فصلنامه نوآوری در مهندسی و تکنولوژی زمستان ۱۴۰۴ شماره ۴- دوره ۱- صفحات۱۰۶-۹۵
Journal of Innovation in Engineering and Technology
ISSN 3060-6098

رویکردهای نوین در تولید نساجی سبز: جایگزینی مواد شیمیایی با متابولیت‌های میکروبی

سیده زهرا شاهرخی[1]
۱.کارشناسی ارشد میکروبیولوژی گرایش میکروب های بیماری زا دانشگاه آزاد اسلامی واحد قم

چکیده

صنعت نساجی به عنوان یکی از ارکان کلیدی اقتصاد در سطح جهان، همواره با چالش‌های جدی در زمینه آلودگی‌های محیطی و مصرف بی‌رویه منابع طبیعی روبرو بوده است و فرآیندهای متداول تولید پوشاک و منسوجات، نیازمند مقادیر عظیمی از مواد شیمیایی مصنوعی، رنگ‌زاهای سمی و حلال‌های خطرناک هستند که ورود آن‌ها به چرخه طبیعت، آسیب‌های جبران‌ناپذیری به منابع آب و خاک وارد می‌سازد. در پاسخ به این بحران‌های روزافزون، رویکرد تولید نساجی سبز به عنوان یک راهبرد اساسی و نجات‌بخش مورد توجه پژوهشگران و صنعتگران قرار گرفته است تا با جایگزینی مواد مخرب، گامی در جهت توسعه پایدار برداشته شود و یکی از نوآورانه‌ترین و مؤثرترین راهکارها در این مسیر، بهره‌گیری از متابولیت‌های ثانویه میکروبی به جای ترکیبات شیمیایی مرسوم است. میکروارگانیسم‌ها از جمله باکتری‌ها و قارچ‌ها با دارا بودن سیستم‌های آنزیمی پیچیده، قادرند ترکیباتی با ویژگی‌های ساختاری و عملکردی بی‌نظیر تولید کنند که در مراحل مختلف پیش‌فرآوری، رنگرزی و تکمیل پارچه کاربرد فراوانی دارند و رنگ‌دانه‌های طبیعی استخراج شده از این ریزاندامگان، نه تنها ثبات و درخشش بالایی بر روی الیاف ایجاد می‌کنند، بلکه فاقد هرگونه خطرات مرتبط با ترکیبات سرطان‌زا و حساسیت‌زا می‌باشند. استفاده از آنزیم‌های تجزیه‌کننده برای حذف ناخالصی‌های الیاف، نیاز به اسیدها و قلیاهای قوی را به طور کامل برطرف ساخته و کیفیت نهایی محصول را بهبود می‌بخشد و افزون بر این، متابولیت‌های ضدباکتریایی و ضدقارچی میکروبی امکان تولید منسوجات بهداشتی و ایمن را بدون نیاز به افزودنی‌های سمی فراهم می‌آورند که این امر در تولید پوشاک پزشکی و ورزشی اهمیت بسزایی دارد. ادغام دانش میکروب‌شناسی با مهندسی منسوجات، علاوه بر کاهش شدید مصرف آب و انرژی، به حذف آلاینده‌های پایدار کمک شایانی می‌کند و با وجود دستاوردهای چشمگیر، تجاری‌سازی این فناوری‌ها نیازمند بهینه‌سازی شرایط تولید و افزایش راندمان استخراج است تا از نظر اقتصادی توان رقابت با روش‌های سنتی را داشته باشند. گذار به این روش‌های مبتنی بر طبیعت، کلید طلایی برای دستیابی به صنعتی پاک، ایمن و دوستدار محیط پیرامون محسوب می‌شود و می‌تواند آینده پوشاک را تضمین نماید.

کلمات کلیدی: نساجی سبز، متابولیت‌های میکروبی، رنگ‌دانه‌های طبیعی، بیوتکنولوژی پوشاک، توسعه پایدار.

مقدمه

صنعت نساجی به عنوان یکی از کهن‌ترین و در عین حال حیاتی‌ترین ارکان اقتصاد جهانی، در دهه‌های گذشته با سرعتی فزاینده و غیرقابل انکار تکامل یافته و توانسته است مرزهای بنیادین علوم مختلف را جابجا نماید. این صنعت نقش بسزایی در ایجاد اشتغال، توسعه صادرات و تامین نیازهای اساسی جوامع بشری ایفا می‌کند، اما همزمان به عنوان یکی از آلاینده‌ترین بخش‌های صنعتی در مقیاس جهانی شناخته می‌شود. تمرکز اصلی راهبردهای توسعه صنعتی در گذشته، صرفا بر افزایش حجم تولید و کاهش هزینه‌های اولیه استوار بود که این امر منجر به وابستگی شدید این صنعت به مشتقات نفتی، رنگ‌های سنتزی و حلال‌های شیمیایی خطرناک گردید. در میان تنوع گسترده فرآیندهای نساجی، مراحل رنگرزی و تکمیل به دلیل استفاده از حجم عظیمی از مواد شیمیایی تثبیت‌کننده، اسیدها و قلیاهای قوی، جایگاه بسیار مخربی در تخریب اکوسیستم‌های طبیعی پیدا کرده‌اند (روی چودوری، ۲۰۱۳). تولید این محصولات نساجی عمدتا از طریق روش‌های شیمیایی پرهزینه انجام می‌پذیرد که نیازمند صرف انرژی حرارتی فراوان، مصرف مقادیر عظیمی از آب شیرین و استفاده از مواد تعاونی به شدت سمی است. باقی‌ماندن بقایای این مواد شیمیایی سمی بر سطح پارچه‌ها و ورود آن‌ها به جریان پساب‌های صنعتی، می‌تواند برای سلامت مصرف‌کنندگان به شدت خطرآفرین بوده و خطرات زیست‌محیطی جبران‌ناپذیری به همراه داشته باشد.

چالش اصلی و بنیادین صنعت نساجی در دوران معاصر، تضاد عمیق میان نرخ بالای تولید پوشاک و تخریب گسترده منابع طبیعی است که منجر به بروز بحران‌های جدی در حوزه سلامت عمومی شده است. فرآیندهای رنگرزی در مقیاس صنعتی به طور متوسط سالانه صدها هزار تن رنگ شیمیایی سنتزی را مصرف می‌کنند که بخش بزرگی از آن‌ها به دلیل بازدهی پایین و عدم اتصال کامل به الیاف، مستقیما وارد جریان‌های آب‌های سطحی و زیرزمینی می‌شوند (کمتر و کاستیک، ۲۰۲۲). این رنگ‌های مصنوعی که در ساختار مولکولی خود غالبا دارای حلقه‌های بنزنی پیچیده و فلزات سنگین هستند، با مسدود کردن مسیر نفوذ پرتوهای خورشید به اعماق آب، فرآیند حیاتی فتوسنتز در گیاهان آبزی را کاملا مختل کرده و موجب فروپاشی شبکه‌های غذایی و مرگ جوامع آبزی می‌گردند. بسیاری از مواد شیمیایی کمکی که به عنوان نرم‌کننده، مواد ضدچروک یا ایجادکننده مقاومت در برابر آتش به پارچه‌ها افزوده می‌شوند، حاوی ترکیبات هالوژنه و فرمالدئیدهای آزاد هستند. این ترکیبات ناپایدار در طول زمان و بر اثر سایش یا شستشو، از شبکه پلیمری پارچه جدا شده و از طریق منافذ پوست جذب جریان خون انسان می‌گردند (شاهد و محمد، ۲۰۱۳). مواجهه مستمر و طولانی‌مدت با این مواد سمی، خطر ابتلا به حساسیت‌های شدید پوستی، اختلالات سیستم غدد درون‌ریز و بیماری‌های مزمن تنفسی را در مصرف‌کنندگان و به ویژه کارگران خطوط تولید به شدت افزایش داده است.

همین چالش‌های اساسی و نگرانی‌های فزاینده سبب شده است تا جامعه علمی جهانی و سازمان‌های بین‌المللی وضع‌کننده قوانین زیست‌محیطی، به سمت توسعه رویکردهای نوین، پاک و دوستدار محیط زیست تحت عنوان تولید نساجی سبز متمایل شوند. در این رویکرد نوین، هدف اصلی به حداقل رساندن استفاده از مواد خطرناک و جایگزینی آن‌ها با فرآیندهایی است که کمترین آسیب را به بیوسفر وارد می‌سازند (ابراهیم و حسین، ۲۰۲۱). انتقال از الگوهای خطی و مخرب به سمت سیستم‌های تولید چرخه‌ای و پایدار، مستلزم بهره‌گیری از فناوری‌های نوینی است که بتوانند با

استفاده از منابع تجدیدپذیر، کارایی بالایی را در مقیاس صنعتی ارائه دهند و آسیب‌های وارده را جبران نمایند. صنایعی که نتوانند مصرف منابع پایه خود را بهینه‌سازی کنند و از انتشار آلاینده‌های پایدار جلوگیری نمایند، در آینده‌ای بسیار نزدیک با جریمه‌های سنگین زیست‌محیطی مواجه شده و از گردونه رقابت در بازارهای بین‌المللی حذف خواهند شد (مایتی و همکاران، ۲۰۲۲). از این رو، یافتن جایگزین‌های کاملا طبیعی و زیست‌تخریب‌پذیر که منطبق بر اصول شیمی سبز باشند، به یک الزام قطعی و غیرقابل انکار در معماری نوین صنعت نساجی تبدیل شده است.

در میان راهکارهای فناورانه موجود، زیست‌فناوری میکروبی به عنوان یکی از امیدبخش‌ترین و کارآمدترین رویکردها برای جایگزینی فرآیندهای شیمیایی خشن در صنعت نساجی ظهور کرده است که ظرفیت‌های بی‌نظیری را به همراه دارد. میکروارگانیسم‌ها از جمله باکتری‌ها، قارچ‌ها و جلبک‌ها به واسطه میلیون‌ها سال تکامل، سیستم‌های متابولیکی بسیار پیچیده‌ای را توسعه داده‌اند که قادرند ترکیباتی با ساختارهای شیمیایی متنوع و عملکردهای اختصاصی تولید نمایند (حیدر و همکاران، ۲۰۲۵). این متابولیت‌های میکروبی که در شرایط محیطی کاملا ملایم از نظر دما و فشار سنتز می‌شوند، جایگزینی کاملا ایمن، زیست‌تخریب‌پذیر و موثر برای کاتالیزورها و رنگزاهای مصنوعی به شمار می‌روند. استفاده از این ترکیبات زیستی در کارخانجات نساجی، نیاز به مصرف انرژی حرارتی بالا برای تثبیت مواد را از بین برده و مصرف آب شیرین را در مراحل شستشو به طرز چشمگیری کاهش می‌دهد (اوزتورک و همکاران، ۲۰۲۰). توانایی بیوسنتز رنگ‌دانه‌ها، آنزیم‌های تجزیه‌کننده و مواد فعال سطحی توسط ریزاندامگان، افق‌های جدیدی را پیش روی مهندسان نساجی قرار داده است تا فرآیندهای تولید را با منطق طبیعت همسو سازند.

هدف اصلی از پژوهش حاضر، بررسی جامع و سیستماتیک توانمندی‌های متابولیت‌های ثانویه میکروبی در جایگزینی مواد شیمیایی مرسوم در مراحل مختلف تولید نساجی است. این مطالعه مروری تلاش می‌کند تا با واکاوی دقیق مکانیسم‌های عمل آنزیم‌های زیستی در پیش‌فرآوری الیاف، کارایی رنگ‌دانه‌های میکروبی در فرآیند رنگرزی، و نقش ترکیبات ضدمیکروبی طبیعی در تکمیل پارچه، تصویر روشنی از آینده نساجی پایدار ارائه دهد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که سرمایه‌گذاری بر روی دانش بومی و استفاده از ظرفیت‌های زیست‌فناورانه، نه تنها یک مسئولیت اخلاقی در قبال محیط زیست است، بلکه برای حفظ قدرت رقابت در بازارهای جهانی یک ضرورت راهبردی محسوب می‌شود (کرامتی، ۱۴۰۴).

بیان مسئله و چالش‌های زیست‌محیطی

چالش اصلی و بنیادین صنعت نساجی در دوران معاصر، تضاد عمیق میان نرخ بالای تولید پوشاک برای پاسخگویی به تقاضای فزاینده جهانی و تخریب گسترده منابع محدود طبیعی است که این تقابل، منجر به بروز بحران‌های جدی در حوزه سلامت عمومی و پایداری بوم‌شناختی شده است. مدل تولید خطی و سنتی در این صنعت، به شدت بر پایه استفاده از مشتقات نفتی و مواد شیمیایی سنتزی استوار است. مسئله اصلی در حجم عظیم و درجه سمیت موادی نهفته است که در مراحل مختلف عملیات تَر (wet processing) از جمله آهارگیری، سفیدگری، رنگرزی، چاپ و تکمیل پارچه مورد استفاده قرار می‌گیرند و در نهایت به صورت پساب‌های به شدت آلوده و تصفیه‌ناپذیر، وارد اتمسفر و هیدروسفر

می‌شوند (اوزتورک و همکاران، ۲۰۲۰). این تخلیه مستمر آلاینده‌ها، ظرفیت خودپالایی اکوسیستم‌های آبی را نابود کرده و تعادل بیولوژیکی محیط زیست را با خطرات جبران‌ناپذیری مواجه ساخته است.

در سطح ریزتر، مسئله به ماهیت شیمیایی رنگ‌ها و مواد تعاونی بازمی‌گردد. رنگ‌های سنتزی گروه آزو که بیش از هفتاد درصد از بازار رنگ‌های نساجی جهان را به خود اختصاص داده‌اند، به دلیل ساختار پیچیده آروماتیک خود، در برابر تجزیه طبیعی نوری و بیولوژیکی به شدت مقاومت می‌کنند. ورود این رنگ‌ها به جریان‌های آب‌های سطحی، با مسدود کردن مسیر نفوذ پرتوهای خورشید به اعماق آب، فرآیند حیاتی فتوسنتز در گیاهان و جلبک‌های آبزی را کاملا مختل کرده و موجب افت شدید اکسیژن محلول و در نتیجه مرگ و میر گسترده آبزیان می‌گردد (کرامار و کوستیچ، ۲۰۲۲). علاوه بر این، شکسته شدن پیوندهای دوگانه نیتروژن در ساختار این رنگ‌ها تحت شرایط بی‌هوازی، منجر به آزادسازی آمین‌های معطر می‌شود که ترکیباتی به شدت سمی، جهش‌زا و سرطان‌زا برای انسان و سایر موجودات زنده محسوب می‌شوند. در کنار رنگ‌ها، استفاده از رزین‌های حاوی فرمالدئید برای ایجاد خاصیت ضدچروک، و ترکیبات هالوژنه به عنوان مواد کندکننده اشتعال، خطرات پنهان دیگری هستند که به مرور زمان از بافت پارچه آزاد شده و از طریق منافذ پوست جذب بدن می‌شوند که این امر به اختلالات غدد درون‌ریز و بیماری‌های مزمن پوستی می‌انجامد (شاهد و محمد، ۲۰۱۳).

رویکردهای کنونی برای مدیریت این بحران نیز خود به بخشی از مسئله تبدیل شده‌اند. تاکنون تمرکز اصلی صنایع بر استفاده از فناوری‌های تصفیه پساب در انتهای خط تولید (end-of-pipe) نظیر انعقاد شیمیایی، لخته‌سازی و اکسیداسیون پیشرفته بوده است. با این وجود، این روش‌های فیزیکوشیمیایی دارای نقایص بنیادین هستند؛ آن‌ها نیازمند مصرف انرژی بسیار بالایی بوده، از نظر اقتصادی بار سنگینی بر دوش تولیدکننده می‌گذارند و مهم‌تر از همه، آلودگی را از بین نمی‌برند بلکه صرفا آن را از فاز مایع به فاز جامد منتقل می‌کنند. نتیجه این فرآیند، تولید حجم عظیمی از لجن‌های سمی ثانویه است که دفع و دفن آن‌ها در خاک، چالش‌های زیست‌محیطی جدیدی را برای سفره‌های آب زیرزمینی به وجود می‌آورد (سیدی و همکاران، ۱۳۹۵). بنابراین، مسئله تنها وجود آلودگی نیست، بلکه ناکارآمدی و ناپایداری پارادایم‌های فعلی در مهار این آلاینده‌هاست (کومار و همکاران، ۲۰۱۹).

با توجه به این بن‌بست‌های فناورانه و زیست‌محیطی، مسئله محوری که پژوهشگران و مهندسان نساجی با آن روبرو هستند، یافتن راهکاری عملیاتی، مقیاس‌پذیر و کاملا ایمن برای جایگزینی این فرآیندهای شیمیایی مخرب با سیستم‌های بیولوژیکی است. اگرچه استفاده از متابولیت‌های میکروبی، آنزیم‌ها و رنگ‌دانه‌های زیستی در مقیاس آزمایشگاهی نتایج بسیار درخشانی در حذف آلاینده‌ها نشان داده است، اما شکاف عمیقی در انتقال این دانش از محیط آزمایشگاه به خطوط تولید صنعتی وجود دارد (حیدر و همکاران، ۲۰۲۵). چگونگی استخراج بهینه این متابولیت‌ها، تثبیت پایدار آن‌ها بر روی ساختار الیاف بدون استفاده از دندانه‌های سمی، و حفظ کیفیت زیبایی‌شناختی و عملکردی پارچه در مقیاس تولید انبوه، مسئله‌ای چندوجهی است که نیازمند تحقیقات جامع و بین‌رشته‌ای می‌باشد.

اهمیت و ضرورت انجام پژوهش

ضرورت حرکت پرشتاب به سمت نساجی سبز و جایگزینی مواد شیمیایی با متابولیت‌های میکروبی، پیش از هر چیز ریشه در بحران‌های جهانی کمبود منابع و تغییرات اقلیمی دارد. صنعت نساجی به عنوان یکی از بزرگترین صنایع

مصرف‌کننده آب شیرین در جهان شناخته می‌شود که برای فرآیندهای شستشو، پخت، رنگرزی و تکمیل، سالانه میلیاردها متر مکعب آب را مصرف و آلوده می‌سازد. استفاده از زیست‌فناوری میکروبی و کاتالیزورهای آنزیمی می‌تواند نیاز به شستشوهای مکرر در دماهای جوش را حذف کرده و فرآیندها را در دمای محیط و اسیدیته خنثی پیش ببرد که این امر به کاهش چشمگیر مصرف آب و انرژی حرارتی می‌انجامد (خان، ۲۰۲۵). در عصری که تنش‌های آبی و خشکسالی به تهدیدی برای امنیت ملی کشورها تبدیل شده است، توسعه و پیاده‌سازی این فناوری‌های زیست‌سازگار نه یک انتخاب لوکس، بلکه یک الزام حیاتی و شرط بقای صنعت نساجی است (مایتی و همکاران، ۲۰۲۲).

از منظر قوانین بین‌المللی و فشارهای اقتصادی نیز، انجام این پژوهش از اهمیت راهبردی برخوردار است. در سال‌های اخیر، سازمان‌های محیط زیستی و نهادهای قانون‌گذار جهانی، استانداردهای بسیار سخت‌گیرانه‌ای نظیر برنامه تخلیه صفر مواد شیمیایی خطرناک را وضع نموده‌اند. برندهای بزرگ پوشاک و کارخانجات نساجی که نتوانند خود را با این الزامات اکولوژیک تطبیق دهند، با جریمه‌های سنگین و تحریم در بازارهای هدف مواجه خواهند شد (ابراهیم و حسین، ۲۰۲۱). جایگزینی مواد سنتزی وارداتی با متابولیت‌های طبیعی تولید شده توسط میکروارگانیسم‌ها، ایمن‌ترین مسیر برای انطباق با این استانداردهای جهانی است. این رویکرد، علاوه بر مصون‌سازی صنعت در برابر تنش‌های قانونی، منجر به تولید منسوجاتی با برچسب‌های سبز و ارگانیک می‌شود که ارزش افزوده اقتصادی بسیار بالایی داشته و جایگاه رقابتی تولیدکنندگان را در بازارهای بین‌المللی به شدت ارتقا می‌بخشد (فراید و همکاران، ۲۰۲۲).

اهمیت این پژوهش همچنین ارتباط تنگاتنگی با ارتقای سطح بهداشت عمومی و توسعه منسوجات فراسودمند دارد. در دنیای پس از همه‌گیری‌های عفونی، تقاضای جوامع برای منسوجاتی که دارای خواص ذاتی ضدباکتریایی و ضدقارچی باشند، رشد تصاعدی داشته است. روش‌های معمول برای ایجاد این خواص، تکیه بر استفاده از نانوذرات فلزات سنگین نظیر نقره و مس یا مواد بیوساید شیمیایی است که خود دارای اثرات سمی انباشته برای انسان هستند. در مقابل، بهره‌گیری از متابولیت‌های ثانویه استخراج شده از قارچ‌های رشته‌ای یا باکتری‌ها، راهکاری کاملا زیست‌سازگار و ایمن برای تولید لباس‌های بیمارستانی، پوشاک ورزشی و لباس‌های زیر فراهم می‌آورد که بدون ایجاد هیچ‌گونه حساسیت پوستی، از رشد عوامل بیماری‌زا و ایجاد بوی نامطبوع جلوگیری می‌کنند (شهیری طبرستانی و همکاران، ۱۳۹۶). این دستاورد، مستقیما به بهبود کیفیت زندگی و سلامت مصرف‌کنندگان کمک می‌نماید.

در نهایت، از دیدگاه توسعه ملی و اقتصاد دانش‌بنیان، این پژوهش برای کشورهای در حال توسعه که از تنوع زیستی و اقلیمی غنی برخوردارند، یک فرصت تاریخی محسوب می‌شود. شناسایی، جداسازی و بهره‌گیری از میکروارگانیسم‌های بومی و همچنین استفاده از عصاره‌های گیاهان محلی برای استخراج متابولیت‌های ارزشمند، می‌تواند وابستگی مطلق صنایع داخلی به واردات مواد شیمیایی گران‌قیمت و مخرب را از بین ببرد (ضابطی و همکاران، ۱۳۹۳). این بومی‌سازی فناوری‌های سبز، علاوه بر جلوگیری از خروج ارز، منجر به ایجاد پیوندهای عمیق میان بخش کشاورزی، بیوتکنولوژی و صنعت نساجی شده و زمینه‌ساز ایجاد اشتغال پایدار برای متخصصان و نخبگان علمی می‌گردد (عبادی و همکاران، ۱۴۰۰). حرکت در این مسیر علمی، تضمین‌کننده تحقق اهداف اقتصاد مقاومتی و توسعه پایدار صنعتی است که ارزش بنیادین این دست پژوهش‌ها را بیش از پیش نمایان می‌سازد (کرامتی، ۱۴۰۴).

مبانی نظری

تولید نساجی سبز و شیمی پایدار

تولید نساجی سبز در ادبیات مهندسی مواد و شیمی پایدار، به مجموعه‌ای از راهبردها، خط‌مشی‌های کلان و فرآیندهای بهینه‌سازی شده اطلاق می‌شود که در تمامی مراحل زنجیره ارزش تولید—از مرحله کاشت و برداشت الیاف طبیعی یا بازیافت الیاف مصنوعی گرفته تا ریسندگی، بافندگی، عملیات تر (رنگرزی و تکمیل) و در نهایت بازیافت محصول—اصول دوازده‌گانه شیمی سبز و پایداری زیست‌محیطی را به طور دقیق و سیستماتیک رعایت می‌کنند. این مفهوم جامع و چندبعدی، بر پایه به حداقل رساندن مصرف منابع فسیلی غیرقابل تجدید، توقف کامل استفاده از کاتالیزورهای سنگین و حلال‌های آلی سمی، و کاهش حداکثری تولید پسماندهای جامد و مایع پایدار استوار است (اوزتورک و همکاران، ۲۰۲۰). در پارادایم نساجی سبز، این رویکرد نوین نیازمند بازنگری اساسی و ساختارشکنی در تمامی استانداردهای مهندسی کلاسیک است؛ به گونه‌ای که روش‌های ترموشیمیایی خشن و پرمصرف جای خود را به زیست‌کاتالیزورهای میکروبی بدهند که در شرایط محیطی کاملاً ملایم (دما و اسیدیته طبیعی) عمل کرده و ردپای کربن کارخانجات را به شدت کاهش می‌دهند (ابراهیم و حسین، ۲۰۲۱). انتقال از الگوهای تولید خطی به اقتصاد چرخشی در صنعت نساجی، نه تنها یک راهکار حفاظتی برای محیط زیست است، بلکه یک استراتژی هوشمندانه برای مدیریت بحران‌های تامین مواد اولیه در دهه‌های آینده به شمار می‌رود (عبادی و همکاران، ۱۴۰۰).

یکی از ستون‌های استوار و غیرقابل انکار در مبانی نظری نساجی سبز، استفاده گسترده و صنعتی از آنزیم‌های میکروبی به جای اسیدها، بازهای قوی و مواد اکسیدکننده شیمیایی در مراحل حساس پیش‌فرآوری نظیر آهارگیری، پخت و سفیدگری پارچه‌ها است که به عنوان "زیست‌فرآوری" شناخته می‌شود (خان، ۲۰۲۵). آنزیم‌های تخصصی نظیر آمیلازها برای حذف آهار نشاسته، سلولازها برای پرزگیری و صیقل دادن سطح الیاف پنبه‌ای، پروتئازها برای فرآوری و نرم کردن الیاف پشم و ابریشم، و لاکازها برای رنگ‌بری و تخریب لیگنین، که عمدتاً توسط باکتری‌ها و قارچ‌ها ترشح می‌شوند، با دقت فضایی و مولکولی بسیار بالا تنها بر روی ناخالصی‌های هدف در سطح الیاف اثر گذاشته و بافت اصلی و ساختار پلیمری الیاف را کاملاً دست‌نخورده و سالم باقی می‌گذارند (سینگ و باجاج، ۲۰۱۷). این سازوکار ظریف و اختصاصی آنزیمی باعث می‌شود که پارچه نهایی از لطافت، درخشش و استحکام کششی بی‌نظیری نسبت به روش‌های سنتی برخوردار باشد و همزمان، به دلیل عدم ورود نمک‌های معدنی سنگین و قلیاها به سیستم فاضلاب، هزینه‌های سربار تصفیه‌خانه‌های صنعتی به شدت افت کرده و امکان بازیابی و استفاده مجدد از آب فرآیندی فراهم گردد (مایتی و همکاران، ۲۰۲۲).

علاوه بر کاتالیزورهای آنزیمی، مبانی نظری توسعه پایدار بر استفاده از پلیمرهای زیستی ترشح شده توسط میکروارگانیسم‌ها به عنوان جایگزین مواد آهارزنی و تکمیل‌کننده‌های پلاستیکی (مانند پلی‌وینیل الکل) تأکید دارد تا معضل جهانی انتشار ریزپلاستیک‌ها در اکوسیستم‌های آبی به طور ریشه‌ای حل گردد. این پلیمرهای زیستی پس از شستشو، به راحتی توسط میکروارگانیسم‌های موجود در طبیعت تجزیه شده و به دی‌اکسید کربن و آب تبدیل می‌شوند (شاهد و محمد، ۲۰۱۳). ادغام این مفاهیم بیوتکنولوژیک با دستاوردهای فناوری نانو، پتانسیل‌های بی‌نظیری را برای ایجاد ویژگی‌های خاص مانند آب‌گریزی، ضدچروک بودن و مقاومت در برابر اشتعال بدون نیاز به مواد سمی هالوژنه و

ترکیبات فرمالدئیدی فراهم آورده است (قربانی و همکاران، ۱۳۹۲). در این چارچوب نظری پیشرفته، منسوجات نه به عنوان کالاهایی یک‌بارمصرف و مخرب، بلکه به عنوان مواد واسطه‌ای در چرخه حیات در نظر گرفته می‌شوند که می‌توانند به طور ایمن به بیوسفر بازگردند و این همان چشم‌اندازی است که زیربنای مطالعات نوین در صنعت پوشاک را شکل می‌دهد (کرامتی، ۱۴۰۴).

متابولیت‌های میکروبی و زیست‌فناوری نساجی

متابولیت‌های میکروبی، ترکیبات بیوشیمیایی بسیار متنوع، پیچیده و از نظر بیولوژیکی فعالی هستند که توسط ریزاندامگان در طول چرخه‌های رشد سلولی و در پاسخ به محرک‌ها و تنش‌های محیطی تولید می‌شوند. در مهندسی نساجی مدرن، متابولیت‌های ثانویه (که مستقیماً در رشد و تولیدمثل میکروارگانیسم نقشی ندارند اما مزایای بقای اکولوژیکی به همراه دارند) به دلیل دارا بودن ویژگی‌های شگفت‌انگیزی همچون خواص رنگ‌دهی پایدار، قدرت ضدمیکروبی ذاتی، قابلیت جذب پرتوهای مضر و توانایی کاهش کشش سطحی سیالات، بیشترین اهمیت علمی را به خود اختصاص داده‌اند. این ترکیبات ارزشمند به عنوان جایگزین‌های مستقیم، زیست‌سازگار و کاملاً ایمن برای مواد شیمیایی سنتزی در حمام‌های رنگرزی و تکمیل فرموله می‌شوند (حیدر و همکاران، ۲۰۲۵). این متابولیت‌های آلی که از طریق فرآیندهای کنترل شده تخمیر در دستگاه‌های واکنش‌گر زیستی (بیوراکتورها) با تنظیم دقیق پارامترهایی نظیر اکسیژن، اسیدیته و منبع کربن با راندمان محاسباتی بسیار بالا قابل تکثیر و تولید می‌باشند، به مهندسان شیمی نساجی اجازه می‌دهند تا فرآیندهای طولانی و چندمرحله‌ای رنگرزی و تکمیل را در یک مرحله واحد ادغام نموده و مصرف منابع را بهینه‌سازی کنند (السایاری و همکاران، ۲۰۲۳).

رنگ‌دانه‌های زیستی تولید شده توسط باکتری‌های خاکی و دریایی نظیر گونه‌های مختلف استرپتومایسس، از برجسته‌ترین و صنعتی‌ترین دسته‌های متابولیت‌های میکروبی هستند که طیف وسیعی از رنگ‌های زنده، باثبات و چشم‌نواز را تولید می‌کنند. این رنگ‌دانه‌های کاملاً طبیعی برخلاف رنگ‌های تجاری گروه آزو، در اثر تجزیه نوری، حرارتی یا تعریق بدن هیچ‌گونه آمین معطر سمی، ترکیبات جهش‌زا یا عوامل ایجادکننده حساسیت‌های تماسی تولید نکرده و به دلیل برخورداری از ساختار مولکولی خاص آنتی‌اکسیدانی، دارای خواص محافظتی بیولوژیکی قدرتمندی در برابر اشعه فرابنفش خورشید و همچنین جلوگیری از رشد پاتوژن‌ها بر روی بافت پارچه هستند (سید و همکاران، ۲۰۲۵). فناوری‌های نوینی نظیر استفاده از شبکه‌های پلیمری قالب مولکولی با نانوحفره‌های مهندسی شده، امکان استخراج، جداسازی و خالص‌سازی این رنگ‌دانه‌های میکروبی و همچنین ترکیبات ضدقارچی پیچیده استخراج شده از قارچ‌های رشته‌ای نظیر تریکودرما را با انتخاب‌پذیری و خلوص بسیار بالا فراهم آورده‌اند که کاربرد آن‌ها را در تولید منسوجات پزشکی و بهداشتی هوشمند کاملاً توجیه‌پذیر می‌سازد (شهیری طبرستانی و همکاران، ۱۳۹۵؛ شهیری طبرستانی و همکاران، ۱۳۹۶).

در کنار رنگ‌دانه‌ها، متابولیت‌های میکروبی شامل دسته بسیار مهمی از مواد فعال سطحی زیستی (بیوسورفاکتانت‌ها) هستند که ساختاری دوگانه‌دوست (آمفی‌فیلیک) دارند و می‌توانند به طور کامل جایگزین شوینده‌های شیمیایی سمی، صابون‌های صنعتی و حلال‌های آلی در مراحل حساس شستشو، نفوذدهی و ثبات رنگ شوند. این ترکیبات زیستی با کاهش شدید و مؤثر کشش سطحی مولکول‌های آب، نفوذ یکنواخت و عمیق رنگ‌دانه‌ها به درون ساختار کریستالی و

آمورف الیاف را تسهیل کرده و نیاز به افزودن نمک‌های تعلیق‌کننده شیمیایی سنگین را به طور کلی مرتفع می‌سازند (کومار و همکاران، ۲۰۱۹). همچنین استخراج و شناسایی دقیق ساختار این متابولیت‌ها با بهره‌گیری از روش‌های پیشرفته کروماتوگرافی گازی و طیف‌سنجی جرمی، نشان داده است که شباهت‌های عملکردی چشمگیری میان ترکیبات ضدمیکروبی استخراج شده از گیاهان دارویی و متابولیت‌های باکتریایی وجود دارد که ترکیب آن‌ها می‌تواند فرمولاسیون‌های قدرتمندی برای تکمیل نساجی ارائه دهد (ضابطی و همکاران، ۱۳۹۳). این تنوع بی‌نظیر بیوشیمیایی نشان‌دهنده ظرفیت‌های بی‌پایان طبیعت برای حل معضلات صنعتی است و مسیر را برای شکل‌گیری نسل جدیدی از منسوجات دوستدار انسان و محیط زیست هموار می‌سازد (کرامار و کوستیچ، ۲۰۲۲).

یافته‌های تحلیلی و دستاوردهای پژوهشی

بررسی، تجمیع و تحلیل سیستماتیک داده‌های حاصل از پژوهش‌های آزمایشگاهی و مطالعات نیمه‌صنعتی در سراسر جهان به روشنی نشان می‌دهد که متابولیت‌های ترشح شده توسط گونه‌های مختلف میکروارگانیسم‌ها، پتانسیل اجرایی و عملیاتی بسیار بالایی برای پیاده‌سازی در خطوط تولید نساجی مدرن دارند. یکی از برجسته‌ترین یافته‌های تحلیلی در این حوزه، اثبات کارایی خارق‌العاده آنزیم‌های هیدرولیزکننده میکروبی در مراحل حساس پیش‌فرآوری الیاف است. یافته‌ها حاکی از آن است که استفاده از زیست‌کاتالیزورهایی نظیر آمیلازها و پروتئازهای استخراج شده از باکتری‌ها، علاوه بر کاهش چشمگیر مصرف انرژی حرارتی و حذف کامل قلیاهای سوزآور، منجر به حفظ یکپارچگی ساختاری الیاف سلولزی و پروتئینی شده و بافت پارچه را برای جذب یکنواخت‌تر و عمیق‌تر رنگ آماده می‌سازد (خان، ۲۰۲۵). این آنزیم‌ها با عملکردی کاملا هوشمند و اختصاصی، تنها ناخالصی‌های سطحی و مواد آهار را تجزیه کرده و از افت مقاومت کششی نخ‌ها که در روش‌های اسیدی مرسوم بسیار شایع است، به طور کامل جلوگیری می‌کنند. همچنین اثبات شده است که فرآوری الیاف پشم با استفاده از پروتئازهای میکروبی، ضمن حذف فلس‌های خشن سطحی و ایجاد لطافت بی‌نظیر، خاصیت نمدی شدن و جمع‌شدگی پارچه را به حداقل رسانده و کیفیت نهایی محصول را به استانداردهای جهانی ارتقا می‌دهد (سینگ و باجاج، ۲۰۱۷).

در زمینه رنگرزی زیستی که یکی از چالش‌برانگیزترین بخش‌های نساجی سبز محسوب می‌شود، یافته‌های پژوهشی ثابت می‌کنند که رنگ‌دانه‌های طبیعی تولید شده توسط میکروارگانیسم‌ها، به ویژه رنگ‌دانه‌های استخراج شده از اکتینوباکتری‌ها و باکتری‌های دریایی، از ثبات نوری، سایشی و شستشویی بسیار مطلوبی بر روی الیاف طبیعی نظیر پنبه و ابریشم برخوردارند. نتایج آنالیزهای رنگ‌سنجی نشان می‌دهد که این رنگ‌دانه‌های زیستی با ایجاد پیوندهای هیدروژنی و واندروالسی مستحکم با گروه‌های عاملی الیاف، رنگی پایدار، یکنواخت و درخشان ایجاد می‌نمایند که به خوبی با رنگ‌های سنتزی قابل رقابت است (فراید و همکاران، ۲۰۲۲). از منظر عملکردی نیز یافته‌ها بسیار خیره‌کننده هستند؛ به عنوان مثال، استخراج و خالص‌سازی رنگ‌دانه قرمز از سویه‌های بومی استرپتومایسس نشان داد که این بیوپیگمنت علاوه بر رنگ‌دهی عالی، با ایجاد یک سپر محافظتی و آنتی‌اکسیدانی نامرئی بر روی الیاف، پارچه را در برابر تخریب‌های ناشی از اشعه ماوراء بنفش و تنش‌های محیطی محافظت کرده و خاصیت ضدمیکروبی قابل توجهی به آن می‌بخشد (سید

و همکاران، ۲۰۲۵). این دستاوردها نشان‌دهنده ماهیت چندعملکردی متابولیت‌های میکروبی است که نیاز به استفاده از چندین ماده شیمیایی مختلف در حمام رنگرزی را مرتفع می‌سازد.

در حوزه ایجاد خواص ویژه و تکمیلی در منسوجات پیشرفته، یافته‌های آزمایشگاهی به روشنی نشان می‌دهند که متابولیت‌های ثانویه استخراج شده از قارچ‌های رشته‌ای، قابلیت‌های فوق‌العاده‌ای به عنوان عوامل ضدقارچی و ضدباکتریایی پایدار بر روی الیاف از خود بروز می‌دهند. بررسی‌های انجام شده بر روی متابولیت‌های فعال گونه‌های قارچ تریکودرما حاکی از آن است که این ترکیبات می‌توانند با ایجاد اختلال در دیواره سلولی پاتوژن‌ها، از رشد کلنی‌های بیماری‌زا بر روی بافت لباس‌های بیمارستانی و ورزشی جلوگیری کنند (شهیری طبرستانی و همکاران، ۱۳۹۶). یکی از یافته‌های کلیدی در زمینه افزایش راندمان استخراج این متابولیت‌های ارزشمند، استفاده از فناوری پلیمرهای قالب مولکولی نانو حفره است که تحولی شگرف در جداسازی ترکیبات زیستی ایجاد کرده است. بهره‌گیری از این شبکه‌های نانومتری هوشمند، به پژوهشگران اجازه داده است تا ترکیبات ضدمیکروبی را با دقت و انتخاب‌پذیری بسیار بالا از محیط کشت استخراج نموده و با بالاترین سطح خلوص بر روی بستر منسوجات اعمال کنند که این امر ماندگاری خواص بهداشتی پارچه را پس از ده‌ها بار شستشو تضمین می‌نماید (شهیری طبرستانی و همکاران، ۱۳۹۵).

همگرایی میان علوم تحلیلی، بیوتکنولوژی و نانوتکنولوژی نیز بخش مهمی از یافته‌های نوین را شکل داده است. شناسایی و آنالیز دقیق ساختار مولکولی متابولیت‌های ثانویه از طریق دستگاه‌های پیشرفته کروماتوگرافی گازی متصل به طیف‌سنجی جرمی، امکان مدل‌سازی دقیق رفتار این ترکیبات را در فرآیندهای نساجی فراهم آورده است و نشان می‌دهد که عصاره‌های استخراج شده از گیاهان دارویی نیز می‌توانند مکملی قدرتمند برای متابولیت‌های میکروبی باشند (ضابطی و همکاران، ۱۳۹۳). استفاده از نانوساختارهای مهندسی شده و پلیمرهای زیستی برای کپسوله کردن و رهاسازی تدریجی این متابولیت‌های شناسایی شده، راندمان اتصال آن‌ها به سطح پارچه را به شدت تقویت کرده و انقلابی در تولید منسوجات معطر و دارویی ایجاد کرده است (قربانی و همکاران، ۱۳۹۲). این یافته‌ها به توسعه راهبردهای جدیدی در صنعت نساجی پیشرفته منجر شده است که بر پایه استفاده از منابع بومی و استراتژی‌های دانش‌بنیان استوار بوده و مسیر استقلال صنعتی را هموار می‌سازند (عبادی و همکاران، ۱۴۰۰).

بخش استراتژیک دیگری از یافته‌های پژوهش به بررسی ظرفیت‌های بی‌نظیر میکروارگانیسم‌ها در سیستم‌های مدیریت پسماند و زیست‌پالایی پساب‌های صنعتی اختصاص دارد که حلقه پایانی و حیاتی در نساجی سبز است. نتایج آزمایش‌های بیوشیمیایی به طور قطع اثبات می‌کنند که باکتری‌های هتروتروف استخراج شده از محیط‌های آلوده نساجی، قادرند با استفاده از ماشین‌آلات آنزیمی اختصاصی خود، پیوندهای دوگانه و بسیار مقاوم رنگ‌های سنتزی از جمله رنگ‌های آنتراکوئینونی را که از سمی‌ترین ترکیبات صنعتی هستند، در زمان بسیار کوتاهی شکسته و ساختار آن‌ها را به ترکیبات معدنی ساده و بی‌خطر تبدیل نمایند (سیدی و همکاران، ۱۳۹۵). این زیست‌پالایی قدرتمند میکروبی، میزان تقاضای شیمیایی اکسیژن و کدورت پساب را به سطوح استاندارد زیست‌محیطی رسانده و امکان بازیافت و بازچرخانی ایمن آب را در سیستم‌های صنعتی کاملا فراهم می‌آورد. بهره‌گیری از این سیستم‌های تصفیه بیولوژیکی در مقایسه با روش‌های شیمیایی رایج، به دلیل عدم تولید لجن‌های سمی ثانویه و مصرف انرژی بسیار پایین، از نظر اقتصادی به شدت توجیه‌پذیر

بوده و تحقق کامل مفهوم اقتصاد چرخشی و تولید با انتشار صفر را در صنعت عظیم نساجی امکان‌پذیر می‌سازد (کومار و همکاران، ۲۰۱۹).

بحث و نتیجه‌گیری

صنعت عظیم نساجی در برهه کنونی، در تقاطع یک تغییر مسیر تاریخی و گریزناپذیر قرار گرفته است که در آن، تداوم روش‌های سنتی مبتنی بر مصرف بی‌رویه مواد شیمیایی دیگر از هیچ منظری توجیه‌پذیر نبوده و گذار شجاعانه به رویکردهای زیست‌محور، یگانه راه نجات این صنعت و حفظ اکوسیستم‌های شکننده کره زمین است. تلفیق و تحلیل جامع یافته‌های این پژوهش به وضوح و با قطعیت اثبات می‌کند که متابولیت‌های میکروبی، شامل سیستم‌های آنزیمی بیوکاتالیزور، رنگ‌دانه‌های زیستی چندعملکردی و ترکیبات ضدمیکروبی طبیعی، نه تنها جایگزین‌هایی برابر و شایسته برای مواد شیمیایی سمی هستند، بلکه به دلیل دقت عمل مولکولی، سازگاری کامل با بیولوژی بدن انسان و قابلیت زیست‌تخریب‌پذیری صددرصدی، برتری‌های کاملا محسوسی نسبت به روش‌های سنتی دارند. استفاده یکپارچه از این راهکارهای پیشرفته بیوتکنولوژیک در تمامی حلقه‌های زنجیره تامین نساجی، از مرحله پیش‌فرآوری الیاف تا رنگرزی و تکمیل نهایی، منجر به شکل‌گیری یک اقتصاد چرخشی و پاک می‌گردد که در آن مفهوم پسماند سمی کاملا منسوخ شده و مواد پس از پایان چرخه عمر مفید خود، مجددا به عنوان مواد مغذی به آغوش طبیعت باز می‌گردند (اوزتورک و همکاران، ۲۰۲۰). این تغییر الگو، مرزهای مهندسی مواد را به سمت هماهنگی کامل با قوانین ترمودینامیکی حیات سوق می‌دهد.

این تغییر پارادایم علمی و صنعتی، علاوه بر تضمین بی‌قید و شرط سلامت مصرف‌کنندگان و ارتقای ایمنی شغلی کارگران خطوط تولید، گامی بسیار بلند و استراتژیک در راستای حفظ منابع به شدت محدود آب شیرین و کاهش شدید انتشار گازهای گلخانه‌ای محسوب می‌شود. جایگزینی فرآیندهای ترموشیمیایی پرمصرف با واکنش‌های زیستی که در دمای محیط و اسیدیته خنثی انجام می‌پذیرند، هزینه‌های سربار انرژی را به طرز چشمگیری کاهش داده و توجیه اقتصادی طرح‌های نساجی سبز را تضمین می‌نماید. علاوه بر این، موفقیت باکتری‌های هتروتروف در زیست‌پالایی و تجزیه کامل آلاینده‌های مقاوم و رنگ‌های سرطان‌زای گروه آزو در سیستم‌های تصفیه پساب، نشان می‌دهد که میکروارگانیسم‌ها نه تنها در تولید مواد اولیه پاک نقش دارند، بلکه در انتهای خط تولید نیز به عنوان رفتگران طبیعت، بار آلودگی را به صفر می‌رسانند (سیدی و همکاران، ۱۳۹۵). این رویکرد کل‌نگر، باعث می‌شود تا صنعت نساجی از یک صنعت مخرب و متهم به تخریب محیط زیست، به صنعتی پیشرو در تحقق اهداف توسعه پایدار سازمان ملل متحد تبدیل گردد.

با این وجود، گذار کامل و بی‌نقص به سمت نساجی صددرصد سبز و زیست‌پایه، مستلزم غلبه هوشمندانه بر چالش‌های فنی و ساختاری متعددی است که نیازمند توجه ویژه نهادهای علمی و سیاست‌گذار می‌باشد. در حال حاضر، بهینه‌سازی فرآیندهای فرمانتاسیون (تخمیر) برای تولید انبوه متابولیت‌ها، افزایش پایداری حرارتی و نوری برخی از رنگ‌دانه‌های طبیعی بر روی الیاف مصنوعی، و همچنین کاهش هزینه‌های مرتبط با استخراج و خالص‌سازی این ترکیبات در مقیاس بزرگ صنعتی، از مهم‌ترین موانعی هستند که پیش روی محققان قرار دارند. برای عبور موفقیت‌آمیز از این گذرگاه تکنولوژیک، توسعه راهبردهای نوین در صنعت نساجی پیشرفته نیازمند شکل‌گیری پیوندهای تحقیقاتی عمیق‌تر و

نظام‌مندتر میان مراکز آکادمیک، پژوهشگاه‌های بیوتکنولوژی و واحدهای توسعه صنعتی کارخانجات است تا دانش فنی به صورت کاملا بومی و متناسب با زیرساخت‌های موجود نهادینه شود (عبادی و همکاران، ۱۴۰۰). همچنین، استفاده از ابزارهای نوین مهندسی ژنتیک و زیست‌شناسی مصنوعی برای اصلاح نژاد سویه‌های میکروبی و افزایش راندمان تولید متابولیت‌های هدف، می‌تواند سرعت تجاری‌سازی این دستاوردها را به شدت تسریع بخشد (حیدر و همکاران، ۲۰۲۵).
در نهایت، می‌توان با قاطعیت و پشتوانه علمی استنتاج نمود که ادغام علوم پیچیده میکروبیولوژی، اصول بنیادین شیمی سبز، فناوری نانو و مهندسی پیشرفته نساجی، افق‌های بسیار روشن و امیدبخشی را برای تولید پوشاکی هوشمند، کاملا ایمن و هماهنگ با طبیعت ترسیم کرده است. آینده صنعت نساجی بدون شک در گرو استفاده از ظرفیت‌های بی‌پایان موجودات زنده و الگوبرداری دقیق از مکانیسم‌های بی‌نقص تکاملی است تا محصولاتی به بازار عرضه شوند که علاوه بر پوشانندگی، دارای ارزش‌های درمانی، محافظتی و زیست‌محیطی باشند (کرامتی، ۱۴۰۴). بهره‌گیری از منابع غنی تنوع زیستی در داخل کشور برای شناسایی میکروارگانیسم‌های بومی و استخراج متابولیت‌های ارزشمند، استراتژی مستحکمی برای قطع وابستگی به واردات مواد شیمیایی آلاینده و تحقق اقتصاد دانش‌بنیان خواهد بود. تداوم نوآوری‌ها در این عرصه، انقلابی بی‌بدیل ایجاد خواهد کرد که پایانی همیشگی بر سیطره مشتقات نفتی مخرب در بخش پوشاک بوده و میراثی پاک و پایدار برای نسل‌های آینده بشریت به یادگار خواهد گذاشت.

منابع

- سیدی، زینب سادات، زهرائی، زهره، و جوکارکاشی، فرشته. (۱۳۹۵). تجزیه میکروبی رنگ آنتراکوئینونی توسط باکتری‌های هتروتروف جدا شده از پساب کارخانه نساجی. دومین کنفرانس بین‌المللی یافته‌های نوین پژوهشی در شیمی و مهندسی شیمی، تهران.
- شهیری طبرستانی، مائده، رهنما، کامران، جهانشاهی، محسن، نصرالله‌نژاد، سعید، و فاطمی، محمدحسین. (۱۳۹۶). استخراج و شناسایی متابولیت‌های ثانویهTrichoderma atroviridae (۶۰۲۲) و بررسی اثرات ضدقارچی آن‌ها. مطالعات حفاظت گیاهان، ۳۱(۱)، ۱۳۱-۱۴۱.
- شهیری طبرستانی، مائده، رهنما، کامران، جهانشاهی، محسن، و امیری، علیرضا. (۱۳۹۵). استخراج ترکیبات ضدقارچی متابولیت‌های ثانویهTrichoderma atroviridae (۳-۱) با کاربرد پلیمرهای قالب مولکولی نانو حفره. کنگره گیاه‌پزشکی ایران.
- ضابطی، سیدمحمود، اسماعیلی، احمد، مجیری، فرزانه، مداح عارفی، حسن، نظریان فیروزآبادی، فرهاد، و صالحی پور، محمد. (۱۳۹۳). جداسازی متابولیت‌های ثانویه طی فرایند استخراج DNA از گیاه آویشن و آنالیز آن‌ها با روش-GC Mass.مجله پژوهش‌های سلولی مولکولی (زیست‌شناسی ایران)، ۲۷(۱)، ۶۶-۷۴.
- عبادی، سیدوحید، کازرونی، حنیف، و سمنانی، داریوش. (۱۴۰۰). راهبردهای توسعه صنعت نساجی پیشرفته ایران. مطالعات مدیریت راهبردی، ۱۲(۴۵)، ۱۴۱-۱۵۹.
- قربانی، احسان، قانع، محمد، طادی بنی، زهرا، و میناپور، شهره. (۱۳۹۲). فناوری نانو و صنعت نساجی. همایش ملی تحقیقات کاربردی و استانداردسازی در توسعه صنایع.

- کرامتی، ناهید. (۱۴۰۴). فناوری‌های نوین در نساجی و پوشاک. نخستین کنفرانس ملی مطالعات نوین در فرهنگ، هنر و علوم انسانی، اردبیل.
- Alsaiari, N. S., Alzahrani, F. M., Amari, A., Osman, H., Harharah, H. N., Elboughdiri, N., & Tahoon, M. A. (۲۰۲۳). Plant and microbial approaches as green methods for the synthesis of nanomaterials: synthesis, applications, and future perspectives. *Molecules*, *28*(۱), ٤٦٣.
- Fried, R., Oprea, I., Fleck, K., & Rudroff, F. (۲۰۲۲). Biogenic colourants in the textile industry–a promising and sustainable alternative to synthetic dyes. Green Chemistry, ۲۴(۱), ۱۳-۳۵.
- Haider, A., Israr, M., Naseem, R., Rasheed, L., Gulnaz, S., & Muhayyudin, G. (۲۰۲۵). Microbial Biotechnology in Textile Industry: An Introduction. In *Microbial Biotechnology in Textile Innovation* (pp. ۱-۲۵). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Ibrahim, N., & Hussain, C. M. (Eds.). (۲۰۲۱). *Green chemistry for sustainable textiles: modern design and approaches*. Woodhead Publishing.
- Khan, M. F. (۲۰۲۵). Recent advances in microbial enzyme applications for sustainable textile processing and waste management. *Sci*, *7*(۲), ٤٦.
- Kramar, A., & Kostic, M. M. (۲۰۲۲). Bacterial secondary metabolites as biopigments for textile dyeing. *Textiles*, *2*(۲), ۲۵۲-۲٦٤.
- Kumar, D., Pandit, P. D., Patel, Z., Bhairappanavar, S. B., & Das, J. (۲۰۱۹). Perspectives, scope, advancements, and challenges of microbial technologies treating textile industry effluents. In Microbial wastewater treatment (pp. ۲۳۷-۲٦۰). Elsevier.
- Maity, S., Pandit, P., Singha, K., & Kar, S. (۲۰۲۲). Progress in innovative green chemistry and circular economy in textiles. *Textile Dyes and Pigments: A Green Chemistry Approach*, ٤٤۳-٤٥٥.
- Ozturk, E., Cinperi, N. C., & Kitis, M. (۲۰۲۰). Green textile production: a chemical minimization and substitution study in a woolen fabric production. *Environmental Science and Pollution Research*, *27*(۳٦), ٤٥۳٥۸-٤٥۳۷۳.
- Roy Choudhury, A. K. (۲۰۱۳). Green chemistry and the textile industry. *Textile Progress*, *45*(۱), ۳-۱٤۳.
- Sayed, G. H. E., Fadel, M., Fouad, R., Ahmed, H. M., & Hamed, A. A. (۲۰۲۵). Improving natural red pigment production by Streptomyces phaeolivaceus strain GH۲۷ for functionalization of textiles with in silico ADME prediction. *BMC microbiology*, *25*(۱), ۱۹.
- Shahid, M., & Mohammad, F. (۲۰۱۳). Green Chemistry Approaches to Develop Antimicrobial Textiles Based on Sustainable Biopolymers A Review. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, *52*(۱٥), ٥۲٤٥-٥۲٦۰.
- Singh, S., & Bajaj, B. K. (۲۰۱۷). Potential application spectrum of microbial proteases for clean and green industrial production. *Energy, Ecology and Environment*, *2*(٦), ۳۷۰-۳۸۶.