

ساخت و مشخصه یابی ماسک های نانولیفی کامپوزیتی الکتروریسی شده بر پایه سلولز استات حاوی نانوذرات اکسید آهن و اکسید مس برای فیلتراسیون ذرات معلق هوا

جواد نوری^۱، پیمان ولی پور^{۱*}، علیرضا حسین پور کاسگری^۱، رامین خواجهی^۲، وحید محمدی^۱

^۱ دانشکده مهندسی نساجی، پوشاک و مد، واحد قائم شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، قائم شهر، ایران

^۲ گروه مهندسی شیمی و پلیمر، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، مرکز پژوهشی فناوری نانو

pe.valipour@iau.ac.ir, ali.hoseinpour@iau.ac.ir

تاریخ دریافت ۱۴۰۵/۰۴/۱۱ تاریخ پذیرش ۱۴۰۵/۰۵/۲۳

چکیده:

آلودگی هوا و انتشار عوامل بیماری زا، ضرورت توسعه مواد فیلتری با راندمان بالا و ویژگی های عملکردی بهبود یافته را افزایش داده است. هدف این پژوهش، تهیه و ارزیابی اولیه نانولیف الکتروریسی شده سلولز استات اصلاح شده با نمک های سولفات آهن و سولفات مس به عنوان مدیای فیلتری بالقوه بود. ابتدا شرایط بهینه الکتروریسی با بررسی اثر غلظت محلول، ولتاژ اعمالی، نرخ تغذیه و فاصله نوک سوزن تا جمع کننده تعیین شد. سپس چهار نوع لایه شامل سلولز استات خالص، سلولز استات حاوی سولفات آهن، سلولز استات حاوی سولفات مس و سلولز استات حاوی ترکیب سولفات آهن و سولفات مس تولید شدند. ویژگی های مورفولوژیکی و قطر الیاف با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی، خواص مکانیکی با آزمون کشش، عملکرد فیلتراسیون و افت فشار تحت شرایط آزمون تعیین شده و تغییرات رشد میکروبی به صورت مقدماتی بررسی شد. نتایج نشان داد که افزایش غلظت محلول سلولز استات تا ۱۸ درصد وزنی موجب کاهش تشکیل ساختارهای دانه تسیجی و ایجاد الیاف یکنواخت تر شد. شرایط بهینه الکتروریسی شامل غلظت ۱۸ درصد وزنی، ولتاژ ۱۷ کیلوولت، فاصله ۷۰ میلی متر و نرخ تغذیه ۱ میلی لیتر بر ساعت تعیین گردید. افزودن نمک های فلزی موجب تغییر در مورفولوژی الیاف و کاهش قطر متوسط آن ها شد؛ به طوری که میانگین قطر الیاف نمونه های بررسی شده در محدوده ۰.۶۸۱ تا ۰.۶۸۱ میکرومتر قرار داشت. نمونه حاوی ترکیب آهن و مس در شرایط آزمون، راندمان فیلتراسیون ۹۷.۶۳، ۹۹.۹۷، ۹۹.۹۹ درصد به ترتیب برای ذرات ۰.۳، ۰.۵ و ۱ میکرون و افت فشار ۲۹ پاسگال را نشان داد. نتایج آزمون های مکانیکی و فیلتراسیون بر اساس سه تکرار مستقل و به صورت میانگین $\pm$ انحراف معیار گزارش شدند. بررسی مقدماتی رشد میکروبی نشان داد که حضور نمک های فلزی با تغییرات مشاهده شده در رشد کلنی ها همراه است؛ با این حال، به دلیل عدم استفاده از سوبه های استاندارد و نبود آزمون کمی، این نتایج تنها به عنوان شواهد اولیه از اثر احتمالی ترکیبات فلزی بر رشد میکروبی تفسیر می شوند. در مجموع، لایه های نانوالیافی سلولز استات اصلاح شده با نمک های آهن و مس می توانند به عنوان مدیای فیلتری با قابلیت بالقوه مورد بررسی قرار گیرند، اگرچه ارزیابی های تکمیلی شامل بررسی ایمنی زیستی، رهش یون های فلزی، دوام عملکرد در شرایط واقعی و آزمون های استاندارد کاربرد نهایی برای تأیید قابلیت استفاده عملی ضروری است.

کلمات کلیدی: الکتروریسی، سلولز استات، سولفات آهن، سولفات مس، فیلتراسیون ذرات معلق هوا.

Fabrication and Characterization of Electrospun, Cellulose acetate Nanofibrous Composite Masks Containing Iron and Copper Oxide Nanoparticles for Airborne Particulate Filtration

Javad Nouri¹, Peiman Valipour^{1*}, Alireza Hosinpour kasgari¹, Ramin Khajavi², Vahid Mohamadi¹

¹ Department of Textile Engineering, Apparel, and Fashion, QaS.C., Islamic Azad University, Qaem Shahr, IRAN

² Department of Chemical & Polymer Engineering, ST.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran Nanotechnology Research Center

pe.valipour@iau.ac.ir, ali.hoseinpour@iau.ac.ir

Abstract

Air pollution and the increasing spread of pathogenic agents have highlighted the need for the development of filtration materials with high efficiency and improved functional performance. In this study, electrospun cellulose acetate nanofibers modified with iron sulfate and copper sulfate salts were fabricated and preliminarily evaluated as potential filtration media. Initially, the optimal electrospinning conditions were determined by investigating the effects of solution concentration, applied voltage, feeding rate, and needle-to-collector distance. Subsequently, four types of nanofibrous layers, including pristine cellulose acetate, cellulose acetate containing iron sulfate, cellulose acetate containing copper sulfate, and cellulose acetate containing both iron sulfate and copper sulfate, were prepared. The morphological characteristics and fiber diameter were evaluated using scanning electron microscopy (SEM), mechanical properties were assessed by tensile testing, filtration performance and pressure drop were determined under the specified test conditions, and preliminary changes in microbial growth were investigated. The results demonstrated that increasing the cellulose acetate concentration to 18 wt% reduced bead formation and resulted in the formation of more uniform nanofibers. The optimum electrospinning parameters were determined as an 18 wt% polymer concentration, an applied voltage of 17 kV, a needle-to-collector distance of 70 mm, and a solution feeding rate of 1 mL h⁻¹. The incorporation of metal salts altered the fiber morphology and decreased the average fiber diameter, with the measured diameters ranging within [actual value] nm. The cellulose acetate containing both iron sulfate and copper sulphate sample exhibited a filtration efficiency of [actual value]% for particles with a size of [particle size] μ m and a pressure drop of [actual value] [unit] under the applied test conditions. The mechanical and filtration results were reported based on [number of independent replicates] independent replicates and expressed as mean $\pm$ standard deviation. Preliminary microbial growth evaluation indicated that the presence of metal salts was associated with changes in the observed colony growth patterns. However, due to the lack of reference microbial strains and quantitative antimicrobial analysis, these findings are considered preliminary evidence of the possible effect of metal-containing compounds on microbial growth rather than definitive antimicrobial activity. Overall, the developed metal salt-modified cellulose acetate nanofibrous layers demonstrated potential for further investigation as filtration media. Nevertheless, additional studies, including biosafety assessment, metal ion release evaluation, long-term performance stability under realistic conditions, and standardized application-related testing, are required before considering practical implementation.

Keywords: Electrospinning, Cellulose acetate, Copper sulfate, Iron sulfate, Airborne particulate filtration

۱- مقدمه

آلودگی هوا یکی از مهم‌ترین تهدیدهای سلامت انسان به شمار می‌رود و افزایش غلظت آلاینده‌های معلق در بسیاری از مناطق جهان، نگرانی‌های جدی در زمینه سلامت عمومی ایجاد کرده است. در این میان، ذرات معلق با قطر آیرودینامیکی کمتر از $5/2$ میکرومتر ($PM_{2.5}$) به دلیل قابلیت نفوذ به اعماق ریه و ورود به جریان خون، با افزایش بروز بیماری‌های تنفسی و قلبی عروقی ارتباط مستقیم دارند [۱ و ۲]. برای حذف این آلاینده‌ها روش‌های مختلفی از جمله جداسازی الکترواستاتیکی، فرآیندهای فتوکاتالیستی، جذب سطحی و ته‌نشینی توسعه یافته است، اما فیلترهای الیافی همچنان یکی از مؤثرترین گزینه‌ها برای حذف ذرات معلق و میکروآرگانیسم‌ها محسوب می‌شوند [۳-۵]. در میان انواع فیلترهای الیافی، نانوالیاف به دلیل قطر کم، سطح ویژه بالا، تخلخل مناسب و نسبت سطح به حجم زیاد، راندمان فیلتراسیون مطلوبی را همراه با افت فشار نسبتاً پایین فراهم می‌کنند [۴، ۶، ۷]. از میان روش‌های تولید نانوالیاف، الکتروریسی به دلیل سادگی تجهیزات، قابلیت کنترل مناسب پارامترهای فرآیند و امکان تولید الیاف پیوسته، به‌عنوان یکی از متداول‌ترین روش‌ها شناخته می‌شود [۸-۱۱].

کیفیت نانوالیاف تولیدشده به ویژگی‌های محلول پلیمری و شرایط فرآیند وابسته است. پارامترهایی مانند ویسکوزیته،

رسانایی الکتریکی، کشش سطحی، نوع حلال و میزان درهم‌تنیدگی زنجیره‌های پلیمری، تشکیل جت پایدار و مورفولوژی نهایی الیاف را تحت تأثیر قرار می‌دهند [۱۲]. علاوه بر این، پارامترهای عملیاتی شامل نرخ تغذیه، فاصله نوک سوزن تا جمع‌کننده و اختلاف پتانسیل اعمالی نیز نقش مهمی در تشکیل الیاف یکنواخت و بدون ساختار دانه تسبیحی دارند و مقدار بهینه آن‌ها برای هر سامانه پلیمری باید به‌صورت تجربی تعیین شود [۱۳-۱۷].

در سال‌های اخیر، استفاده از نانوالیاف الکتروریسی شده در مدیاهای فیلتری ماسک‌های تنفسی مورد توجه قرار گرفته است. مطالعات نشان داده‌اند که افزودن لایه‌های نانوالیافی می‌تواند راندمان حذف ذرات را افزایش دهد، در حالی که افت فشار را در محدوده قابل قبول حفظ کند [۱۸-۲۰]. عملکرد این فیلترها بر پایه مکانیسم‌هایی نظیر برخورد اینرسی، رهگیری، انتشار براونی، ته‌نشینی گرانشی و جذب الکترواستاتیکی است که سهم هر یک به اندازه ذرات و ویژگی‌های ساختار الیافی وابسته است [۲۱-۲۶]. پس از همه‌گیری کووید-۱۹، توسعه مواد فیلتری با قابلیت حذف ذرات و ویژگی‌های ضد میکروبی بیش از پیش مورد توجه قرار گرفت. در این راستا، نانوذرات و اکسیدهای فلزی از جمله نقره، اکسید مس، اکسید روی و اکسید آهن به دلیل خواص ضد میکروبی خود در ساختار نانوالیاف به کار گرفته شده‌اند [۲۷-۳۵]. با این حال، عملکرد این ترکیبات علاوه بر نوع ماده فلزی، به نوع پلیمر، روش افزودن،

شرایط فرآیند الکتروریسی و نحوه توزیع آن‌ها در شبکه نانوالیافی وابسته است.

مطالعات متعددی اثر استفاده از ترکیبات فلزی در نانوالیاف فیلتری را بررسی کرده‌اند [۳۶-۳۸]، اما بیشتر این پژوهش‌ها بر استفاده از نانوذرات یا اکسیدهای فلزی متمرکز بوده‌اند. در مقابل، اطلاعات موجود درباره استفاده از نمک‌های فلزی محلول به‌عنوان افزودنی در محلول الکتروریسی و تأثیر آن‌ها بر ویژگی‌های ساختاری و عملکردی نانوالیاف در سامانه‌های پلیمری مختلف محدود است. همچنین، ارتباط میان حضور این نمک‌ها، تغییرات مورفولوژی الیاف، عملکرد فیلتراسیون و تغییرات اولیه رشد میکروبی هنوز نیازمند بررسی بیشتر است.

بر این اساس، هدف پژوهش حاضر، تهیه نانوالیاف سلولز استات حاوی سولفات آهن و سولفات مس به روش الکتروریسی و بررسی اثر این نمک‌ها بر مورفولوژی الیاف، خواص مکانیکی، عملکرد فیلتراسیون و ارزیابی مقدماتی تغییرات رشد میکروبی است. در این مطالعه تلاش شد ارتباط بین حضور نمک‌های فلزی محلول در محلول الکتروریسی و ویژگی‌های ساختاری و عملکردی لایه‌های نانوالیافی مورد بررسی قرار گیرد.

۲- تجربیات

۲-۱- مواد

سلولز استات (Cellulose Acetate, CA) مورد استفاده در این پژوهش از شرکت Sigma-Aldrich (USA) تهیه شد.

مشخصات این پلیمر شامل نقطه ذوب ۲۳۰ درجه سانتی گراد، چگالی ۱.۳ (g/cm³)، فرمول شیمیایی [C₆H₇O₂(OH)] بود. استون (Acetone) به‌عنوان حلال اصلی از شرکت دکتر مجلی (ایران) و اسید استیک گلاسیال (Glacial Acetic Acid) از (Germany) تهیه شدند. مخلوط این دو حلال برای تهیه محلول الکتروریسی مورد استفاده قرار گرفت.

به منظور اصلاح ساختار نانوالیاف، از سولفات آهن هفت‌آبه (FeSO₄·7H₂O) و سولفات مس (CuSO₄) ساخت شرکت Merck آلمان استفاده شد. این نمک‌ها با توجه به انحلال‌پذیری مناسب در محیط حلال، دسترسی آسان، هزینه نسبتاً پایین و گزارش‌های پیشین درباره اثرات ضد میکروبی آن‌ها انتخاب شدند. برای ارزیابی مقدماتی تغییرات رشد باکتری‌ها، از محیط کشت نوترینت آگار (Nutrient Agar) تهیه‌شده از شرکت تعاونی کاردان‌آزما (ایران) استفاده شد. این محیط کشت به‌عنوان یک محیط عمومی برای رشد باکتری‌ها به‌کار می‌رود و در این پژوهش جهت مقایسه کیفی رشد کلنی‌ها در نمونه‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفت.

۲-۲- روش‌ها

به منظور انجام مراحل مختلف این پژوهش، از تجهیزات آزمایشگاهی متناسب با هر آزمون استفاده شد. توزین مواد اولیه با استفاده از ترازوی دیجیتال آزمایشگاهی انجام گرفت و برای تهیه محلول‌های

الکتروریسی، از حمام اولتراسونیک مدل Backer با فرکانس ۴۰ kHz به منظور یکنواخت سازی محلول ها استفاده شد.

تولید نانوالیاف با استفاده از دستگاه الکتروریسی مدل E-Spinner NF CO-AN/VI ساخت شرکت فناوری نانو ساختار آسیا انجام شد. این دستگاه قابلیت اعمال ولتاژ تا ۲۵ kV را داشته و در این پژوهش برای تولید لایه های نانوالیافی مورد استفاده قرار گرفت. قطر الیاف نیز از روی تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) با استفاده از نرم افزار ImageJ (Version 1.43) اندازه گیری و تحلیل شد.

خواص مکانیکی نمونه ها با استفاده از دستگاه آزمون کشش SANTAM STM-1 مجهز به حسگر نیرو ۱۰۰ kgf و نرم افزار STM-Controller ارزیابی شد.

آزمون راندمان فیلتراسیون و افت فشار با استفاده از دستگاه آزمون ماسک و مدیای فیلتر FT-200PS ساخت شرکت نانوفناوران مقیاس و براساس استاندارد BS EN 140 انجام شد. این دستگاه به شمارنده ذرات چهارکاناله برای اندازه گیری ذرات با اندازه های ۰.۳، ۰.۵، ۳ و ۵ میکرومتر مجهز بود. ذرات آزمون توسط دستگاه مولد آئروسول ساخت شرکت نانوفناوران مقیاس تولید شدند و از آئروسول کلرید سدیم به عنوان ذرات آزمون استفاده شد.

برای بررسی مقدماتی تغییرات رشد باکتری ها، محیط کشت نوترینت آگار پس از استریل سازی با اتوکلاو آزمایشگاهی، در انکوباتور Binder (Germany) انکوبه شد. سپس نمونه ها روی محیط کشت قرار گرفتند و تغییرات رشد کلنی ها به صورت کیفی مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به اینکه در این مطالعه از سویه های مرجع، شرایط استاندارد تلقیح و اندازه گیری قطر هاله عدم رشد استفاده نشد، این روش به عنوان بررسی مقدماتی رشد باکتری ها تفسیر شده و نه آزمون استاندارد انتشار دیسک (Disk Diffusion).

۲-۲-۱- آماده سازی محلول ها جهت فرآیند

الکتروریسی

در مرحله نخست، به منظور تعیین شرایط بهینه الکتروریسی، محلول های سلولز استات با غلظت های وزنی ۱۲، ۱۸ و ۲۴ درصد تهیه شدند تا اثر غلظت محلول بر تشکیل نانوالیاف بررسی شود. برای تهیه هر محلول، جرم کل محلول برابر با ۲۰ گرم در نظر گرفته شد؛ به طوری که به ترتیب ۲.۴، ۳.۶ و ۴.۸ گرم سلولز استات برای تهیه محلول های ۱۲، ۱۸ و ۲۴ درصد توزین شد. در تمامی نمونه ها، از مخلوط استون و اسید استیک با نسبت حجمی ۲:۱ (استون: اسید استیک) به عنوان حلال استفاده شد و مقدار حلال متناسب با غلظت مورد نظر تنظیم گردید.

تمامی محلول‌ها پس از آماده‌سازی به مدت ۱۵ دقیقه در حمام اولتراسونیک قرار گرفتند تا اختلاط کامل اجزا انجام شده و حباب‌های احتمالی و تجمعات پلیمری حذف شوند. همچنین، تمامی فرآیندهای الکتروریسی در دمای ثابت ۲۸ درجه سانتی‌گراد انجام شد تا اثر تغییرات دما بر مورفولوژی نانوالیاف به حداقل برسد.

به منظور بهینه‌سازی فرآیند الکتروریسی، علاوه بر غلظت محلول، سه پارامتر اصلی شامل ولتاژ اعمالی، فاصله نوک سوزن تا جمع‌کننده و نرخ تغذیه محلول نیز مورد بررسی قرار گرفتند. در این مرحله، در هر آزمایش تنها یکی از پارامترها تغییر داده شد و سایر شرایط ثابت نگه داشته شدند تا اثر مستقل هر عامل بر مورفولوژی نانوالیاف ارزیابی شود. طراحی آزمایش براساس نتایج مطالعات پیشین و آزمون‌های مقدماتی انجام شده در این پژوهش صورت گرفت. تمامی شرایط آزمایشی حداقل در سه تکرار مستقل بررسی شدند و نمونه‌های حاصل از نظر قابلیت تشکیل جت پایدار، تشکیل ساختارهای دانه تسبیحی، یکنواختی الیاف و کیفیت شبکه نانوالیافی با استفاده از تصاویر SEM مورد ارزیابی قرار گرفتند. در نهایت، شرایط شامل غلظت ۱۸ درصد وزنی، ولتاژ ۱۷ کیلوولت، فاصله ۷۰ میلی‌متری نوک سوزن تا جمع‌کننده و نرخ تغذیه ۱ میلی‌لیتر بر ساعت به‌عنوان شرایط بهینه انتخاب شد.

پس از تعیین شرایط بهینه، محلول سلولز استات ۱۸ درصد وزنی به‌عنوان محلول پایه برای تهیه نمونه‌های حاوی

نمک‌های فلزی انتخاب شد. به‌منظور بررسی اثر افزودنی‌ها، چهار گروه شامل سلولز استات خالص (CA)، سلولز استات حاوی سولفات آهن (CA/Fe)، سلولز استات حاوی سولفات مس (CA/Cu) و سلولز استات حاوی هم‌زمان سولفات آهن و سولفات مس (CA/Fe/Cu) تهیه شدند. غلظت نمک‌های فلزی بر اساس مطالعات پیشین و آزمون‌های مقدماتی، به‌گونه‌ای انتخاب شد که ضمن حفظ قابلیت الکتروریسی محلول، از کاهش یکنواختی الیاف جلوگیری شود.

برای تهیه محلول پایه، ۳.۶ گرم سلولز استات در ۱۶.۴ گرم مخلوط حلال شامل ۵.۵ گرم استون و ۱۰.۹ گرم اسید استیک حل شد تا جرم کل محلول به ۲۰ گرم برسد. در نمونه CA/Fe، مقدار ۰.۵ گرم سولفات آهن به محلول افزوده شد و برای ثابت نگه داشتن جرم کل محلول، مقادیر استون و اسید استیک به‌ترتیب به ۵.۳ و ۱۰.۶ گرم کاهش یافت. در نمونه CA/Cu نیز به‌جای سولفات آهن، ۰.۵ گرم سولفات مس افزوده شد و مقادیر حلال مشابه نمونه CA/Fe تنظیم گردید. برای تهیه نمونه CA/Fe/Cu، ۰.۵ گرم سولفات آهن و ۰.۵ گرم سولفات مس به محلول اضافه شد و به منظور ثابت نگه داشتن جرم کل محلول در ۲۰ گرم، مقادیر استون و اسید استیک به‌ترتیب به ۵.۱۳ و ۱۰.۲۶ گرم کاهش یافت؛ در نتیجه نسبت جرمی سولفات آهن به سولفات مس برابر با ۱:۱ بود. تمامی محلول‌های حاوی نمک‌های فلزی نیز پیش از الکتروریسی به مدت ۱۵ دقیقه در حمام اولتراسونیک همگن شدند تا توزیع یکنواخت نمک‌ها در محلول حاصل

شود. پس از تهیه محلول‌ها، تمامی نمونه‌ها تحت شرایط بهینه تعیین‌شده الکترورسی شدند و برای انجام آزمون‌های مورفولوژی، خواص مکانیکی، فیلتراسیون و سایر ارزیابی‌های انجام‌شده در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفتند.

۲-۲-۲- آزمون خواص مکانیکی لایه‌های الکترورسی

شده ماسک‌ها

۲-۲-۲-۱- آزمون کشش

خواص کششی لایه‌های نانوالیافی به‌منظور ارزیابی مقاومت مکانیکی آن‌ها در برابر بارگذاری مورد بررسی قرار گرفت، زیرا استحکام مناسب یکی از عوامل مؤثر بر حفظ یکپارچگی ساختار و عملکرد لایه فیلتری در حین استفاده است. آزمون کشش با استفاده از دستگاه SANTAM STM-1 (Santam Engineering Design Co., Iran) مجهز به حسگر نیرو ۱۰۰ kgf انجام شد. نمونه‌ها پس از آماده‌سازی، بین فک‌های دستگاه قرار گرفتند و منحنی تنش-کرنش با استفاده از نرم‌افزار STM-Controller ثبت و تحلیل شد. در این پژوهش، نیروی بیشینه، تنش، کرنش، ازدیاد طول، مدول الاستیسیته و انرژی جذب‌شده تا نقطه شکست از داده‌های آزمون استخراج شد.

۲-۲-۳- اندازه‌گیری قطر میانگین لیاف و مورفولوژی

مورفولوژی نانوالیاف، شامل شکل ظاهری، یکنواختی و قطر لیاف، یکی از مهم‌ترین شاخص‌های ارزیابی کیفیت فرآیند

الکترورسی است و نقش مهمی در عملکرد نهایی لایه‌های نانوالیافی، از جمله راندمان فیلتراسیون و افت فشار، ایفا می‌کند. در این پژوهش، مورفولوژی نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (Scanning Electron Microscopy, SEM) بررسی شد و میانگین قطر نانوالیاف از روی تصاویر SEM با استفاده از نرم‌افزار ImageJ (Version 1.43) اندازه‌گیری گردید. برای هر بچ مستقل الکترورسی‌شده، حداقل سه تصویر SEM از نواحی مختلف نمونه تهیه شد و از هر تصویر، حداقل ۳۰ نانوالیف به صورت تصادفی انتخاب و اندازه‌گیری شد. میانگین قطر لیاف برای هر بچ به‌عنوان واحد آماری در نظر گرفته شد و نتایج نهایی به صورت میانگین $\pm$ انحراف معیار حاصل از سه بچ مستقل گزارش شدند. انتخاب لیاف از نواحی مختلف تصاویر به‌صورت تصادفی انجام شد تا احتمال سوگیری در اندازه‌گیری کاهش یابد.

به منظور بررسی ترکیب عنصری نمونه‌ها، از آزمون طیف‌سنجی پراکندگی انرژی پرتو ایکس (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, EDS) استفاده شد. این آزمون برای شناسایی حضور عناصر آهن و مس در نمونه‌های حاوی نمک‌های فلزی انجام شد. با توجه به ماهیت نقطه‌ای اندازه‌گیری EDS، نتایج حاصل صرفاً به عنوان شواهدی از حضور عناصر در نمونه‌ها تفسیر شدند و از آن برای نتیجه‌گیری درباره یکنواختی توزیع عناصر استفاده نشد. ارزیابی کمی توزیع عناصر مستلزم انجام نقشه‌برداری عنصری

(Elemental Mapping) یا بررسی چندین ناحیه مستقل

است که در این مطالعه انجام نشد.

۲-۲-۴- آزمون کارآیی فیلتراسیون، نفوذپذیری هوا و افت فشار ماسک‌ها

عملکرد فیلتراسیون لایه‌های نانوالیافی با استفاده از دستگاه آزمون ماسک و مدیای فیلتر FT-200PS و با استناد به روش‌های ارائه‌شده در استاندارد BS EN 140 و استاندارد ملی ایران شماره ۱۶۱۳۸ ارزیابی شد. از آنجا که نمونه‌های مورد بررسی در این پژوهش، لایه‌های نانوالیافی سلولز استات بودند و نه ماسک کامل مونتاژشده، استانداردهای مذکور صرفاً به‌عنوان مرجع اجرای آزمون‌ها و شرایط اندازه‌گیری مورد استفاده قرار گرفتند و نتایج حاصل تنها بیانگر عملکرد مدیای فیلتری در شرایط آزمون هستند.

به منظور ارزیابی راندمان فیلتراسیون، چهار گروه شامل CA، CA/Fe، CA/Cu و CA/Fe/Cu مورد بررسی قرار گرفتند. آزمون راندمان در آهنگ جریان ۹۵ لیتر بر دقیقه و با استفاده از آئروسول کلرید سدیم انجام شد. راندمان فیلتراسیون بر اساس تعداد ذرات اندازه‌گیری‌شده در بالادست و پایین‌دست نمونه توسط شمارنده ذرات دستگاه محاسبه گردید و برای هر نمونه، راندمان فیلتراسیون ذرات با اندازه‌های ۰.۳، ۰.۵، ۱ و ۳ میکرومتر گزارش شد.

به منظور ارزیابی قابلیت عبور هوا، افت فشار نمونه‌ها مطابق الزامات استاندارد ملی ایران شماره ۱۶۱۳۸ اندازه‌گیری شد. براساس این استاندارد، آزمون افت فشار با سطح مؤثر حداقل

۴.۹ سانتی‌متر مربع و در آهنگ جریان ۸ لیتر بر دقیقه انجام شد و اختلاف فشار بین دو سوی نمونه توسط فشارسنج دستگاه ثبت گردید. تفاوت آهنگ جریان مورد استفاده در آزمون راندمان فیلتراسیون (۹۵ L/min) و آزمون افت فشار (۸ L/min) ناشی از الزامات استانداردهای مربوط به هر آزمون است؛ به‌گونه‌ای که هر آزمون با شرایط تعریف‌شده در استاندارد مرجع خود انجام شد. افت فشار نمونه‌ها بر اساس رابطه ۱ محاسبه گردید.

$$\Delta p = (X_{m1} - X_{m2}) / 4.9 \quad (1)$$

که در آن: X_{m1} : میزان افت فشار در بالادست ماسک برحسب پاسگال، X_{m2} : میزان افت فشار در پایین دست ماسک برحسب پاسگال، Δp : میزان افت فشار ماسک برحسب پاسگال.

۲-۲-۵- آزمون بررسی خواص آنتی باکتریال ماسک‌ها

۲-۲-۵-۱- آماده سازی لایه های فیلتر ماسک جهت

آزمون آنتی باکتریال

به‌منظور بررسی مقدماتی تأثیر حضور نمک‌های فلزی بر تغییرات رشد میکروبی سطح لایه‌های نانوالیافی، یک ارزیابی کیفی رشد میکروبی انجام شد. در این بررسی، به‌جای استفاده از سویه‌های استاندارد آزمایشگاهی، نمونه‌های میکروبی طبیعی موجود بر سطح ماسک پس از استفاده واقعی جمع‌آوری و تغییرات رشد میکروبی در تماس با لایه‌های مختلف فیلتری بررسی شد. با توجه به عدم

شناسایی گونه‌های میکروبی، نبود سویه مرجع، و عدم انجام آزمون کمی تعیین تعداد کلنی‌ها، نتایج این بخش تنها به‌عنوان شواهد اولیه از تأثیر احتمالی ترکیبات فلزی بر رشد میکروبی تفسیر شده و به‌عنوان اثبات فعالیت ضد میکروبی استاندارد در نظر گرفته نمی‌شود.

برای انجام این ارزیابی، چند نمونه ماسک پزشکی تجاری تهیه شد و لایه فیلتر اصلی آن‌ها پس از جداسازی، با لایه‌های نانوالیافی تولیدشده در این پژوهش جایگزین گردید. نمونه‌های مورد بررسی شامل نانوالیاف CA/Fe، CA/Cu و CA/Fe/Cu بود. همچنین، ماسک پزشکی تجاری بدون تغییر به‌عنوان نمونه شاهد مورد بررسی قرار گرفت.

پس از جایگذاری لایه‌های نانوالیافی در ساختار ماسک، لایه‌ها با استفاده از چسب مناسب تثبیت شدند. تمامی نمونه‌ها پیش از استفاده تحت شرایط یکسان آماده‌سازی شدند. سپس ماسک‌ها توسط یک داوطلب و در شرایط معمول استفاده به مدت دو ساعت مورد استفاده قرار گرفتند. پس از پایان زمان استفاده، لایه‌های فیلتری در شرایط استریل و زیر هود لامینار خارج شده و برای بررسی رشد میکروبی آماده شدند.

به منظور مقایسه تغییرات رشد میکروبی، دو سطح لایه فیلتری شامل سطح داخلی در تماس با صورت و سطح خارجی در معرض محیط، به‌صورت جداگانه روی محیط کشت نوترینت آگار قرار داده شدند. پس از طی دوره

انکوباسیون، تغییرات رشد کلنی‌ها به‌صورت کیفی بررسی و مقایسه شد. در این مطالعه، اندازه‌گیری کمی تعداد کلنی‌ها (CFU)، تعیین درصد کاهش لگاریتمی، شناسایی گونه‌های میکروبی و استفاده از آزمون‌های استاندارد ارزیابی فعالیت ضد میکروبی انجام نشد؛ بنابراین، نتایج حاصل صرفاً نشان‌دهنده تغییرات مشاهده‌شده در رشد میکروبی سطح نمونه‌ها بوده و برای تأیید عملکرد ضد میکروبی نیازمند بررسی‌های استاندارد تکمیلی است.

۲-۲-۵-۲- مراحل آماده سازی محلول و محیط کشت

به منظور بررسی مقدماتی اثر حضور نمک‌های فلزی بر تغییرات رشد میکروبی سطح نمونه‌ها، از محیط کشت نوترینت آگار به‌عنوان محیط عمومی رشد باکتری‌ها استفاده شد. نوترینت آگار یک محیط کشت جامد عمومی است که امکان رشد و مشاهده کلنی‌های میکروبی را فراهم می‌کند. لازم به ذکر است که در این مطالعه، به دلیل عدم استفاده از سویه‌های استاندارد مرجع و عدم شناسایی گونه‌های میکروبی، نتایج حاصل صرفاً به‌عنوان ارزیابی کیفی تغییرات رشد میکروبی تفسیر شده و به‌عنوان آزمون استاندارد فعالیت ضد میکروبی در نظر گرفته نمی‌شود.

براساس دستورالعمل سازنده، برای تهیه محیط کشت، مقدار ۲۸ گرم پودر نوترینت آگار در یک لیتر آب مقطر حل می‌شود. در این پژوهش، با توجه به حجم مورد نیاز، ۸۰۴ گرم از پودر نوترینت آگار در ۳۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر حل شد.

بررسی تغییرات رشد میکروبی در دو سطح مختلف فیلتر، سطح خارجی نمونه (در تماس با محیط) و سطح داخلی نمونه (در تماس با صورت فرد استفاده کننده) به صورت جداگانه بر روی محیط کشت قرار داده شدند.

در مجموع، برای چهار گروه نمونه، هشت پتری دیش مورد استفاده قرار گرفت؛ به طوری که برای هر نوع لایه فیلتری، یک پتری دیش برای سطح خارجی و یک پتری دیش برای سطح داخلی در نظر گرفته شد. پس از انتقال نمونه ها به محیط کشت، پتری دیش ها به مدت ۲۴ ساعت در انکوباتور قرار گرفتند و تغییرات رشد کلنی های میکروبی به صورت کیفی بررسی و بین نمونه ها مقایسه شد. از آنجا که تعداد کلنی ها (CFU)، درصد کاهش لگاریتمی، شناسایی میکروارگانیسم ها و آزمون های استاندارد تعیین فعالیت ضد میکروبی در این مطالعه انجام نشد، نتایج این بخش صرفاً به عنوان شواهد اولیه از تغییر رفتار رشد میکروبی در حضور ترکیبات فلزی گزارش می شوند.

پس از آماده سازی محلول، به منظور انحلال کامل اجزا و استریل سازی محیط کشت، نمونه ها در اتوکلاو در دمای ۱۲۱ درجه سانتی گراد به مدت ۱۵ دقیقه قرار گرفتند.

پس از استریل شدن، محیط کشت در شرایط استریل و زیر هود لامینار در پتری دیش های استریل توزیع شد. در هر پتری دیش حدود ۱۸ میلی لیتر محیط کشت ریخته شد و پس از جامد شدن محیط، پتری دیش ها تا زمان استفاده در شرایط مناسب نگهداری شدند.

برای آماده سازی نمونه ها، لایه فیلتر اصلی ماسک های بهداشتی تجاری خارج و با لایه های نانوالیافی تولید شده در این پژوهش شامل نانوالیاف CA, CA/Fe, CA/Cu و CA/Fe/Cu جایگزین شد. سپس نمونه ها تحت شرایط استفاده واقعی، به مدت دو ساعت توسط یک فرد داوطلب مورد استفاده قرار گرفتند.

پس از پایان زمان استفاده، ماسک ها در شرایط استریل و زیر هود لامینار باز شده و لایه فیلتری خارج گردید. به منظور



شکل ۱- نمونه های محیط کشت شده در داخل دستگاه آنکوباتور.

به منظور بررسی اولیه اثر حضور نمک های فلزی بر تغییرات رشد میکروبی سطح نمونه ها، لایه های نانوالیافی تهیه شده

۲-۲-۵-۳- آزمون اندازه گیری مساحت هاله عدم رشد

۲-۳- تحلیل آماری

برای تعیین قطر نانوالیاف، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت و قطر تعداد مشخصی از الیاف به صورت تصادفی از نواحی مختلف تصاویر انتخاب و با استفاده از نرم‌افزار ImageJ اندازه‌گیری شد. داده‌های حاصل برای تعیین میانگین قطر، انحراف معیار و محدوده تغییرات قطر الیاف (حداقل-حداکثر) مورد استفاده قرار گرفتند.

با توجه به اینکه اندازه‌گیری‌های انجام‌شده از تصاویر SEM متعلق به یک نمونه الکترونیسی‌شده واحد هستند، هر اندازه‌گیری از یک الیاف یا یک تصویر به عنوان تکرار مستقل آماری در نظر گرفته نشد. در تحلیل آماری، بیج‌های مستقل الکترونیسی‌شده به عنوان واحد آزمایشی مستقل در نظر گرفته شدند و میانگین قطر به‌دست‌آمده از هر بیج برای مقایسه بین گروه‌ها استفاده شد. نتایج به صورت میانگین $\pm$ انحراف معیار گزارش شدند.

به منظور تحلیل آماری داده‌ها، تمامی آزمون‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶ انجام شد. پیش از انجام آزمون‌های آماری، نرمال بودن توزیع داده‌ها بررسی گردید. سپس برای مقایسه میانگین گروه‌ها از آزمون تحلیل واریانس یک‌طرفه (One-way ANOVA) استفاده شد و در صورت مشاهده اختلاف معنی‌دار، مقایسات چندگانه با آزمون تعقیبی

مورد بررسی قرار گرفتند. در این ارزیابی، تغییرات رشد کلنی‌های میکروبی پس از تماس سطح نمونه‌ها با محیط کشت مشاهده و ثبت شد. با توجه به اینکه در این مطالعه شناسایی گونه‌های میکروبی، استفاده از سویه‌های مرجع استاندارد، تعیین غلظت مشخص تلقیح و کنترل‌های مثبت و منفی انجام نشد، نتایج حاصل صرفاً به عنوان یک ارزیابی مقدماتی و غربالگری کیفی از تغییرات رشد میکروبی تفسیر می‌شوند.

روش انجام‌شده در این پژوهش معادل آزمون استاندارد Kirby-Bauer یا Disk Diffusion نیست. در آزمون دیسک دیفیوژن استاندارد، استفاده از سویه‌های میکروبی شناخته‌شده، تلقیح با تراکم مشخص، شرایط کنترل‌شده آزمون و اندازه‌گیری کمی قطر ناحیه عدم رشد برای ارزیابی فعالیت ضد میکروبی ضروری است. در مقابل، در مطالعه حاضر نمونه‌های میکروبی حاصل از شرایط استفاده واقعی ماسک بررسی شدند و تنها تغییرات مشاهده‌شده در رشد کلنی‌ها بین نمونه‌ها مقایسه گردید.

بنابراین، نتایج این بخش به‌عنوان شواهد اولیه از احتمال تأثیر ترکیبات فلزی موجود در ساختار نانوالیاف بر رفتار رشد میکروبی گزارش شده و برای اثبات فعالیت ضد میکروبی نیازمند انجام آزمون‌های استاندارد شامل استفاده از سویه‌های مرجع، اندازه‌گیری کمی رشد میکروبی و تحلیل آماری است.

Tukey انجام گرفت. سطح معنی داری آماری در تمامی آزمون‌ها $p < 0.05$ در نظر گرفته شد.

۳- نتایج و یافته‌ها

۳-۱- بهینه‌سازی شرایط الکترورسی

به منظور دستیابی به نانوالیاف سلولز استات با مورفولوژی مناسب، اثر غلظت محلول، ولتاژ اعمالی، فاصله نوک سوزن تا جمع‌کننده و نرخ تغذیه مورد بررسی قرار گرفت. به منظور تعیین شرایط بهینه فرآیند الکترورسی، ابتدا اثر غلظت محلول سلولز استات بر مورفولوژی نانوالیاف مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور، محلول‌هایی با غلظت‌های ۱۲، ۱۸ و ۲۴ درصد وزنی تهیه و تحت شرایط مختلف الکترورسی ارزیابی شدند. در این مرحله، پارامترهای اصلی فرآیند شامل ولتاژ اعمالی، فاصله نوک سوزن تا جمع‌کننده و نرخ تغذیه به صورت کنترل‌شده تغییر داده شدند و مورفولوژی نانوالیاف حاصل با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مورد ارزیابی قرار گرفت. معیار انتخاب شرایط بهینه، تشکیل جت پایدار، تولید نانوالیاف یکنواخت، حذف ساختارهای دانه تسبیچی (Bead) و دستیابی به شبکه‌ای پیوسته از نانوالیاف بود.

نتایج نشان داد که در غلظت ۱۲ درصد وزنی، به دلیل ویسکوزیته پایین محلول، تعداد قابل‌توجهی ساختار دانه

تسبیچی در کنار نانوالیاف تشکیل شد که بیانگر مناسب نبودن این غلظت برای تولید الیاف یکنواخت بود. با این حال، در میان نمونه‌های تهیه‌شده با این غلظت، نمونه شماره ۵ کمترین میزان دانه تسبیچی را نشان داد و به عنوان مبنایی برای ادامه روند بهینه‌سازی سایر پارامترهای فرآیند انتخاب شد.

با افزایش غلظت محلول به ۱۸ درصد وزنی، تشکیل دانه تسبیچی‌ها تقریباً به‌طور کامل حذف شد و شبکه‌ای یکنواخت و پیوسته از نانوالیاف به دست آمد. در مقابل، اگرچه در غلظت ۲۴ درصد وزنی نیز دانه تسبیچی مشاهده نشد، اما افزایش ویسکوزیته محلول موجب افزایش قطر الیاف و کاهش یکنواختی آن‌ها شد. بر این اساس، غلظت ۱۸ درصد وزنی به عنوان غلظت بهینه انتخاب شد.

پس از انتخاب غلظت بهینه، نتایج حاصل از بررسی پارامترهای فرآیند نشان داد که اعمال ولتاژ ۱۷ کیلوولت، فاصله ۷۰ میلی‌متری بین نوک سوزن و جمع‌کننده و نرخ تغذیه ۱ میلی‌لیتر بر ساعت، بهترین شرایط را برای تشکیل جت پایدار و تولید نانوالیاف یکنواخت فراهم می‌کند. بنابراین، تمامی نمونه‌های حاوی نمک‌های فلزی در ادامه پژوهش با استفاده از این شرایط بهینه تولید و برای انجام آزمون‌های بعدی مورد استفاده قرار گرفتند (جدول ۱).

جدول ۱- بررسی تاثیر پارامترهای الکتروریسی و یافتن شرایط بهینه تولید نانو الیاف سلولز استات.

درصد وزنی	دور موتور (rpm)	نرخ تغذیه (ml/h)	فاصله نوک سورنگ تا صفحه (mm)	ولتاژ (kv)	شماره نمونه
محلول با غلظت ۱۲ درصد وزنی (۲.۴ گرم استات سلولز)	۲۵۰	۲	۷۰	۱۷	۱
	۲۵۰	۲	۱۰۰	۱۷	۲
	۲۵۰	۲	۱۵۰	۱۷	۳
	۲۵۰	۱.۵	۷۰	۱۷	۴
	۲۵۰	۱	۷۰	۱۷	۵
	۲۵۰	۱	۱۰۰	۱۴	۶
	۲۵۰	۱	۱۰۰	۱۷	۷
	۲۵۰	۱	۱۰۰	۲۰	۸
	۲۵۰	۱	۱۰۰	۲۵	۹
	۲۵۰	۱	۷۰	۲۵	۱۰
	۲۵۰	۰.۵	۷۰	۲۵	۱۱
	۲۵۰	۰.۵	۱۰۰	۲۵	۱۲
	۲۵۰	۰.۵	۱۰۰	۳۰	۱۳
	۲۵۰	۱	۱۰۰	۳۰	۱۴
محلول با غلظت ۱۸ درصد وزنی (۳.۶ گرم استات سلولز)	۲۵۰	۱	۷۰	۱۷	۱۵
	۲۵۰	۱	۱۰۰	۲۵	۱۶
	۲۵۰	۱	۱۰۰	۲۰	۱۷
محلول با غلظت ۲۴ درصد وزنی (۴.۸ گرم استات سلولز)	۲۵۰	۱	۷۰	۱۷	۱۸
	۲۵۰	۱	۱۰۰	۲۵	۱۹
	۲۵۰	۱	۱۰۰	۲۰	۲۰

V: میزان ولتاژ دستگاه الکتروریسی بر حسب (kv). D: فاصله ی نوک سورنگ تا صفحه جمع کننده دستگاه الکتروریسی بر حسب (mm). D: فاصله ی نوک سورنگ تا صفحه جمع کننده دستگاه الکتروریسی بر حسب (mm)

مخلوط سولفات آهن و مس تهیه شد. تصاویر میکروسکوپ

۳-۲- بررسی مورفولوژی نانوالیاف

الکترونی روبشی (جدول ۲) نشان داد که تمامی نمونه‌ها

دارای ساختار نانوالیافی یکنواخت بوده و افزودن نمک‌های

فلزی تأثیر نامطلوبی بر مورفولوژی الیاف نداشته است.

پس از تعیین شرایط بهینه، چهار نوع لایه نانوالیافی شامل

سلولز استات خالص، سلولز استات حاوی سولفات آهن،

سلولز استات حاوی سولفات مس و سلولز استات حاوی

جدول ۲- درصد و حجم مواد بکار رفته در تهیه محلول الکتروریسی برای ماسک های مختلف.

نوع ماسک	حجم محلول (گرم)	سلولز استات (گرم)	حلال استن (گرم)	اسید استیک (گرم)	سولفات آهن (گرم)	سولفات مس (گرم)
ماسک سلولز استات	۲۰	۳.۶	۵.۵	۱۰.۹		=
ماسک سلولز استات حاوی نمک آهن	۲۰	۳.۶	۵.۳	۱۰.۶	۰.۵	=
ماسک سلولز استات حاوی نمک مس	۲۰	۳.۶	۵.۳	۱۰.۶	=	۰.۵
ماسک سلولز استات حاوی نمک آهن و مس	۲۰	۳.۶	۵.۱۳	۱۰.۲۶	۰.۵	۰.۵

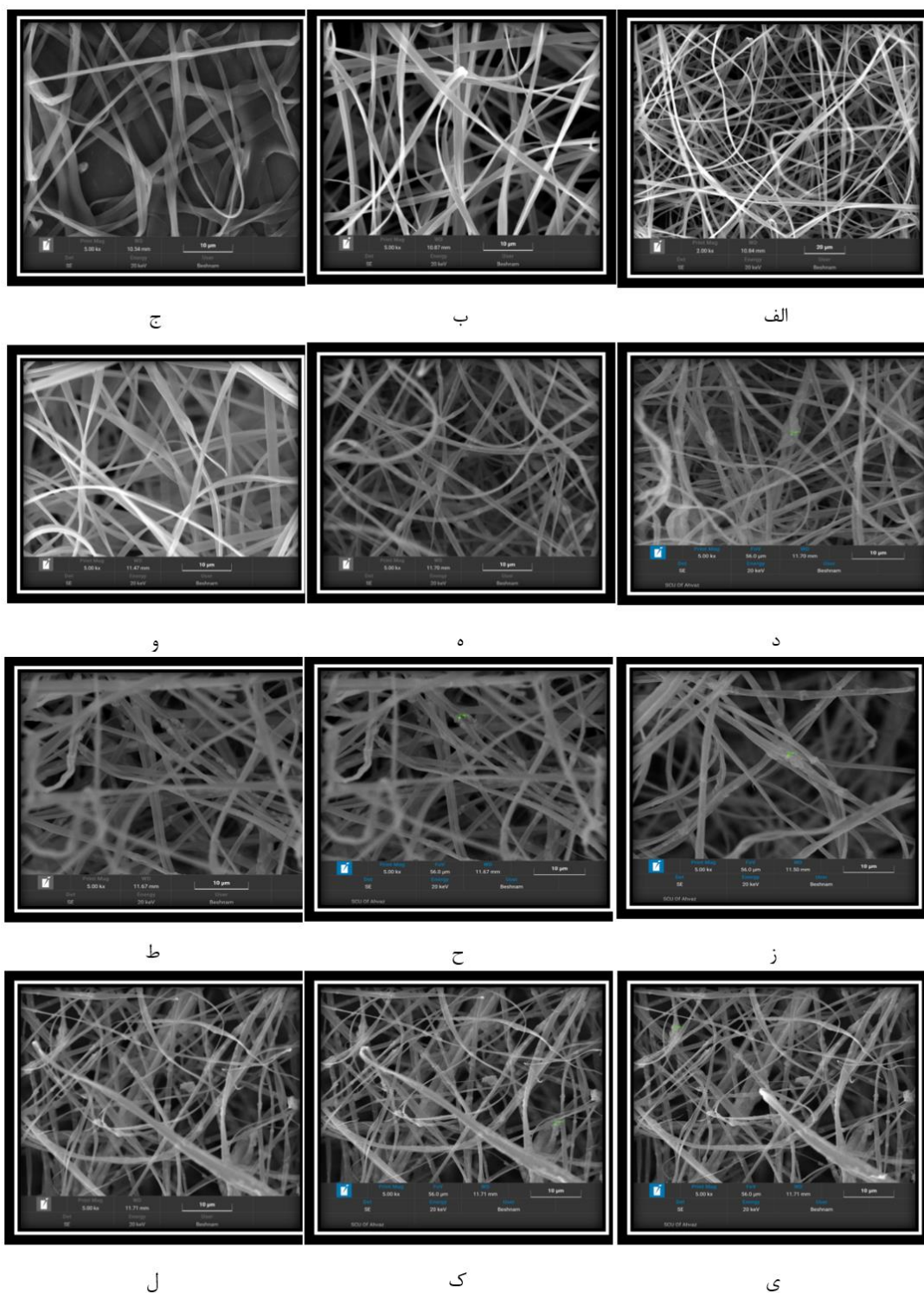
به منظور بررسی حضور عناصر فلزی در ساختار نانوالیاف، آنالیز نقطه‌ای EDS انجام شد. نتایج آنالیز EDS حضور عناصر مربوط به ترکیبات فلزی افزوده شده در نمونه‌های حاوی نمک‌های آهن و مس را تأیید کرد. مشاهده پیک‌های مربوط به عناصر آهن و مس نشان‌دهنده حضور این عناصر در ساختار نانوالیاف است. با این حال، از آنجا که آنالیز EDS نقطه‌ای انجام شده است، این نتایج صرفاً حضور عناصر را تأیید می‌کند و برای ارزیابی دقیق یکنواختی توزیع عناصر در سطح نمونه کافی نیست (شکل ۲). با این حال، از آنجا که آزمون‌های FTIR و XRD در این مطالعه انجام نشده‌اند، امکان بررسی دقیق نوع برهم‌کنش‌های شیمیایی بین سلولز استات و ترکیبات فلزی و همچنین تعیین تغییرات احتمالی در ساختار بلوری وجود ندارد. بنابراین، نتایج حاضر صرفاً بر اساس شواهد مورفولوژیکی، عنصری و عملکردی تفسیر شده‌اند.

۳-۳- نتایج آزمون کشش

نتایج آزمون کشش در جدول ۳ و شکل ۲ ارائه شده است. نمونه سلولز استات خالص نسبت به نمونه شاهد استحکام کششی بیشتری نشان داد. همچنین افزودن نمک‌های فلزی موجب تغییراتی در نیروی پارگی و میزان ازدیاد طول شد، اما تمامی نمونه‌ها استحکام کافی برای استفاده به‌عنوان لایه فیلتراسیون ماسک را حفظ کردند. بیشترین نیروی پارگی

در نمونه حاوی سولفات مس و بیشترین میزان ازدیاد طول در نمونه حاوی سولفات آهن مشاهده شد که که نشان‌دهنده مقاومت بالاتر ساختار نانوالیافی در برابر اعمال بار کششی است.

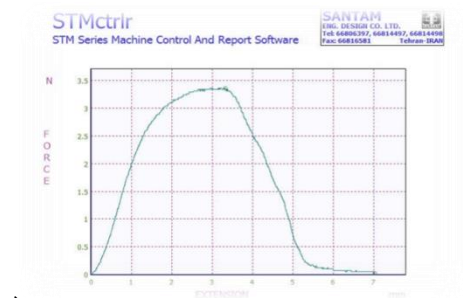
بررسی داده‌ها نشان داد که افزودن نمک‌های فلزی موجب تغییر در رفتار مکانیکی لایه‌های سلولز استات گردید. نمونه سلولز استات حاوی نمک آهن بیشترین مقدار نیروی شکست (12.7214 N) و بیشترین ازدیاد طول پس از شکست (8.4809 درصد) را در میان نمونه‌های الکترورسی شده نشان داد. همچنین، نمونه حاوی نمک مس دارای بالاترین مقدار تنش در نقطه شکست (0.448 MPa) در مقایسه با سایر نمونه‌های الکترورسی شده بود. نمونه حاوی ترکیب هم‌زمان نمک آهن و مس نیز تغییراتی در مدول و رفتار تغییرشکلی نشان داد که نشان‌دهنده اثر ترکیب نمک‌های فلزی بر خواص مکانیکی شبکه نانوالیافی است. این تغییرات می‌تواند به تغییر در ویژگی‌های محلول الکترورسی و در نتیجه تغییر در ساختار و پیوستگی شبکه الیاف نسبت داده شود. با توجه به وابستگی عملکرد لایه‌های فیلتری به مجموعه‌ای از ویژگی‌های ساختاری و عملکردی، نتایج مکانیکی حاضر صرفاً برای مقایسه مقاومت و رفتار تغییرشکلی نمونه‌ها تفسیر شده و به‌تنهایی به‌عنوان معیار کافی برای کاربرد فیلتری در نظر گرفته نمی‌شود.



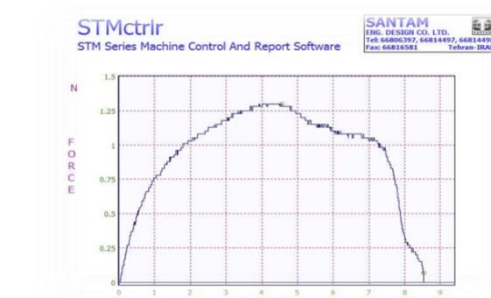
شکل ۲- تصاویر مربوط به لایه‌های مختلف ماسک تولید شده (الف-ج) نمونه اولیه جهت حصول شرایط بهینه الکتروریسی، د-ه) نمونه لایه سلولز استات حاوی نمک آهن، و) نمونه لایه سلولز استات، ز-ط) نمونه لایه سلولز استات حاوی نمک مس، ی-ل) نمونه لایه سلولز استات حاوی نمک آهن و مس

جدول ۳- داده‌های ثبت شده مرتبط با آزمون کشش نمونه‌های مختلف از لایه ماسک.

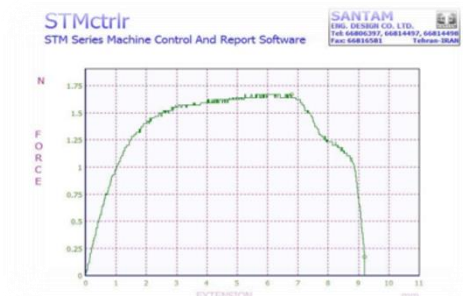
نوع	آزمون	نیرو (N)	ازدیاد طول (mm)	تنش (MPa)	کرنش (%)	ازدیاد طول بعد پارگی (%)	مدول (MPa)	انرژی (j)	زمان (min)
ماسک شاهد	Peak	۱.۳	۴.۵۵۹	۰.۱۷۳۳	۳.۰۳۹۳	۲.۱۵۶۶۶۴	۵.۷۰۲	۴.۴۲۵۹۷۳	۰:۲۷:۴۴
	Break	۰.۰۷	۸.۵۲۷	۰.۰۰۹۳	۵.۶۸۴۷	۵.۶۴۳۰۲۷	۰.۱۶۳۶	۸.۱۶۴۴۱۱	۰:۵۱:۲۵
سلولز استات	Peak	۳.۱۴	۱.۳۷۳۹	۰.۴۱۸۷	۰.۹۱۵۹	۰.۱۶۳۹۹۴۹	۴۵.۷۱۴۶	۲.۳۶۵۰۶۸	۰:۸:۳۳
	Break	۰.۰۵	۸.۳۰۷۹	۰.۰۰۶۷	۵.۵۳۸۶	۵.۵۲۵۱۱۳	۰.۱۲۱	۶.۸۵۶۴۹۵	۰:۴۹:۹۴
سلولز استات نمک آهن	Peak	۲.۰۴	۶.۹۹۲۴	۰.۲۷۲	۴.۶۶۱۶	۳.۳۷۳۲۴۹	۵.۸۳۴۹	۱۱.۴۲۱۰۷	۰:۴۲:۰۴
	Break	۰.۰۵	۱۲.۷۲۱۴	۰.۰۰۶۷	۸.۴۸۰۹	۸.۴۵۵۲۰۷	۰.۰۷۹	۱۶.۱۰۸۵۶	۱:۱۶:۴۲
سلولز استات نمک مس	Peak	۳.۳۶	۳.۳۲۳	۰.۴۴۸	۲.۲۱۵۳	۱.۰۲۸۴۰۹	۲۰.۲۲۳	۷.۸۹۱۲۳۹	۰:۲۰:۰۳
	Break	۰.۰۲	۷.۰۳۲	۰.۰۰۲۷	۴.۶۸۸	۴.۶۷۷۹۲۱	۰.۰۵۷۶	۱۱.۹۶۳۸۷	۰:۴۲:۲۸
سلولز استات نمک آهن و مس	Peak	۱.۶۷	۶.۷۸۹۴	۰.۲۲۲۷	۴.۵۲۶۳	۳.۵۳۰۰۵۶	۴.۹۲۰۱	۹.۴۰۶۹۱۴	۰:۴۰:۸۲
	Break	۰.۱۷	۹.۱۹۳۹	۰.۰۲۲۷	۶.۱۲۹۳	۶.۰۲۹۶۳۱	۰.۳۷۰۴	۱۲.۳۷۸۵۲	۰:۵۵:۲۴
ماسک شاهد	Peak	۱.۳	۴.۵۵۹	۰.۱۷۳۳	۳.۰۳۹۳	۲.۱۵۶۶۶۴	۵.۷۰۲	۴.۴۲۵۹۷۳	۰:۲۷:۴۴
	Break	۰.۰۷	۸.۵۲۷	۰.۰۰۹۳	۵.۶۸۴۷	۵.۶۴۳۰۲۷	۰.۱۶۳۶	۸.۱۶۴۴۱۱	۰:۵۱:۲۵



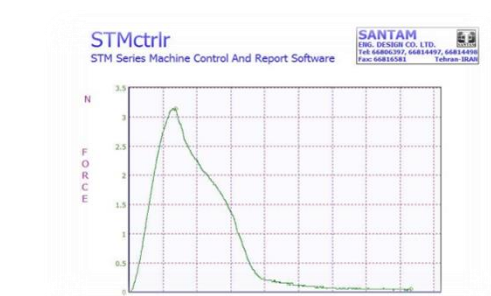
د



الف



ه



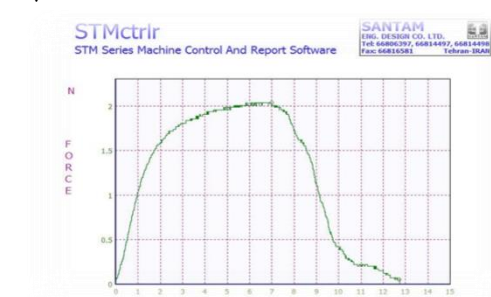
ب

شکل ۳- نمودار نیرو - ازدیاد طول برای نمونه لایه‌های

ماسک مختلف (الف) شاهد (ماسک معمولی)، (ب) استات سلولز،

(ج) استات سلولز-آهن، (د) استات سلولز-مس، (ه) استات سلولز حاوی

نمک مس و نمک آهن



ج

۳-۴- نتایج اندازه‌گیری قطر نانوالیاف

خالص شد. آزمون تحلیل واریانس یک‌طرفه (One-way

ANOVA) نیز نشان داد که اختلاف بین گروه‌ها از نظر

آماري معنی‌دار است ($P < 0.05$). همچنین تصاویر SEM

(شکل ۳-۲) کاهش قطر الیاف و حفظ یکنواختی ساختار را

در نمونه‌های حاوی نمک‌های فلزی تأیید کردند.

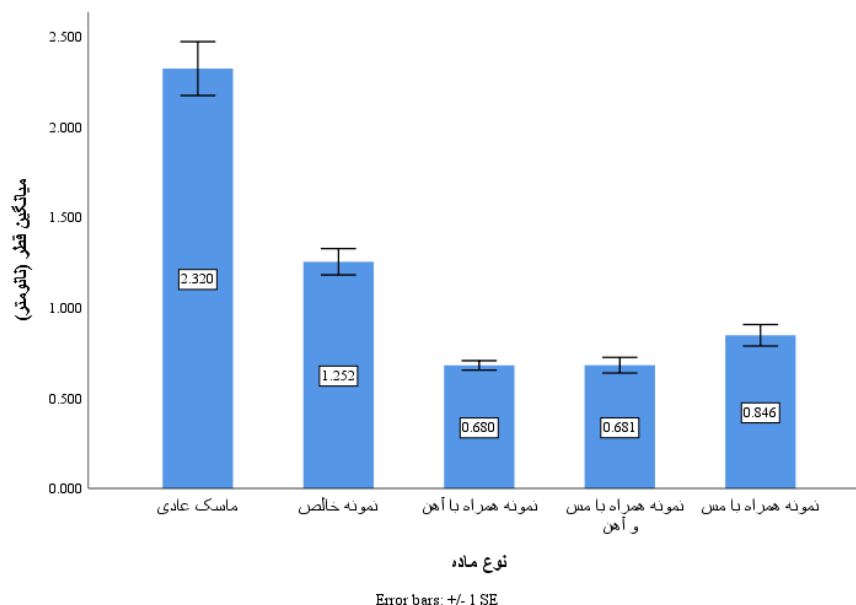
مقادیر میانگین قطر نانوالیاف در جدول ۴ و شکل ۴ ارائه

شده است. نتایج نشان داد که افزودن نمک‌های فلزی موجب

کاهش میانگین قطر الیاف نسبت به نمونه سلولز استات

جدول ۴- قطر میانگین نانو الیاف بین گروه‌های مختلف مورد مطالعه.

قطر (نانومتر)						
تعداد	میانگین	انحراف معیار	کمترین	بیشترین		
۳۰	۲/۳۲۰ ^c	۰/۸۱۵	۱/۰۴۵	۴/۸۸۶	ماسک عادی	نوع ماده
۳۰	۱/۳۵۲ ^b	۰/۳۹۸	۰/۵۶۴	۲/۱۸۵	نمونه خالص	
۳۰	۰/۶۸۰ ^a	۰/۱۴۳	۰/۳۳۸	۱/۰۷۲	نمونه همراه با آهن	
۳۰	۰/۶۸۱ ^a	۰/۲۳۷	۰/۲۵۴	۱/۲۶۰	نمونه همراه با مس و آهن	
۳۰	۰/۸۴۶ ^a	۰/۳۲۵	۰/۳۰۷	۱/۵۲۵	نمونه همراه با مس	
$P < ۰/۰۰۱$					$P\text{-value}^{\dagger}$	
[†] از آزمون تحلیل واریانس یک‌طرفه ولج (Welch's one-way ANOVA) برای مقایسه گروه‌ها و از آزمون تعقیبی توکی (Tukey) برای مقایسه‌های زوجی استفاده شد. بالانویس‌های متفاوت روی میانگین‌ها نشان‌دهنده اختلاف آماری معنی‌دار هستند ($P < ۰/۰۵$).						



شکل ۴- نمودار میله‌ای میانگین قطر نانو الیاف در بین گروه‌های مختلف مطالعه.

۳-۵- نتایج آزمون فیلتراسیون و افت فشار

نتایج آزمون فیلتراسیون در جدول ۵ و شکل ۵ ارائه شده است. راندمان حذف ذرات با اندازه‌های ۰/۳، ۰/۵، ۱ و ۳ میکرومتر برای تمامی گروه‌ها اندازه‌گیری و به صورت میانگین $\pm$ انحراف معیار گزارش شد. تمامی نمونه‌ها راندمان بالایی در حذف ذرات معلق، به ویژه ذرات ۱ و ۳ میکرون، نشان دادند. راندمان فیلتراسیون تمامی نمونه‌ها بیش از ۹۹ درصد بود. در میان نمونه‌های مورد بررسی، نمونه حاوی ترکیب نمک آهن و مس، در مقایسه با سایر نمونه‌ها، راندمان بالاتری در حذف ذرات نشان داد که این افزایش عملکرد می‌تواند ناشی از تغییر در مورفولوژی الیاف، قطر متوسط الیاف، ساختار شبکه نانوالیافی و ویژگی‌های سطحی نمونه باشد. با این حال، ارزیابی برتری یک نمونه فیلتری تنها بر اساس راندمان حذف ذرات انجام نمی‌شود و

پارامترهایی مانند افت فشار، قابلیت تنفس‌پذیری و خواص مکانیکی نیز باید در کنار راندمان فیلتراسیون در نظر گرفته شوند.

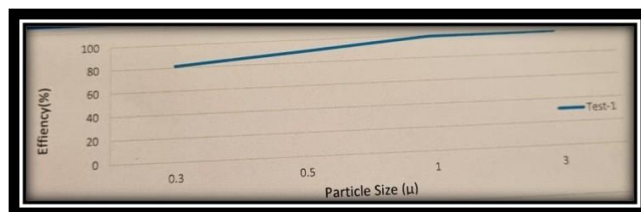
علاوه بر راندمان حذف ذرات، افت فشار ایجاد شده توسط نمونه‌های مختلف نیز بررسی شد (جدول ۳-۵). نتایج نشان داد که تغییر ترکیب لایه نانوالیافی و افزودن نمک‌های فلزی، علاوه بر اثرگذاری بر راندمان فیلتراسیون، بر مقاومت عبور هوا نیز تأثیر دارد. بنابراین، ارزیابی عملکرد فیلترها باید براساس ایجاد تعادل میان راندمان حذف ذرات و افت فشار انجام شود. در این مطالعه، نمونه‌ها براساس مجموعه نتایج راندمان فیلتراسیون و افت فشار مقایسه شدند؛ با این حال، به دلیل عدم محاسبه شاخص کیفیت فیلتر (Quality Factor)، ارزیابی کامل این شاخص به مطالعات تکمیلی موکول می‌شود.

جدول ۵- داده‌های آزمون فیلتراسیون ذرات و افت فشار برای گروه‌های مختلف از ماسک‌ها.

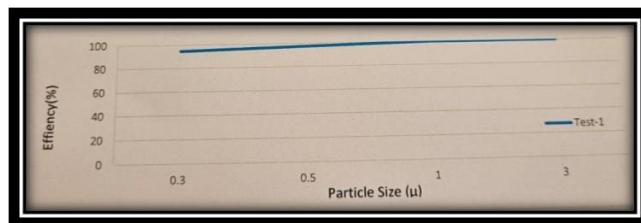
دما ۲۵ درجه سانتی گراد		30 Lit min فلو (آهنگ جریان)			
کارایی و افت فشار نمونه مورد آزمون					
نوع نمونه	Particle Size (μ)				Pressure Drope(pa)
	۰.۳	۰.۵	۱	۳	
AC	۸۱.۳۹	۸۹.۸۲	۹۸.۸۳	۹۹.۸۲	۳۹
AC+Fe	۹۴.۵۲	۹۷.۳۰	۹۹.۷۳	۹۹.۹۸	۳۰
AC+Cu	۸۷.۲۰	۹۳.۱۴	۹۹.۱۹	۹۹.۷۲	۳۷
AC+Fe+Cu	۹۷.۸۰	۹۷.۶۳	۹۹.۹۰	۹۹.۹۹	۲۹

اندازه ذره - کارایی

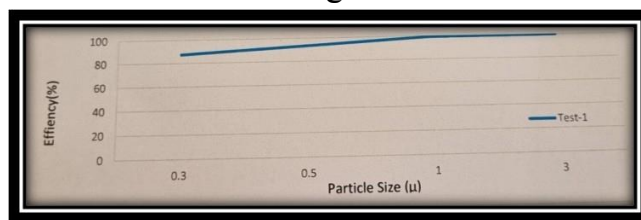
الف



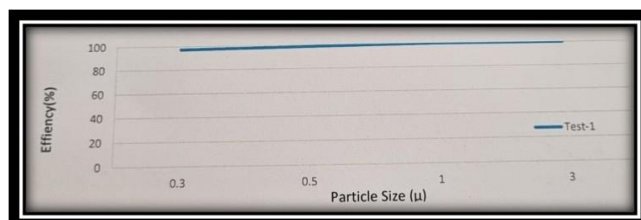
ب



ج



د



شکل ۵- نتایج آزمون فیلتراسیون هوا و جذب ذرات الف) سلولز

استات ، ب) سلولز استات حاوی نمک آهن ، ج) سلولز استات

حاوی نمک مس ، د) سلولز استات حاوی نمک مس

۳-۶- نتایج آزمون آنتی باکتریال

نتایج آزمون آنتی باکتریال به صورت چشمی در شکل ۶ نشان

داده شده است. در نمونه سلولز استات خالص رشد

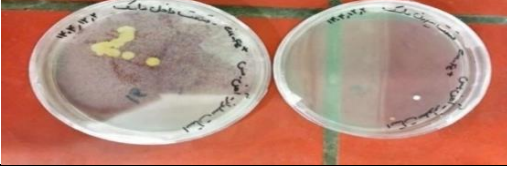
کلیه های باکتریایی در سطح داخلی فیلتر مشاهده شد،

درحالی که نمونه های حاوی نمک های فلزی کاهش قابل توجهی در تعداد کلنی ها نشان دادند. در میان نمونه ها، فیلتر حاوی سولفات مس بهترین عملکرد ضد میکروبی را داشت و در آن رشد قابل مشاهده ای از کلنی های باکتریایی مشاهده نشد. نمونه حاوی مخلوط سولفات آهن و سولفات مس نیز نسبت به نمونه خالص کاهش محسوسی در رشد میکروبی نشان داد. با این حال، به دلیل عدم استفاده از سویه های استاندارد و عدم شناسایی گونه های میکروبی، این نتایج به عنوان شواهد اولیه از اثر احتمالی ترکیبات فلزی تفسیر شده و برای اثبات فعالیت ضد میکروبی قطعی نیازمند آزمون های استاندارد تکمیلی است.

۴- بحث

نتایج این پژوهش نشان داد که غلظت محلول الکترورسی یکی از مهم ترین عوامل مؤثر بر مورفولوژی نانوالیاف سلولز استات است. بررسی تصاویر SEM نشان داد که با افزایش غلظت محلول از ۱۲ به ۱۸ درصد وزنی، تشکیل ساختارهای دانه تسبیحی به طور محسوسی کاهش یافت و الیاف یکنواخت تر و پیوسته تری تولید شدند. این پدیده را می توان به افزایش ویسکوزیته محلول و افزایش درهم تنیدگی زنجیره های پلیمری نسبت داد؛ به گونه ای که جت الکترورسی پایداری بیشتری پیدا کرده و احتمال شکست جریان و تشکیل قطرات کاهش یافته است. این نتیجه با مطالعات Ahmed و همکاران [۸] و Reneker و همکاران

[۱۲] مطابقت دارد که افزایش غلظت محلول را یکی از عوامل اصلی حذف دانه تسبیحی و بهبود کیفیت نانوالیاف معرفی کرده‌اند.

نوع ماسک	تصاویر تست رشد باکتری داخل و خارج لایه فیلتر ماسک
تست آنتی باکتریال فیلتر سلولز استات (قسمت داخل - ظرف سمت چپ و بیرون ماسک - ظرف سمت راست)	
آنتی باکتریال فیلتر سلولز استات حاوی نمک آهن (قسمت داخل - ظرف سمت چپ و بیرون ماسک - ظرف سمت راست)	
تست آنتی باکتریال فیلتر سلولز استات حاوی نمک مس (قسمت داخل - ظرف سمت چپ و بیرون ماسک - ظرف سمت راست)	
تست آنتی باکتریال فیلتر سلولز استات حاوی نمک آهن و نمک مس (قسمت داخل - ظرف سمت چپ و بیرون ماسک - ظرف سمت راست)	

شکل ۶- تست آنتی باکتریال از طریق شمارش کولون بصورت چشمی.

و Hekmati و همکاران [۱۵] همخوانی دارد که بیان کرده‌اند دستیابی به تعادل مناسب میان ولتاژ، نرخ تغذیه و فاصله جمع‌کننده برای تولید نانوالیاف با قطر یکنواخت ضروری است.

این اختلاف‌ها براساس آزمون تحلیل واریانس یک‌طرفه از نظر آماری معنی‌دار بودند که بیانگر اثر واقعی افزودن نمک‌های فلزی بر کاهش قطر الیاف است. این تغییر را می‌توان ناشی از افزایش هدایت الکتریکی محلول دانست. حضور یون‌های فلزی باعث افزایش چگالی بار الکتریکی در

علاوه بر غلظت محلول، پارامترهای فرآیند الکتروریسی نیز نقش تعیین‌کننده‌ای در کیفیت نهایی الیاف داشتند. در این مطالعه مشخص شد که ولتاژ ۱۷ کیلوولت، فاصله ۷۰ میلی‌متری سوزن تا جمع‌کننده و نرخ تغذیه ۱ میلی‌لیتر بر ساعت بهترین شرایط را برای تولید نانوالیاف یکنواخت فراهم می‌کنند. در ولتاژهای پایین، نیروی الکترواستاتیکی برای کشش کامل جت کافی نبود و در ولتاژهای بالاتر نیز ناپایداری جت و آشفته‌گی جریان موجب کاهش کیفیت الیاف شد. این نتایج با گزارش Thompson و همکاران [۱۴]

جت الکترورسی شده و در نتیجه کشش الکترواستاتیکی بیشتری بر محلول وارد می‌شود که به تولید الیاف نازک‌تر منجر می‌گردد. کاهش قطر الیاف سبب افزایش سطح ویژه و افزایش تعداد منافذ ریز در ساختار فیلتر شده و در نهایت عملکرد فیلتراسیون را بهبود می‌بخشد. این نتایج با گزارش Li و همکاران [۶] درباره ارتباط میان قطر نانوالیاف و راندمان فیلتراسیون مطابقت دارد.

بررسی آزمون کشش نشان داد که تمامی لایه‌های الکترورسی شده دارای استحکام کافی برای استفاده به عنوان لایه فیلتراسیون ماسک بودند. اگرچه افزودن نمک‌های فلزی تغییراتی در نیروی پارگی و میزان ازدیاد طول ایجاد کرد، اما هیچ‌یک از نمونه‌ها کاهش شدیدی در خواص مکانیکی نشان ندادند. این موضوع بیانگر آن است که حضور نمک‌های فلزی در غلظت‌های استفاده‌شده، ساختار شبکه نانوالیاف را به گونه‌ای تغییر نداده که موجب افت شدید استحکام شود و بنابراین امکان استفاده عملی از این لایه‌ها در ماسک‌های تنفسی وجود دارد.

یکی از مهم‌ترین یافته‌های این پژوهش، بهبود عملکرد فیلتراسیون در نمونه‌های حاوی نمک‌های فلزی بود. نتایج نشان داد که تمامی نمونه‌ها راندمان بسیار بالایی در حذف ذرات، به‌ویژه ذرات یک و سه میکرون، داشتند و نمونه حاوی هم‌زمان نمک آهن و مس بهترین عملکرد را نشان داد. نمونه حاوی ترکیب نمک‌های آهن و مس، در مقایسه با

نمونه‌های حاوی هر یک از نمک‌ها به‌صورت مجزا، عملکرد متفاوتی نشان داد. این بهبود عملکرد می‌تواند ناشی از اثر ترکیبی حضور هم‌زمان یون‌های آهن و مس و تأثیر آن‌ها بر ویژگی‌های ساختاری و عملکردی لایه نانوالیافی باشد. با این حال، به دلیل عدم بررسی نسبت‌های مختلف آهن به مس و نبود تحلیل آماری اثر متقابل، این مشاهده به‌عنوان اثر ترکیبی تفسیر شده و اثبات هم‌افزایی نیازمند مطالعات تکمیلی است. به نظر می‌رسد کاهش قطر الیاف و افزایش سطح ویژه، همراه با تغییرات ایجادشده در ساختار سطحی الیاف، موجب افزایش احتمال برخورد و به دام افتادن ذرات معلق شده است. از سوی دیگر، کاهش افت فشار در نمونه‌های حاوی نمک‌های فلزی نشان می‌دهد که افزایش راندمان فیلتراسیون بدون کاهش قابلیت تنفس‌پذیری حاصل شده است؛ موضوعی که در طراحی فیلترهای تنفسی اهمیت فراوانی دارد. این نتایج با مطالعات Lee و همکاران [۲۲] و Tan و همکاران [۲۱] همخوانی دارد. کاهش قطر متوسط الیاف در نمونه‌های حاوی نمک‌های فلزی می‌تواند به تغییر ویژگی‌های محلول الکترورسی، از جمله افزایش احتمالی رسانایی ناشی از حضور گونه‌های یونی و تأثیر آن بر کشیدگی جت در میدان الکتریکی نسبت داده شود. با این حال، از آنجا که رسانایی، ویسکوزیته و کشش سطحی محلول‌ها در این مطالعه به‌صورت مستقیم اندازه‌گیری نشده‌اند، این تفسیر به‌عنوان یک فرضیه احتمالی مبتنی بر

مطالعات پیشین ارائه می‌شود و برای تأیید آن به بررسی‌های تکمیلی نیاز است.

نیازمند انجام نقشه‌برداری عنصری یا بررسی چندین ناحیه مستقل است.

نتایج آزمون آنتی‌باکتریال نیز نشان داد که حضور نمک‌های فلزی موجب کاهش رشد باکتری‌ها نسبت به نمونه سلولز استات خالص شد. این رفتار را می‌توان به آزاد شدن یون‌های فلزی و برهم‌کنش آن‌ها با دیواره سلولی و غشای میکروارگانیسم‌ها نسبت داد که در نهایت موجب اختلال در عملکرد سلولی و مهار رشد باکتری می‌شود. مطالعات پیشین نیز نشان داده‌اند که یون‌های فلزی حاصل از ترکیبات مس و آهن می‌توانند از طریق ایجاد گونه‌های فعال اکسیژن، تخریب غشای سلولی و اختلال در فعالیت آنزیم‌ها، اثرات ضد میکروبی قابل توجهی ایجاد کنند [۲۹-۳۲]. البته باید توجه داشت که در این پژوهش ارزیابی بر پایه رشد میکروارگانیسم‌های حاصل از شرایط واقعی استفاده از ماسک انجام شد و از سویه‌های استاندارد آزمایشگاهی استفاده نشد؛ بنابراین نتایج بیشتر بیانگر عملکرد نمونه‌ها در شرایط کاربردی هستند.

استفاده از نمک‌های محلول آهن و مس به عنوان افزودنی در محلول الکتروریسی، در مقایسه با استفاده از نانوذرات فلزی، می‌تواند یک رویکرد متفاوت برای اصلاح ساختار نانوالیافی باشد. در این روش، ترکیبات فلزی بدون نیاز به سنتز جداگانه نانوذرات به محلول پلیمری افزوده شدند. با این حال، بررسی مزیت اقتصادی این رویکرد نیازمند ارزیابی دقیق هزینه مواد اولیه، انرژی مصرفی، زمان فرآیند تولید و قابلیت مقیاس‌پذیری است؛ بنابراین، در شرایط فعلی نمی‌توان کم‌هزینه بودن یا برتری اقتصادی آن را به‌طور قطعی نتیجه‌گیری کرد.

از محدودیت‌های اصلی این پژوهش، بررسی تعداد محدودی از ترکیبات فلزی و عدم ارزیابی اثر غلظت‌های مختلف نمک‌ها، پایداری عملکرد در شرایط استفاده طولانی‌مدت، رفتار لایه‌ها در محیط‌های مرطوب و میزان رهایش یون‌های فلزی است. همچنین، ارزیابی رشد میکروبی در این مطالعه بر اساس نمونه‌های حاصل از شرایط واقعی استفاده از ماسک انجام شد و به دلیل نبود سویه‌های استاندارد، عدم شناسایی گونه‌های میکروبی، نبود تلقیح کنترل‌شده و انجام نشدن آزمون‌های کمی، نتایج این بخش تنها به عنوان شواهد مقدماتی از تغییرات رشد میکروبی تفسیر می‌شوند.

در این پژوهش، حضور عناصر فلزی در ساختار نانوالیاف حاوی نمک‌های آهن و مس با استفاده از آنالیز EDS بررسی شد. نتایج این آزمون، حضور عناصر مورد نظر را در نواحی بررسی‌شده تأیید کرد؛ با این حال، به دلیل ماهیت نقطه‌ای اندازه‌گیری EDS، این داده‌ها برای اثبات یکنواختی توزیع عناصر در کل ساختار الیاف کافی نیستند و ارزیابی دقیق‌تر

از دیگر محدودیت‌های این مطالعه، نبود ارزیابی‌های تکمیلی شیمیایی و ساختاری مانند FTIR و XRD، همچنین عدم بررسی زیست‌سازگاری، سمیت سلولی و رهایش یون‌ها در شرایط شبیه‌سازی‌شده تنفس است. با توجه به تماس مستقیم احتمالی این ساختارها با انسان، انجام این آزمون‌ها پیش از پیشنهاد کاربردهای نهایی ضروری خواهد بود.

با وجود این محدودیت‌ها، این پژوهش نشان داد که افزودن نمک‌های سولفات آهن و سولفات مس به نانوالیاف سلولز استات می‌تواند تغییراتی در مورفولوژی الیاف، ویژگی‌های فیلتراسیون و رفتار رشد میکروبی مشاهده‌شده ایجاد کند. بررسی هم‌زمان مورفولوژی، خواص مکانیکی، راندمان فیلتراسیون و افت فشار از نقاط قوت این مطالعه محسوب می‌شود. مطالعات آینده باید بر ارزیابی اثر غلظت‌های مختلف نمک‌های فلزی، بررسی سازوکارهای برهم‌کنش پلیمر-نمک، تعیین پایداری عملکرد در شرایط واقعی، اندازه‌گیری رهایش یون‌های فلزی، انجام آزمون‌های استاندارد ضد میکروبی و بررسی عملکرد در مقیاس بزرگ‌تر تمرکز کنند.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، نانوالیاف سلولز استات خالص و اصلاح‌شده با سولفات آهن، سولفات مس و ترکیب آن‌ها به روش الکتروریسی تهیه و ویژگی‌های ساختاری، مکانیکی و عملکرد فیلتراسیون آن‌ها بررسی شد. نتایج نشان داد که

محلول سلولز استات با غلظت ۱۸ درصد وزنی در شرایط بهینه الکتروریسی، ساختاری یکنواخت با کاهش تشکیل دانه تسبیحی ایجاد کرد. افزودن نمک‌های فلزی موجب تغییر مورفولوژی و کاهش قطر الیاف شد؛ اگرچه بررسی دقیق مکانیسم این تغییرات نیازمند اندازه‌گیری مستقیم ویژگی‌های محلول مانند رسانایی، ویسکوزیته و کشش سطحی است.

نمونه‌های حاوی نمک‌های فلزی، به‌ویژه ترکیب آهن-مس، تغییرات قابل‌توجهی در عملکرد فیلتراسیون نسبت به سلولز استات خالص نشان دادند. با این حال، این اثر به‌عنوان نتیجه حضور ترکیبات فلزی تفسیر شده و برای اثبات هرگونه اثر هم‌افزایی، انجام مطالعات بیشتر با نسبت‌های مختلف فلزات و تحلیل‌های آماری برهم‌کنش ضروری است. ارزیابی مقدماتی رشد میکروبی نیز نشان‌دهنده تغییر در الگوی رشد کلنی‌ها در حضور نمک‌های فلزی بود، اما به دلیل نبود سویه‌های استاندارد و آزمون‌های کمی، این نتایج تنها به‌عنوان شواهد اولیه در نظر گرفته می‌شوند.

در مجموع، اصلاح نانوالیاف سلولز استات با نمک‌های فلزی می‌تواند بر ویژگی‌های ساختاری و عملکرد فیلتراسیون لایه‌ها اثرگذار باشد. با این حال، پیش از بررسی کاربردهای نهایی، مطالعات تکمیلی شامل ارزیابی رهایش یون‌های فلزی، ایمنی زیستی، سمیت سلولی، رفتار رطوبتی، پایداری

عملکرد در شرایط شبیه‌سازی شده استفاده واقعی و آزمون‌های استاندارد مورد نیاز است.

۶- قدردانی

بدین وسیله از سرکار خانم دکتر راهداریان، آزمایشگاه مرکزی دانشگاه شهید چمران اهواز و سرکار خانم دکتر

6. Li, Y., et al., Electrospun nanofibers for high-performance air filtration. *Composites Communications*, 2019. 15: p. 6-19.

7. Rafiei, S. and P. Valipour, Comparative study on electrocentrifuge and electrospinning of Polyacrylonitrile as two different methods of creating new nanofilters in environmental refinement. *Journal of Textile Science and Technology*, 2024. 13(3): p. 1-24.

8. Ahmed, F.E., B.S. Lalia, and R. Hashaikeh, A review on electrospinning for membrane fabrication: Challenges and applications. *Desalination*, 2015. 356: p. 15-30.

9. Nazockdast, H., Properties and medical applications of electrospun chitosan nanofibers: a review. *Journal of Textile Science and Technology*, 2014. 4(1): p. 43-55.

10. Dehghan, N., P. Payvandy, and M. Tavanaei, Image Processing for Optimization of Thresholding Methods and Determination of Nanofibers Diameter. *Journal of Textile Science and Technology*, 2013. 3(3): p. 17-28.

11. Doshi, J. and D.H. Reneker, Electrospinning process and applications of electrospun fibers. *Journal of Electrostatics*, 1995. 35(2): p. 151-160.

کلانتری، دانشکده بهداشت (گروه مهندسی بهداشت) دانشگاه علوم پزشکی ایران و کارشناسان محترم آزمایشگاه‌های این مراکز به خاطر همکاری صمیمانه در راستای انجام این پروژه کمال تشکر و قدردانی را به عمل می‌آورم.

۷- منابع

1. Yue, H., et al., *Stronger policy required to substantially reduce deaths from PM2.5 pollution in China*. *Nature Communications*, 2020. 11(1): p. 1462.

2. Downward, G.S., et al., Long-term exposure to ultrafine particles and incidence of cardiovascular and cerebrovascular disease in a prospective study of a Dutch cohort. *Environmental health perspectives*, 2018. 126(12): p. 127007.

3. Robert, B. and G. Nallathambi, A concise review on electrospun nanofibres/nanonets for filtration of gaseous and solid constituents (PM2.5) from polluted air. *Colloid and Interface Science Communications*, 2020. 37: p. 100275.

4. Zare Mehrjardi, A., H. Rahimnezhad, and S. Rahimnezhad, Investigating the antibacterial and absorbent properties of disposable masks based on the hydroxyapatite. *Journal of Textile Science and Technology*, 2023. 12(2): p. 26-40.

5. Ghajarieh, A., S. Habibi, and A. Talebian, A review on the medical application of electrospun nanofibers. *Journal of Textile Science and Technology*, 2019. 8(1): p. 31-44.

12. Reneker, D.H. and A.L. Yarin, Electrospinning jets and polymer nanofibers. *Polymer*, 2008. 49(10): p. 2387-2425.
13. Reneker, D.H., et al., Electrospinning of Nanofibers from Polymer Solutions and Melts, in *Advances in Applied Mechanics*, H. Aref and E. van der Giessen, Editors. 2007, Elsevier. p. 43-346.
14. Thompson, C.J., et al., Effects of parameters on nanofiber diameter determined from electrospinning model. *Polymer*, 2007. 48(23): p. 6913-6922.
15. Hekmati, A., et al., Effect of needle length, electrospinning distance, and solution concentration on morphological properties of polyamide-6 electrospun nanowebs. *Textile Research Journal*, 2013. 83: p. 1452-1466.
16. Liu, R., et al., Classification NanoSAR development for cytotoxicity of metal oxide nanoparticles. *Small*, 2011. 7(8): p. 1118-26.
17. Tong, H.W. and M. Wang, Electrospinning of fibrous polymer scaffolds using positive voltage or negative voltage: a comparative study. *Biomed Mater*, 2010. 5(5): p. 054110.
18. Zhang, Z., et al., Electrospun transparent nanofibers as a next generation face filtration media: A review. *Biomaterials Advances*, 2023. 149: p. 213390.
19. Dharmaraj, S., et al., The COVID-19 pandemic face mask waste: A blooming threat to the marine environment. *Chemosphere*, 2021. 272: p. 129601.
20. Coia, J.E., et al., Guidance on the use of respiratory and facial protection equipment. *J Hosp Infect*, 2013. 85(3): p. 170-82.
21. Tan, N.P., et al., Solution Blow Spinning (SBS) Nanofibers for Composite Air Filter Masks. *ACS Applied Nano Materials*, 2019. 2.
22. Lee, H. and S. Jeon, Polyacrylonitrile Nanofiber Membranes Modified with Ni-Based Conductive Metal Organic Frameworks for Air Filtration and Respiration Monitoring. *ACS Applied Nano Materials*, 2020. XXXX.
23. Maher, B., et al., A fluid mechanics explanation of the effectiveness of common materials for respiratory masks. *Int J Infect Dis*, 2020. 99: p. 505-513.
24. Tcharkhtchi, A., et al., An overview of filtration efficiency through the masks: Mechanisms of the aerosols penetration. *Bioact Mater*, 2021. 6(1): p. 106-122.
25. Zhang, Z., et al., Electrospun ultrafine fibers for advanced face masks. *Mater Sci Eng R Rep*, 2021. 143: p. 100594.
26. Zhuangbo, F., Z. Long, and Y. Tao, Filtration characteristics of fibrous filter following an electrostatic precipitator. *Journal of Electrostatics*, 2016. 83: p. 52-62.
27. Naragund, V.S. and P.K. Panda, Electrospun nanofiber-based respiratory face masks-a review. *Emergent Mater*, 2022. 5(2): p. 261-278.
28. Liao, M., et al., A technical review of face mask wearing in preventing respiratory COVID-19 transmission. *Curr Opin Colloid Interface Sci*, 2021. 52: p. 101417.

29. Raghunath, A. and E. Perumal, Metal oxide nanoparticles as antimicrobial agents: a promise for the future. *Int J Antimicrob Agents*, 2017. 49(2): p. 137-152.
30. Dizaj, S.M., et al., Antimicrobial activity of the metals and metal oxide nanoparticles. *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl*, 2014. 44: p. 278-84.
31. Hu, X., et al., In vitro evaluation of cytotoxicity of engineered metal oxide nanoparticles. *Sci Total Environ*, 2009. 407(8): p. 3070-2.
32. Parham, S., et al., ChemInform Abstract: Antimicrobial Treatment of Different Metal Oxide Nanoparticles: A Critical Review. *ChemInform*, 2016. 47.
33. Son, W.K., J.H. Youk, and W.H. Park, Antimicrobial cellulose acetate nanofibers containing silver nanoparticles. *Carbohydrate Polymers*, 2006. 65(4): p. 430-434.
34. Karthick, A. and G. Nallathambi, Nano silver incorporated electrospun polyacrylonitrile nanofibers and spun bonded polypropylene composite for aerosol filtration. *Journal of Industrial Textiles*, 2017. 46: p. 1342-1361.
35. Bashiri Rezaie, A., M. Montazer, and M. Mahmoudi Rad, Facile fabrication of cytocompatible polyester fiber composite incorporated via photocatalytic nano copper ferrite/myristic-lauric fatty acids coating with antibacterial and hydrophobic performances. *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl*, 2019. 104: p. 109888.
36. Jiang, Y.-C., et al., Particle Removal and Antibacterial of Nanofiber Doped with Metal and Ions Prepared by Electrospinning. *Aerosol and Air Quality Research*, 2023. 23(7): p. 220342.
37. Thomberg, T., et al., The anti SARS-CoV-2 activity of nanofibrous filter materials activated with metal clusters. *Atmospheric Environment: X*, 2023. 17: p. 100212.
38. Yan, N., et al., Highly electrostatic cellulose acetate materials assisted by copper ion coordination for air filtration. *Chemical Engineering Journal*, 2025. 505: p. 159848.