and Fujiwara, S.T., 2017. Functionalized cellulose acetate filters for advanced environmental applications. *Journal of Environmental Science and Technology*, 15, pp.1203-1215.
- [24] Puls, J., Wilson, S.A. and Hölter, D., 2011. Degradation of cellulose acetate-based materials: A review. *Journal of Polymers and the Environment*, 19, pp.152-165.
- [25] Wsoo, M.A., Shahir, S., Bohari, S.P.M., Nayan, N.H.M. and Abd Razak, S.I., 2020. A review on the properties of electrospun cellulose acetate and its application in drug delivery systems: A new perspective. *Carbohydrate Research*, 491, p.107978.
- [26] Joseph, B., Sagarika, V.K., Sabu, C., Kalarikkal, N. and Thomas, S., 2020. Cellulose nanocomposites: Fabrication and biomedical applications. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 5(4), pp.223-237.
- [27] Mohajerani, A., Kadir, A.A. and Larobina, L., 2016. A practical proposal for solving the world's cigarette butt problem: Recycling in fired clay bricks. *Waste Management*, 52, pp.228-244.
- [28] Wang, W., Wang, M., Huang, J., Li, X., Cai, L., Shi, S.Q. and Ni, Y., 2020. High efficiency pyrolysis of used cigarette filters for ester-rich bio-oil through microwave-assisted heating. *Journal of Cleaner Production*, 257, p.120596.
- [29] Yousef, S., Eimontas, J., Striūgas, N., Praspaliauskas, M. and Abdelnaby, M.A., 2022. Pyrolysis kinetic behaviour, TG-FTIR, and GC/MS analysis of cigarette butts and their components. *Biomass Conversion and Biorefinery*, pp.1-21.
- [30] Ogundare, S.A., Moodley, V. and Van Zyl, W.E., 2017. Nanocrystalline cellulose isolated from discarded cigarette filters. *Carbohydrate Polymers*, 175, pp.273-281.
- [31] Dobaradaran, S., Soleimani, F., Akhbarizadeh, R., Schmidt, T.C., Marzban, M. and Basirian Jahromi, R., 2021. Environmental fate of cigarette butts and their toxicity in aquatic organisms: A comprehensive systematic review. *Environmental Research*, 195, p.110881.
- [34] Qamar, W., Abdelgalil, A.A., Aljarboa, S., Alhuzani, M. and Altamimi, M.A., 2020. Cigarette waste: Assessment of hazard to the environment and health in Riyadh city. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 27(5), pp.1380-1383.
- [35] Fei, P., Liao, L., Cheng, B. and Song, J., 2017. Quantitative analysis of cellulose acetate with a high degree of substitution by FTIR and its application. *Analytical Methods*, 9(43), pp.6194-6201.
- [36] Araújo, M.C.B. and Costa, M.F., 2019. A critical review of the issue of cigarette butt pollution in coastal environments. *Environmental Research*, 172, pp.137-149.
- [37] Smith, E.A. and Novotny, T.E., 2011. Whose butt is it? Tobacco industry research about smokers and cigarette butt waste. *Tobacco Control*, 20(Suppl 1), pp.i2-i9.