

Fabrication and evaluation of respiratory filter adsorbent media properties using wood-driven cellulose nanofibers

Armin Jamali^{*1}, Hossein Yousefi², Mehdi Mashkour³, Abolghasem Khazaeian⁴

1. Corresponding Author, Ph.D. Student of Wood Technology and Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: a.jamali.ir@gmail.com
2. Associate Prof., Dept. of Wood Technology and Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: hyousefi@gau.ac.ir
3. Associate Prof., Dept. of Wood Technology and Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: mashkour@gau.ac.ir
4. Professor, Dept. of Wood Technology and Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: khazaeian@gau.ac.ir

Article Info

Article type:

Full Length Research Paper

Article history:

Received: 11.05.2023

Revised: 02.08.2024

Accepted: 02.10.2024

Keywords:

Cellulose nanofiber,
Particle efficiency,
Respiratory mask

ABSTRACT

Background and Objectives: Fine dust air pollution poses a significant health threat in arid and semi-arid regions worldwide. Inhaling these particles is linked to cardiovascular issues, reduced lung function, skin problems, respiratory irritation, and an increased risk of cancer. Existing respiratory masks often struggle to capture these fine particles (less than 2.5 microns) due to the limitations of conventional filter materials. This study explored enhancing respiratory filter performance by applying a deep-coating method with cellulose nanofibers (CNFs) on a cellulosic substrate. We investigated CNF concentrations of 0.05%, 0.1%, 0.2%, and 0.5%. Coated filters were freeze-dried at -50 °C and 0.04 mbar pressure. These modifications aimed to improve filter absorption capacity, addressing the limitations of conventional filters and offering a novel approach to mitigate health risks from fine dust inhalation.

Materials and Methods: Wood cellulose nanofiber gel (WCNFs) was obtained from Nano Novin Polymer Co., Iran. Carboxymethyl cellulose (CMC) and citric acid (CA) were purchased from Dr. Mojallali Co., Iran. The cotton fabric substrate came from Live Co., Iran. Sample characterization employed Fourier-transform infrared spectroscopy (ATR-FTIR), X-ray diffraction (XRD), filter pressure drop measurement, field-emission scanning electron microscopy (FESEM), and a fine particle adsorption test.

Results: The FTIR test confirmed the purity of the cellulosic substrate used for CNF coating. XRD analysis revealed the presence of β 1-cellulose in the substrate, indicated by distinct peaks at 2θ angles of 15.5°, 16.5°, 22.5°, and 34.5°. This structure facilitated strong bonding between CNFs and the substrate. FESEM imaging confirmed the presence of nanofibers (below 100 nm), enabling the formation of nano- and submicron pores. While increasing CNF concentration generally raised pressure drop, the optimal treatment involved a 5-layer sample with two layers

containing 0.5% CNFs. This configuration achieved a remarkable 96.18% absorption efficiency for particles smaller than 2 microns, exceeding the N95 standard set by the Food and Drug Administration.

Cite this article: Jamali, Armin, Yousefi, Hossein, Mashkour, Mehdi, Khazaeian, Abolghasem. 2024. Fabrication and evaluation of respiratory filter adsorbent media properties using wood-driven cellulose nanofibers. *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 31 (1), 121-142.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/JWFST.2024.21867.2043

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

ساخت و ارزیابی خواص لایه جاذب فیلتر تنفسی با استفاده از نانوفیبر سلولز چوب

آرمین جمالی^{*۱}، حسین یوسفی^۲، مهدی مشکور^۳، ابوالقاسم خزاعیان^۴

۱. نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری گروه تکنولوژی و مهندسی چوب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: a.jamali.ir@gmail.com
۲. دانشیار گروه تکنولوژی و مهندسی چوب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: hyousefi@gau.ac.ir
۳. دانشیار گروه تکنولوژی و مهندسی چوب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: mashkour@gau.ac.ir
۴. استاد گروه تکنولوژی و مهندسی چوب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: khazaeian@gau.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی	سابقه و هدف: آلودگی هوا (ریزگردها) یکی از مهم‌ترین چالش‌های محیط زیستی در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان محسوب می‌شود. ورود این ریزگردها به درون سیستم تنفسی انسان همواره با پیامدهای جبران‌ناپذیر جانی هم‌چون حمله‌های قلبی، کاهش حجم ریه، افزایش بعضی از ناراحتی‌های پوستی، گرفتگی بینی، گلودرد، سرفه و خطر ابتلا به سرطان همراه است. از طرفی برای جلوگیری از ورود این ذرات به مجاری تنفسی انواع ماسک‌های تنفسی پدید آمدند. ابعاد ریزگردهای معلق در هوا (کم‌تر از ۲/۵ میکرون) در حدی است که فیلترهای تنفسی معمولی توان جذب و به دام انداختن آن‌ها و جلوگیری از ورود آن‌ها به مجاری تنفسی را به سبب وجود منافذ میکرومتری، ندارند. در پژوهش حاضر لایه جاذب فیلتر تنفسی با استفاده از روش غوطه‌وری و جذب نانوفیبر سلولز در پارچه پنبه‌ای در چهار سطح مصرف نانوفیبر سلولز ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۵ درصد تعیین و سپس لایه‌های حاوی نانوسلولز به روش خشک‌کن انجمادی تحت دمای منفی ۵۰ و فشار ۰/۰۴ میلی بار ساخته و مورد بررسی قرار گرفت.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۱۴ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۲/۱۱/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۲۱	
واژه‌های کلیدی: جذب ریزگرد، ماسک تنفسی، نانوفیبر سلولز	
	مواد و روش‌ها: مواد مورد استفاده در این پژوهش ژل نانوفیبر سلولز تهیه‌شده از شرکت دانش‌بنیان نانونوین پلیمر، کریوکسی متیل سلولز و اسیدسیتریک تهیه‌شده از شرکت دکتر مجللی، پارچه نخی به‌عنوان بستر از شرکت لیو (live) می‌باشد. روش‌های آنالیز نمونه‌های تولید شده در این پژوهش عبارتند از: آزمون طیف‌سنجی مادون‌فرمز فوریه (ATR-FTIR)، آزمون طیف‌سنجی پراش اشعه ایکس (XRD)، آزمون افت فشار فیلتر (Pressure Drop)، آزمون میکروسکوپ الکترونی نشر میدان (FESEM) و آزمون جذب ریزگرد (Fine Particle Adsorption).

یافته‌ها: با استفاده از آزمون FTIR ثابت شد که بستر مورد استفاده جهت نشان دادن نانوالیاف سلولزی از جنس سلولز خالص بود. هم‌چنین نتایج حاصل از آزمون XRD بر روی بستر نیز با ظهور پیک‌هایی در زوایای دوتتای (2θ) ۱۵/۵، ۱۶/۵، ۲۲/۵ و ۳۴/۵ نشان داد که سلولز بستر از سلولز نوع بتا ۱ (β1) بود بنابراین این امر موجب شد تا نانوالیاف سلولزی به راحتی بتوانند با بستر پیوند برقرار کنند. میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد نانوالیاف مورد استفاده در این پژوهش در مقیاس نانومتری (زیر ۱۰۰ نانومتر) قرار داشته بنابراین می‌توانند منافذ نانومتری و زیرمیکرونی تشکیل دهند. به‌طورکلی با افزایش غلظت نانوفیبر سلولز، افت فشار نیز افزایش یافت. بهترین تیمار این مطالعه، نمونه ۵ لایه با ۲ لایه حاوی ۰/۵ درصد نانوالیاف سلولزی بود که راندمان جذب آن برای متوسط ذرات زیر ۲ میکرون مقدار ۹۶/۱۸ درصد بود. راندمان جذب ریزگرد در این لایه جذب با استاندارد N95 (تولید شده بر اساس دستورالعمل سازمان غذا و دارو) یکسان بود.

استناد: جمالی، آرمین، یوسفی، حسین، مشکور، مهدی، خزاعیان، ابوالقاسم (۱۴۰۳). ساخت و ارزیابی خواص لایه جذب فیلتر تنفسی با استفاده از نانوفیبر سلولز چوب. *نشریه پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل*، ۳۱ (۱)، ۱۴۲-۱۲۱.

DOI: 10.22069/JWFST.2024.21867.2043



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

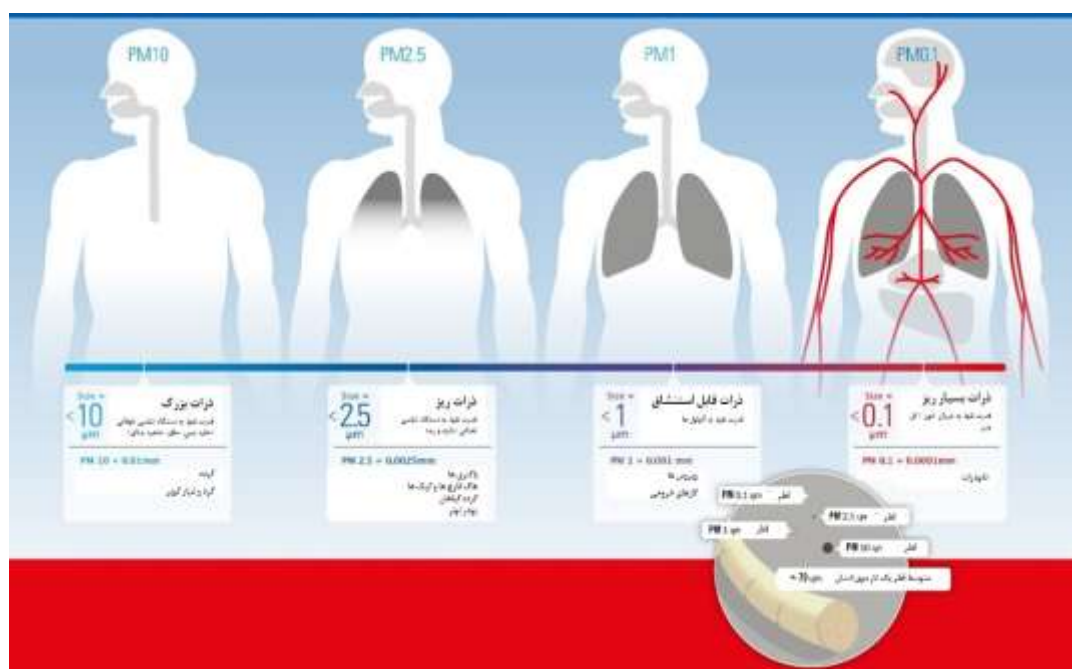
مقدمه

مشکلات زیست محیطی امروزه به یک چالش بزرگ در دنیا تبدیل شده است. پدیده گرمایش زمین، انقراض انواع گونه‌های جانوری و گیاهی ناشی از این مشکلات می‌باشند. به‌طور کلی محیط زندگی انسان همواره دستخوش حوادث طبیعی خطرآفرین است و یکی از این حوادث و بلایای طبیعی طوفان‌های گردوغبار بوده که منشأ آن بیابان‌های حاشیه خلیج فارس و کشورهای غربی ایران، به‌ویژه عراق می‌باشد (۱). البته که گسترش روزافزون و بی‌رویه شهرها به همراه توسعه سریع اقتصادی و افزایش مصرف انرژی نیز آلودگی در هوا و زمین را تشدید می‌کند. از منابع آلودگی‌های محیط‌زیست می‌توان به صنعت، حمل‌ونقل، کشاورزی، تولیدات تجاری و خانگی، گرمایش تجاری و خانگی و ... اشاره داشت. تعاریف متفاوتی از آلودگی در جوامع وجود دارد، به‌طور کلی هرگاه ماده یا موادی بیگانه با غلظتی خاص وارد عناصر محیطی شوند و تعادل طبیعی آن‌ها را بر هم بزنند صحبت از آلودگی می‌شود. هوا، آب و خاک، سه عامل مهم در طبیعت‌اند که می‌توانند متأثر از این نوع آلودگی‌ها باشند. با توجه به هدف پژوهش حاضر، شناخت بر آلودگی هوا و انواع تأثیرات آن بر محیط‌زیست و سلامت انسان، امری ضروری است که در ادامه به آن پرداخته می‌شود. در پژوهشی، آلودگی هوا به‌عنوان یک ریسک فاکتور مهم محیطی برای جهان و سلامت عمومی معرفی شد که با افزایش شدت و وخامت بیماری‌های تنفسی همراه است (۲). این پدیده طبیعی، هر محیط اقتصادی، اجتماعی، سیاسی و بیوفیزیکی را تحت تأثیر قرار می‌دهد و باعث بروز اثرات منفی فراوان بر کشاورزان می‌گردد (۳).

طوفان‌های گردوغبار با تأثیرپذیری از عوامل و آلودگی‌های غیرطبیعی خود را به‌صورت یک آلودگی طبیعی نشان می‌دهد.

سازمان حفاظت محیط‌زیست در سال ۱۳۹۰ گردوغبار یا ریزگرد را به ذراتی بسیار کوچک و سبک سیلتی و رسی یا ماسه‌ای اطلاق نمودند که در اثر فرسایش بادی و بیابان‌زایی توسط باد تا مسافت بسیار طولانی جابجا و انتقال می‌یابند. این ذرات توانایی بالایی در حمل و جابجایی فلزات سنگین و از این قبیل را دارند. نتایج پژوهشی نشان داد که ذرات ریزدانه (کم‌تر از ۲/۵ میکرون) بیش‌ترین سهم را در حمل فلزات سنگین دارند (۲، ۴، ۵). نتایج مطالعاتی مشابه نشان داد که بیش‌ترین پراش پرتو ایکس بافت ریزگردهای اهواز در دو گروه کلسیت منیزیم‌دار و کوارتز قرار گرفتند (۱، ۶، ۷).

مطالعات انجام شده از سوی پژوهش‌گران مختلف در خصوص آنالیز قطر ذرات گردوغبار نشان می‌دهد که این ذرات از چند ده نانومتر تا چند ده میکرومتر متغیر می‌باشند. در مطالعه‌ای متوسط قطر ذرات را ۱۶/۶ میکرون گزارش شد که منشأ آن وجود دانه‌های ریزی مانند رس (قطر کم‌تر از ۰/۰۰۲ میلی‌متر) و سیلت (قطر بین ۰/۰۲ - ۰/۰۰۲ میلی‌متر) در بستر تالاب‌های خشک و بیابان‌ها است (۱، ۳، ۷). همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، اندازه قطر ذرات رابطه مستقیم با عمق نفوذ این ذرات به سیستم تنفسی بدن انسان دارد، بدین‌صورت که هرچه قطر ذرات کوچک‌تر باشند، عمق نفوذ آن‌ها به اندام‌های تنفسی انسان نیز افزایش می‌یابد که این امر پیامدهای ناگواری را برای سلامت انسان در بر خواهد داشت.



شکل ۱- عمق نفوذ ریزگردها در آناتومی بدن انسان (برگرفته از www.afprofilters.com).

Figure 1. Depth of particulate matter penetration in the anatomy of the human body (taken from www.afprofilters.com).

می‌سازند و همان‌طور که گفته شد ابعاد ریزگردها کم‌تر از ۲ میکرون می‌باشد. این آسیب‌ها شامل دو دسته آسیب‌های کوتاه‌مدت و آسیب‌های بلندمدت می‌باشد. آسیب‌های کوتاه‌مدت شامل: ناراحتی چشم، بینی و گلو در افراد سالم و همچنین تشدید بیماری‌های قلبی و یا ریوی مزمن و انواع آن است. اثرات بلندمدت شامل حمله‌های قلبی، کاهش حجم ریه، افزایش بعضی از ناراحتی‌های پوستی، گرفتگی بینی، گلودرد و سرفه، خطر ابتلا به سرطان برای افرادی که طولانی‌مدت در معرض گردوغبار قرار دارند و انواع آسیب‌های خطرناک دیگر می‌باشد (۲، ۹، ۱۰).

با توجه به مطالب ذکر شده در بالا پدیده گردوغبار یا آلودگی هوا از بزرگ‌ترین چالش‌های دهه اخیر در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان محسوب می‌شود که پیامدهای ناگواری را برای محیط‌زیست و سلامت انسان به همراه دارد. از این‌رو استفاده از ماسک‌ها و فیلترهای تنفسی بیش‌ازپیش مورد اهمیت

هدف اول اثرات زیان‌بار آلاینده‌های موجود در هوا، سیستم تنفسی است؛ به‌طوری‌که مواجهه با غلظت زیاد آلاینده‌های هوا، می‌تواند باعث تشدید بیماری‌های تنفسی گردد (۲، ۸). مطالعات گسترده‌ای در خصوص تأثیر ریزگردها بر سلامت انسان صورت گرفته است بنابراین برخی از مطالعات اپیدمیولوژیک نشان می‌دهند که افزایش آلودگی هوا رابطه مستقیم با افزایش مرگ‌ومیر ناشی از بیماری‌های قلبی-عروقی و تنفسی دارد. بر اساس گزارش سازمان بهداشت جهانی^۱ (WHO) در سال ۲۰۱۲ تخمین زده شده است که حدود ۳/۷ میلیون مرگ زودرس ناشی از آلودگی هوا در مناطق شهری و روستایی رخ داده است که علت اصلی آن مواجهه با ذرات ۱۰ میکرون و کم‌تر بوده است.

ذرات معلقی که قطرشان کم‌تر از ۱۰ میکرون است، بیش‌ترین آسیب را به سلامت انسان وارد

1- WHO: World health organization

و ماسک‌های موجود در بازار و هم‌چنین جایگزینی مواد زیست تخریب به‌عنوان مواد اولیه مورد استفاده در این صنعت به‌عنوان یک چالش جهانی مطرح شده است (۱۲، ۱۳). یکی از این مواد، نانوالیاف سلولز می‌باشد که دارای پتانسیل بالقوه بسیار بالایی به جهت داشتن ویژگی‌های منحصر به فرد در حوزه فیلتراسیون می‌باشد.

سلولز یکی از مهم‌ترین پلیمرهای طبیعی است و به‌عنوان یک ماده خام پایان‌ناپذیر و ماده‌ای زیست‌سازگار در مقیاس صنعتی است. این ماده سال‌هاست که در قالب چوب و الیاف گیاهی به‌عنوان یک منبع انرژی، مصالح ساختمانی و پوشاک به‌کاربرده می‌شود. سلولز به‌عنوان فراوان‌ترین پلیمر زیستی طبیعی (۱۰۰ میلیارد تن تولید در سال توسط طبیعت از واحدهای انیدرو - D - گلوکز تشکیل شده است که با پیوندهای گلیکوزیدی ($\beta - 1 \rightarrow 4$) به یکدیگر متصل شده‌اند و دارای درجه پلیمریزاسیونی در حدود ۱۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ برای زنجیره سلولزی می‌باشد. هر واحد انیدروگلوکز یک زنجیر سلولز دارای سه گروه هیدروکسیل آزاد در موقعیت کربن ۲، کربن ۳ و کربن ۶ می‌باشد که می‌تواند باعث تشکیل پیوندهای هیدروژنی شوند. در اثر تشکیل این پیوندهای هیدروژنی ساختارهای نانومتری مختلفی مانند نانوفیبریل، فیبریل نخستین و نانوکریستال تشکیل می‌گردد (شکل ۲). در مطالعه یوسفی و همکاران (۲۰۱۳) نانوفیبریل با قطر حدود ۱۰ تا ۴۰ نانومتر و طول چند میکرومتر را بزرگ‌ترین واحد نانومتری سلولز معرفی نمودند (۱۴). به این ترتیب نسبت ضریب منظر (طول به قطر) در نانوفیبر سلولز بسیار بالا می‌باشد که این امر می‌تواند موجب تشکیل شبکه‌ای با منافذ ریز در نانوفیبر سلولز شده و در به دام انداختن ذرات ریز در فیلتر تنفسی مؤثر باشد. به‌طور کلی روش‌های مختلفی جهت لایه نشانی

قرار گرفته است. ماسک‌ها و فیلترهای معمولی موجود در بازار با ساختاری میکرومتری توان مؤثری در جذب ذرات زیر ۲ میکرون را ندارند که پیامد آن می‌تواند اثرات منفی جبران‌ناپذیری بر سیستم تنفسی و سلامت انسان بگذارد (۱۱، ۳۳، ۳۴).

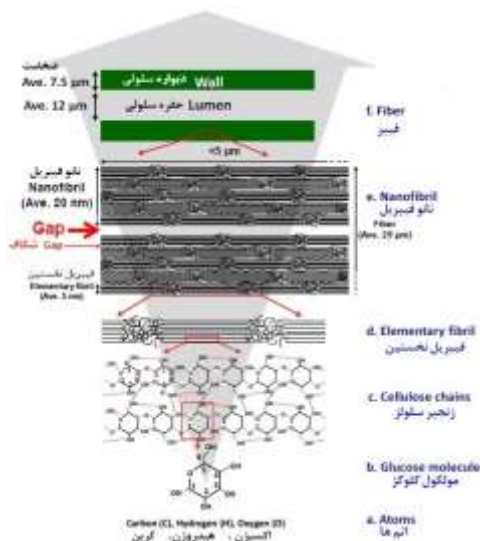
به‌طور کلی تجهیزات حفاظت فردی به دو دسته کلی: ماسک‌های تصفیه‌کننده هوا و ماسک‌های تأمین‌کننده هوا تقسیم می‌شوند که هر از آن‌ها براساس طراحی و ویژگی‌های خاص به خود در کاربردهای مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرند. به‌طوری‌که در دسته اول یعنی ماسک‌های تصفیه‌کننده هوا از فیلترها و کاتریج‌ها برای حذف آلاینده‌هایی مانند گازها، بخارات، ذرات معلق در هوا و یا ترکیبی از آلاینده‌ها استفاده می‌شود. دسته دوم یعنی ماسک‌های تأمین‌کننده هوا، معمولاً به دو شکل: پوشاننده دهان و بینی و پوشاننده کامل سر با مخزن تأمین‌کننده هوای سالم (اکسیژن) در محیط‌های بسیار خطرناک یا اتمسفر پایین مورد استفاده قرار می‌گیرند. پژوهش حاضر بر روی ساخت لایه جاذب برای ماسک‌های تصفیه‌کننده هوا با هدف جذب ذرات معلق در هوا انجام گردید. استاندارد اروپایی مورد استفاده در این دسته از ماسک‌ها EN149 + A1-2009 می‌باشد که در سه گروه FFP1، FFP2 و FFP3 طبقه‌بندی می‌شوند. معادل این طبقه‌بندی در استاندارد آمریکایی NIOSH به ترتیب N90، N95 و N99 می‌باشد.

به‌طور کلی استفاده از مواد زیست‌تخریب‌ناپذیر در ماسک‌های موجود، مشکلات محیط زیستی بسیاری به همراه دارد. اغلب این مواد، پلیمرهای مشتق شده از مواد نفتی می‌باشند. از جمله این پلیمرها می‌توان به polyacrylonitrile، polyimide، glass fiber، polyvinylidene fluoride، polyvinylpyrrolidone، polypropylene، polystyrene و ... اشاره نمود. از این‌رو همواره تولید و بهینه‌سازی راندمان فیلترها

مواد و روش‌ها

مواد اولیه مورد استفاده در این پژوهش به شرح جدول ۱ می‌باشد.

نانوالیاف بر روی بستر وجود دارد، از جمله این روش‌ها الکتروریسی (۴۲)، اسپری (۳۹)، غوطه‌وری (۴۰)، پلاسما (۴۱) و چرخشی (۳۸) می‌باشد. روش لایه نشانی در این پژوهش روش غوطه‌وری می‌باشد.



شکل ۲- اولتراساختار سلولز برگرفته از مقاله یوسفی و همکاران، ۲۰۱۵.

Figure 2. Ultra-structure of cellulose taken from Yousefi et al., 2015.

جدول ۱- نام مواد شیمیایی مورد استفاده.

Table 1. The name of chemical material.

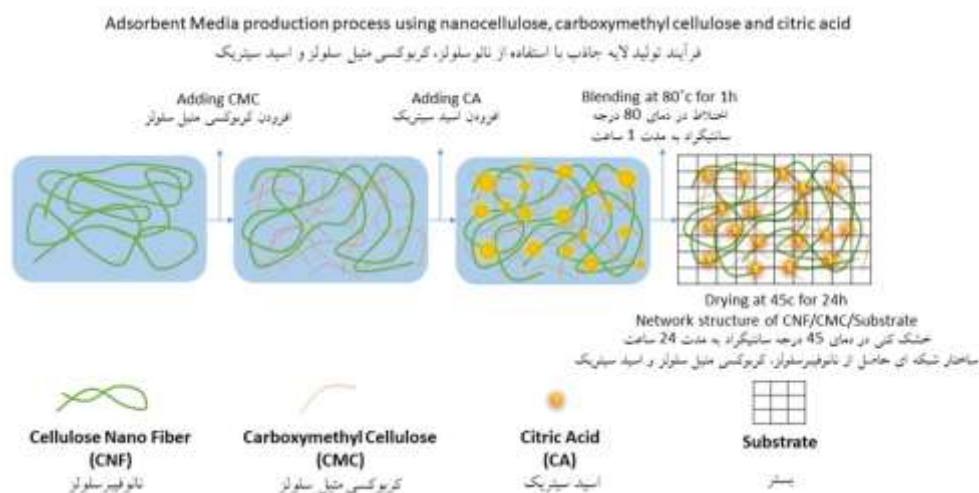
مشخصات Characterization	شرکت تولیدکننده Company	فرمول شیمیایی Chemical formula	نام ماده شیمیایی Material Name	ردیف Row
درجه پلیمریزاسیون (Degree of polymerization): 7000 قطر متوسط (Medium diameter): 35-55 nm غلظت: ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۵ درصد	نانو نوین پلیمر Nano novin polymer	$C_6H_{10}O_5$	ژل نانوفیبر سلولز Cellulose Nanofiber Gel	1
وزن مولکولی (Molecular Weight): 192.124 (g/mol) دمای انحلال پذیری در آب (Solubility temperature in water): 20 درجه سلسیوس دمای ذوب (melting point): 153 درجه سلسیوس خلوص بالای ۹۹ درصد	دکتر مجللی Dr Mojalali	$C_6H_8O_7$	اسید سیتریک Citric Acid	2
وزن مولکولی (Molecular Weight): 1240.208 (g/mol) درجه استخلاف (degree of succession): 0.54	دکتر مجللی Dr Mojalali	$C_8H_{16}O_8$	کربوکسی متیل سلولز Carboxymethyl cellulose	3
پارچه پنبه‌ای Cotton fabric	لیو live	$C_6H_{10}O_5$	بستر سلولزی خالص Pure cellulose substrate	4
استاندارد اروپایی European Standard	فرش ایر Fresh Air	-	ماسک تنفسی N95 N95 Face Mask	5

نموده و سپس بین شیشه قرار داده شد. فرایند جذب نانوالیاف در این پژوهش به صورت غوطه‌وری انجام شد. در نمونه‌های ۳ لایه تنها یک‌لایه (لایه میانی) توسط نانوسلولز پیوند عرضی شده، جذب شد، این در حالی است که در نمونه‌های ۵ لایه تعداد دولایه، به صورت یک‌درمیان یا به عبارتی در لایه‌های دوم و چهارم، جذب نانوسلولز به همراه عامل ایجاد پیوند عرضی صورت گرفت. در مرحله نهایی نمونه‌های ۳ لایه (با یک‌لایه جاذب) و نمونه‌های ۵ لایه (با دولایه جاذب) توسط دستگاه خشک‌کن انجمادی مدل Beta 8 LD plus ساخت شرکت Christ کشور آلمان (آزمایشگاه مرکزی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان) با فشار ۰/۰۴ میلی‌بار و دمای منفی ۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت تولید گردید. شکل ۳ شماتیک مراحل تولید لایه‌های جاذب را نشان می‌دهد.

تعداد ۸ نمونه با سه تکرار در این پژوهش تولید شد. کد اختصاری نمونه‌های تولید شده به شرح جدول ۲ می‌باشد.

ایجاد پیوند عرضی در شبکه نانوفیبر سلولز با هدف اطمینان از عدم رهایش نانوفیبر سلولز در حین تنفس و همچنین تثبیت نانوالیاف در بستر انجام شده است. جهت این کار ابتدا ژل نانوفیبر سلولز به درصدهای ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۵ توسط آب مقطر و با استفاده از ترازوهای دیجیتال با دقت ۰/۰۱ و ۰/۰۰۱ گرم مدل D0025 ساخت شرکت A&D ژاپن، بر روی دستگاه همزن مغناطیسی مدل RCT B S000 ساخت کشور آلمان، در دمای اتاق با دور ۴۰۰ در دقیقه به مدت ۱۵ دقیقه هم‌زنی شد. جهت ایجاد پیوند عرضی در سوسپانسیون ابتدا ژل نانو فیبر سلولز به دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد توسط همزن مغناطیسی با دور ۴۵۰ در دقیقه رسید و سپس میزان ۵۰ درصد وزنی خشک نانوالیاف سلولز، کربوکسی متیل سلولز و اسیدسیتریک اضافه گردید. فرایند هم‌زنی به مدت ۶۰ دقیقه به طول انجامید (۱۵، ۳۲، ۳۵، ۳۶).

جهت تولید لایه جاذب با استفاده از دستگاه خشک‌کن انجمادی^۱ ابتدا بستر سلولزی مورد استفاده را آغشته به نانو فیبرهای سلولز پیوند عرضی شده



شکل ۳- شماتیک فرآیند ترکیب نانوفیبر سلولز با اتصال‌دهنده‌های عرضی و نحوه ارتباط آن‌ها با هم در لایه جاذب فیلتر.

Figure 3. Schematic design of the combination of CNF with cross-linkers within the adsorption media.

جدول ۲- تشریح کدهای اختصاری نمونه‌ها.

Table 2. Description of brief code of samples.

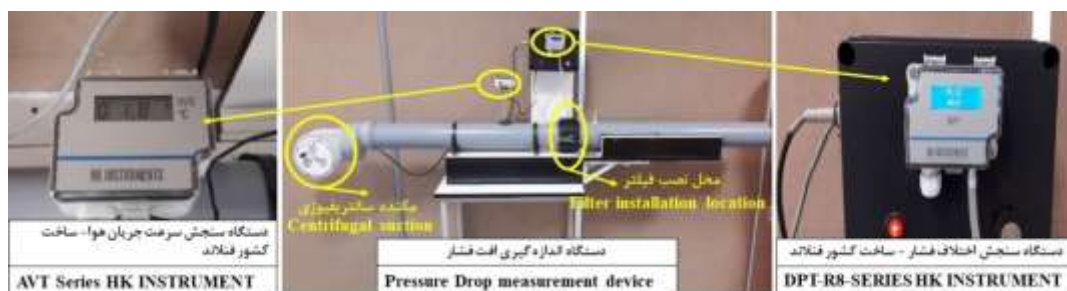
توضیحات Explanation	کد اختصاری Abbreviation code	ردیف Row
S: نانوفیبر سلولز تولیدشده به روش سوپراسیاب	S3F05	1
Super Grinding Cellulose nanofiber	S5F05	2
3: تعداد لایه‌های ماسک	S3F1	3
Number of mask layers	S5F1	4
5: تعداد لایه‌های ماسک	S3F2	5
Number of mask layers	S5F2	6
F: خشک‌شده با دستگاه خشک‌کن انجمادی	S3F5	7
Drying by Freeze drier		
0.5: غلظت نانوفیبر سلولز 0.05%		
Cellulose nanofiber concentration		
1: غلظت نانو فیبر سلولز 0.1%	S5F5	8
Cellulose nanofiber concentration		
2: غلظت نانو فیبر سلولز 0.2%		
Cellulose nanofiber concentration		
5: غلظت نانو فیبر سلولز 0.5%		
Cellulose nanofiber concentration		

آزمون جهت مقایسه بر روی ماسک N95 حاوی دولایه ملت بلون^۱ و یک لایه^۲ SSMMS نیز انجام شد. آزمون افت فشار کمی توسط دستگاه تعیین افت فشار فیلتر (شکل ۴) که در این پژوهش به صورت ابتکاری و با استفاده از تجهیزات اندازه‌گیری دقیق براساس استاندارد اروپایی BS EN149+A1-2009 ساخته شد، مورد ارزیابی قرار گرفت. نانوماسک‌های تولید شده در این پژوهش با توجه به استاندارد اروپایی در ۳ سطح جریان هوا ۳۰، ۹۵ و ۱۶۰ لیتر بر دقیقه مورد ارزیابی قرار گرفتند.

۱- ملت بلون (Melt Blown) مورد استفاده در این ماسک یک لایه ریزمیکرون الباف پلی‌پروپیلن (با متوسط قطری حدود ۲/۵ میکرومتر) و با گراماژ ۱۷ گرم بر سانتی‌مترمکعب بوده است که توسط شرکت بافتینه (ایران) تولید شده و مورد تأیید سازمان غذا و دارو وزارت بهداشت می‌باشد.

۲- این ماده متشکل از ۵ لایه است که حرف S و M در آن متناظر اسپان باند و ملت بلون است. در واقع این ماده از دو لایه ملت بلون تشکیل شده منتهی فرقی با لایه ملت بلون مجزا در کم‌تر بودن گراماژ است. این ماده نیز توسط شرکت بافتینه (ایران) تولید شده و مورد تأیید سازمان غذا و دارو وزارت بهداشت می‌باشد.

آزمون‌های مورد استفاده، شامل طیف‌سنجی مادون‌قرمز (ATR-FTIR) و طیف‌سنجی پراش پرتوایکس (XRD) واقع در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، افت فشار کیفی که توسط ۲۰ نفر مصرف‌کننده مورد ارزیابی قرار گرفت، میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدان (FE-SEM) واقع در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه صنعتی شاهرود، افت فشار کمی توسط دستگاه ساخته‌شده در این پژوهش با استفاده از تجهیزات اندازه‌گیری دقیق می‌باشد. مهم‌ترین آزمون، آزمون جذب ریزگرد می‌باشد که توسط دستگاه Laser Particle counter مدل HHPC-6 شرکت Met One آمریکا (شرکت آزاد فیلتر قزوین) مورد ارزیابی قرار گرفت. این آزمون جهت تعیین درصد جذب ذرات ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷، ۱، ۲ و ۵ میکرون در نمونه‌های ۳ و ۵ لایه با غلظت‌های ۰/۰۵ و ۰/۵ درصد انجام گردید. درصد جذب نمونه‌های ۳ و ۵ لایه تولید شده به روش خشک‌کن انجمادی به همراه نمونه شاهد ۳ و ۵ لایه اندازه‌گیری شد. همچنین این



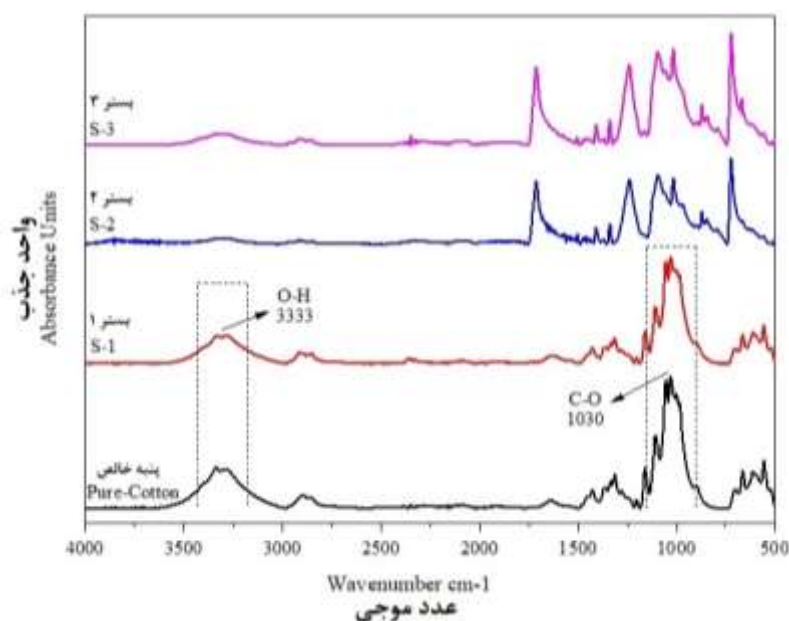
شکل ۴- دستگاه اندازه‌گیری افت فشار فیلتر.

Figure 4. Filter pressure drop measuring device.

قابل مشاهده می‌باشد. ظهور دو پیک شاخص در دامنه ۱۰۳۰ و ۳۳۳۳ برای پارچه S-1 و مطابقت آن با منحنی سلولز خالص پنبه، نشان می‌دهد که پارچه S-1 تقریباً از سلولز خالص تشکیل شده و گزینه مناسبی جهت نشان دادن نانوالیاف سلولزی به عنوان بستر می‌باشد. در مقابل ظهور پیک‌های متفاوت در پارچه‌های S-2 و S-3 و عدم تطابق آن‌ها با نمودار سلولز نشان می‌دهد که پارچه‌های مذکور سلولزی نبوده و یا دارای ناخالصی‌های قابل ملاحظه‌ای بودند.

نتایج و بحث

شکل ۵ نتیجه آزمون طیف‌سنجی مادون قرمز فوریه بستر مورد استفاده را نشان می‌دهد. جهت انتخاب بستری مناسب برای لایه نشانی نانوالیاف، از بین پارچه‌های موجود در بازار، سه نمونه تحت عنوان پارچه (S-1)، پارچه (S-2) و پارچه (S-3) تهیه و مورد آزمون FTIR قرار گرفتند. هدف از این آزمون انتخاب یک بستر مناسب جهت نشان دادن نانوالیاف سلولزی و حصول اطمینان از تشکیل پیوندهای مناسب بین نانوالیاف و بستر بوده است. منحنی مربوط به سلولز خالص پنبه و منحنی‌های ۳ پارچه

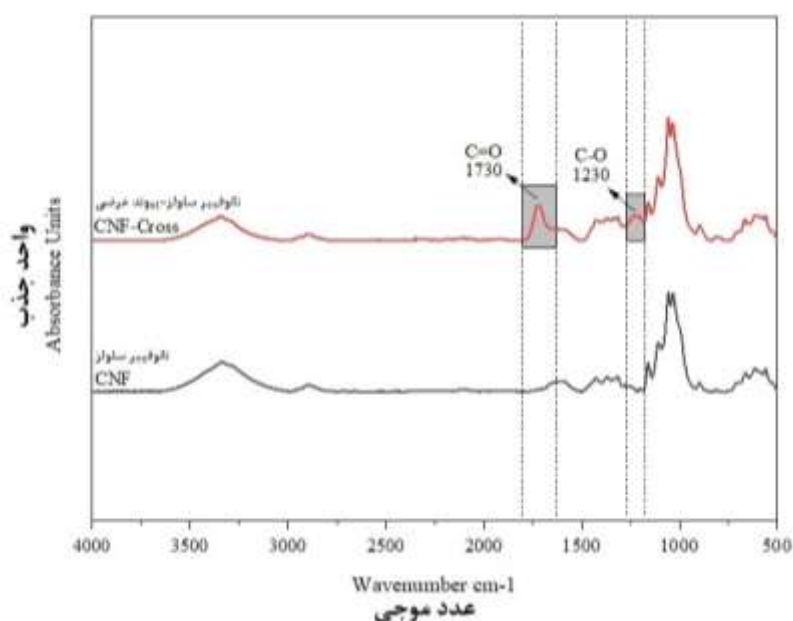


شکل ۵- آزمون طیف‌سنجی مادون قرمز جهت مقایسه پارچه‌های S1, S2 و S3 با منحنی سلولز خالص.

Figure 5. Infrared spectroscopy test to compare different substrates with pure cellulose graph.

نشان‌دهنده ایجاد پیوندهایی از نوع استری بین این مواد و نانوالیاف سلولزی می‌باشد که سبب تقویت شبکه نانوالیافی گردید (۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۸). هدف از ایجاد پیوندهای عرضی، افزایش اطمینان از عدم رهايش نانوالیاف سلولزی از بستر در فرآیند تنفس بوده است.

شکل ۶ منحنی آزمون طیف‌سنجی مادون‌قرمز فوریه آتروژل نانوالیاف سلولزی خالص و آتروژل نانوالیاف سلولزی حاوی اسیدسیتریک/کربوکسی متیل سلولز را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود ظهور دو پیک در دامنه ۱۲۳۰ و ۱۷۳۰ در نمونه پیوند عرضی شده با اسیدسیتریک/کربوکسی متیل سلولز

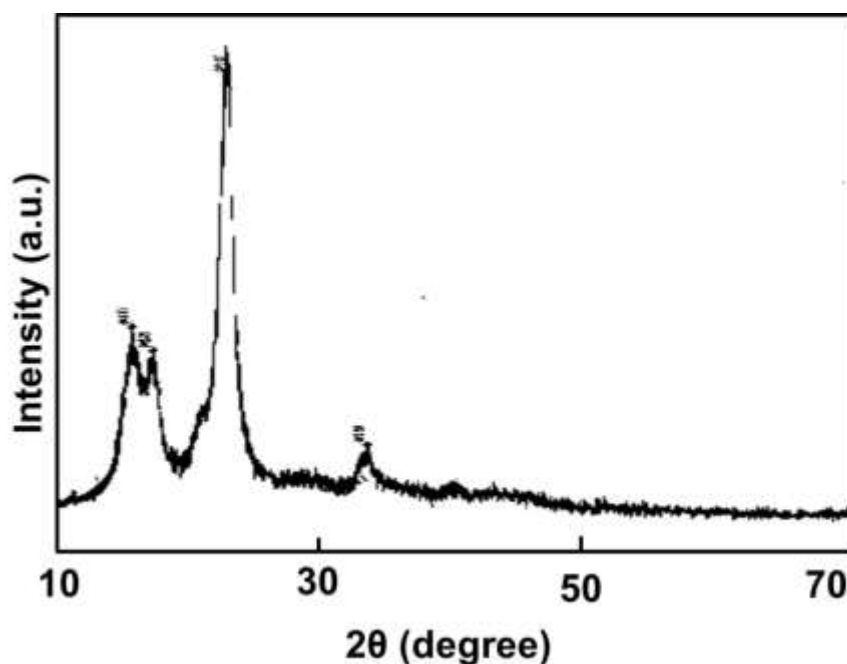


شکل ۶- آزمون طیف‌سنجی مادون‌قرمز جهت بررسی عملکرد اتصال‌دهنده عرضی.

Figure 6. Infrared spectroscopy test to evaluate crosslinking performance.

پراش پرتوایکس، نتایج آزمون طیف‌سنجی مادون‌قرمز را تأیید و تقویت می‌نماید. با این وصف، نتیجه قطعی این است که بستر S-1 از سلولز خالص تشکیل شده بنابراین این امر سبب می‌شود تا نانوالیاف سلولز به‌راحتی بتوانند با میکرو الیاف بستر پیوند برقرار کند.

شکل ۷ آزمون طیف‌سنجی پراش پرتوایکس بر روی بستر S-1 را نشان می‌دهد. همان‌طوری که نتایج آزمون طیف‌سنجی مادون‌قرمز بر روی این بستر، تطابق زیادی با منحنی سلولز خالص نشان داد، در این آزمون نیز ظهور ۴ پیک در زوایای ۲ تا ۱۵/۵، ۱۶/۵، ۲۲/۵ و ۳۴/۵ نشان‌دهنده سلولز نوع بتا ۱ (B1) در این بستر می‌باشد. در واقع نتایج آزمون طیف‌سنجی



شکل ۷- آزمون طیف‌سنجی پراش پرتو ایکس از بستر مورد استفاده.

Figure 7. XRD test of the substrate were used.

آن‌ها صفر بود (۱۹). آزمون افت فشار کیفی در این پژوهش به صورت ابداعی و بدون هزینه انجام گردید و سبب شد تا در این مطالعه نسبت درصد‌های نانوفیبر سلولز به ۴ سطح ۰/۱، ۰/۲، ۰/۵ و ۰/۵ کاهش یابد و در ادامه مورد بررسی قرار گرفت. آزمون افت فشار کیفی مجدد برای درصد‌های جدید نانوفیبر سلولز تکرار گردید و نتیجه درصد‌های جدید با ممانعت بسیار کمی در مقابل عبور هوا در هنگام تنفس همراه گردید به عبارت دیگر تنفس به صورت آزمون کیفی آسان بود. لازم به توضیح است که غالباً افزایش افت فشار در ماسک‌ها و فیلترها با افزایش جذب ریزگرد همراه می‌گردد (۲۰، ۲۱). منتهی افت فشار بالا سبب سختی در تنفس و تبعات منفی (مانند کمبود اکسیژن و ...) است بنابراین بین افت فشار و جذب ریزگرد تعادلی باید وجود داشته باشد.

شکل ۸ آزمون افت فشار به صورت کیفی را نشان می‌دهد. این آزمون به صورت ابداعی در این پژوهش انجام گردید. در این آزمون نمونه‌های تولید شده در پیش‌آزمون و آزمون نهایی توسط ۱۰ نفر مورد ارزیابی قرار گرفتند. بدین صورت که در ابتدا نمونه‌های حاوی نانوفیبر سلولز در غلظت‌های ۰/۳، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ با درصد‌های مختلف پیوندهای عرضی بررسی و نتایج حاصل از این آزمون نشان داد که درصد‌های وزنی ۱ و ۱/۵ نانوسلولز با بستن منافذ مانع از عبور هوا شده بنابراین افت فشار زیاد و تنفس را دچار مشکل می‌کند. دلیل این امر ویژگی ممانعتی بالای نانوفیبر سلولز در آن‌ها است که در درصد‌های بالا سبب افزایش دانسیته و بستن منافذ می‌گردند. ایزی و همکاران در سال ۱۳۹۷ فیلم‌هایی با استفاده از نانوالیاف سلولز تولید نمودند که نفوذپذیری به هوای

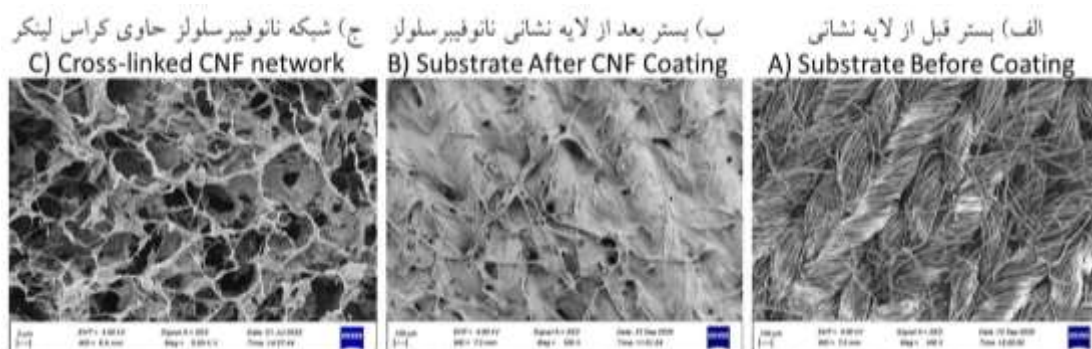


شکل ۸- آزمون افت فشار کیفی.

Figure 8. Qualitative pressure drop test.

۹ ب لایه نشانی نانوفیبر سلولز حاوی پیوند عرضی بر روی زیرلایه میکرومتری سبب شد تا سطح میکروفیبرهای زیرلایه پوشانده شود و در شکل ۹ ج بزرگنمایی بالاتر شبکه نانوفیبر سلولز حاوی پیوند عرضی نمایش داده شد که وظیفه اصلی در جذب ریزگردها را به عهده دارد (۲۲) به‌طورکلی هدف استفاده از ایجاد پیوند عرضی در پژوهش اطمینان از ایجاد شبکه پیوسته و پیشگیری از رهائش نانوالیاف بود.

شکل ۹ آزمون میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی بر روی بستر جاذبها شامل (الف) زیرلایه میکرومتری سلولزی، (ب) زیرلایه میکرومتری لایه نشانی شده با نانوفیبر سلولز حاوی پیوند عرضی و (ج) شبکه نانوفیبر سلولز حاوی پیوند عرضی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در تصویر مشاهده می‌شود زیر لایه بستر جاذبها از الیاف میکرومتری سلولز تشکیل شده و اندازه قطر میکروفیبرها 8 ± 22 میکرون محاسبه گردید. شکل

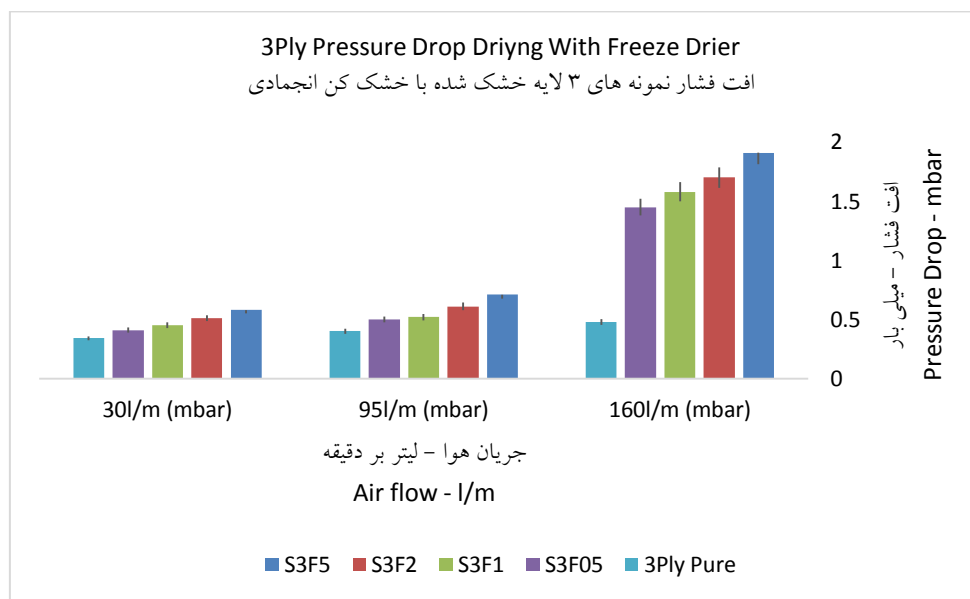


شکل ۹- آزمون میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی بر روی لایه جاذب ماسک تنفسی.

Figure 9. FE-SEM on adsorption media.

بود. هم‌چنین با افزایش سطح جریان هوا، افت فشار به‌طور معنی‌داری افزایش پیدا کرد (۳۷). این آزمون در این پژوهش، بر اساس استاندارد اروپایی EN149+A1-2009 در سه جریان هوای ۳۰، ۹۵ و ۱۶۰ لیتر بر دقیقه انجام گردید. در استاندارد نام‌برده حداکثر افت فشار ماسک‌های تنفسی سری FFP2 در جریان هوای ۱۶۰، ۹۵ و ۳۰ لیتر بر دقیقه به‌ترتیب ۳، ۲/۴ و ۰/۷ میلی بار تعیین گردید، به‌عبارت‌دیگر نباید افت فشار از این میزان تجاوز کند، بر این اساس افت فشار تمامی نمونه‌های تولید شده اعم از ۳ لایه و ۵ لایه در این پژوهش از حد مجاز استاندارد اروپایی بالاتر نرفت.

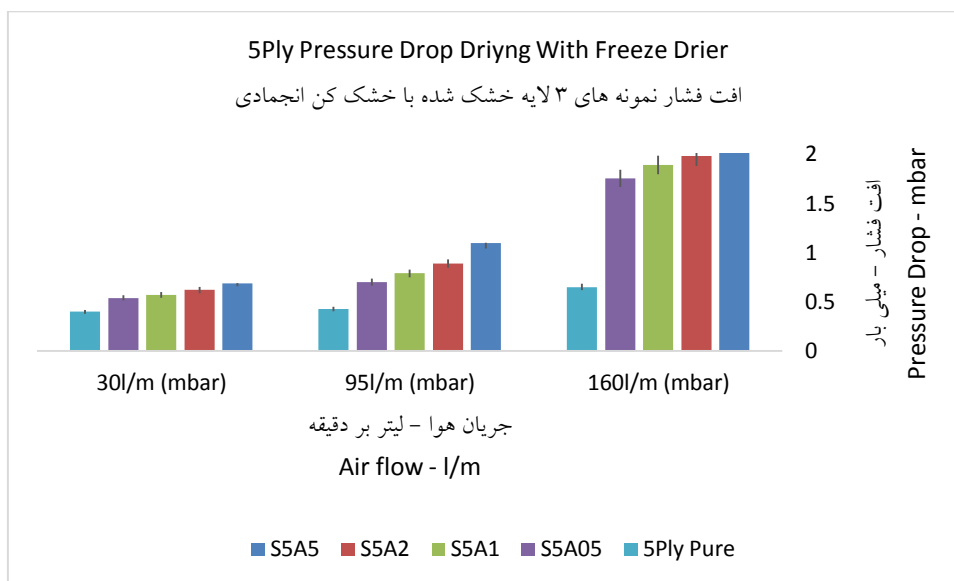
نتایج آزمون افت فشار کمی با رسم نمودارهایی بیان شد. شکل ۱۰ مقایسه افت فشار نمونه‌های ۳ لایه و شکل ۱۱ مقایسه نمونه‌های ۵ لایه تولید شده به روش خشک‌کن انجمادی در غلظت‌های ۰/۱، ۰/۰۵، ۰/۲ و ۰/۵ درصد نانوفیبر سلولز را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که با لایه نشانی نانوالیاف سلولز افت فشار نسبت به نمونه شاهد بدون نانو، به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. هم‌چنین با افزایش غلظت نانوالیاف سلولز، افت فشار نیز با افزایش همراه گردید. به‌طورکلی کم‌ترین افت فشار نانو ماسک‌ها، مربوط به نمونه حاوی ۰/۰۵ درصد و بیش‌ترین افت فشار مربوط به نمونه حاوی ۰/۵ درصد نانوفیبر سلولز



شکل ۱۰- مقایسه افت فشار نمونه‌های ۳ لایه تولید شده به روش خشک‌کن انجمادی در غلظت‌های ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۵ درصد^۱.

Figure 10. Comparison of pressure drop of 3-layer media produced by freeze drying method at concentrations of 0.05, 0.1, 0.2, and 0.5%.

۱- بازه‌های درج‌شده روی هر ستون در این مطالعه فاصله اطمینان ۹۵٪ است که با کمک جدول توزیع t-student محاسبه گردید. چنانچه بازه‌ها با هم همپوشانی داشته باشند، دو میانگین تفاوت معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۵٪ ندارند و اگر بازه‌ها همپوشانی نداشته باشند، در سطح اطمینان ۹۵٪ تفاوت معنی‌دار دارند

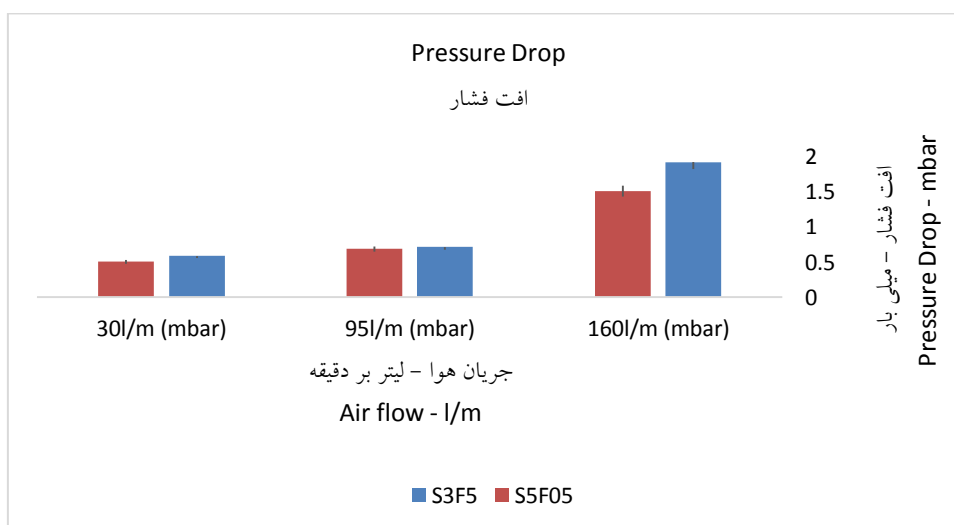


شکل ۱۱- مقایسه افت فشار نمونه‌های ۵ لایه تولید شده به روش خشک‌کن انجمادی در غلظت‌های ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۵ درصد.

Figure 11. Comparison of pressure drop of 5-layer media produced by freeze drying method at concentrations of 0.05, 0.1, 0.2, and 0.5%.

می‌باشد، بدین صورت که با افزایش درصد نانوالیاف، ساختار شبکه‌ای در لایه بیشتر، ایجاد مسیرهای زیگزاگ بیشتر، قطر حفرات تشکیل شده کم‌تر و در نتیجه عبور هوا سخت‌تر می‌شود (۲۲، ۲۳). هم‌چنین این مقایسه نشان می‌دهد که تعداد لایه‌ها در افت فشار اثر چندانی نداشته بلکه نوع لایه (غلظت نانوفیبر سلولزی) عامل تعیین‌کننده‌تری می‌باشد.

شکل ۱۲ مقایسه افت فشار نمونه ۳ لایه با بالاترین غلظت و نمونه ۵ لایه تولید شده به روش خشک‌کن انجمادی با پایین‌ترین غلظت را نشان می‌دهد. مطابق شکل، افت فشار نمونه ۵ لایه با غلظت ۰/۰۵ درصد از مقدار کم‌تری نسبت به نمونه ۳ لایه با غلظت ۰/۵ درصد برخوردار می‌باشد. علت این امر حضور نانوالیاف سلولزی بیشتر در نمونه ۳ لایه

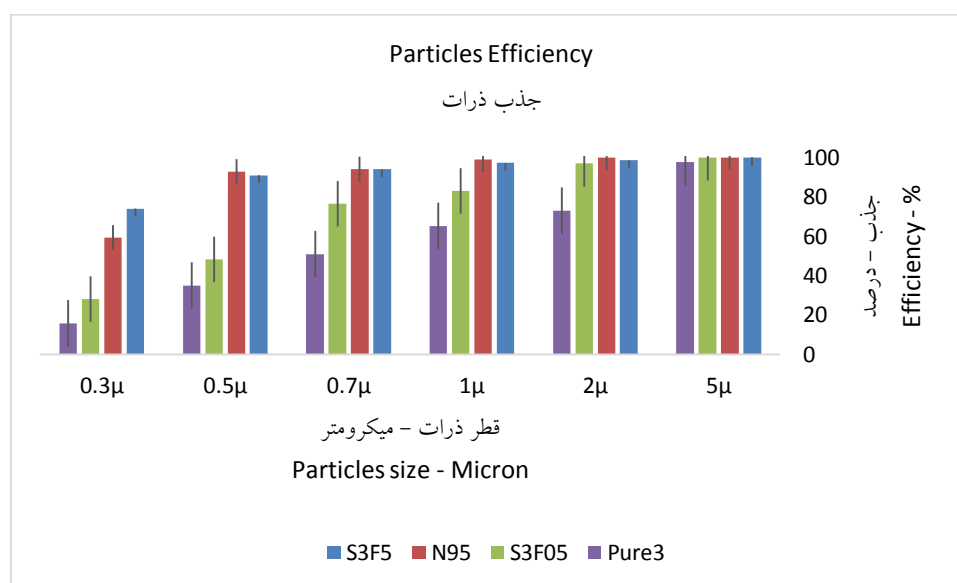


شکل ۱۲- مقایسه افت فشار نمونه‌های ۳ لایه با غلظت ۰/۵ درصد و ۵ لایه با غلظت ۰/۰۵ درصد تولید شده به روش خشک‌کن انجمادی.

Figure 12. Comparison of pressure drop of 3-layer media with a concentration of 0.5% and 5-layer with a concentration of 0.05% produced by freeze-drying method.

به‌طور کلی براساس سابقه تحقیق دو مکانیسم مهم در جذب فیزیکی تأثیرگذارند، مکانیسم ^۱ Interception در جذب ذرات میکرومتری و مکانیسم ^۲ Diffusion در جذب ذرات نانومتری (۲۴). بر این اساس ضریب جذب ذرات ۰/۳ میکرون توسط نانوالیاف سلولزی به‌واسطه ایجاد ساختار شبکه‌ای با منافذ ریزتر تحت تأثیر مکانیسم Diffusion نسبت به سایر نمونه‌ها افزایش می‌یابد.

شکل ۱۳ مقایسه درصد جذب بین نمونه شاهد ۳ لایه، ماسک N95، نمونه ۳ لایه ۰/۰۵ درصد و نمونه ۳ لایه ۰/۵ درصد را نشان می‌دهد. افزایش راندمان جذب نمونه‌های ۰/۰۵ و ۰/۵ درصد نسبت به یکدیگر و نمونه شاهد، کاملاً مشهود می‌باشد. این در حالی است که درصد جذب ذرات بالای ۰/۵ میکرون در ماسک N95 بیش‌تر از سایر نمونه‌ها است؛ اما در جذب ذرات ۰/۳ میکرون بیش‌ترین راندمان جذب مربوط به نمونه ۳ لایه با غلظت ۰/۵ درصد می‌باشد.



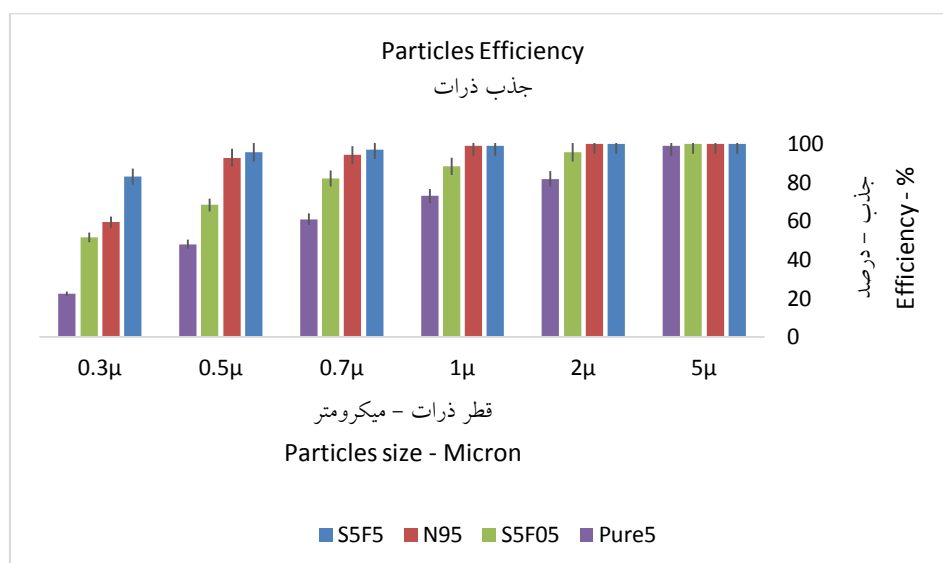
شکل ۱۳- مقایسه آزمون جذب ریز گرد نمونه‌های شاهد ۳ لایه، N95، نمونه ۳ لایه ۰/۰۵ درصد و نمونه ۳ لایه ۰/۵ درصد تولید شده به روش خشک‌کن انجمادی.

Figure 13. Comparison of fine adsorption test of 3-layer control samples, N95, 3-layer media 0.05% and 3-layer media 0.5% produced by freeze-drying.

دارد. با این تفاوت که جذب تمامی ذرات در نمونه ۵ لایه ۰/۵ درصد بالاتر از ماسک N95 و سایر نمونه‌های تولید شده در این پژوهش بوده است.

شکل ۱۴ مقایسه نمونه ۵ لایه ۰/۰۵ درصد، نمونه ۵ لایه ۰/۵ درصد تولید شده به روش خشک‌کن انجمادی، ماسک N95 و نمونه شاهد ۵ لایه را نشان می‌دهد. این مقایسه نیز نتایجی مشابه نمونه‌های ۳ لایه

- ۱- مکانیسم Interception: این ویژگی تحت تأثیر نیروی اینرسی ذرات در دامنه ابعادی میکرومتری قرار می‌گیرد
- ۲- مکانیسم Diffusion: این ویژگی به‌عنوان مکانیسم اصلی در جذب ذرات نانومتری و تحت تأثیر حرکت براونی ذرات قرار می‌گیرد

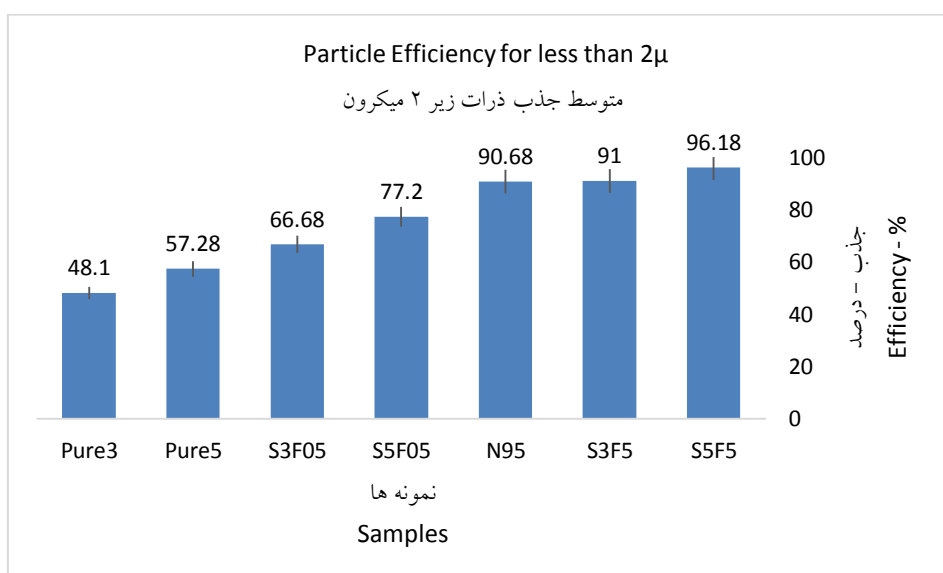


شکل ۱۴- مقایسه آزمون جذب ریز گرد نمونه‌های شاهد ۵ لایه، N95، نمونه ۵ لایه ۰/۰۵ و نمونه ۵ لایه ۰/۵ درصد تولید شده به روش خشک‌کن انجمادی.

Figure 14. Comparison of fine adsorption test of 5-layer control samples, N95, 5-layer media 0.05% and 5-layer media 0.5% produced by freeze-drying.

شاهد و غلظت‌های پایین قابل‌رؤیت می‌باشد اما این تفاوت با ماسک N95 معنی‌دار نبوده بنابراین می‌توان گفت جذب متوسط ذرات زیر ۲ میکرون نمونه‌های با غلظت ۰/۵ درصد با ماسک N95 تولید شده بر اساس دستورالعمل سازمان غذا و دارو یکسان می‌باشد.

شکل ۱۵ مقایسه میزان متوسط جذب ذرات زیر ۲ میکرون بین نمونه‌های تولید شده در این پژوهش و ماسک N95 را نشان می‌دهد. همانند تصویر افزایش میزان جذب متوسط ذرات زیر ۲ میکرون در نمونه‌های با بالاترین غلظت (۰/۵ درصد) نسبت به ماسک N95،



شکل ۱۵- مقایسه میزان جذب متوسط ذرات زیر ۲ میکرون نمونه‌های ۳ و ۵ لایه غلظت‌های ۰/۰۵ و ۰/۵ درصد تولید شده به روش خشک‌کن انجمادی، ماسک N95 تجاری و نمونه‌های شاهد ۳ و ۵ لایه.

Figure 15. Comparison of the average adsorption of particles less than 2 microns of 3 and 5-layer media at concentrations of 0.05 and 0.5% produced by freeze-drying, N95 mask, 3 and 5-layer control samples.

اشاره داشت. افزایش راندمان جذب با حضور نانوالیاف سلولزی قابل انتظار بود چرا که در ماسک‌ها و فیلترهای تولید شده با الیاف میکرومتری منافذ هم در مقیاس میکرومتری تشکیل می‌شوند. حتی در ماسک استاندارد سازمان غذا و دارو که لایه‌های مؤثر در جذب آن ملت بلون و SSMMS هستند دارای الیاف حدود ۲ تا ۳ میکرومتری هستند منتهی در جاذب‌های تولید شده در این مطالعه از نانوالیاف سلولزی با قطر متوسط حدود ۳۵ نانومتر استفاده گردید. بنابراین بالقوه این نانوالیاف می‌توانند منافذ ریزتری از سایر ماسک‌ها ایجاد کنند و از آنجایی که مکانیسم جذب ذرات هوا در ماسک‌های تنفسی فیزیکی است بنابراین بزرگی و کوچکی منافذ نقش کلیدی در کارایی ماسک جهت جذب ریزگرد ایفا می‌کنند.

افزایش افت فشار نمونه‌های تولید شده توسط نانوفیبر سلولز نسبت به ماسک N95 و نمونه شاهد نشان‌دهنده کوچک شدن منافذ در لایه‌های جاذب و احتمالاً بسته شدن برخی منافذ بوده و پیرو آن می‌تواند در جذب نیز تأثیرگذار باشد. این آنالیز نشان داد که با افزایش غلظت نانوفیبر سلولز در جاذب‌های تولید شده، افت فشار نیز افزایش می‌یابد. از نظر کارایی جذب متوسط ذرات زیر ۲ میکرون همه نمونه‌های تولید شده با ۰/۵ درصد نانو فیبر سلولز (۳ و ۵ لایه) نتایج نسبتاً بهتری نسبت به ماسک N95 نشان دادند.

جمع‌بندی آخر این‌که نانوفیبر سلولز بالقوه می‌تواند ماده مناسبی جهت افزایش کارایی ماسک‌های تنفسی در جذب ریزگردهای هوا باشد. نتایج به دست آمده از این پژوهش در فاز آزمایشگاهی و بعد از ۱/۵ سال آزمون و خطا به دست آمد. بدیهی است با بهینه‌تر کردن روش‌های تولید در مطالعات بعدی امید می‌رود بیش‌تر بتوان از ظرفیت‌های بالقوه نانوفیبر سلولز در کاربردهای ماسک‌های تنفسی استفاده نمود.

از بررسی و مقایسه نتایج آزمون جذب ریزگرد نتایج زیر قابل استنباط هستند:

- با کاهش قطر ذرات معلق در هوا، توانایی جذب آن‌ها توسط جاذب‌ها کاهش می‌یابد (۲۵).
- به‌طورکلی افزایش غلظت نانوفیبر سلولز با افزایش جذب ریزگرد رابطه‌ای مستقیم دارد. بدین معنا که هرچه غلظت نانوفیبر سلولز در لایه جاذب تنفسی افزایش یابد، درصد جذب ذرات نیز افزایش می‌یابد. این نتیجه به دلیل توانایی نانوفیبر سلولز در تشکیل شبکه ریزمنافذ و ایجاد مسیرهای زیگزاگی است (۲۲، ۲۳، ۲۶).
- به‌طورکلی فرآیند خشک‌کنی در روش خشک‌کن انجمادی می‌تواند تأثیر بسزایی در ایجاد ساختار شبکه‌ای نانوالیاف بگذارد، به دلیل این‌که آب موجود در نانوفیبر سلولز ابتدا یخ‌زده و سپس در اثر خلأ، مستقیماً به بخار آب تبدیل شده و از بین نانوفیبرهای سلولزی خارج می‌گردد. بنابراین کشش سطحی آب تا حد بسیار بالایی حذف و شبکه منافذ آئروژلی ایجاد می‌گردد (۲۲، ۲۳). هم‌چنین حضور لایه‌های بستر سلولزی و ایجاد پیوندهای عرضی با آن، می‌تواند از اثر کشش سطحی آب و دلمگی نانوالیاف بکاهد.
- توانایی جذب ذرات ۰/۳ میکرومتری در همه نمونه‌ها با اختلاف معنی‌داری نسبت به جذب سایر ذرات قرار دارد که این نتایج با گزارش‌های دیگر نیز همخوانی دارد (۲۲، ۲۳، ۲۶، ۲۷).

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر لایه‌های جاذب تنفسی با استفاده از نانوفیبر سلولز با هدف جذب ریزگردهای هوا و با استفاده از روش خشک‌کن انجمادی تولید گردید. اولین مزیت استفاده از نانوفیبر سلولز در ماسک‌ها و فیلترهای تنفسی، می‌توان به زیست‌سازگار بودن و زیست‌تجدیدپذیر بودن آن از نظر سلامتی برای انسان نسبت به ماسک‌های با الیاف مصنوعی

منابع

1. Ghorbanian, J., & Kordvari, P. (2014). Analysis of fine dust in Ahvaz city by X-ray method and the relationship between the intensification of these storms and the destruction of Hur al-Azim wetland. *Wetlands Ecology Quarterly - Islamic Azad University, Ahvaz Branch*. 20, 101-93. [In Persian]
2. Bernstein, J. A., Alexis, N., Barnes, C., Bernstein, I. L., Nel, A., Peden, D., Diaz-Sanchez, D., Tarlo, S. M., & Williams, P.B. (2004). Health effects of air pollution. *J. allergy and clinical immunology*. 114 (5), 1116-1123.
3. Effati, M., Bahrami, H., & Darvishi Blourani, A. (2011). Investigation of physical and chemical properties of surface soil particles in dust centers, February 17-18, the first International Congress on Dust Phenomena and its harmful effects, Khuzestan, Iran. 212p. [In Persian]
4. Tavakoli, K., Monfared, N., Tasori, M., & Omrani, Kh. (2011). Investigation of the effects of fine dust on the quantitative and qualitative characteristics of kebab dates, February 17-18, the First International Congress on Dust Phenomena and Combating Its Harmful Effects, Khuzestan, Iran. 38p. [In Persian]
5. Krueger, B. J., Grassian, V. H., Cowin, J. P., & Laskin, A. (2004). Heterogeneous chemistry of individual mineral dust particles from different dust source regions: the importance of particle mineralogy. *J. Atmospheric Environment*, 38 (36), 6253-6261.
6. Razavian, M., & Kushki, F. (2011). Geographical origin and effects of dust phenomenon in Khuzestan province, February 17-18, the first international congress on dust phenomenon and dealing with its harmful effects, Khuzestan, Iran. 869p. [In Persian]
7. Zarasvandi, A., Farid, M., & Nazarpour, A. (2011). Combination of mineralogy and morphology of dust particles in Khuzestan province based on XRD analyses and SEM images. *Iranian J. of Crystallography and Mineralogy*. 19 (3), 518-511. [In Persian]
8. Marino, E., Caruso, M., Campagna, D., & Polosa, R. (2015). Impact of air quality on lung health: myth or reality? *J. Therapeutic Advances In Chronic Disease*. 6 (5), 286-298.
9. Motassadi, S., Khazaei Sultanabadi, P., Etemad, K., Rashidi, Y., Gheibipour, H., & Rouhani Rasaf, M. (2016). The relationship between air pollution and the number of cases with the problem of acute respiratory symptoms registered in the Emergency Medical Center of Tehran in 2012. *J. Community Health Research*. 2 (2), 44-38. [In Persian]
10. Sharifi, S., Karami, M., Ismail Nasab, N., & Farsan, H. (2016). Determining the Relationship between Air Pollution and Death due to Cardiovascular and Respiratory Diseases in Tehran: Using GLARMA Model. *Iranian J. of Epidemiology*. 12 (4), 43-36. [In Persian]
11. Berger, S. A., Kramer, M., Nagar, H., Finkelstein, A., Frimmerman, A., & Miller, H. I. (1993). Effect of surgical mask position on bacterial contamination of the operative field. *J. Hospital Infection*. 23 (1), 51-54.
12. Wang, L., Gao, Y., Xiong, J., Shao, W., Cui, C., Sun, N., Zhang, Y., Chang, S., Han, P., Liu, F., & He, J. (2022). Biodegradable and high-performance multiscale structured nanofiber membrane as mask filter media via poly (lactic acid) electrospinning. *J. Colloid and Interface Science*. 606, 961-970.
13. Henning, L. M., Abdullayev, A., Vakifahmetoglu, C., Simon, U., Bensalah, H., Gurlo, A., & Bekheet, M. F. (2021). Review on polymeric, inorganic, and composite materials for air filters: from processing to properties. *J. Advanced Energy and Sustainability Research*. 2 (5), P2100005.
14. Yousefi, H., Faezipour, M., Hedjazi, S., Mousavi, M. M., Azusa, Y., & Heidari, A. H. (2013). Comparative study of paper and nano paper properties prepared from bacterial cellulose nanofibers and fibers/ground cellulose nanofibers of canola straw. *J. Industrial Crops and Products*. 43, 732-737. [In Persian]

15. Shu, Y., Bai, Q., Fu, G., Xiong, Q., Li, C., Ding, H., Shen, Y., & Uyama, H. (2020). Hierarchical porous carbons from polysaccharides carboxymethyl cellulose, bacterial cellulose, and citric acid for supercapacitor. *J. Carbohydrate polymers*. 227, 115346.
16. Hassan, M. M., Tucker, N., & Le Guen, M. J. (2020). Thermal, mechanical, and viscoelastic properties of citric acid-crosslinked starch/cellulose composite foams. *J. Carbohydrate Polymers*. 230, 115675.
17. Gorgieva, S., Vogrinčič, R., & Kokol, V. (2019). The effect of membrane structure prepared from carboxymethyl cellulose and cellulose nanofibrils for cationic dye removal. *J. Polymers and the Environment*. 27 (2), 318-332.
18. Zhang, Z., Li, Y., Song, L., Ren, L., Xu, X., & Lu, S. (2019). Swelling resistance and water-induced shape memory performances of sisal cellulose nanofibers/polyethylene glycol/Citric acid Nanocellulose Papers. *J. Nanomaterials*. 9p.
19. Izze, S., Mashkour, M., & Rasouli, D. (2018). Comparative study on the properties of nanopapers prepared from cellulose and chitin nanofibers. *J. Wood and Forest Science and Technology*. 25 (3), 61-72. [In Persian]
20. Gao, X., Gou, J., Zhang, L., Duan, S., & Li, C. (2018). A silk fibroin-based green nano-filter for air filtration. *J. RSC advances*. 8 (15), 8181-8189.
21. Wang, W., Fang, Y., Ni, X., Wu, K., Wang, Y., Jiang, F., & Riffat, S. B. (2019). Fabrication and characterization of a novel konjac glucomannan-based air filtration aerogels strengthened by wheat straw and okara. *J. Carbohydrate polymers*. 224, 115129.
22. Lu, Z., Su, Z., Song, S., Zhao, Y., Ma, S., & Zhang, M. (2018). Toward high-performance fibrillated cellulose-based air filter via constructing spider-web-like structure with the aid of TBA during the freeze-drying process. *J. Cellulose*. 25 (1), 619-629.
23. Nemoto, J., Saito, T., & Isogai, A. (2015). Simple freeze-drying procedure for producing nanocellulose aerogel-containing, high-performance air filters. *J. ACS applied materials & interfaces*. 7 (35), 19809-19815.
24. Tcharkhtchi, A., Abbasnezhad, N., Seydani, M. Z., Zirak, N., Farzaneh, S., & Shirinbayan, M. (2020). An overview of filtration efficiency through the masks: Mechanisms of the aerosols penetration. *J. Bioactive materials*. 6 (1), 106-122.
25. Lee, S. A., Grinshpun, S. A., & Reponen, T. (2008). Respiratory performance offered by N95 respirators and surgical masks: human subject evaluation with NaCl aerosol representing bacterial and viral particle size range. *J. Annals of Occupational Hygiene*. 52 (3), 177-185.
26. Macfarlane, A. L., Kadla, J. F., & Kerekes, R. J. (2012). High-performance air filters produced from freeze-dried fibrillated wood pulp: fiber network compression due to the freezing process. *J. Industrial & Engineering Chemistry Research*. 51 (32), 10702-10711.
27. Skaria, S. D., & Smaldone, G. C. (2014). Respiratory source control using surgical masks with nanofiber media. *J. Annals of Occupational Hygiene*. 58 (6), 771-781.
28. Patel, R. B., Skaria, S. D., Mansour, M. M., & Smaldone, G. C. (2016). Respiratory source control using a surgical mask: an in vitro study. *J. Occupational and Environmental Hygiene*. 13 (7), 569-576.
29. Li, X., & Gong, Y. (2015). Design of polymeric nanofiber gauze mask to prevent inhaling PM_{2.5} particles from haze pollution. *J. Chemistry*. <https://doi.org/10.1155/2015/460392>.
30. Zhang, R., Liu, C., Hsu, P. C., Zhang, C., Liu, N., Zhang, J., Lee, H. R., Lu, Y., Qiu, Y., Chu, S., & Cui, Y. (2016). Nanofiber air filters with high-temperature stability for efficient PM_{2.5} removals from the pollution sources. *J. Nano Letters*. 16 (6), 3642-3649.
31. Kim, J. H., Roberge, R. J., Powell, J. B., Shaffer, R. E., Ylitalo, C. M., & Sebastian, J. M. (2015). Pressure drop of

- filtering facepiece respirators: How low should we go? *International J. of Occupational Medicine and Environmental Health*. 28 (1), 71.
32. Dharmalingam, K., & Anandalakshmi, R. (2019). Fabrication, characterization, and drug loading efficiency of citric acid crosslinked NaCMC-HPMC hydrogel films for wound healing drug delivery applications. *International J. Biological Macromolecules*. 134, 815-829.
33. Honarbakhsh, M., Jahangiri, M., Ghaem, H., Ghorbani, M., Omidvari, F., Khorasani, M. A., & Shabani, F. (2018). Qualitative fit testing of medium-size N95/FFP2 respirators on Iranian health care workers. *J. Health Scope*. 7, 4. [In Persian]
34. Kolahi, H., Jahangiri, M., Ghaem, H., Rostamabadi, A., Aghabeigi, M., Farhadi, P., & Kamalinia, M. (2018). Evaluation of respiratory protection program in petrochemical industries: Application of analytic hierarchy process. *J. Safety and Health at Work*, 9 (1), 95-100. [In Persian]
35. Priya, G., Narendrakumar, U., & Manjubala, I. (2019). Thermal behavior of carboxymethyl cellulose in the presence of polycarboxylic acid crosslinkers. *J. Thermal Analysis and Calorimetry*. Pp: 1-7.
36. Shu, Y., Bai, Q., Fu, G., Xiong, Q., Li, C., Ding, H., Shen, Y., & Uyama, H. (2020). Hierarchical porous carbons from polysaccharides carboxymethyl cellulose, bacterial cellulose, and citric acid for supercapacitor. *J. Carbohydrate Polymers*. 227, 115346.
37. Zou, Z., & Yao, M. (2015). Airflow resistance and bio-filtering performance of carbon nanotube filters and current facepiece respirators. *J. Aerosol Science*. 79, 61-71.
38. Lyu, J., Liu, L., Zhao, X., Shang, Y., Zhao, T., & Li, T. (2016). Facile fabrication of multifunctional aramid nanofiber films by spin coating. *J. of Materials Engineering and Performance*. 25, 4757-4763.
39. Wang, Z., Ma, H., Chu, B., & Hsiao, B.S., (2017). Fabrication of cellulose nanofiber-based ultrafiltration membranes by spray coating approach. *J. of Applied Polymer Science*. 134 (11).
40. Zhang, Q., Wang, H., Fan, X., Lv, F., Chen, S., & Quan, X. (2016). Fabrication of TiO₂ nanofiber membranes by a simple dip-coating technique for water treatment. *Surface and Coatings Technology*. 298, 45-52.
41. Ai, J., Heidari, K. S., Ghorbani, F., Ejazi, F., Biazar, E., Asefnejad, A., Pourshamsian, K., & Montazeri, M. (2011). Fabrication of coated-collagen electrospun PHBV nanofiber film by plasma method and its cellular study. *J. of Nanomaterials*. 2011, 1-8.
42. Anusiya, G., & Jaiganesh, R. (2022). A review of fabrication methods of nanofibers and a special focus on the application of cellulose nanofibers. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*. 4, 100262.
43. www.afprofiters.com