مجله علوم تغذیه و صنایع غذایی ایران
سال بیست و یکم، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۵، صفحات ۵۴-۴۳

طراحی نانوفیلتر هیبریدی جهت کاهش هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای در برنج دودی

امیر فلاح[۱]، مهدی فرهودی[۲]، بابک غیاثی طرزی[۳]، غلامحسن اسدی[۴]

۱- دانشجوی دکترای تخصصی علوم و صنایع غذایی، دانشکده علوم کشاورزی و صنایع غذایی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- نویسنده مسئول اول: استاد گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده علوم تغذیه صنایع غذایی، انستیتو تحقیقات تغذیه ای و صنایع غذایی کشور، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران. پست الکترونیکی: farhoodi@sbmu.ac.ir

۳- نویسنده مسئول دوم: دانشیار دانشکده علوم کشاورزی و صنایع غذایی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. پست الکترونیکی: babakghiassi@iau.ir

۴- گروه مهندسی صنایع غذایی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۷/۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۷

چکیده

سابقه و هدف: فرآینـــد دود دادن برنج از فرآیند های قدیمی و پر استفاده است که میتواند باعث تولید هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای (PAHs) سرطان زا شود. هدف این پژوهش ساخت و طراحی نانوفیلتر سلولز استات بر پایه‌ی بنتونیت به عنوان گزینه‌ای نوآورانه و مؤثر برای کاهش آلاینده‌ها در فرآورده‌های غذایی دودی است.

مواد و روش‌ها: در این مطالعه نانوفیلتر ویژه ساخته شده از سلولز استات توسعه داده شد که شامل یک ساختار متخلخل و جاذب است. در این نانوفیلتر از نانورس بنتونیت استفاده شد که ۰,۵ تا ۱,۵ درصد از وزن آن را تشکیل می‌دهد.

یافته‌ها: یافته‌های تجربی نشان داد که افزودن نانوذرات بنتونیت به نانوفیلتر استات سلولز، بهبود چشمگیری در خواصی مانند خواص مکانیکی، افزایش زاویه تماس آب و تخلخل ایجاد کرد. ساختار نانوفیلتر تولیدشده، توزیع یکنواخت و منظم نانوذرات را به‌خوبی نشان داد. نتایج آنالیز جذب PHAs نیز بیانگر آن بود که این نانوفیلتر هیبریدی توانست طی دوره ۲۱ روزه دودی کردن برنج، ترکیبات آروماتیک چندحلقه‌ای را به‌طور مؤثر کاهش دهد. علاوه بر این، بررسی‌ها در دوره‌های مختلف فیلتراسیون و شست‌وشوی مکرر نشان داد که این نانوفیلتر از لحاظ عملکرد، راندمان حذف و تخلخل، قابلیت استفاده مجدد مطلوبی دارد.

نتیجه‌گیری: به طور کلی این مطالعه نشان میدهد نانوفیلتر سنتزشده گزینه‌ای کارآمد و نوآورانه برای کاهش آلاینده‌ها در محصولات غذایی دودی هستند.

واژگان کلیدی: نانوفیلتر، استات سلولز، برنج دودی، هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای، بنتونیت

پیام‌های اصلی

- نانوفیلتر هیبریدی ساختاری یکنواخت و بدون ترک با توزیع منظم نانوذرات نشان داد.
- افزودن ۱٪ وزنی نانوذرات بنتونیت به نانوفیلتر استات سلولز، خواص مکانیکی و تخلخل فیلتر را بهبود داد.
- نانوفیلتر قادر به کاهش مؤثر ترکیبات آروماتیک چندحلقه‌ای (PAHs) در برنج دودی طی ۲۱ روز بود.
- بررسی فیلتراسیون و شست‌وشوی مکرر نشان‌دهنده قابلیت استفاده مجدد مطلوب نانوفیلتر بود.
- نانوفیلتر هیبریدی استات سلولز- بنتونیت گزینه‌ای نوآورانه و مؤثر برای کاهش آلاینده‌ها در فرآورده‌های غذایی دودی محسوب می‌شود.

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-28]

[DOI: 10.66224/nsft.21.2.43]

• مقدمه

تولید مواد غذایی سالم و ایمن یکی از اصول مهم صنعت مواد غذایی است. علی‌رغم تلاش در جهت تولید مواد غذایی سالم ممکن است مواد غذایی از طریق مواد خام یا در طول فرآیند آلوده شوند و مصرف‌کنندگان مواد غذایی را ناخواسته در معرض افزودنی‌ها و آلاینده‌ها قرار بدهد. فلزات سنگین، آفت‌کش‌ها و سایر آلاینده‌های وارد شده به آب و زنجیره مواد غذایی و در نتیجه شکل‌گیری ترکیبات ناخواسته در طول فرآیند مواد غذایی می‌تواند منجر به بروز انواع بیماری‌های مزمن به‌ویژه سرطان شود (۱).

هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای PAHs (Polycyclic aromatic hydrocarbons) یک گروه از ترکیبات آلی هستند که در اثر سوختن ناقص سوخت‌های فسیلی تشکیل می‌شوند. این‌ها می‌توانند خاک و آب‌های زیرزمینی را آلوده کنند و وارد زنجیره غذایی شوند (۲). علاوه بر این ترکیبات آروماتیک چند حلقه‌ای می‌توانند در فرآیندهای مختلف آماده‌سازی مواد غذایی مانند کباب کردن، دودی کردن، سرخ کردن و خشک‌کردن تشکیل شود. مکانیسم دقیق تشکیل PAHs در مواد غذایی کبابی و دودی مشخص نشده است اما ممکن است در اثر تجزیه چربی، پروتئین و کربوهیدرات‌ها در دماهای بالا و در محدوده ۵۰۰ تا ۹۰۰ درجه سلسیوس تشکیل این ترکیبات افزایش یابد. بزرگ‌ترین نگرانی در ارتباط با PAHs اثرات سرطان‌زایی و جهش‌زایی آن‌هاست (۳, ۴).

در بین فرآیندهای مواد غذایی، دود دادن مواد غذایی که به‌منظور بهبود ویژگی‌های طعم (مزه و بو)، رنگ و بافت مواد غذایی صورت می‌گیرد، به دلیل تماس مستقیم گازهای حاصل از سوختن، عامل مهم آلودگی به PAHs است (۵). عوامل مؤثر در آلودگی به PAHs عبارت‌اند از: زمان و درجه حرارت فرآیند (رابطه مستقیم با مقدار PAHs)، فاصله از منبع حرارتی (رابطه عکس با مقدار PAHs)، نوع فرآیند (کباب کردن، تفت دادن، دود دادن، خشک‌کردن)، نوع سوخت (زغال کمتر از چوب تولید PAHs می‌کند) و میزان چربی ماده غذایی (۶, ۷).

فرآیند دود دادن برای طیف وسیعی از محصولات غذایی از جمله محصولات گوشتی و دریایی، انواع پنیر و برنج به کار می‌رود. (۸). برنج دودی از محصولات قدیمی و پرمصرف است. در فرآیندهای سنتی دود دادن برنج از دود دادن مستقیم استفاده می‌شد که باعث افزایش قابل توجهی در مقدار PAHs می‌شود. در حال حاضر به‌جای دود دادن سنتی برنج، از دود دهی غیر مستقیم و هم‌چنین طعم‌دهنده‌های دود استفاده می‌گردد. از جدیدترین روش‌های کاهش PAHs در مواد غذایی، ساخت و استفاده از نانوساختارهای سه‌بعدی مانند آئروژل، هیدروژل، کامپوزیت‌ها و غشاهای نابافته است (۹-۱۳)

فیبر ماده‌ای است جامد که درعین انعطاف‌پذیری و ظرافت، طول بسیار بلندتری نسبت به قطرش (بیش از ۱۰۰۰) دارد. فیبرها میتوانند کوتاه و منقطع یا بلند و یکسره، طبیعی یا سنتزی و در ابعاد معمولی، میکرونی یا نانو باشند (۱۴). الیاف با قطر کمتر از یک میکرومتر را نانوفیبر می‌نامند. این الیاف با طول‌های نسبتاً کوتاه چند میکرونی و با قطر کمتر از ۵۰۰ نانومتر، از انواع ساختارهای تک‌بعدی هستند (۱۵-۱۷)

الکتروریسی (Electrospinning) یکی از روش‌های نوین ساخت سازه‌های نانو است که می‌تواند برای تولید فیبرها با ساختار نمدمانند (نابافته) (Non-woven mesh) و با اندازه کمتر از ۱۰۰ نانومتر از محلول پلیمرها و پلیمرهای زیستی مورد استفاده قرار بگیرد (۱۸). نانوفیبرهای ساخته‌شده با این روش دارای ویژگی‌های بی‌همتایی مانند ویژگی‌های مکانیکی برتر و قدرت کشش بالا به دلیل امکان جهت‌گیری بالای پلیمرها در حین تشکیل نانوفیبرها هستند. همچنین هنگام ریسیدن فیبرها از محلول‌های پلیمری، حلال به سرعت تبخیر شده و اجازه تولید فیبرهای ترکیبی از مخلوطی از پلیمرها را می‌دهد که در روش‌های دیگر معمولاً دچار تفکیک فاز می‌شوند. علاوه بر این ابعاد بسیار کوچک این فیبرها منجر به داشتن سطح ویژه بسیار بالا می‌شود و به دلیل این ویژگی می‌توان کاربردهای فرا ویژه‌ای را برای آن‌ها در نظر گرفت که در فیبرهای با اندازه بزرگ‌تر نمی‌توان یافت (۱۹-۲۱). در زمینه کاربردهای غذایی و دارویی این فیبرها باید از پلیمرهای خوراکی یا مواد GRAS ساخته شوند. این فیبرها می‌توانند حاوی اجزای فراسودمند از جمله داروها، طعم‌ها، رنگدانه‌ها و ... باشند. می‌توان از آن‌ها به‌عنوان مواد کمک فرایند از جمله واکنشگاه‌های کاتالیتیک غشاها، فیلترها و حس‌گرها استفاده نمود (۱۹, ۲۲-۲۴).

بدین منظور هدف از انجام تحقیق حاضر ساخت و بررسی کارایی نانوفیلتر ویژه‌گزین PAHs در کاهش آلاینده‌های آروماتیک حلقوی در برنج دودی است.

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-28]

[DOI: 10.66224/nsft.21.2.43]

• مواد و روش‌ها

برنج هاشمی از استان گیلان ایران تهیه شد. استات سلولز (حاوی ٪۳۹/۸ استیل با میانگین وزن مولکولی = ۳۰ کیلو دالتون) و نانورس (بنتونیت آبدوست (NCB)) از شرکت سیگما-آلدریچ خریداری و مستقیماً بدون خالص‌سازی بیشتر مورد استفاده قرار گرفت. سدیم پریدات، بافر فسفات، N، N-دیم-تیل فرمامید (N, N-Dimethylformamide) (DMF) و دی‌اکسان (Dioxane) و سایر مواد شیمیایی از شرکت مرک خریداری شدند.

ساخت نانوفیلتر متخلخل

تولید نانوفیلتر ویژه‌گزین متخلخل بر پایه نانوفیبرها با روش الکتروریسی بر طبق روش اصلاح شده Lee و همکاران (۲۰۱۸) و همچنین Kim و همکاران (۲۰۲۱) انجام شد. بدین منظور برای تهیه محلول الکتروریسی سلولز استات در مخلوط حلال های دی متیل فرم امید و دی اکسان با نسبت یک به یک حل شده و در نسبت های مختلف با کمک پلیمر پلی اتیلن اکساید مخلوط شد. سپس برای الکتروریسی هر یک از نمونه ها محلول های پلیمری با غلظت های متفاوت از سوزن سرنگ که به دستگاه ولتاژ بالا متصل بود خارج شده روی فویل آلومینیومی که با فاصله از نوک سوزن قرار گرفته بود، جمع آوری شد و به مدت ۲۴ ساعت زیر خلا و در دمای محیط خشک شدند. برای جداسازی پلی اتیلن اکساید که محلول در آب می‌باشد غشاها به مدت ۴ تا ۶ ساعت در آب مقطر ۴۰ درجه سلسیوس قرار داده شدند و سپس به خوبی با آب مقطر شسته شده و در آون به مدت ۴ ساعت در دمای ۵۵ درجه سلسیوس خشک شد (۹, ۲۵).

ساخت نانوفیلتر جاذب

ابتدا آمینه کردن نانوالیاف متخلخل، با استفاده از محلول سدیم پریدات ۰/۲ مول بر لیتر، بافر فسفات با pH ۷ و تری اتانول آمین ۰/۱ مول بر لیتر انجام شد. در مرحله بعد الیاف‌های آمینه شده با استفاده از محلول گلوتارآلدهید ۲/۵ درصد فعال شدند. سپس آنزیم لیگنینولیتیک بر روی نانوالیاف‌های تهیه شده به روش غوطه وری تثبیت شد (۲۶).

ویژگی‌های ریزساختار

به‌منظور مطالعه ریزساختار، از سطح نمونه‌ها توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) تصویر برداری شد. قبل از عکس‌برداری، نمونه‌ها در اندازه‌های ۱×۵ میلی‌متر بریده و سپس با لایه‌ای از طلا پوشانده شد (۲۷).

زاویه تماس با آب

زاویه تماس با آب توسط دستگاه گونیومتر (Kruss، آلمان) مجهز به یک نرم افزار آنالیز تصاویر مورد ارزیابی قرار گرفت. یک قطره آب ۴ میکرولیتری روی سطح نانو فیلتر قرار داده شد. زاویه تماس هر نمونه با استفاده از گونیومتر نوری پس از یک بازه ۶ ثانیه‌ای تعیین شد (۲۸).

خواص مکانیکی

ضخامت نانو فیلتر با استفاده از یک میکرومتر دیجیتال (Mitutoyo، ژاپن) با دقت ۰,۰۱ میلی‌متر از پنج قسمت تصادفی فیلتر اندازه گیری شد و مقادیر میانگین آنها گزارش شد. سپس، فیلترهای تولید شده با استفاده از یک برش‌دهنده دو تیغه‌ای به نوارهای مستطیلی (۱ × ۱۵ سانتی‌متر) برش داده شد. خواص مکانیکی، شامل استحکام کششی (TS) (Tensile strength) و ازدیاد طول در نقطه شکست (EB) (Elongation at break) فیلترها، براساس استاندارد مصوب انجمن آمریکا با استفاده از یک دستگاه آنالیز بافت (Testometric، انگلستان) با فاصله اولیه ۱۰ سانتی‌متر و سرعت کراس‌هد ۰/۵ میلی‌متر بر ثانیه ، تعیین شد (۲۹).

کارایی جذب PAHs

حلول‌های استاندارد مخلوطی از ۴ PAH در غلظت‌های اولیه ۰,۱ تا ۱۰ $mg \cdot L^{-1}$ در آب مقطر تهیه شد. در هر آزمایش، مقدار مشخصی از نانوفیلتر (۲۵ mg) در ۵۰ mL از محلول آلاینده قرار داده شد. سپس در دمای ۲۵ ± ۱ C° و با هم‌زدن مداوم (۱۵۰ rpm) تا رسیدن به تعادل قرار گرفت. غلظت باقی‌مانده‌ی PAHs در فاز آبی پس از جداسازی نانوفیلتر با سانتریفیوژ و استخراج فاز مایع به روش SPE، با استفاده از دستگاه GC–MS اندازه‌گیری گردید.

قابلیت استفاده مجدد

عملکرد قابلیت استفاده مجدد فیلتر از طریق انجام چندین چرخه متوالی فیلتراسیون و تمیز کردن مورد بررسی قرار گرفت. در هر چرخه، فیلتر برای حذف چهار ترکیب آروماتیک چندحلقه‌ای (PAH۴) به کار گرفته شد. پس از هر مرحله فیلتراسیون، فیلتر بلافاصله تحت فرآیند تمیزکاری با بخارات حلال اتانول قرار گرفت تا ترکیبات جذب‌شده از سطح آن جدا شوند و کارایی فیلتر برای استفاده مجدد حفظ گردد (۳۰).

شناسایی و تعیین مقدار PAHs

شناسایی و تعیین مقدار PAH ها طبق روش تعیین شده توسط السادات میربد و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از دستگاه GC/MS هیولت پاکارد مجهز به طیف‌سنجی جرمی (Perkin Elmer Auto System XL) انجام شد. این سیستم دارای یک ستون -CTO ۲۰ A (۵٪ فنیل متیل پلی سیلوکسان، ۳۰

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-28]

[DOI: 10.66224/nsft.21.2.43]

میکرون، ۰/۲۵ میلی‌متر قطر داخلی، ضخامت نمونه ۰/۱ میکرومتر) بود. تجزیه و تحلیل تحت شرایط عملیاتی انجام شد: دمای اولیه به مدت ۵ دقیقه در ۶۰ درجه سانتیگراد حفظ شد و سپس با شیب ۴ درجه سانتیگراد در دقیقه به ۲۲۰ درجه سانتیگراد افزایش یافت. دما بیشتر افزایش یافت و در دمای ۴ درجه سانتیگراد به ۲۸۰ درجه سانتیگراد رسید و به مدت ۱۵ دقیقه در این دما نگه داشته شد. دمای تزریق کننده و آشکارساز ۲۸۰ درجه سانتیگراد بود. شویش با استفاده از گاز هلیوم (He) با سرعت جریان ۱ میلی‌لیتر در دقیقه و نسبت تقسیم ۱:۵۰ انجام شد (۳۱).

آنالیزهای آماری

اختلاف بین تیمارهای مختلف، براساس طرح آماری فاکتوریل کاملاً تصادفی با استفاده از تحلیل واریانس (ANOVA) در سطح احتمال ۵ درصد تعیین شد. مقایسه میانگین داده‌ها براساس آزمون دانکن با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۱۹ و EXCEL نسخه ۲۰۱۳ انجام شد.

• یافته‌ها

بهینه‌سازی نانوفیلتر پایه و نانوفیلتر جاذب

هدف از این طراحی، تولید نانوالیاف یکنواخت، بدون گره (bead) و با توزیع قطر مناسب بود. یافته‌های اصلی آزمون ANOVA نشان داد که ارزش F مدل برابر با ۲۴۰۸۲,۲۶ بود که نشان می‌دهد مدل از نظر آماری معنی‌دار است. احتمال اینکه چنین مقدار بزرگی از F به طور تصادفی و صرفاً به دلیل نویز حاصل شده باشد تنها ۰,۰۱ درصد است. مقادیر P کمتر از ۰/۰۵ نشان‌دهنده معنی‌دار بودن عوامل در مدل هستند. در مواردی که عوامل زیادی بی‌اهمیت باشند (به‌جز عواملی که برای حفظ ساختار مدل ضروری هستند)، حذف آن‌ها می‌تواند مدل را بهبود ببخشد. ارزش F مربوط به Lack of Fit (عدم برازش) برابر با ۰/۹۲ است که بیانگر عدم معنی‌داری آن نسبت به خطای خالص است. به عبارتی، احتمال ۵۳/۴۵ درصد وجود دارد که چنین مقداری از Lack of Fit به دلیل نویز به دست آمده باشد. این یک نتیجه مطلوب است زیرا نشان می‌دهد مدل به خوبی با داده‌ها مطابقت دارد.

برای بررسی صحت مدل تخمینی، ده آزمایش تأییدی اضافی انجام شد. میزان دقت مدل با استفاده از درصد انحراف نسبی (RSD) بین مقادیر پیش‌بینی‌شده و مقادیر تجربی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که درصد خطا بین ۰/۱۲ تا ۲/۸۹ درصد بود که همگی کمتر از آستانه ۵ درصد بوده و نشان‌دهنده دقت قابل قبول مدل هستند. بر اساس تحلیل RSM، بهترین شرایط برای الکتروریسی نانوالیاف سلولز استات با ویژگی‌های یکنواخت و بدون نقص که در جدول ۱ آمده است. این شرایط منجر به تولید نانوالیاف یکنواخت و بدون گره شدند. بهینه‌سازی نانوفیلتر جاذب با توجه به در نظرگرفتن کمترین میزان قطر الیاف به عنوان نقاط هدف بهینه، انجام پذیرفت که نتایج به شرح جدول ۲ می‌باشد. نمودار مربوطه نیز در شکل ۱ قابل مشاهده است.

جدول۱. نتایج صحت سنجی نقاط بهینه پیش بینی شده الکتروریسی الیاف پایه

شماره آزمون	سرعت‌پمپ (میلی‌لیتر بر ساعت)	فاصله جمع کننده تا نوک‌سوزن (سانتیمتر)	ولتاژ (کیلوولت)	قطر میانگین نانوالیاف (نانومتر)
پیش بینی شده	۱/۰۶۹	۱۷/۰۹۹	۲۱/۵۲۶	۲۱۹/۴۷۵
آزمایش شده	۱/۱	۱۷	۲۱/۵	۲۲۲/۹

میزان خطای پیش بینی: ۱/۵۶ درصد

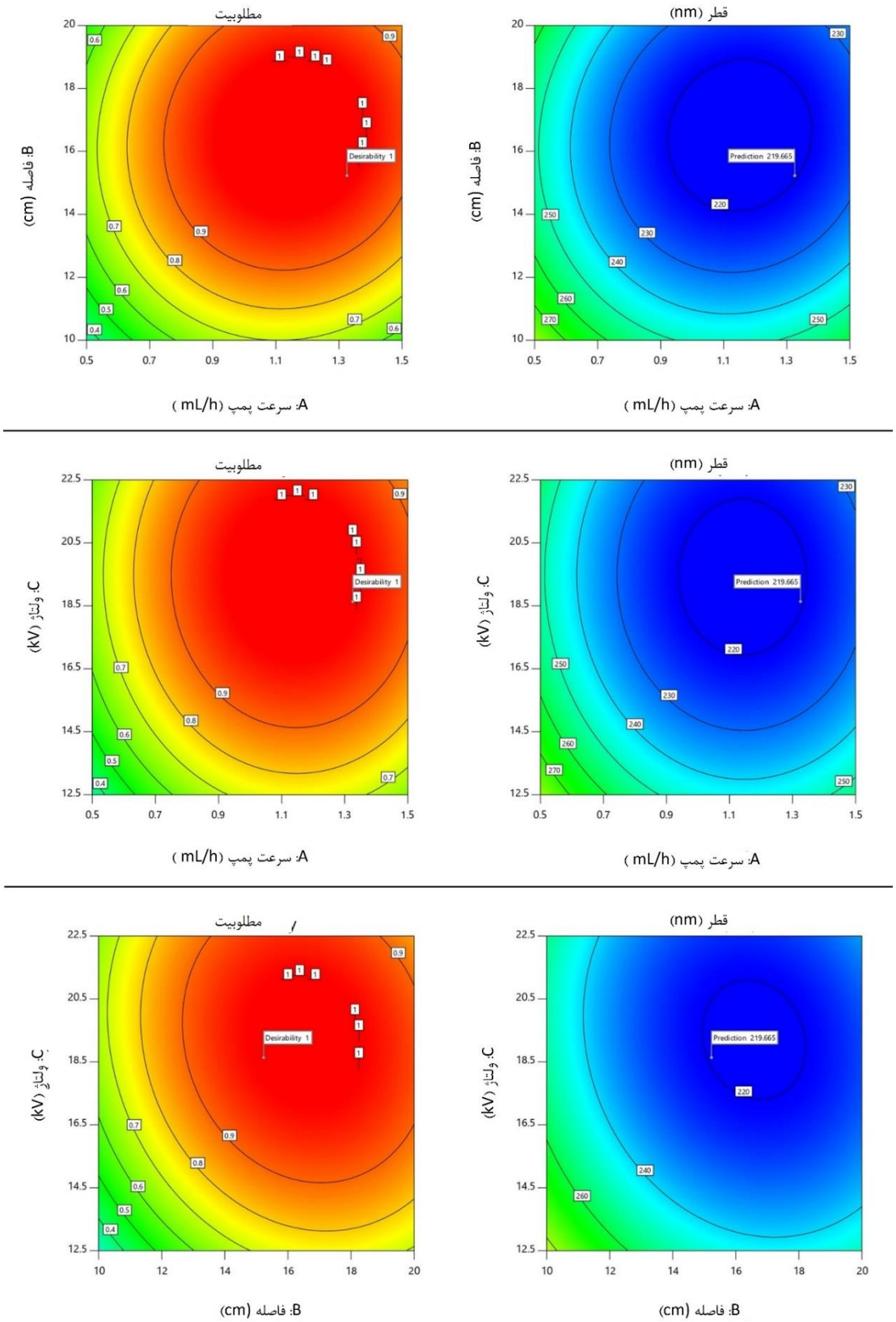
جدول۲. نتایج صحت سنجی نقاط بهینه پیش بینی شده الکتروریسی الیاف متخلخل

شماره آزمون	سرعت درام (دور بر دقیقه)	سایز سوزن (گیج)	غلظت کمک پلیمر (درصد وزنی)	قطر میانگین نانوالیاف (نانومتر)
پیش بینی شده	۱۳/۸۸۸	۱۹/۵۴۹	۲/۰۱۳	۲۸۶/۹
آزمایش شده	۱۴	۲۰	۲	۲۹۸/۱

میزان خطای پیش بینی: ۳/۹۰ درصد

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-28]

[DOI: 10.66224/nsft.21.2.43]



شکل ۱. نمودارهای کانتور بهینه‌شده قطر نانوفیلتر (نانومتر) و مطلوبیت: تعامل بین نرخ پمپ، ولتاژ اعمالی و فاصله

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-28]

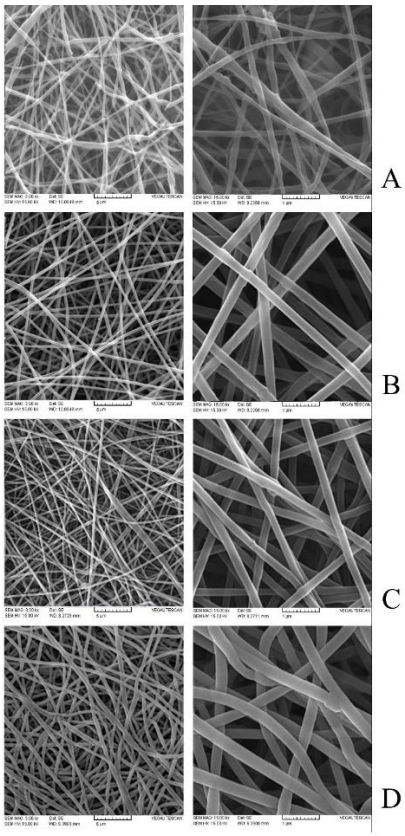
[DOI: 10.66224/nsft.21.2.43]

مورفولوژی

طبق نتایج عکس SEM در شکل ۲، ساختار الیاف‌های الکتروریسی سلولز استات بدون کمک پلیمر دارای بخش های دانه ای، کوتاه، شکننده و غیر یکنواخت با میانگین قطر ۲۶۳/۶ نانومتر می‌باشد. مشخص شد سلولز استات به دلیل ویسکوزیته بالایی که دارد به تنهایی قادر به ساخت الیاف یکنواخت نمی-باشد و در فرایند الکتروریسی قطره ایجاد می‌شود.

افزودن پلیمر کمکی پلی وینیل الکل به محلول قطر الیاف‌ها را افزایش می‌دهد و باعث ایجاد فیبرها صاف و یکنواخت با میانگین قطر ۲۹۸/۱ نانومتر می‌شود. شستشو با آب باعث کاهش قطر نسبت به نانوالیاف اصلی شد که به دلیل انتشار پلی وینیل الکل به درون آب و کوچک شدن الیاف می‌باشد.

تصاویر میکروسکوپ الکترونی نشان می‌دهد ثبیت آنزیم تاثیر زیادی بر ساختار الیاف نمی‌گذارد و تنها کمی چروک خوردگی و افزایش قطر نانو الیاف را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۲، میانگین قطر نانو الیاف‌ها ۳۰۲/۸ نانومتر و میانگین قطر نانوالیاف‌ها ۳۲۲/۳ می‌باشد. تیمارهای انجام گرفته بر روی نانوالیاف‌ها باعث افزایش قطر شده اند.



شکل ۲. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی A) نانوالیاف سلولز استات B) نانوالیاف سلولز استات و پلی وینیل الکل C) نانوالیاف سلولز استات پلی وینیل الکل زدایی شده D) نانوالیاف متخلخل پس از تثبیت آنزیم
(بزرگنمایی در تصاویر چپ ۳۰۰۰ و در تصاویر راست ۱۵۰۰۰ است)

زاویه تماس

با وجود ماهیت آبگریز سلولز استات، قطرات آب به تدریج به نانوفیلتر بسیار متخلخل متشکل از نافیبرهای سلولزی ها نفوذ کردند. با توجه به شکل ۳A زاویه تماس نانوفیلتر سلولز استات ۱/۷±۷۷/۹ درجه است که بالاترین مقدار ثبت شده می باشد. با افزودن بنتونیت آبدوست به محلول پلیمری، نانوفیلترهای هیبریدی کاهش زاویه تماس را نشان دادند که نشان دهنده بهبود آب دوستی سطح فیلتر است. پس از افزودن بنتونیت تا سطح ۱/۵ درصد، زاویه تماس ۱/۳±۵۲/۷ درجه تعیین شد.

تخلخل

ویژگی های فیزیکی نانوفیلترها، مانند نفوذپذیری بخار آب، ممکن است تحت تأثیر تخلخل آنها باشد. نمودار نشان داده شده در شکل ۳B تخلخل نانوفیلتر را نشان می دهد. تخلخل نانوفیلتر استات سلولز اصلی ۱/۶±۸۹/۵ درصد اندازه‌گیری شد. نانوفیلترهای هیبریدی مطابق با یافته‌های مستند شده در تحقیقات قبلی، تخلخل بیشتری را نشان دادند (32). لازم به ذکر است در غلظت بنتونیت ۱/۵ درصد به دلیل ایجاد ساختارهای مهره مانند، منجر به کاهش تخلخل ساختار نانو فیلترها می شود.

خواص مکانیکی

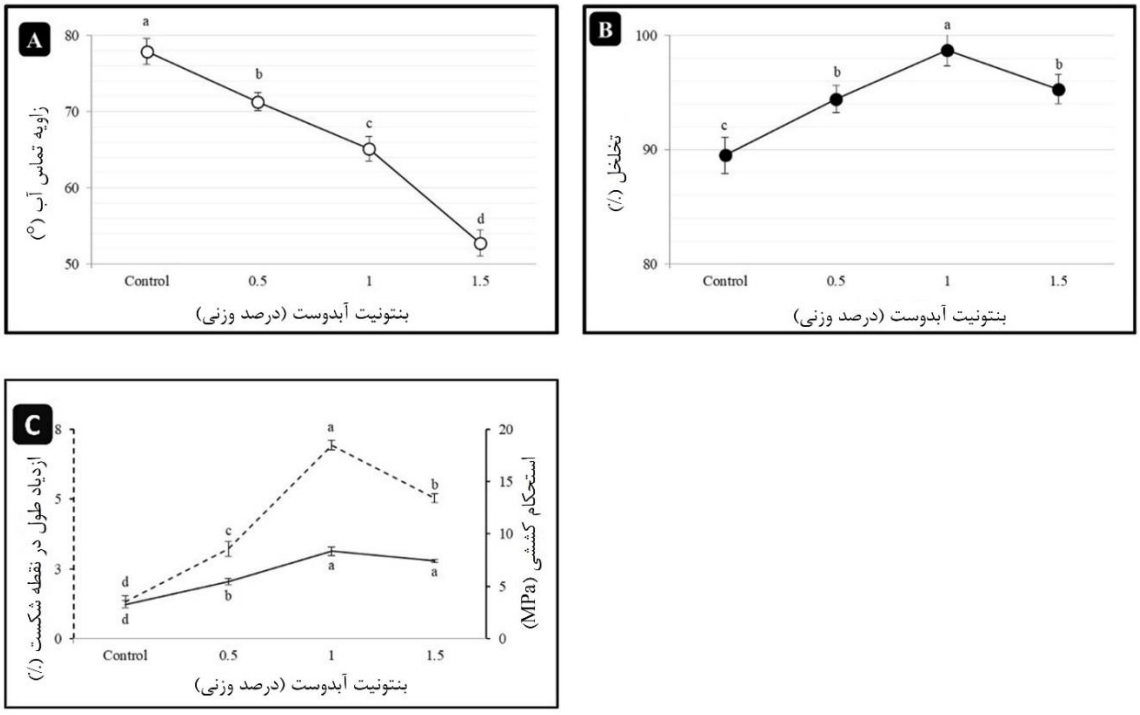
کاربرد عملی نانوفیلترها به طور قابل توجهی تحت تأثیر عملکرد مکانیکی آنها است. یافته‌های آزمایش کشش در شکل ۳C ثبت و نمایش داده شد. نتایج این مطالعه افزایش قابل‌توجهی در مقاومت مکانیکی نانوفیلترهای هیبریدی با ۰/۵ – ۱ درصد وزنی بنتونیت نشان می‌دهد. با این وجود، زمانی که محتوای بنتونیت به ۱/۵درصد وزنی رسید و ویسکوزیته پلیمر افزایش یافت، ذرات شروع به تجمع کردند. در نتیجه، منافذ مسدود شد و در نتیجه انعطاف‌پذیری مواد به دلیل کاهش تخلخل آن کاهش یافت. در نتیجه، نانوفیلتر شکننده‌تر شد، که منجر به کاهش توانایی آن در مقاومت در برابر کشش و توانایی آن در کشیدگی قبل از شکستن شد.

کارایی جذب PAHs

جدول۳ غلظت اجزای PAHs، به ویژه بنزو[α]آنتراسن (Benzo[a]anthracene, BαA)، کریزن (Chrysene, CHR)، بنزو[β]فلوئورانتن (Benzo[b]fluoranthene, BβF)، و و بنزو[α]پیرن (Benzo[a]pyrene, BαP) را در نمونه برنج هاشمی در یک دوره ۲۱ روزه دوددهی نشان می دهد. بررسی نمونه‌های برنج دودی نشان داد که غلظت BαP افزایش یافته است، که از حداکثر حد مجاز (۱ میکروگرم بر کیلوگرم)

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-28]
[DOI: 10.66224/nsft.21.2.43]

تعیین‌شده توسط کمیسیون اروپا فراتر رفته است. همانطور که انتظار می رفت، یک رابطه مستقیم بین مدت قرار گرفتن در معرض دود و سطوح اجزای PAHs در نمونه های برنج مشاهده شد. شاخص BαP در نمونه‌های برنج شاهد قبل از دوددهی در آستانه ۱ میکروگرم بر کیلوگرم بود. با این وجود، به دنبال عمل دوددهی، افزایش قابل توجهی در این شاخص مشاهده شد. مشابه نتایج این تحقیق، فاضلی و همکاران در تحقیقات خود نشان دادند که مدت زمان دودی کردن تأثیر معنی‌داری بر شاخص‌های بنزو[a]پیرن (BaP) و PAH۴ در هر دو رقم (هاشمی و دمسیاه) بین سه گروه آزمایش (برنج غیردودی، برنج دودی شده به مدت ۱۰ و ۱۴ روز) داشت. آنها همچنین مشاهده کردند که سطح شاخص BaP در نمونه‌های برنج غیردودی کمتر از حد مجاز (۱ میکروگرم در کیلوگرم) بود، اما پس از دودی کردن افزایش یافت و از حد مجاز فراتر رفت. علاوه بر این، شاخص PAH۴ در هر دو نمونه برنج غیردودی و دودی بسیار بالا بود و روند دودی کردن بیشتر افزایش یافت (۳۳).



شکل ۳. خصوصیات سطحی (A: زاویه تماس و B: تخلخل) و C خصوصیات مکانیکی نانوفیلترهای سلولز استات هیبریدی حاوی بنتونیت

جدول۳. تأثیر نانوفیلترهای سلولز استات و هیبریدی حاوی بنتونیت بر ترکیبات PAHs در نمونه‌های برنج در زمان‌های مختلف دودی کردن

نوع فیلتر	زمان دوددهی (روز)	BαA	CHR	BβF	BαP
بدون فیلتر	۰	۲/۰±۱۲/۲۹^{i}	۱/۰±۷۱/۱^{g}	۳/۰±۴۷/۲۴^{h}	۱/۰±۹۷/۲۴^{h}
	۷	۸/۰±۸۵/۳۰^{d}	۵/۰±۲۵/۲۲^{d}	۸/۰±۸۹/۳۴^{d}	۴/۰±۷۶/۲۳^{e}
	۱۴	۱۲/۰±۳۸/۲۵^{b}	۶/۰±۵۹/۲۷^{b}	۱۰/۰±۹۰/۳۲^{b}	۵/۰±۸۰/۲۴^{b}
	۲۱	۱۴/۰±۸۱/۳۲^{a}	۷/۰±۹۹/۱۷^{a}	۱۲/۰±۱۳/۳۴^{a}	۶/۰±۴۴/۱۴^{a}
فیلتر استات سلولز	۰	۱/۰±۱۵/۲۴^{j}	۰/۰±۹۸/۱۰^{h}	۲/۰±۰۷/۱۴^{j}	۱/۰±۰۱/۱۱^{i}
	۷	۴/۰±۴۶/۲۱^{g}	۲/۰±۸۵/۲۳^{f}	۵/۰±۷۱/۱۷^{f}	۲/۰±۷۹/۱۳^{f}
	۱۴	۸/۰±۴۲/۱۶^{e}	۴/۰±۰۸/۱۳^{e}	۷/۰±۳۳/۱۴^{e}	۳/۰±۷۴/۱۵^{e}
	۲۱	۱۱/۰±۳۴/۲۶^{c}	۵/۰±۹۹/۱۹^{c}	۹/۰±۲۹/۱۲^{c}	۴/۰±۳۶/۱۷^{d}
فیلتر استات سلولز حاوی بنتونیت	۰	۰/۰±۲۸/۱۲^{k}	۰/۰±۲۴/۹^{i}	۰/۰±۵۸/۱۱^{k}	۰/۰±۲۷/۱۰^{j}
	۷	۱/۰±۱۴/۱۱^{j}	۰/۰±۹۵/۱۳^{h}	۱/۰±۷۶/۱۲^{j}	۱/۰±۰۱/۱۴^{i}
	۱۴	۲/۰±۷۲/۱۱^{h}	۱/۰±۱۴/۱۴^{h}	۲/۰±۶۷/۱۲^{i}	۱/۰±۲۳/۱۱^{i}
	۲۱	۵/۰±۰۴/۰۸^{f}	۲/۰±۸۴/۱۲^{f}	۴/۰±۸۱/۱۴^{g}	۲/۰±۳۶/۰۹^{g}

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-28]

[DOI: 10.66224/nsft.21.2.43]

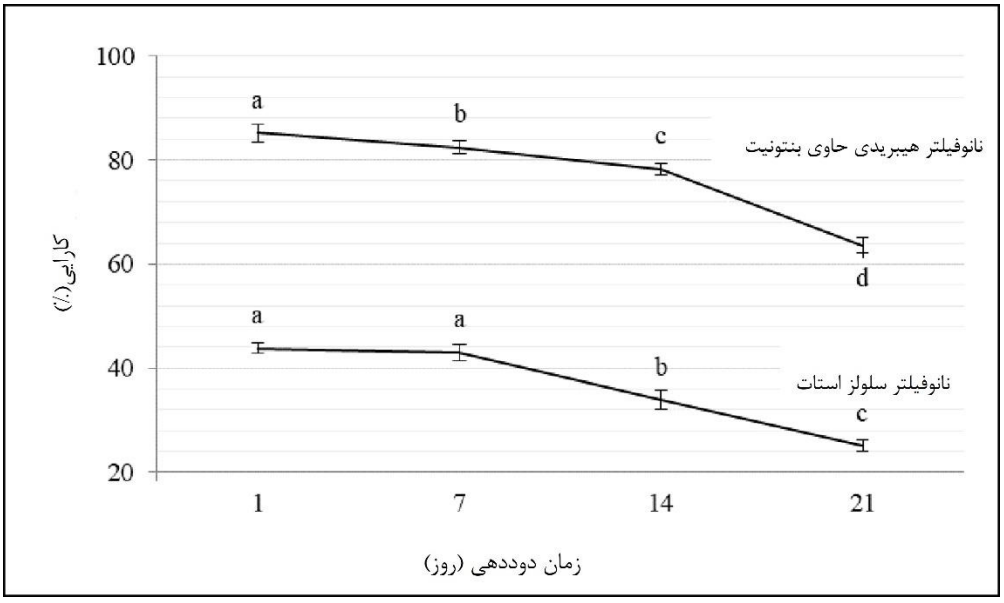
راندمان فیلتراسیون

عملکرد فیلترها معمولاً با راندمان فیلتراسیون آنها تعیین می شود که همه آنها به شدت به ساختار فیلتر مربوط می شود. فیلترهایی با ساختار نانوالیافی به دلیل عملکرد بهتر در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته‌اند (34). شکل۴ عملکرد نانوفیلترهای سلولز استات شاهد و هیبریدی حاوی بنتونیت را در حذف PAH۴ در نمونه برنج در زمان‌های مختلف دوددهی نشان می‌دهد. نانوفیلترهای هیبریدی به دلیل افزایش تخلخل، کارایی فیلتر را بهبود بخشیده اند که تا پایان روز بیست و یکم حداقل ۶۰ درصد کارایی را نشان داده است.

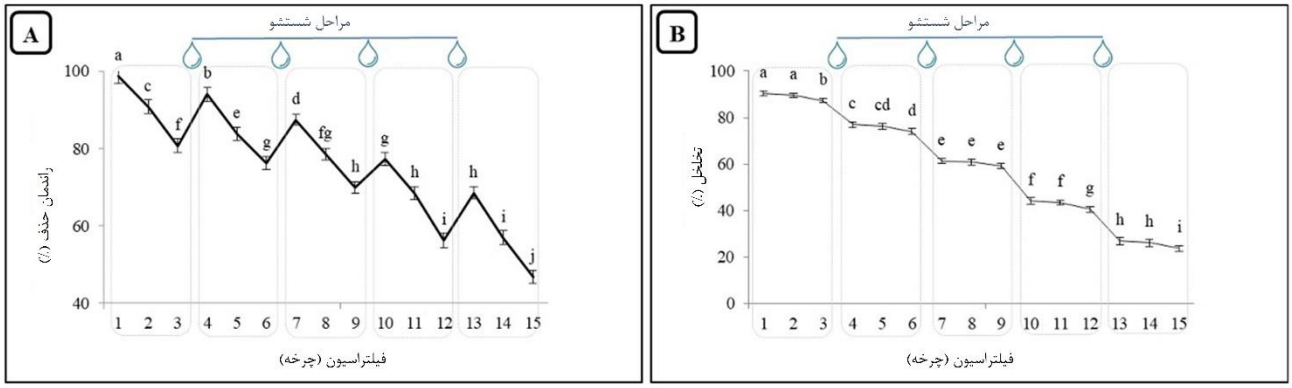
قابلیت استفاده مجدد

عملکرد قابلیت استفاده مجدد فیلتر سلولز استات هیبریدی حاوی بنتونیت از طریق چرخه های متعدد فیلتر و تمیز کردن ارزیابی شد. در هر مرحله از فیلتر کردن PAHs، یک مرحله تمیز کردن بعدی با استفاده از بخارات حلال اتانول انجام شد (شکل 5B). با پیشرفت مراحل فیلتراسیون، پس از حدود ۱۰ سیکل درجه تخلخل و به دنبال آن راندمان حذف تقریبا به نصف تقلیل می یابد.

نتایج نشان داد نانو فیلترهای هیبریدی CA-NCB پس از ۵ بار فیلتراسیون، با کاهش تخلخل و زبری شدید سطح مواجه شدند. پس از ۱۵ بار فیلتراسیون، نانوفیبرهای CA از هم پاشیده شدند و NCB از ساختار فیلتر حذف شد.



شکل ۴. ملکرد نانوفیلترهای نانوفیلترهای سلولز استات شاهد و هیبریدی حاوی بنتونیت در حذف PAH۴ در نمونه برنج در زمان‌های مختلف دوددهی



شکل ۵. (A) راندمان حذف و (B) تخلخل فیلتر سلولز استات هیبریدی حاوی بنتونیت در طول چرخه های مکرر فیلتراسیون و تمیز کردن برای قابلیت استفاده مجدد

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-28]

[DOI: 10.66224/nsft.21.2.43]

• بحث

هدف در این پژوهش تولید الیاف بدون دانه و با ساختاری یکنواخت و بیشترین میزان سطح به حجم بود تا بستری مناسب برای تثبیت آنزیم باشد زیرا هرچه نسبت سطح به حجم بالاتر باشد میزان آنزیم بیشتری در سطح الیاف تثبیت می‌شود (۳۵). با توجه به اینکه ویژگی‌های فیزیکی نانوفیلتر سلولز استات (CA)تحت تأثیر عوامل مربوط به محلول و فرآیند الکتروریسی قرار دارد، طراحی آزمایش به روش سطح پاسخ (RSM) بر اساس سه عامل انجام شد: سرعت پمپ، فاصله جمع کننده تا نوک سوزن و ولتاژ اعمالی. سرعت پمپ (دبی محلول) در فرآیند الکتروریسی یکی از عوامل مهم در تعیین شکل‌گیری و قطر نانوالیاف است. نتایج نشان می‌دهد که در سرعت‌های پایین تغذیه، محلول پلیمری به صورت پیوسته و یکنواخت از سوزن خارج نمی‌شود، که مانع از شکل‌گیری پایدار جت محلول و مخروط تیلور می‌شود. افزایش فاصله سوزن تا جمع‌کننده زمان پرواز محلول را افزایش می‌دهد که در نتیجه باعث کشش بهتر محلول و کاهش قطر میانگین الیاف می‌شود.

اعمال ولتاژ بالا نقش مهمی در ایجاد بار الکتریکی لازم در محلول دارد و میدان الکتریکی خارجی را شکل می‌دهد. با شروع فرایند خروج محلول، قطره‌ای که در نوک سوزن قرار دارد به شکل مخروط تیلور در می‌آید. ولتاژ بالاتر موجب ایجاد میدان الکتریکی قوی‌تری شده و کشش بیشتری در محلول ایجاد می‌کند. این امر سبب کاهش قطر الیاف و افزایش سرعت تبخیر حلال می‌شود، به‌ویژه زمانی که پلیمر در ولتاژهای پایین‌تری پردازش می‌شود.

افزایش قطر الیاف ها و ایجاد فیبرها صاف و یکنواخت با افزودن پلیمر کمکی پلی وینیل الکل میتواند به دلیل ویسکوزیته پایین پلی وینیل الکل باشد. ویسکوزیته بالا سلولز استات در فرایند الکتروریسی منجر به تولید فیبرهای کوتاه و شکننده می‌شود (۳۶).

پلی وینیل الکل به عنوان کمک پلیمر در فرایند الکتروریسی استفاده شده و محلول در آب می‌باشد. سلولز استات بخش اصلی الیاف‌های تشکیل شده و نامحلول در آب می‌باشد. بنابراین پلی وینیل الکل موجود در فیبرها به علت هیدروفیل بودن به راحتی در دمای ۴۰ درجه سلسیوس در آب حل می‌شوند و از نانوالیاف-ها حذف می‌شوند.

نانوفیلتر هیبریدی شامل نانوساختارهایی با سطح براق است. علاوه بر این، نانوفیلتر هیبریدی مورفولوژی سطحی یکسانی را با نانوفیلتر سلولز استات الکتروریسی شده منظم نشان داد. افزودن بنتونیت هیچ اثر قابل توجهی بر ظاهر فیزیکی الیاف نداشت. فقط نانوالیاف افزایش جزئی در قطر و کاهش صافی طبیعی خود داشتند. پدیده های مشاهده شده را می توان به گنجاندن بنتونیت در چارچوب نانوفیلتر، همراه با نوسانات ولتاژ در طول فرآیند ساخت نسبت داد. نمونه داده شده چندین مهره تولید شده در اثر فرآیند تولید را نشان می دهد (37).

کاهش زاویه تماس نانوفیلترهای هیبریدی با افزودن بنتونیت آبدوست به محلول پلیمری نشان دهنده بهبود آب دوستی سطح فیلتر است. افزایش آب دوستی سطح غشاء با افزودن عناصر معدنی در پژوهش های پیشین ثبت شده است (38).

نتایج آزمون تخلخل نشان داد تعیین تخلخل نانوفیلتر تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی پلیمرهای سازنده و پارامترهای خاص الکتروریسی مورد استفاده قرار می‌گیرد. نانوفیلترهای هیبریدی مطابق با یافته‌های مستند شده در تحقیقات قبلی، تخلخل بیشتری را نشان دادند.

بنتونیت به عنوان یک عامل تقویت کننده در الیاف سلولز استات استفاده می شود. اعتقاد بر این است که بهبود مشاهده شده ناشی از برهمکنش های سودمند بین ماتریس پلیمری و نانوذرات و هم ترازی و جهت گیری عالی آنها در امتداد محور فیبر است. تحقیقات نشان داده است که ویژگی‌های مواد و ویژگی‌های ساختاری الیاف بر خواص مکانیکی غشاهای الیافی از جمله قطر، تخلخل، هم‌ترازی، پیوند و عوامل دیگر تأثیر می‌گذارد. وارد کردن بنتونیت به زنجیره های پلیمری منجر به کاهش توانایی آنها در حرکت و افزایش در هم قفل شدن آنها می شود. در نتیجه، استحکام کششی مواد را افزایش می دهد. با این وجود، کاهش در ازدیاد طول ماده وجود دارد (39).

با در نظر گرفتن مدت قرار گرفتن در معرض دود و سطوح اجزای PAHs در نمونه های برنج، نانوفیلترهای ساده و هیبریدی باعث کاهش جذب PAHs می شود. این نشان می دهد که نانوذرات به طور موثر کانال هایی را که ترکیبات دودزا از آن عبور می کنند، مسدود می کنند. افزودن بنتونیت منجر به افزایش قابل توجهی در جذب PAHs شد و کارایی آنها نشان داد. نانوفیلتر هیبریدی با ۱٪ گنجاندن NCB بالاترین مقادیر جذب را نشان داد.

طبق نتایج راندمان فیلتراسیون، نانوفیلترهای هیبریدی به دلیل افزایش تخلخل، کارایی فیلتر را بهبود بخشیده اند. توانایی بخارات حلال مشاهده شده برای تمیز کردن فیلتر، مزایای اقتصادی فیلتر سلولز استات هیبریدی را به عنوان یک فیلتر موثر PAHs برجسته می کند. عملکرد فیلتر را می توان چندین بار با تمیز کردن آن با بخارات حلال بازیابی کرد و امکان استفاده

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-28]

[DOI: 10.66224/nsft.21.2.43]

طولانی مدت را فراهم کرد. این نه تنها هزینه های نگهداری را کاهش می دهد بلکه تولید زباله را نیز به حداقل می رساند.

نتیجه‌گیری

نانوالیاف استات سلولز به‌ویژه در حالت هیبریدی با بنتونیت، ظرفیت بالایی در جذب ترکیبات PAHs نشان دادند. افزودن ۱٪ وزنی NCB باعث بهبود خواص مکانیکی، افزایش زاویه تماس آب و تخلخل فیلتر شد و ساختاری یکنواخت و بدون ترک ایجاد کرد. در نمونه‌های برنج دودی‌شده، استفاده از این فیلتر هیبریدی منجر به کاهش قابل‌توجه غلظت PAHs نسبت به نمونه کنترل و فیلتر ساده شد. نتایج آزمون قابلیت استفاده مجدد نشان داد در پی پیشرفت فرآیند فیلتراسیون و انجام حدود ده سیکل، میزان تخلخل کاهش قابل‌توجهی یافته و متعاقباً، کارایی حذف به حدود نصف مقدار اولیه افت یافت. به طور کلی این نتایج نشان می‌دهند که نانوفیلتر هیبریدی گزینه‌ای نوآورانه و مؤثر برای کاهش آلاینده‌ها در فرآورده‌های غذایی دودی است.

• References

1. Ferrante M, Zanghì G, Cristaldi A, Copat C, Grasso A, Fiore M, et al. PAHs in seafood from the Mediterranean Sea: an exposure risk assessment. Food and Chemical Toxicology. 2018;115:385-90.
2. Abbas I, Badran G, Verdin A, Ledoux F, Roumié M, Courcot D, Garçon G. Polycyclic aromatic hydrocarbon derivatives in airborne particulate matter: sources, analysis and toxicity. Environmental Chemistry Letters. 2018;16(2):439-75.
3. Bansal V, Kumar P, Kwon EE, Kim K-H. Review of the quantification techniques for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in food products. Critical reviews in food science and nutrition. 2017;57(15):3297-312.
4. Nodrati A, Haghighat A, Afshar Moghaddam M, Khandaghi J. Combination of Liquid-phase Extraction with Dispersive Liquid-liquid Micro-extraction for the Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Honey Sample Using High-performance Liquid Chromatography. Iranian Journal of Nutrition Sciences and Food Technology. 2024;18(4):93-102.
5. Gorji MEh, Ahmadkhaniha R, Moazzen M, Yunesian M, Azari A, Rastkari N. Polycyclic aromatic hydrocarbons in Iranian Kebabs. Food control. 2016;60:57-63.
6. Wongmaneepratip W, Vangnai K. Effects of oil types and pH on carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in grilled chicken. Food Control. 2017;79:119-25.
7. Singh L, Varshney JG, Agarwal T. Polycyclic aromatic hydrocarbons' formation and occurrence in processed food. Food Chemistry. 2016;199:768-81.
8. Lawal AT. Polycyclic aromatic hydrocarbons. A review. Cogent Environmental Science. 2017;3(1):1339841.
9. Kim D-Y, Han G-T, Shin H-S. Adsorption of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) by cellulosic aerogels during smoked pork sausage manufacture. Food Control. 2021:107878.
10. Dai W-J, Wu P, Liu D, Hu J, Cao Y, Liu T-Z, et al. Adsorption of polycyclic aromatic hydrocarbons from aqueous solution by organic montmorillonite sodium alginate nanocomposites. Chemosphere. 2020;251:126074.
11. Cesar Filho M, Bueno PV, Matsushita AF, Rubira AF, Muniz EC, Durães L, et al. Synthesis, characterization and sorption studies of aromatic compounds by hydrogels of chitosan blended with β-cyclodextrin-and PVA-functionalized pectin. Rsc Advances. 2018;8(26):14609-22.
12. Solano RA, De León LD, De Ávila G, Herrera AP. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) adsorption from aqueous solution using chitosan beads modified with thiourea, TiO2 and Fe3O4 nanoparticles. Environmental Technology & Innovation. 2021:101378.
13. Des Ligneris E, Dumée LF, Kong L. Nanofiber-based materials for persistent organic pollutants in water remediation by adsorption. Applied Sciences. 2018;8(2):166.
14. Thakur VK, Thakur MK, Gupta RK. Review: raw natural fiber–based polymer composites. International Journal of Polymer Analysis and Characterization. 2014;19(3):256-71.
15. Dhand V, Mittal G, Rhee KY, Park S-J, Hui D. A short review on basalt fiber reinforced polymer composites. Composites Part B: Engineering. 2015;73:166-80.
16. Che D, Saxena I, Han P, Guo P, Ehmann KF. Machining of carbon fiber reinforced plastics/polymers: a literature review. Journal of Manufacturing Science and Engineering. 2014;136(3):034001.
17. Bongarde U, Shinde V. Review on natural fiber reinforcement polymer composites. International Journal of Engineering Science and Innovative Technology. 2014;3(2):431-6.
18. Yanılmaz M, Sarac AS. A review: effect of conductive polymers on the conductivities of electrospun mats. Textile Research Journal. 2014;84(12):1325-42.
19. Bhushani JA, Anandharamakrishnan C. Electrospinning and electrospraying techniques: Potential food based applications. Trends in Food Science & Technology. 2014;38(1):21-33.
20. Hasan MM, Alam AM, Nayem KA. Application of Electrospinning techniques for the production of tissue Engineering Scaffolds: A review. European Scientific Journal. 2014;10(15).
21. Mirjalili M, Zohoori S. Review for application of electrospinning and electrospun nanofibers technology in textile industry. Journal of Nanostructure in Chemistry. 2016;6(3):207-13.
22. Rezaei A, Nasirpour A, Fathi M. Application of cellulosic nanofibers in food science using electrospinning and its potential risk. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2015;14(3):269-84.

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-28]

[DOI: 10.66224/nsft.21.2.43]

23. Rieger KA, Schiffman JD. Electrospinning an essential oil: Cinnamaldehyde enhances the antimicrobial efficacy of chitosan/poly (ethylene oxide) nanofibers. Carbohydrate polymers. 2014;113:561-8.

24. Fuenmayor CA, Cosio MS. ENCAPSULATION OF ANTIOXIDANT PHENOLIC COMPOUNDS IN ZEIN ULTRA-THIN FIBERS VIA ELECTROSPINNING. Revista EIA/English version. 2016;12(2):13-26.

25. Lee H, Nishino M, Sohn D, Lee JS, Kim IS. Control of the morphology of cellulose acetate nanofibers via electrospinning. Cellulose. 2018;25(5):2829-37.

26. Inobeme A, Ikechukwu Ajai A, Inobeme J, Adetunji CO, Obar A, Mathew JT, et al. Superabsorbent polymers for the development of nanofiltration. Properties and Applications of Superabsorbent Polymers: Smart Applications with Smart Polymers: Springer; 2023. p. 157-70.

27. Wang M-L, Yu D-G, Bligh SWA. Progress in preparing electrospun Janus fibers and their applications. Applied Materials Today. 2023;31:101766.

28. Ma W, Qi H, Zhang Y, Lin M, Qiu Y, Zhang C. Fabrication of laminated micro/nano filter and its application for inhalable PM removal. Polymers. 2023;15(6):1459.

29. Properties ASDoM, editor Standard test method for tensile properties of thin plastic sheeting1995: American Society for Testing and Materials.

30. Andrade L, Mendes F, Espindola J, Amaral M. Reuse of dairy wastewater treated by membrane bioreactor and nanofiltration: technical and economic feasibility. Brazilian Journal of Chemical Engineering. 2015;32(3):735-47.

31. Alsadat Mirbod M, Hadidi M, Huseyn E, Mousavi Khaneghah A. Polycyclic aromatic hydrocarbon in smoked meat sausages: effect of smoke generation source, smoking duration, and meat content. Food Science and Technology. 2021;42:e60921.

32. Sangani N, Eslahi N, Varsei M, Ghanbari H. Electrospinning of cellulose acetate/graphene/nanoclay nanocomposite for textile wastewater filtration. The Journal of The Textile Institute. 2023:1-9.

33. Fazeli F, Seyedain Ardabili SM, Piravivanak Z, Honarvar M, Mooraki N. The effect of the smoking process on polycyclic aromatic hydrocarbons contents in Hashemi and Domsiah rice cultivars. Journal of Food Processing and Preservation. 2021;45(2):e15172.

34. Lyu C, Zhao P, Xie J, Dong S, Liu J, Rao C, Fu J. Electrospinning of nanofibrous membrane and its applications in air filtration: A review. Nanomaterials. 2021;11(6):1501.

35. Broumand A, Emam-Djomeh Z, Khodaiyan F, Mirzakhanlouei S, Davoodi D, Moosavi-Movahedi AA. Nano-web structures constructed with a cellulose acetate/lithium chloride/polyethylene oxide hybrid: Modeling, fabrication and characterization. Carbohydrate polymers. 2015;115:760-7.

36. Adesina OA. Level of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon in Smoked Food Materials from Roadside Barbeque Spots in Western Nigeria and Health Implication. Polycyclic Aromatic Compounds. 2020:1-6.

37. May NW, Dixon C, Jaffe DA. Impact of wildfire smoke events on indoor air quality and evaluation of a low-cost filtration method. Aerosol and Air Quality Research. 2021;21(7):210046.

38. Akbari A, Yegani R, Pourabbas B, Behboudi A. Fabrication and study of fouling characteristics of HDPE/PEG grafted silica nanoparticles composite membrane for filtration of Humic acid. Chemical engineering research and design. 2016;109:282-96.

39. Azarniya A, Eslahi N, Mahmoudi N, Simchi A. Effect of graphene oxide nanosheets on the physico-mechanical properties of chitosan/bacterial cellulose nanofibrous composites. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2016;85:113-22.

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-28]

[DOI: 10.66224/nsft.21.2.43]

Design of a Hybrid Nanofilter for the Reduction of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Smoked Rice

*Fallah A[1], Farhoodi M[*2], Ghiassi Tarzi B[*3], Asadi G[4]*

1- *Ph.D. Student in Food Science and Technology, Department of Food Science and Technology, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran*

2- **First Corresponding Author: Professor, Department of Food Science and Technology, National Nutrition and Food Technology Research Institute, Faculty of Nutrition Sciences, Food Science and Technology, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Iran. Email: farhoodi@sbmu.ac.ir*

3- **Second Corresponding Author: Associate Professor, Department of Food Science and Technology, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. Email:* babakghiassi@iau.ir

4- *Department of Food Science and Technology, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran*

Received 22 Sep, 2025 **Accepted 27 Dec, 2025**

Background and Objectives: The smoking process of rice is a traditional and widely used method that may lead to the formation of carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs). This study aimed to design and develop a nanofilter as an innovative and effective approach to reduce contaminants in smoked food products.

Materials and Methods: In this study, a specialized nanofilter made of cellulose acetate was developed, featuring a porous and adsorptive structure. Bentonite nanoclay was incorporated into the nanofilter at concentrations ranging from 0.5% to 1.5% by weight.

Results: Experimental findings demonstrated that the addition of bentonite nanoparticles to the cellulose acetate nanofilter significantly enhanced properties such as mechanical strength, water contact angle, and porosity. The nanofilter structure exhibited a uniform and well-organized distribution of nanoparticles. Analysis of PAH adsorption showed that the hybrid nanofilter effectively reduced polycyclic aromatic compounds during the 21-day rice smoking period. Moreover, assessments conducted over multiple filtration and washing cycles indicated that the nanofilter maintained desirable reusability in terms of performance, removal efficiency, and porosity.

Conclusion: Overall, this study suggests that nanofilters represent a promising and innovative solution for reducing contaminants in smoked food products.

Keywords: Nanofilter, Cellulose acetate, Smoked rice, Polycyclic aromatic hydrocarbons, Carcinogens

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-28]

[DOI: 10.66224/nsft.21.2.43]