

فناوری نانو در منسوجات: ایمنی محیط زیست و شیوه های پایدار

لیلا حیدری^{۱*}، عظیم باقری^۲، ابراهیم گلی پور^۲، اکبر عسگرپور^۲

۱- مدرس و مدیر دپارتمان مهندسی صنایع شیمیایی، ایران، تهران، دانشگاه جامع علمی کاربردی، مرکز آموزش شرکت تولیدی و صنعتی آذین خودرو
۲- دانشجوی کارشناسی مهندسی فناوری صنایع شیمیایی، ایران، تهران، دانشگاه جامع علمی کاربردی، مرکز آموزش شرکت تولیدی و صنعتی آذین خودرو

چکیده

گنجاندن نانوذرات در منسوجات، ضمن حفظ انعطاف پذیری، خواص عملکردی قابل توجهی را به همراه دارد. امروزه، منسوجات نانو در بخش های مختلفی مانند ورزش، مراقبت های بهداشتی و حفاظتی به کار گرفته می شوند. با این وجود، به نظر می رسد که فناوری نانو توانایی تغییر چشمگیر وضعیت فعلی فناوری ها را دارد؛ نگرانی هایی در مورد اثرات آن بر انسان و محیط زیست وجود دارد. بخش اول، اصول اولیه سم شناسی نانوذرات را بیان می کند و تأکید می کند که مطالعات آینده باید نانوذرات و نحوه تعامل، زیست فعال شدن و ایجاد تهدید برای انسان و محیط زیست را به طور کامل توصیف کنند. این مقاله مروری، جنبه های زیست محیطی و ایمنی نانومواد را هنگام گنجاندن در منسوجات مورد بحث قرار می دهد. مقررات فعلی در مورد نانومواد در منسوجات مانند REACH ثبت، ارزیابی، مجوز و محدودیت مواد شیمیایی (EPA (آژانس حفاظت از محیط زیست) و OSHA (اداره ایمنی و بهداشت شغلی) بر نیاز به فرآیندهایی که نانوذرات را پوشش می دهند و اندازه گیری می کنند، تأکید دارند. همچنین، ادغام فناوری نانو سبز را در نظر می گیرد، توصیه هایی برای استفاده ایمن از فناوری نانو برای ریشه کن کردن پیامدهای منفی بر محیط زیست ارائه می دهد و استفاده از اقلام طبیعی و قابل بازیافت را پیشنهاد می دهد. با نشان دادن کاربردهای واقعی، این بررسی نشان می دهد که پایداری و کاربرد نانوذرات می تواند برای پیشرفت های بیشتر مانند منسوجات هوشمند و واکنش پذیر و همچنین تأمین جنبه های آینده فناوری نانو در منسوجات، دست در دست هم پیش بروند.

کلمات کلیدی: اثرات زیست محیطی، نشت، نانوذرات فلزی، سم شناسی، بهداشت و ایمنی.

مقدمه

فناوری نانو که به عنوان کنترل مواد در سطوح نانومتری توصیف می‌شود، سهم چشمگیری در صنعت نساجی داشته و در نتیجه پارچه‌هایی با کاربردهای خاص تولید می‌کند که نیازهای مصرف‌کننده را برآورده می‌کند. کاربردهای نانوذرات در منسوجات با امکان ادغام خواص بهبود یافته در مقیاس نانو، قابلیت‌های پارچه را به طور قابل توجهی بهبود بخشیده است. این پیشرفت‌ها نه تنها عملکرد منسوجات را افزایش می‌دهند، بلکه از نوآوری‌های پایدار نیز پشتیبانی می‌کنند، زیرا پارچه‌های فرآوری شده با نانوذرات می‌توانند عمر محصول را افزایش داده و مصرف منابع را کاهش دهند و فناوری نانو را به عنوان یک رویکرد تحول‌آفرین در بخش نساجی قرار دهند. با این وجود، استفاده نمایی از نانوذرات بسیار بحث‌برانگیز است زیرا سوالات زیست‌محیطی و ایمنی عمده‌ای را مطرح می‌کند که برای تجزیه و تحلیل کامل مناسب هستند. کاربردهای خاص این مواد در صنعت نساجی به این معنی است که آگاهی از خطراتی که آنها برای انسان و محیط زیست ایجاد می‌کنند، هنگام بهره‌برداری صنعت در آینده، بسیار مهم است.

بازار جهانی فناوری نانو در منسوجات در سال ۲۰۲۱ تقریباً ۵/۸ میلیارد دلار ارزش داشت و انتظار می‌رود تا سال ۲۰۲۷ به ۱۵/۴ میلیارد دلار برسد و با نرخ رشد مرکب سالانه ۱۷/۱ درصد رشد کند. استفاده از نانوذرات در منسوجات برای اهداف ضدباکتریایی حدود ۶۵ درصد از کل نانومواد مورد استفاده در منسوجات را تشکیل می‌دهد. سایر نانومواد مانند نانولوله‌های کربنی^۱ (CNTs) و نانورس به ترتیب حدود ۱۲ درصد و ۱۰ درصد از بازار را تشکیل می‌دهند. با این وجود، یک مسئله مهم در رابطه با جنبه‌های سمیت نانوذرات وجود دارد. این به این معنی است که رفتار بیولوژیکی نانوذرات می‌تواند به دلیل جنبه‌های نانوذرات مانند اندازه و مساحت سطح آنها، اثرات پیش‌بینی نشده‌ای داشته باشد. این مورد در مورد نانولوله‌های کربنی تک دیواره^۲ (SWCNTs) صدق می‌کند که مشخص شده است که ممکن است باعث سمیت، التهاب و استرس اکسیداتیو در انسان شوند. علاوه بر این، از آنجا که نانوذرات برای مدت طولانی در محیط باقی می‌مانند، تجمع زیستی پیدا می‌کنند که پیامدهایی برای محیط‌های آبی و همچنین خشکی دارد. هدف این مقاله بررسی کامل خطرات سم‌شناسی مرتبط با نانوذرات است و بر نیاز به تحقیقات بیشتر برای ارزیابی حضور و اثرات آنها بر محیط‌های مختلف و موجودات زنده تأکید می‌کند.

بنابراین، جدا از سمیت، مسائل نظارتی مهمی در رابطه با ایمنی نانوذرات مورد استفاده در صنعت نساجی وجود دارد. صنعت نساجی با نگرانی‌های ایمنی کلیدی در مورد مقررات نانوذرات در طول اجرای ایمن آنها مواجه است. آژانس مواد شیمیایی اروپا^۳ (ECHA) به همراه EPA^۴ و OSHA^۵ مقرراتی را در مورد استفاده و تولید محافظت‌شده نانومواد تدوین کرده‌اند. این مقررات شامل محدودیت در مواجهه کارگران، حفاظت از مصرف‌کنندگان و همچنین حفاظت از محیط زیست است. با این وجود، هیچ تکنیک واحدی برای تعیین آزادسازی نانوذرات در مراحل مختلف چرخه عمر منسوجات در دسترس نیست که این مقررات را به چالش می‌کشد. از این رو، نیاز به سیاست‌های سختگیرانه هنگام مهار نانوذرات همراه با نظارت بر محیط زیست برای خطرات انسانی در استفاده از نانوذرات در منسوجات وجود دارد. در نتیجه، تمرکز فزاینده‌ای بر فناوری نانو سبز به عنوان یک راه حل بالقوه برای چندین نگرانی مرتبط با استفاده از نانوذرات وجود دارد. این رویکرد مربوط به استفاده از مواد و پلیمرهای منبع بیولوژیکی است که زیست تخریب‌پذیر و حساس به محیط زیست هستند و در عین حال کاربرد کاربردی ارائه می‌دهند. نانوذرات زیستی مبتنی بر منابع تجدیدپذیر، نوبدبخش رویکردی سازگار با محیط زیست هستند که با دستور کار پایداری صنایع نساجی مطابقت دارد. رویکردهای جدید در فناوری‌های سنتز نانوذرات شامل کپسوله‌سازی و اصلاح سطح برای به حداقل رساندن احتمال انتشار نانوذرات در طول چرخه عمر پارچه‌ها است.

^۱ Carbon Nano Tubes^۲ Single-Walled Carbon Nano Tubes^۳ European Chemicals Agency^۴ Environmental Protection Agency^۵ Occupational Safety and Health Administration

انبوهی از مقالات، کاربرد نانوذرات را بر روی منسوجات گزارش کرده‌اند. با این حال، مطالعات محدودی در مورد سمیت زیست‌محیطی ایجاد شده به دلیل شسته شدن نانوذرات در طول تولید، پردازش و پس از دفع منسوجات در دسترس است. بنابراین، این مقاله مروری قصد دارد علاوه بر ملاحظات ایمنی هنگام برخورد با منسوجات نانو، تأثیر نانوذرات منتشر شده در طول فرآیندهای فوق بر انسان و محیط زیست را مورد بحث قرار دهد. پروتکل‌های نظارتی، نگرانی‌های نظارتی جهانی، استراتژی‌های توسعه نانوذرات پایدار و همچنین تلاش‌ها برای به حداقل رساندن انتشار نانوذرات از منسوجات، به طور خلاصه ارائه شده است. علاوه بر این، چند مطالعه موردی صنعتی، تنگنای فعلی و چشم‌اندازها نیز گنجانده شده است.

۱- کاربردهای نانوذرات در منسوجات

نانوذرات برای ایجاد ویژگی‌های کاربردی مختلف مانند ضد میکروبی، مقاومت در برابر اشعه ماوراء بنفش، ضد الکتریسیته ساکن، دفع آب و خاک، کندکنندگی شعله و غیره در منسوجات به کار می‌روند. آنها همچنین در حذف رنگ باقیمانده از پساب‌های رنگی مؤثر هستند. نانوذرات به دلیل نسبت سطح به حجم زیاد، می‌توانند به طور یکنواخت در الیاف نساجی گنجانده شوند و در نتیجه ویژگی‌های خاصی مانند محافظت در برابر اشعه ماوراء بنفش، مقاومت در برابر باکتری، دفع آب و خود تمیز شوندگی را ارائه دهند. علاوه بر این، نانوذرات راه را برای منسوجات "هوشمند" هموار می‌کنند و حسگرهای پاسخگو را در پارچه‌ها تعبیه می‌کنند که می‌توانند سیگنال‌های فیزیولوژیکی مانند ضربان قلب و دما را که برای ورزش و نظارت بر مراقبت‌های بهداشتی ضروری است، کنترل کنند. در رنگرزی، افزودن این نانومواد باعث افزایش تثبیت رنگ، محافظت در برابر اشعه ماوراء بنفش و عملکرد ضد میکروبی می‌شود. به عنوان مثال، نانوذرات TiO_2 به عنوان فوتوکاتالیست عمل می‌کنند که چسبندگی رنگ را افزایش داده و اثر رنگ‌زدایی ناشی از قرار گرفتن در معرض نور خورشید را کاهش می‌دهند. به همین ترتیب، نانوذرات ZnO برای افزایش راندمان رنگرزی و ایجاد خواص ضد باکتری در پارچه و همچنین لباس‌های کاربردی مورد استفاده در مراکز پزشکی و لباس‌های ورزشی استفاده می‌شوند. با این حال، مزایای اصلی نانوکامپوزیت‌ها شامل کاهش حساسیت به انقباض و مصرف کمتر آب و انرژی در طول رنگرزی است که می‌تواند از طریق دماهای نسبتاً پایین (۵۰-۶۰ درجه سانتیگراد) و چرخه‌های رنگرزی کوتاه‌تر حاصل شود و شیوه‌های تولید پایدارتری را ترویج دهد. از طریق کاربرد نانومواد، می‌توان هم تأثیر زیست‌محیطی و هم هزینه فرآیند رنگرزی واقعی را به شدت کاهش داد و در عین حال خواص اساسی منسوجات از جمله زیبایی، استحکام و کاربرد را افزایش داد. شکل ۱ کاربردهای مهم فناوری نانو در منسوجات را نشان می‌دهد.



شکل ۱. کاربردهای فناوری نانو در منسوجات

رویکردهای مختلفی برای ترکیب نانوذرات اکسید فلزی بر روی الیاف نساجی طبیعی و مصنوعی بررسی شده است (جدول ۱). در این مقاله روش کاربرد بر اساس نوع الیاف، ماهیت نانوذرات، عملکرد، دوام، هزینه، مدت زمان کاربرد و غیره انتخاب شده است.

جدول ۱. روش‌های رایج کاربرد نانوذرات روی منسوجات

ردیف	روش	مزایا	معایب
۱	سل-ژل ^۱	توزیع یکنواخت نانوذرات را ممکن می‌سازد. پوشش‌های بادوام و شفاف ایجاد می‌کند. می‌تواند چندمنظوره باشد.	فرآیند پیچیده و زمان‌بر هزینه بالای پیش‌سازها نیاز به تثبیت پس از عملیات قابلیت مقیاس‌پذیری محدود برای کاربردهای صنعتی
۲	هیدروترمال ^۲	نانوذرات با بلورینگی بالا تولید می‌کند. مناسب برای طیف وسیعی از مواد امکان کنترل دقیق اندازه و شکل سازگاری بالا با فرآیندهای سازگار با محیط زیست	به دلیل دما و فشار بالا، انرژی‌بر است. نیاز به اتوکلاوهای گران‌قیمت دارد. زمان واکنش طولانی است. توان عملیاتی محدود برای کاربردهای در مقیاس صنعتی
۳	کپسوله‌سازی ^۳	آزادسازی کنترل‌شده و پایدار عوامل فعال را تسهیل می‌کند.	هزینه بالای مواد کپسوله‌کننده دستیابی به اندازه ذرات یکنواخت دشوار است.

^۱ Sol-Gel

^۲ Hydrothermal

^۳ Encapsulation

فرآیند تولید پیچیده چالش‌هایی در تضمین سازگاری با تمام زیرلایه‌های نساجی	از عوامل حساس در برابر تخریب محافظت می‌کند. پایداری را در شرایط سخت افزایش می‌دهد. برای ترکیب افزودنی‌های کاربردی، چندمنظوره است.		
نیاز به کنترل دقیق بر شرایط واکنش دارد. زمان‌بر و پرهزینه خطر رسوب ناهموار نانوذرات ممکن است شامل معرف‌های خطرناک باشد.	رشد مستقیم نانوذرات روی الیاف. پیوند قوی بین سطحی، دوام را افزایش می‌دهد. از مهاجرت نانوذرات در حین شستشو جلوگیری می‌کند. خواص عملکردی متناسب را ممکن می‌سازد.	سنتر درجاً ^۱	۴
نفوذ محدود نانوذرات به الیاف ممکن است کاربرد غیریکنواخت رخ دهد. به شدت به شرایط خشک شدن وابسته است. دوام کمتری در مقایسه با سایر روش‌ها دارد.	ساده و سازگار با صنعت مناسب برای طیف وسیعی از زیرلایه‌های نساجی مقرون به صرفه برای کاربردهای در مقیاس بزرگ امکان ادغام آسان پوشش‌های کاربردی را فراهم می‌کند.	پوشش غوطه‌وری ^۲	۵
هزینه بالای تجهیزات و عملیات مقیاس‌پذیری محدود برای تولید انبوه حساسیت به عوامل محیطی مانند رطوبت نیاز به کنترل دقیق بر خواص محلول	ساختارهای نانوالیافی فوق‌العاده ظریف تولید می‌کند. نسبت سطح به حجم بالایی ارائه می‌دهد. امکان ترکیب مواد متنوع را فراهم می‌کند. تخلخل کنترل‌شده را در غشاهای نساجی امکان‌پذیر می‌سازد.	الکتروریسی ^۳	۶
به سیستم‌های خلاء گران‌قیمت و ورودی انرژی بالا نیاز دارد. به دلیل دمای بالای فرآیند، محدود به منسوجات مقاوم در برابر حرارت است. در برخی روش‌ها شامل پیش‌سازهای سمی یا محصولات جانبی است. مقیاس‌پذیری برای تولید منسوجات در مقیاس بزرگ همچنان چالش‌برانگیز است.	پوشش‌های نانوذرات بسیار یکنواخت و همگون تولید می‌کند. مناسب برای کاربردهای لایه نازک در مقیاس نانو چسبندگی و پیوند شیمیایی قوی به زیرلایه‌های نساجی را فراهم می‌کند. کنترل دقیق ضخامت پوشش و خواص مواد را امکان‌پذیر می‌سازد.	رسوب بخار ^۴	۷

۲- ملاحظات زیست‌محیطی و ایمنی نانوذرات در منسوجات

۲-۱- تأثیر سم‌شناسی نانوذرات در منسوجات

کاربردهای نانوذرات^۵ (NPs) در منسوجات هوشمند به دلیل خواصی مانند ضد باکتری، محافظت در برابر اشعه ماوراء بنفش و دوام آنها به دلیل اندازه کوچک و سطح وسیعشان، در صنعت نساجی نسل فعلی رایج‌تر است. با این حال، خواص فیزیکوشیمیایی منحصر به فرد نانوذرات می‌تواند خطرات سم‌شناسی را برای سلامت انسان و محیط زیست ایجاد کند. گزارش شده است که برخی از نانوذرات پرکاربرد مانند نقره (Ag) و دی‌اکسید تیتانیوم (TiO₂) باعث ایجاد استرس اکسیداتیو و بزرگنمایی زیستی می‌شوند و به پوست، ریه و سد خونی- مغزی نفوذ می‌کنند. در همین حال، نانوذرات نقره می‌توانند با تأثیر بر لیپیدها، پروتئین‌ها و DNA، تولید گونه‌های فعال اکسیژن^۶ (ROS) را القا کرده و منجر به استرس اکسیداتیو سلول‌ها شوند. فعالیت میتوکندری را مختل کرده و متابولیسم انرژی را مختل کرده و در نتیجه مرگ سلولی را تحریک می‌کنند. این نانوذرات در آسیب DNA، التهاب و بیماری‌های مزمن ریه از

^۱ In-situ Synthesis

^۲ Dip coating

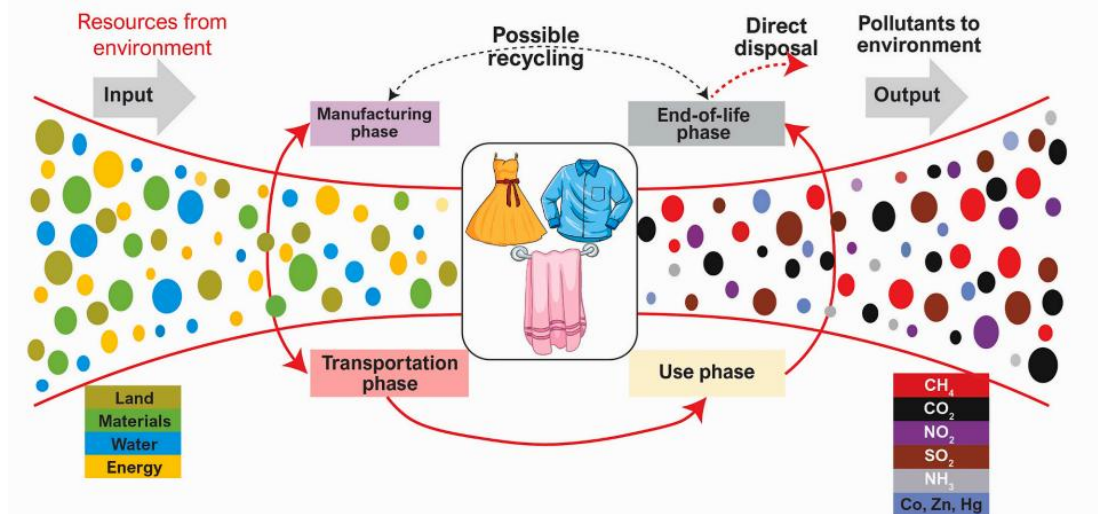
^۳ Electrospinning

^۴ Vapour deposition

^۵ Nanoparticles

^۶ Reactive Oxygen Species

جمله فیروز نقش دارند. نانوذرات نقره و TiO_2 به عنوان نوروتوکسیک گزارش شده‌اند و بیماری‌های عصبی را در کارگران نساجی که به طور مزمن در معرض این مواد قرار دارند، تشدید می‌کنند. علاوه بر این، دسترسی آزاد به این نانوذرات می‌تواند هنگام شستن، پوشیدن یا حتی دور انداختن لباس نیز حاصل شود که در نهایت محیط زیست و به ویژه آب‌ها را آلوده می‌کند. نانوذرات نقره ممکن است با پروتئین‌ها واکنش نشان دهند و روی آبشش‌های ماهی رسوب کنند که می‌تواند در تنفس و هموستاز یون اختلال ایجاد کند. این نشان می‌دهد که نانوذرات نقره و TiO_2 می‌توانند در بافت‌های موجودات آبی تجمع زیستی پیدا کنند و بر تولید مثل، رشد و فعال‌سازی آنزیم‌های آنها تأثیر منفی بگذارند که منجر به سمیت تولید مثلی می‌شود. سمیت نانوذرات با اندازه، واکنش‌پذیری و تولید ROS آنها تعیین می‌شود. اگرچه اثرات متفاوتی از خود نشان می‌دهند، اما سمیت آنها عمدتاً به دلیل ترکیب و ویژگی‌های سطحی آنهاست. تولید بیش از حد ROS شرایطی را ایجاد می‌کند که در آن آنتی‌اکسیدان‌های سلولی بیش از حد فعال می‌شوند و در نتیجه استرس اکسیداتیو ایجاد می‌شود که به طور مخربی بر لیپیدها، DNA و پروتئین‌ها تأثیر می‌گذارد، به گونه‌ای که سلول‌ها را می‌کشد و به بافت آسیب می‌رساند. فعالیت سیتوتوکسیک بیشتر نانوذرات، امکان تحریک پاسخ‌های ایمنی را فراهم می‌کند و باعث آزاد شدن سیتوکین‌ها و کموکین‌ها می‌شود که باعث التهاب می‌شوند. التهاب طولانی مدت ممکن است باعث ایجاد شرایط آسیب‌زا مانند فیبروز و بیماری‌های سرطانی شود. به عنوان مثال، نانوذرات TiO_2 که عمدتاً در منسوجات استفاده می‌شوند، می‌توانند با DNA تماس پیدا کرده و آن را جهش دهند یا کروموزوم‌ها را تغییر دهند و خطرات بالقوه‌ای را از قرار گرفتن طولانی مدت و مزمن در معرض نانوذرات ایجاد کنند. شکل ۲ چرخه عمر یک سیستم محصول نساجی و مداخلات محیطی آن را در مراحل مختلف نشان می‌دهد.

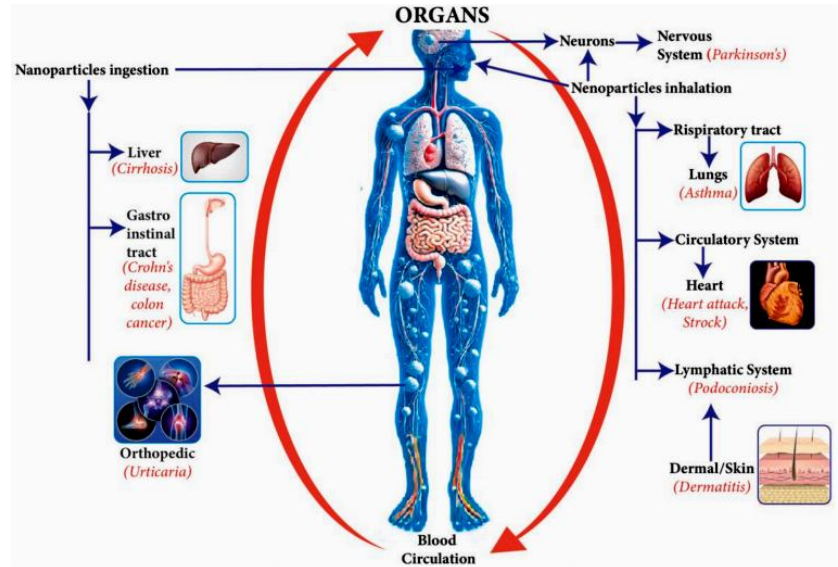


شکل ۲. چرخه حیات یک سیستم محصول نساجی و مداخلات زیست‌محیطی آن در مراحل مختلف

۲-۲- خطرات بهداشتی مرتبط با نانوذرات در محیط‌های شغلی

منسوجات فرآوری‌شده با نانوذرات می‌توانند از طریق استنشاق و تماس پوستی با نانوذرات، برای کارگرانی که در تولید چنین پارچه‌هایی نقش دارند، خطر سلامتی ایجاد کنند (شکل ۳). تخمین زده شده است که هنگام استنشاق نانوذرات، احتمال ابتلا به سرطان، فیبروز یا التهاب ریه وجود دارد. این امر کارگرانی را که با این مواد سروکار دارند، با ایجاد اثرات تنفسی، سوزش پوست و سمیت سیستمیک ناشی از قرار گرفتن طولانی مدت در معرض آن، تحت تأثیر قرار می‌دهد. تهدید زیست‌محیطی بلندمدت نیز به نانوذراتی نسبت داده می‌شود که در برابر تخریب در محیط مقاوم هستند. اثرات سم‌شناسی ذرات نیز در محیط تجمع یافته و بر گونه‌های دیگر تأثیر می‌گذارند. این ماندگاری به ویژه برای نانوذراتی مانند TiO_2 که از نظر شیمیایی بی‌اثر هستند و تجزیه و شسته

نمی‌شوند، نگران‌کننده است. پرداختن به این چالش‌ها نیازمند یک رویکرد جامع، از جمله ارزیابی‌های ریسک قوی، پروتکل‌های ایمنی در تولید و توسعه نانومواد ایمن‌تر است. تغییر قوانین باید با هدف تنظیم مدیریت ریسک نانوذرات به کار رفته در منسوجات انجام شود، که این امر بر اهمیت اتخاذ شیوه‌های سازگار با محیط زیست و غیرخطرناک تأکید می‌کند.



شکل ۳. نمایش شماتیک انتقال نانوذرات در بدن انسان

۳-۲- انتشار نانوذرات و نگرانی‌های نظارتی

انتشار نانوذرات در طول فرآیندهای مرطوب نساجی به دلیل پایداری بالقوه زیست‌محیطی و تجمع زیستی آنها، چالش‌های نظارتی قابل توجهی را ایجاد می‌کند. از آنجایی که صنعت نساجی به طور فزاینده‌ای از نانومواد استفاده می‌کند، نیاز مبرمی به چارچوب‌های نظارتی جامع برای مدیریت استفاده و دفع ایمن عوامل رنگرزی حاوی نانوذرات برای کاهش خطرات مرتبط با سلامتی و زیست‌محیطی وجود دارد. نهادهای نظارتی مانند REACH اتحادیه اروپا، EPA ایالات متحده و OSHA بر نانومواد نظارت دارند، اما شکاف‌های قابل توجهی در قوانین موجود وجود دارد. این موارد شامل فقدان روش‌های تشخیص موثر، داده‌های ناکافی در مورد اثرات سلامتی نانومواد و الزامات ناکافی آزمایش است.

۴-۲- راهبردهای فناوری نانو سبز در منسوجات

فناوری نانو سبز با هدف توسعه نانومواد سازگار با محیط زیست و پایدار که ردپای اکولوژیکی فرآیندهای صنعتی را کاهش می‌دهند، توسعه یافته است. در منسوجات، این رویکرد بر استفاده از نانوذرات زیستی تهیه شده از مواد تجدیدپذیر تأکید دارد که خواص عملکردی پارچه‌ها را افزایش می‌دهد و در عین حال خطرات زیست‌محیطی و بهداشتی را به حداقل می‌رساند. با استفاده از فناوری نانو سبز، منسوجات می‌توانند بدون تکیه بر مواد شیمیایی خطرناک، به ویژگی‌های پیشرفته‌ای مانند فعالیت ضد میکروبی، محافظت در برابر اشعه ماوراء بنفش و دوام بهبود یافته دست یابند. به عنوان مثال، ترکیب رنگ‌های طبیعی با نانوذرات زیست سازگار می‌تواند رنگ‌های پر جنب و جوشی را به همراه داشته باشد و در عین حال فرآیند رنگرزی کمتر سمی و زیست تخریب‌پذیرتر را تضمین کند. علاوه بر این، استفاده از تکنیک‌های سنتز سازگار با محیط زیست، مانند بیوسنتز با استفاده از عصاره‌های گیاهی، امکان تولید نانوذرات غیرسمی را فراهم می‌کند که اثر بخشی را حفظ می‌کنند. به طور کلی، ادغام فناوری نانو سبز در رنگرزی منسوجات، یک استراتژی مناسب برای ارتقای پایداری در صنعت، کمک به یک اکوسیستم سالم‌تر و محصولات ایمن‌تر برای مصرف‌کنندگان است.

۳- مطالعات موردی صنعتی و کاربردهای نانوذرات در منسوجات

فناوری نانو سریع‌ترین حوزه در حال توسعه است که با وارد کردن نانوذرات به فرآیندهای تولید نساجی، تغییرات عمده‌ای را در بخش‌های مد و نساجی فنی ایجاد کرده است. سه مزیت کلیدی نانوذرات مربوط به سطح گسترش یافته آنها به همراه خواص شیمیایی و رفتار عملکردی است که باعث بهبود عملکرد در کنار کاهش مشکلات زیست‌محیطی و فرصت‌های استراتژیک جدید می‌شود. این بخش به بررسی تجاری‌سازی فرآیندهای رنگرزی، ارائه نمونه‌های صنعتی و نشان دادن چگونگی تسهیل توسعه منسوجات کاربردی توسط ادغام نانوذرات می‌پردازد.

۳-۱- داستان‌های موفقیت تجاری: فرآوری مرطوب منسوجات با نانوذرات بهبود یافته

در طول سال‌ها، استفاده از نانوذرات در منسوجات به دلیل توانایی آنها در بهبود جذب رنگ، ثبات رنگ و عملکرد پارچه افزایش یافته است. استفاده از نانوذرات علاوه بر بهبود عملکرد پارچه، با کاهش مصرف آب و انرژی در طول فرآیندهای رنگرزی، به حفاظت از محیط زیست نیز کمک کرده است. مطالعه‌ای نشان داد که ۸۰ درصد از منسوجات فرآوری شده با نانومواد از نظر بهره‌وری انرژی و دوام پایدارتر بوده‌اند و ۳۰ درصد کاهش در مصرف آب در طول تولید داشته‌اند. دهه گذشته شاهد پذیرش و تجاری‌سازی فناوری نانو توسط صنایع بوده است. امروزه، بسیاری از صنایع نساجی، نانو منسوجات برند خود را برای کاربردهای تخصصی دارند. به عنوان مثال، نایک و آدیداس نانوذرات TiO_2 را در لباس‌های ورزشی خود گنجانده‌اند که منجر به افزایش ۴۰ درصدی محافظت در برابر اشعه ماوراء بنفش و حفظ رنگ شده است. نانوذرات نقره به دلیل اثربخشی ضد میکروبی خود در لباس‌های ورزشی و منسوجات پزشکی مورد توجه قرار گرفته‌اند. شرکت‌های Patagonia و The North Face از فناوری AgNP، مانند HeiQ Pure، برای عملیات ضد میکروبی بادوام استفاده می‌کنند و مطالعات نشان می‌دهد که پارچه‌های پنبه‌ای عمل‌آوری شده با AgNP تا ۹۹/۷۹ درصد راندمان ضد میکروبی دارند و در عین حال مصرف آب و مواد شیمیایی را در فرآیند رنگرزی کاهش می‌دهند. در صنعت جین، Levi Strauss & Co. از نانوذرات و لیزر در رنگرزی استفاده کردند تا مصرف آب را ۵۰ درصد و مصرف انرژی را ۴۰ درصد بدون افت کیفیت کاهش دهند. تولیدکنندگان رنگ نیز شروع به استفاده از نانوذرات برای بهبود تخریب رنگ و تصفیه فاضلاب کرده‌اند که به فرآیندهای رنگرزی سبزتر کمک می‌کند. برندهایی مانند Nano-Tex در خط مقدم این تحول هستند و از نانوذرات برای بهبود راندمان رنگرزی، کاهش مصرف آب و مواد شیمیایی و همسو با اهداف پایداری جهانی استفاده می‌کنند. مجموعه برندهای نساجی مبتنی بر فناوری نانو، پیشرفت‌های پیشرو را به نمایش می‌گذارد که از پارچه‌ها محافظت می‌کند و ضمن افزایش عملکرد، پایداری را نیز ارتقا می‌دهد. Nano-Tex یک پیشرو جهانی در اجرای اصلاحات الیاف در مقیاس مولکولی برای دستیابی به مقاومت در برابر لکه و افزایش دوام بدون تأثیر بر ساختار پارچه است. NanoSphere شرکت Schoeller از طریق اثر برگ نیلوفر آبی به دفع آب بدون PFC دست می‌یابد و در عین حال قابلیت‌های خود تمیزشوندگی را نیز ارائه می‌دهد. NanoGH پوشش‌های ضد میکروبی و خود تمیزشونده‌ای ایجاد می‌کند که پارچه‌ها را به سطوح مقاوم در برابر رشد میکروبی تبدیل می‌کند. Odegon مواد نانو متخلخل بوگیر را توسعه می‌دهد که به خوبی برای لباس‌های ورزشی و یونیفرم‌ها مناسب است. ManoGH عملیات پیشرفته‌ای را در زمینه نساجی توسعه داده است که مقاومت در برابر آب را با خواص خود تمیزشوندگی و ضد میکروبی ترکیب می‌کند تا طول عمر محصول را افزایش دهد و در عین حال قابلیت‌های عملیاتی آنها را افزایش دهد. Nanex Always Dry یک لایه محافظ مقاوم در برابر آب ایجاد می‌کند که از لکه‌هایی که روی پارچه، چرم و چوب تأثیر می‌گذارند، جلوگیری می‌کند. برند دیگری به نام GoGoNano، پوشش‌های ضد آب سازگار با محیط زیست تولید می‌کند که از وسایل الکترونیکی مانند وسایل نقلیه و منسوجات محافظت می‌کند و در عین حال ویژگی‌های سطح اصلی آنها را حفظ می‌کند. Nano⁴-Textile نانوپوشش SiO_2 را به عنوان یک مانع ضد لکه

پایاده سازی می کند که نفوذپذیری پارچه را برای تهویه حفظ می کند. همه این برندها برای پیشبرد علم نانو از طریق یک رویکرد پایدار پیشگامانه به توسعه فناوری نساجی متحد می شوند.

۲-۳- مُد کاربردی و کاربردهای آن در منسوجات فنی

کاربردی سازی مُد، به ویژه در بخش منسوجات فنی، با کمک نانوذرات در مرحله رنگرزی، راه درازی را پیموده است. نانوذرات، جدا از مزایای زیبایی شناختی، اثرات عملکردی را در زمینه های چندوجهی به پارچه ها ارائه می دهند و بنابراین در مد و همچنین کاربردهای فنی جای می گیرند. این شامل افزایش جذب رنگ و سایه می شود، جایی که تقویت درجات و تُن ها با استفاده از نانوذرات نقره، پارچه ها را شیک. نانوذرات TiO_2 همچنین در ایجاد پارچه های خود تمیز شونده استفاده می شوند که در آن نور UV ترکیبات آلی را تجزیه می کند و بنابراین دفعات شستشو را کاهش می دهد و در نتیجه دوام پارچه و در نتیجه جنبه پایداری را افزایش می دهد. فناوری نانو همچنین امکان توسعه محصولات نساجی هوشمند از جمله منسوجات ترموکرومیک و فتوکرومیک را فراهم می کند که به ترتیب با دما یا نور رنگ را تغییر می دهند و در نتیجه تعامل با لباس های مد و تطبیق پذیری لباس ها را بهبود می بخشند. اگرچه استفاده از نانوذرات در رنگرزی پارچه مزایای خود را دارد، اما مردم نگرانی های فزاینده ای در مورد اثرات نانوذرات بر محیط زیست ایجاد کرده اند. در نتیجه، نانوذرات زیستی از منابع طبیعی که سازگار با محیط زیست هستند، اهمیت پیدا می کنند.

۴- چشم اندازهای آینده و نوآوری های تکنولوژیکی

۴-۱- نانوذرات نسل بعدی برای منسوجات

پیشرفت های جدید در فناوری نانو، بخش نساجی، به ویژه بخش رنگرزی را به شدت تحت تأثیر قرار می دهد. نانوذرات نوظهور جدید، پتانسیل مثبتی برای دستیابی به محصولات نساجی با عملکرد بالا و پایدار ارائه می دهند. نسل های بعدی نانوذرات شامل نقاط کوانتومی^۱ (QD ها)، پروسکایت ها^۲ و نانوکامپوزیت ها هستند که با واکنش پذیری شیمیایی و ترموکرومیک بودن، جایگزین نانوذرات مرسوم مانند TiO_2 و Ag می شوند. نقاط کوانتومی، که ذرات نیمه هادی با اندازه بین دو تا ده نانومتر هستند، دارای ویژگی فوتولومینسانس وابسته به اندازه هستند که به آنها اجازه می دهد تا با توجه به سطح نور محیط، به صورت انتخابی رنگ شوند ثابت کردند که با استفاده از نقاط کوانتومی می توان به پارچه ها ویژگی تغییر رنگ فوگل^۳ را در شرایط نوری مختلف داد. با این حال، این روش برای پایداری منسوجات مبتنی بر نقاط کوانتومی در برابر نور خورشید، گرما و تنش مکانیکی باید بیشتر بهبود یابد. پیشنهاد شده است که نقاط کوانتومی با لایه های محافظ پلیمرهای پایدار پوشانده شوند تا پایداری آنها افزایش یابد و در عین حال ویژگی های نوری آنها حفظ شود. همچنین، نانوذرات پروسکایت هالید پتانسیل تغییر رنگ منسوجات را بر اساس ویژگی های نوری و الکتریکی خود دارند. نانوکامپوزیت های مبتنی بر پروسکایت می توانند با استفاده از اشعه ماوراء بنفش تحریک شوند، بنابراین در فضای باز قابل استفاده و برای اهداف استتار قابل تطبیق هستند. ظرفیت آنها برای محافظت در برابر اشعه ماوراء بنفش و جمع آوری نور، آنها را هم در مد و هم در الکترونیک جذاب تر می کند. علاوه بر این، توانایی توسعه یک ساختار کپسوله کننده پروسکایت را در قالب ماتریس های آلی و معدنی که برای کاربرد پیشرفته در شرایط رطوبت بهینه کافی است، بررسی شد، جایی که عملکرد منسوجات تغییر رنگ دهنده تضعیف نمی شود و پایداری مکانیکی تضمین می شود. طبیعت پاسخ های خوبی برای طیف وسیعی از مسائل ارائه می دهد. به عنوان مثال، بسیاری از محققان انگیزه یافته اند تا از فناوری ابرآبگریزی طبیعی تقلید کنند. اکنون تعداد بسیار کمی از مواد نساجی

^۱ Quantum Dots

^۲ Perovskites

^۳ Fugle Color

بیومیمتیک در بازار موجود است و بیومیمیکری در صنعت نساجی هنوز یک زمینه مطالعاتی بسیار جوان است. اکثر مطالعات محدود به مرحله تحقیق هستند. امید زیادی برای استفاده از مکانیسم‌های طبیعی به عنوان یک مفهوم طراحی جدید برای منسوجات نوآورانه وجود دارد.

۲-۴- چالش‌های پایداری و مقیاس‌پذیری نانوذرات در منسوجات

پیشرفت‌های اخیر در فناوری‌های رنگرزی نشان می‌دهد که نانوذرات چشم‌اندازهای قابل دسترس‌تری را برای فرآیندهای نساجی سبز فراهم می‌کنند. اما هنوز کارهای زیادی در مورد کاربرد صنعتی این فناوری و مهمترین جنبه کاربرد آنها، یعنی هزینه، باید انجام شود. تهیه نانوذرات فلزی مانند نقره و تیتانیا برای کاربرد رنگرزی پرهزینه است و مشکلاتی دارد که به دلیل آن، ترکیب فرآیندهای رنگرزی با استفاده از این ذرات نمی‌تواند آسان باشد. در همین حال، سنتز سبز نانوذرات با استفاده از عصاره‌های گیاهی، اگرچه سازگار با محیط زیست است، اما با مشکلاتی مانند بازده و مقیاس‌پذیری ضعیف مواجه است. فناوری‌های جدید از جمله فرآیند رنگرزی بدون آب با استفاده از نانوذرات با مصرف آب بسیار کمتر (زیر ۵ درصد) گزارش شده‌اند. اما، حفظ و پایداری این نانوذرات در فرآیندهای رنگرزی در مقیاس بزرگ آسان نیست؛ با این حال، روش‌های کپسوله‌سازی در بهبود پایداری مفید بوده‌اند. نانوذرات زیستی مانند نانوسلولز و مصرف منابعی مانند بازیافت مواد شیمیایی رنگرزی برای بهبود جنبه اقتصادی تلاش می‌شوند. علاوه بر این، برخی از محققان نانوذرات مبتنی بر پلیمر زیست تخریب‌پذیر را شناسایی کرده‌اند که ممکن است مسائل زیست‌محیطی مربوط به نانوذرات فلزی را کاهش دهند. برندهایی که نانوذرات را برای یک طرح توسعه پایدار به کار می‌گیرند، باید استانداردهای زیست‌محیطی را حفظ کرده و تحت ^۱AEC (مجوز انطباق با محیط زیست) قرار گیرند.

۳-۴- پتانسیل منسوجات هوشمند و واکنش‌پذیر با استفاده از نانوذرات

منسوجات و پوشاک حاوی نانوذرات، در زمینه‌های مد، مراقبت‌های بهداشتی، ورزش و اشکال نظامی، دستخوش تحولات چشمگیری هستند. برخی از این نوآوری‌ها شامل نقاط کوانتومی (QD) که در اثر گرما و نور تغییر رنگ می‌دهند، کریستال‌های فوتونی و مواد تغییر فاز دهنده ^۲(PCM) هستند که بر اساس محرک‌های مختلف محیطی نیز تغییر رنگ می‌دهند. به عنوان مثال، منسوجات مبتنی بر QD می‌توانند بسته به نوع نور، رنگ خود را تغییر دهند و در نتیجه عملکرد لباس‌های هوشمند تطبیقی را افزایش دهند. اجزای حساس به گرما و ترموکرومیک، هنگام قرار گرفتن در معرض گرما، رنگ یا بافت را تغییر می‌دهند و در لباس‌های ورزشی و لباس‌های کار مفید هستند. منسوجات حساس به pH هنگام قرار گرفتن در معرض تغییرات، رنگ یا بافت را تغییر می‌دهند و در مراقبت‌های بهداشتی برای نظارت بر عفونت‌ها استفاده می‌شوند. علاوه بر این، منسوجات هوشمند حاوی نانوذراتی مانند نانولوله‌های کربنی (CNTs) و نانوذرات نقره (AgNPs) به عنوان پوشیدنی برای نظارت بر سیگنال‌های فیزیولوژیکی از جمله ضربان قلب و دمای بدن استفاده می‌شوند که نتایج بیماران و ورزشکاران را بهبود می‌بخشند. آنها به عنوان پیشرفت‌های بزرگی در ارائه ادغام فناوری پیشرفته با کاربرد نساجی شناخته می‌شوند.

۵- نتایج

امروزه، فناوری نانو با معرفی طیف وسیعی از خواص عملکردی، صنعت نساجی را به طور قابل توجهی پیشرفت داده است. نانوذرات مختلف اکنون در منسوجات استاندارد هستند زیرا باعث افزایش عملکرد منسوجات می‌شوند و در عین حال طول عمر پارچه را

^۱ Authorization for Environmental Compliance

^۲ Phasechange Materials

افزایش می‌دهند و همچنین نیاز به آب را در رنگرزی به حداقل می‌رسانند. این رویکردهای تحول‌آفرین، نویدبخش ارائه عملکرد ارتقا یافته محصول همراه با تکنیک‌های جدید برای بهره‌وری بهتر تولید هستند. در عین حال، توسعه سریع ادغام فناوری نانو در منسوجات، نگرانی‌هایی را در مورد خطرات زیست‌محیطی و بهداشتی مرتبط با نانوذرات ایجاد می‌کند. سیستم‌های محیطی می‌توانند نانوذرات آزاد شده از منسوجات را هم از چرخه‌های شستشو و هم از تأسیسات تصفیه فاضلاب و محل‌های دفع جذب کنند که منجر به آسیب احتمالی به موجودات آبی و همچنین ورود به زنجیره‌های غذایی می‌شود. مسائل زیست‌محیطی بلندمدت از ماهیت دائمی و تجمع تدریجی نانوذرات ناشی می‌شود. بنابراین، صنعت نساجی باید از طریق اجرای روش‌های سنتز سازگارتر با محیط زیست همراه با تکنیک‌های تثبیت کارآمد، پایداری را به ارمغان بیاورد تا از نشت نانوذرات به محیط زیست جلوگیری شود. با این حال، پرداختن به چالش‌های مقیاس‌پذیری برای گذار از موفقیت‌های آزمایشگاهی به پذیرش گسترده صنعتی ضروری است. کاهش اثرات زیست‌محیطی را می‌توان از طریق روش‌های مناسب برای دفع ایمن و توسعه سیستم بازیافت حلقه بسته به دست آورد. آزمایش سمیت زیست‌محیطی به عنوان ابزاری حیاتی برای ارزیابی عملکرد کامل پایداری منسوجات مبتنی بر فناوری نانو عمل می‌کند تا ایمنی در مقایسه با خطرات بالقوه به حداکثر برسد. دولت و نهادهای نظارتی باید نقش کلیدی در رفتار، انحلال و تجمع زیستی نانوذرات در محیط زیست ایفا کنند. کاربرد موفقیت‌آمیز فناوری نانو در منسوجات نیازمند همکاری فعال بین دانشمندان، شرکای صنعتی و نهادهای نظارتی است. صنعت نساجی می‌تواند با اجرای صحیح اقدامات ایمنی و ایجاد راه‌حل‌های سازگار با محیط زیست و همچنین اتخاذ شیوه‌های پایدار، از فناوری نانو برای توسعه پایدار مقرون‌به‌صرفه استفاده کند و آینده‌ای سازگار با محیط زیست را پیش ببرد.

منابع

- ۱- Abdelrahman, M.S., Nassar, S.H., Mashaly, H., Mahmoud, S., Maamoun, D., ElSakhawy, M., Khattab, T.A., Kamel, S., ۲۰۲۰. Studies of polylactic acid and metal oxide nanoparticles-based composites for multifunctional textile prints. *Coatings* ۱۰ (۱), ۵۸.
- ۲- Abd-El salam K.A. Periakaruppan R. Rajeshkumar S. Agri-Waste and Microbes for Production of Sustainable Nanomaterials ۲۰۲۱ Elsevier.
- ۳- Abdelghaffar, R.A., El-Bisi, M.K., ۲۰۲۲. Improvement of the Dyeability and Salt-Free Dyeing for Wool Fabrics with Anionic Dyes by Pretreatment with Whey and Soybean Proteins. *J. Nat. Fibers* ۱۹ (۱۵), ۱۱۰۰۳-۱۱۰۲۰.
- ۴- Abdelslam, S.H., Mashaly, H.M., El-Thaloutha, A., Saad, M.A., Abdel-Aziz, M., ۲۰۲۱. An environmental friendly approach in printing of natural fabrics on using chitosan and chitosan nanoparticles. *Egypt. J. Chem.* ۶۴ (۸), ۴۲۸۳-۴۲۹۹.

- ۵- Abdul-Reda Hussein, U., Mahmoud, Z.H., Alaziz, K.A., Alid, M.L., Yasin, Y., Ali, F.K., Kianfar, E., ۲۰۲۳. Antimicrobial finishing of textiles using nanomaterials. *Braz. J. Biol.* ۸۴, e۲۶۴۹۴۷.
- ۶- Marimuthu, P., Thiruvengadam, G., Sundarrajan, S., ۲۰۲۰. Genotoxic effects of titanium dioxide nanoparticles in textiles: Implications for long-term exposure. *Journal of Nanotoxicology* ۱۰ (۲), ۱۸۷-۱۹۷.
- ۷- Massella, D., Giraud, S., Guan, J., Ferri, A., Salaün, F., ۲۰۱۹. Textiles for health: A review of textile fabrics treated with chitosan microcapsules. *Environ. Chem. Lett.* ۱۷, ۱۷۸۷-۱۸۰۰.
- ۸- Mat Lazim, Z., Salmiati, S., Marpongahtun, M., Arman, N.Z., Mohd Haniffah, M.R., Azman, S., Salim, M.R., ۲۰۲۳. Distribution of silver (Ag) and silver nanoparticles (AgNPs) in aquatic environment. *Water* ۱۵ (۷), ۱۳۴۹.
- ۹- Mehravani, B., Ribeiro, A.I., Zille, A., ۲۰۲۱. Gold nanoparticles synthesis and antimicrobial effect on fibrous materials. *Nanomaterials* ۱۱ (۵), ۱۰۶۷.
- ۱۰- Hossain, K.R., Akter, S., Nanjeba, M., Mahmud, M.A., ۲۰۲۴a. Properties and Performance of Biopolymers in Textile Applications. In: *Biopolymers in the Textile Industry: Opportunities and Limitations*. Singapore, Springer Nature Singapore, pp. ۴۱-۸۶.
- ۱۱- Hossain, M.T., Shahid, M.A., Limon, M.G.M., Hossain, I., Mahmud, N., ۲۰۲۴b. Techniques, applications, and challenges in textiles for sustainable future. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity* ۱۰۰۲۳۰.
- ۱۲- Hossain, M., Biswas, A.K., Parvez, S., Bain, S., ۲۰۱۳. Advanced functionalization of textiles by nanofinishing: A review. In: *In Proceedings of the International Conference on Mechanical, Industrial and Materials Engineering*, pp. ۱-۳.