

ایجاد هدایت الکتریکی در پارچه‌های پنبه‌ای و پلی‌استری با استفاده از پلی‌پیرول در فرآیند پلیمریزاسیون شیمیایی درجا و ارزیابی خواص عملکردی آنها

مجید سهرابی

گروه مهندسی نساجی، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

sohrabimajid307@gmail.com

تاریخ دریافت ۱۴۰۴/۰۹/۰۵ تاریخ پذیرش ۱۴۰۴/۰۶/۱۳

چکیده

در این پژوهش، ایجاد هدایت الکتریکی در پارچه‌های پنبه‌ای و پلی‌استری به روش پلیمریزاسیون شیمیایی درجا با استفاده از پلی‌پیرول (PPy) مورد بررسی قرار گرفت. عوامل کلیدی فرآیند شامل غلظت مونومر، نسبت مولی آغازگر به مونومر و نسبت دوپه‌کننده به مونومر بررسی گردید. نتایج نشان داد که در شرایط بهینه، مقاومت الکتریکی سطح پارچه پنبه‌ای از مقدار اولیه در محدوده 10^{14} اهم بر مربع به ۵۰ اهم بر مربع کاهش یافت و در پارچه پلی‌استر این مقدار از محدوده 10^{14} اهم بر مربع به ۲۱۰ اهم بر مربع رسید. بررسی اثر غلظت مونومر نشان داد که با افزایش غلظت پیرول تا ۰/۱ مولار، رسانایی به‌طور قابل‌توجهی بهبود یافت، اما در غلظت‌های بالاتر مانند ۰/۲ مولار به دلیل تجمع ذرات و ایجاد پوشش‌های ناهمگن، مقاومت الکتریکی افزایش پیدا کرد. نتایج تحلیل آماری (ANOVA) نشان داد که اختلاف مشاهده‌شده بین نمونه‌های پوشش‌داده‌شده و شاهد، در سطح اطمینان ۹۵٪ برای هر دو نوع پارچه معنادار است. آزمون‌های مکانیکی نشان دادند که پوشش‌دهی تغییر معناداری در استحکام و ازدیاد طول نمونه‌ها ایجاد نکرده است. همچنین آزمون ثبات شست‌وشویی طبق استاندارد ISO 105-C01:1992 نشان داد که رسانایی پس از ۲۰ چرخه شست‌وشو به‌طور نسبی حفظ گردید.

واژگان کلیدی: پلی‌پیرول، پارچه رسانا، پلیمریزاسیون شیمیایی درجا، مقاومت سطحی الکتریکی

Creating Electrical Conductivity in Cotton and Polyester Fabrics using In-Situ Chemical Polymerization of Polypyrrole Process and Evaluating Their Functional Properties

Majid Sohrabi

¹Department of Textile Engineering, Faculty of Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

sohrabimajid307@gmail.com

Abstract

In this study, the creation of electrical conductivity in cotton and polyester fabrics by in situ chemical polymerization using polypyrrole (PPy) was investigated. The key process factors included monomer concentration, initiator to monomer molar ratio, and dopant to monomer ratio were investigated. The results showed that under optimal conditions, the electrical surface resistance of cotton fabric decreased from the initial value in the range of 1014 ohms/square to 50 ohms/square, and in polyester fabric, this value increased from the range of 1014 ohms/square to 210 ohms/square. The effect of monomer concentration was investigated, showing that the conductivity improved significantly with increasing pyrrole concentration up to 0.1 M, but at higher concentrations such as 0.2 M, the electrical resistance increased due to particle aggregation and the formation of heterogeneous coatings. The results of statistical analysis (ANOVA) showed that the observed difference between the coated and control samples was significant at the 95% confidence level for both types of fabrics. Mechanical tests showed that the coating did not cause a significant change in the strength and elongation of the samples. Also, the washing stability test according to ISO 105-C01:1992 standard showed that the conductivity was relatively maintained after 20 washing cycles.

Keywords: Polypyrrole, Conductive Fabric, In-situ Chemical Polymerization, Surface Electrical Resistance

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر، با تکامل فناوری‌های پوشیدنی و افزایش تقاضا برای سامانه‌های هوشمند انعطاف‌پذیر، منسوجات رسانا به‌عنوان یکی از عرصه‌های پیشرو در ترکیب علوم نساجی، مواد و الکترونیک مطرح شده‌اند. این منسوجات قادرند خواص سنتی پارچه از قبیل انعطاف‌پذیری، سبکی، تنفس‌پذیری و راحتی پوشش را حفظ کرده و در عین حال جریان الکتریکی را هدایت کنند. چنین ویژگی‌هایی باعث شده است که کاربردهای گسترده‌ای از قبیل حسگرهای پوشیدنی، الکترودهای زیستی، سامانه‌های گرمایشی و ضدالکترواستاتیک، ذخیره‌سازهای انرژی و محافظت در برابر تابش الکترومغناطیسی ایجاد شوند [۱].

با توسعه روزافزون فناوری‌های نوین در حوزه نساجی و منسوجات هوشمند، یکی از زمینه‌های مهم و پرکاربرد، رساناسازی منسوجات به‌منظور ایجاد قابلیت‌های الکتریکی در کنار خواص سنتی آن‌ها همچون نرمی، انعطاف‌پذیری و قابلیت شست‌وشو است. منسوجات رسانا به دلیل خواص ویژه‌ای که ارائه می‌دهند، در کاربردهایی مانند حسگرهای پوشیدنی، الکترودهای زیستی، تجهیزات ذخیره‌سازی انرژی، منسوجات ضدالکتریسیته ساکن و حوزه‌های پزشکی و نظامی اهمیت یافته‌اند [۲].

با این حال، بیشتر الیاف و پارچه‌های رایج نظیر پنبه و پلی‌استر ذاتاً عایق الکتریکی بوده و مقاومت سطحی آن‌ها در محدوده‌ی 10^8 تا 10^{14} اهم بر مربع قرار دارد. بنابراین، ایجاد رسانایی الکتریکی در این منسوجات نیازمند به‌کارگیری روش‌های پوشش‌دهی و اصلاح سطحی

مناسب است. در دهه‌های اخیر، روش‌های مختلفی برای ایجاد رسانایی در منسوجات مورد بررسی قرار گرفته است. این روش‌ها شامل پوشش‌دهی با فلزات، استفاده از نانوذرات رسانا، افزودن کربن سیاه یا نانولوله‌های کربنی و به ویژه استفاده از پلیمرهای هادی می‌باشد. در میان این روش‌ها، استفاده از پلیمرهای هادی به دلیل فرآیندپذیری مناسب، هزینه نسبتاً کم، امکان اعمال بر روی بسترهای متنوع نساجی و ایجاد پوشش‌های پایدار و یکنواخت توجه ویژه‌ای را به خود جلب کرده است [۳].

از طرف دیگر، استفاده از پلیمرهای ذاتاً رسانا^۱ به دلیل سهولت سنتز، پایداری شیمیایی و قابلیت کنترل خواص الکتریکی، جایگاه ویژه‌ای یافته است. پلی‌پیرول^۲ (PPy) به‌عنوان یک پلیمر مزدوج با ساختار π -متصل، قابلیت انجام واکنش‌های برگشت‌پذیر اکسایش-کاهش را دارد و می‌تواند به راحتی در سطح منسوجات با روش‌های مختلف به‌ویژه پلیمریزاسیون شیمیایی درجا^۳ پوشش داده شود؛ روشی که به دلیل یکنواختی پوشش و نیاز کم تجهیزات در کاربردهای صنعتی محبوب است [۴، ۵].

مطالعات پیشین نشان داده‌اند که نوع بستر نساجی و ساختار فیزیکی آن نقش مهمی در کارایی پوشش پلی‌پیرول ایفا می‌کند. برای نمونه، پارچه‌های سلولزی مانند پنبه به دلیل دارا بودن گروه‌های عاملی هیدروکسیل و زبری سطحی ذاتی، چسبندگی بالاتری برای پوشش پلیمرهای هادی نشان می‌دهند، در حالی که پلی‌استر

¹ Intrinsically Conductive Polymers

² Polypyrrole, PPy

³ In-situ

به دلیل سطح صاف و فاقد گروه‌های فعال شیمیایی، معمولاً به پیش‌تیمار یا شرایط بهینه‌سازی شده در فرآیند نیاز دارد [۶].

علاوه بر بستر، شرایط فرآیند سنتز نیز بر میزان رسانایی نهایی منسوجات تأثیرگذار است. در این میان، نسبت مولی اکسیدکننده به مونومر، نسبت دوپه‌کننده به مونومر و غلظت مونومر از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر محسوب می‌شوند. افزایش بیش از حد نسبت اکسیدکننده می‌تواند منجر به تخریب زنجیرهای پلیمری و کاهش رسانایی شود، در حالی که مقادیر بهینه آن می‌تواند تشکیل شبکه پلیمری یکنواخت‌تر و رساناتر را تسهیل نماید [۷]. به همین ترتیب، عامل دوپه‌کننده مانند سدیم دودسیل‌بنزن‌سولفونات (SDBS)، با وارد شدن در ساختار پلی‌پیرول، بار الکتریکی و تحرک حامل‌های بار را افزایش داده و در نهایت منجر به افزایش رسانایی می‌شود. با این حال، مقادیر بیش از حد عامل دوپه‌کننده می‌تواند به دلیل ایجاد اختلالات ساختاری، موجب کاهش رسانایی گردد [۸].

پلیمریزاسیون درجا با استفاده از مونومر پیرول و اکسیدکننده‌هایی چون آهن (III) کلرید ($FeCl_3$) در حضور دوپه‌کننده‌های آنیونی مانند پارا-تولون سولفونیک اسید (TsOH)، سدیم دودسیل‌بنزن‌سولفونات (SDBS) و ۵،۱-نفتالین‌دی‌سولفونیک اسید (NDSA) انجام می‌شود. در این فرآیند، تشکیل پلی‌پیرول در سطح پارچه موجب ایجاد پوشش هادی یکنواخت و با چسبندگی مناسب می‌گردد. بررسی‌های متعدد نشان داده‌اند که نوع و

ساختار مولکولی دوپه‌کننده بر هدایت‌پذیری، ریخت‌شناسی ساختاری، چسبندگی و پایداری حرارتی پلی‌پیرول تأثیر به‌سزایی دارد [۹].

یکی از دوپه‌کننده‌هایی که اخیراً توجه زیادی را جلب کرده، SDBS است. این ترکیب آنیونی با زنجیره هیدروکربنی بلند، علاوه بر نقش دوپانت الکترون، عملکرد فعال سطحی نرم ایفا کرده و قادر است تشکیل نانوالیاف یا نانولوله‌های با ساختار منظم و چسبندگی بالا بر روی پارچه را تسهیل نماید. این ویژگی باعث می‌شود که پوشش پلی‌پیرول - سدیم دودسیل‌بنزن‌سولفونات نه تنها هدایت الکتریکی بالاتری داشته باشد، بلکه در برابر سایش و خستگی مکانیکی پایدارتر شود [۱۰-۱۲].

بنابراین، توجه مضاعفی به بررسی اثرات SDBS به‌عنوان عامل دوپه‌کننده و فعال سطحی نرم بر پوشش‌دهی پلی‌پیرول صورت گرفته است، اما مطالعات جامع و نظام‌مند بر روی بسترهای منسوجی متفاوت مانند پنبه و پلی‌استر، در شرایط مشابه، هنوز محدود هستند [۱۳-۱۵]. پارچه پنبه‌ای که شامل الیاف سلولزی طبیعی می‌باشد با ساختار متخلخل و گروه‌های عاملی سطحی مانند هیدروکسیل، توانایی جذب بالایی دارد و محیطی مناسب برای تشکیل پوشش‌های یکنواخت PPy فراهم می‌سازد. برعکس، پارچه پلی‌استر به‌عنوان یک پارچه با الیاف مصنوعی و خواص سطحی آب‌گریز، به‌علت عدم حضور گروه‌های عاملی سطحی فعال، نیازمند پیش‌عملیات یا اصلاح سطحی است تا پوشش‌دهی مطلوب حاصل گردد [۱۶-۱۸]. بررسی رفتار پلی‌پیرول - سدیم دودسیل‌بنزن

البسه گرمایشی، تجهیزات نظامی و محافظت حرارتی قابل استفاده است. همچنین این منسوجات به دلیل تغییر مقاومت الکتریکی در برابر کشش، امکان استفاده در حسگرهای پوشیدنی را فراهم می کنند؛ به ویژه برای پایش حرکات بدن، علائم حیاتی یا فشارهای مکانیکی که در کاربردهای پزشکی و ورزشی اهمیت دارند [۲۲].

از سوی دیگر، انعطاف پذیری و قابلیت تطبیق پوشش پلی پیرول با بسترهای سبک وزن مانند پنبه و پلی استر، زمینه را برای استفاده از این منسوجات در تولید الکترودهای زیستی فراهم ساخته است؛ الکترودهایی که می توانند در سیستم های تحریک عضلانی، پایش الکتروفیزیولوژیک یا سامانه های مراقبت سلامت به کار روند [۲۱،۳].

افزون بر این، ساختار متخلخل و رسانای این منسوجات آن ها را به گزینه ای مناسب برای استفاده در فناوری های ذخیره سازی انرژی تبدیل کرده است؛ به ویژه در طراحی ابرخازن های انعطاف پذیر و پوشیدنی که نیازمند الکترودهای سبک، مقاوم و با ظرفیت بالا هستند [۲۲].

در نهایت، با بهره گیری از خواص ذاتی پلی پیرول یا افزودن نانوذراتی مانند نقره یا گرافن، این منسوجات قابلیت ایجاد پوشاک پزشکی با خاصیت آنتی باکتریال را نیز دارند که در بیمارستان ها، تجهیزات درمانی و مراقبت های بهداشتی قابل بهره برداری اند [۲۳].

در سال های اخیر، استفاده از پلی پیرول برای رسانا سازی منسوجات به ویژه از طریق پلیمریزاسیون درجا بسیار مورد توجه پژوهشگران بوده است. این روش نه تنها امکان

سولفونات بر روی این دوگانه پارچه، امکان درک نقش ساختار منسوج بر کیفیت پوشش و عملکرد الکتریکی نهایی را فراهم می کند.

در این زمینه، آثار متعددی گزارش شده اند؛ برای نمونه، لیو^۱ و همکاران پوشش دهی درجا روی پنبه با پلی پیرول را با هدایت الکتریکی بالا و پایداری شست و شو نشان دادند [۱۹].

شانگ^۲ و همکاران در یک پژوهش متفاوت با استفاده از روش پوشش دهی بخار^۳، موفق به سنتز یکنواخت لایه ای از پلی پیرول بر روی بستر منسوج شدند. این لایه ی پلی پیرولی، به واسطه ی رسانایی الکتریکی ذاتی خود، توانایی تبدیل انرژی الکتریکی به گرما را نشان داد و به عنوان پوشش گرمایی مؤثر برای تولید منسوجات گرمایشی انعطاف پذیر به کار گرفته شد [۲۰]. همچنین، کارینگلا^۴ و همکاران با سنتز پارچه های کتان رسانا، قابلیت کاربرد در پوشاک فنی را بررسی نموده اند اما تمرکز خاصی بر اثر SDBS در پوشش دهی این منسوجات انجام نشده است [۲۱].

پژوهش های انجام شده در این زمینه می تواند نقش مهمی در توسعه منسوجات هوشمند ایفا کند. یکی از کاربردهای مهم آنها، استفاده از منسوجات رسانای پوشش یافته با پلی پیرول در سامانه های گرمایشی قابل کنترل است؛ به طوری که با عبور جریان الکتریکی، گرمای یکنواخت و پایداری در سطح پارچه ایجاد می شود که در

¹ Liu

² Shang

³ Vapor Phase Polymerization

⁴ Caringella

منسوجات هوشمند را در زمینه‌هایی چون مراقبت‌های پزشکی، نظامی و محافظتی برجسته ساخت [۲۳].

ورنر^۴ و همکاران در بررسی خود روی پارچه‌های رسانا برای سامانه‌های پوشیدنی، تأکید کردند که استفاده از پلیمرهای رسانا به‌ویژه پلی‌پیرول می‌تواند پاسخ‌دهی الکتریکی مناسبی در مقابل محرک‌های فیزیکی مانند کشش یا فشار ایجاد کند. آن‌ها استفاده از منسوجات رسانا را به‌عنوان حسگرهای پوشیدنی برای پایش وضعیت فیزیولوژیکی بدن پیشنهاد نمودند [۲۴].

شانگ و همکاران نیز با بهره‌گیری از پلیمرهای رسانا در طراحی منسوجات هوشمند، ساختارهای چندلایه‌ای متشکل از پلی‌پیرول را به‌کمک روش پلیمریزاسیون بخار تولید کردند. آن‌ها نشان دادند که این ساختارها، به دلیل کنترل دقیق ضخامت و یکنواختی پوشش، قادر به ایجاد اثر گرمایش سطحی مناسبی هستند و می‌توانند در ساخت پوشاک گرمایشی یا تجهیزات الکتروگرمایی سبک‌وزن مورد استفاده قرار گیرند [۲۵].

ژی و همکاران با استفاده از پلیمریزاسیون درجا پلی‌پیرول بر روی پارچه پنبه‌ای، حسگر کرنشی انعطاف‌پذیری توسعه دادند که نه تنها از رسانایی بالایی برخوردار بود، بلکه مقاومت خوبی در برابر شست‌وشو و تغییرات مکانیکی از خود نشان داد [۲۶]. ژیا^۵ و همکاران نشان دادند که منسوجات پوشش‌داده‌شده با پلیمرهای رسانا مانند پلی‌پیرول می‌توانند به‌عنوان الکترودهای انعطاف‌پذیر در سلول‌های خورشیدی نساجی کاربرد یابند. آن‌ها بر اهمیت

پوشش‌دهی یکنواخت را فراهم می‌کند، بلکه چسبندگی و خواص مکانیکی پوشش را نیز بهبود می‌بخشد.

هونکنس^۱ و همکاران نشان دادند که اگر سطح بستر مانند چوب‌پلیمر که ترکیب مواد چوبی با پلیمرهای مصنوعی است که تحت عنوان Wood-Polymer Composites (WPCs) شناخته می‌شوند، با روش پلاسما پردازش شود، باعث می‌شود که پیوندپذیری آن افزایش می‌یابد و در نتیجه، پلی‌پیرول بهتر به سطح می‌چسبد. این فرایند باعث افزایش دوام و یکنواختی پوشش رسانا می‌شود [۱۹]. خو^۲ و همکاران با توسعه نانوساختارهای کامپوزیتی کلسان متشکل از پلی‌پیرول، نشان دادند که ترکیب این پلیمر با ماتریس‌های انعطاف‌پذیر می‌تواند خواص الکتریکی و مکانیکی مناسبی برای استفاده در منسوجات کش‌پذیر ایجاد کند. نتایج آن‌ها حاکی از آن بود که با کنترل شرایط پلیمریزاسیون، می‌توان به ساختارهایی با چسبندگی خوب و هدایت الکتریکی بالا دست یافت [۲۲]. در مطالعه‌ای توسط رفیع^۳ و همکاران، یک پوشش چندمنظوره بر روی پارچه پنبه‌ای اعمال شد که ضمن افزایش رسانایی، خواص ضدباکتری و مقاومت شعله نیز به آن اضافه شده بود. آن‌ها با بهره‌گیری از پلی‌پیرول در ترکیب با نانوذرات، موفق به تولید پوششی پایدار شدند که حتی پس از چندین بار شست‌وشو نیز خواص عملکردی خود را حفظ می‌کرد. این مطالعه کاربردهای بالقوه‌ی

¹ Hünnekens

² Xu

³ Rafi

⁴ Veerender

⁵ Xia

ترکیب خواص الکتریکی و مکانیکی در توسعه منسوجات برداشت‌کننده انرژی تأکید کردند [۲۷].

هوا^۱ در مطالعات خود، ضرورت پیش عملیات سطحی را در بهبود عملکرد پوشش‌های فعال یادآوری کرده است [۲۸].

[۲۹]. از دیدگاه کاربردی، پایداری پوشش‌های رسانا در برابر شست‌وشو از اهمیت زیادی برخوردار است. منسوجات رسانا در صورتی برای استفاده واقعی مناسب هستند که رسانایی آن‌ها پس از چندین چرخه شست‌وشو حفظ گردد. تحقیقات نشان داده‌اند که پلی‌پیرول به دلیل نامحلول بودن در آب، ذاتاً مقاومت مناسبی در برابر شست‌وشو دارد، اما میزان چسبندگی آن به بستر و شرایط فرآیند سنتز می‌تواند پایداری نهایی را به شدت تحت تأثیر قرار دهد [۳۰].

با توجه به مروری که بر پیشینه پژوهش‌های صورت‌گرفته انجام شد، به‌وضوح می‌توان دریافت که علیرغم پیشرفت‌های قابل‌توجه در توسعه منسوجات رسانا بر پایه پلی‌پیرول، هنوز برخی جنبه‌های بنیادی این حوزه، به‌ویژه در ارتباط با اثر ساختاری و عملکردی دوپه‌کننده‌های خاص مانند سدیم دودسیل بنزن سولفونات (SDBS) بر روی بسترهای گوناگون نساجی، به‌طور جامع بررسی نشده است.

بررسی پیشینه پژوهش‌ها نشان می‌دهد که بیشتر مطالعات تنها بر یک پارچه خاص (مثلاً پنبه یا پلی‌استر) تمرکز داشته و کمتر پژوهشی به‌طور هم‌زمان به مقایسه

عملکرد پلی‌پیرول بر روی هر دو بستر با شرایط فیزیکی متفاوت پرداخته است. همچنین، در بسیاری از مقالات، پارامترهای مؤثر فرآیند به‌صورت جداگانه بررسی شده و کمتر تحقیقی وجود دارد که تأثیر ترکیبی پارامترهای کلیدی (اکسیدکننده، دوپه‌کننده و غلظت مونومر) را همراه با تحلیل خواص مکانیکی و ثبات شست‌وشویی در کنار رسانایی الکتریکی ارائه کرده باشد.

از این رو، هدف اصلی پژوهش حاضر، بررسی اثر ترکیب دوپه‌کننده‌ی SDBS و اکسیدکننده‌ی $FeCl_3$ بر پلیمریزاسیون شیمیایی درجا پلی‌پیرول روی بسترهای پنبه‌ای و پلی‌استری و تحلیل تأثیر آن بر خواص ریخت‌شناسی، هدایت الکتریکی، خواص مکانیکی و عملکرد ثبات شست و شویی است. در این پژوهش، با استفاده از پلیمریزاسیون شیمیایی درجا، پلی‌پیرول به‌طور مستقیم بر روی پارچه‌های پنبه‌ای و پلی‌استری در حضور عامل دوپه‌کننده‌ی نوین SDBS و اکسیدکننده $FeCl_3$ سنتز می‌شود. نوآوری در استفاده از SDBS، مقایسه بسترهای منسوجی طبیعی و مصنوعی که از نظر شیمی سطحی، جذب‌پذیری و قطبیت تفاوت اساسی دارند و بررسی جامع ویژگی‌های الکتریکی، ریخت‌شناسی، خواص مکانیکی و عملکرد ثبات شست و شویی، این پژوهش را می‌تواند نسبت به کارهای مشابه متمایز کند. به‌طور مشخص، نوآوری اصلی مقاله در کاربرد فرآیند پلیمریزاسیون شیمیایی درجا برای ایجاد رسانایی الکتریکی در هر دو بستر پنبه و پلی‌استر و بررسی هم‌زمان اثر عوامل کلیدی شامل غلظت مونومر، نسبت

^۱ Hu

اکسیدکننده به مونومر و نسبت دوپه‌کننده به مونومر بر خواص الکتریکی، مکانیکی و ثبات شست‌وشویی می‌باشد؛ نکته‌ای که کمتر به صورت جامع در پژوهش‌های پیشین بررسی شده است.

۲- تجربیات

۲-۱- مواد

در این پژوهش، جهت انجام فرایند پلیمریزاسیون شیمیایی درجا، از آهن (III) کلرید ($FeCl_3$) به عنوان اکسیدکننده و آغازگر واکنش، و از سدیم دودسیل بنزن سولفونات (SDBS) به عنوان عامل دوپ‌کننده استفاده شد. هر دو ماده از شرکت Sigma-Aldrich تهیه گردید. مونومر رسانای پیرول با خلوص ۹۸٪ از شرکت Merck آلمان تهیه و به عنوان ماده اولیه جهت ایجاد خاصیت رسانایی در منسوجات مورد استفاده قرار گرفت. به منظور بررسی اثر پوشش‌دهی بر خواص الکتریکی، از پارچه‌های تجاری متداول پنبه خالص و پلی‌استر خالص با ساختار بافت تافته استفاده شد. پارچه پنبه‌ای دارای تراکم ۱۷ تار بر سانتی‌متر، تراکم پود ۲۰ پود بر سانتی‌متر، وزن پایه ۱۸۰ گرم بر مترمربع و ضخامت ۳۰۰ میکرومتر بود. پارچه پلی‌استری نیز با تراکم ۲۴ تار و ۲۴ پود در هر سانتی‌متر مربع، وزن پایه ۱۳۰ گرم بر مترمربع و ضخامت ۲۰۰ میکرومتر مشخص گردید. با وجود تلاش برای انتخاب پارچه‌های با شرایط ساختمانی مشابه، به دلیل محدودیت‌های موجود در بازار، تفاوت‌هایی در تراکم و وزن پایه میان نمونه پنبه و پلی‌استر وجود داشت. هدف اصلی از انتخاب این دو پارچه، بررسی اثر ماهیت ذاتی

الیاف طبیعی (پنبه) و مصنوعی (پلی‌استر) بر کارایی فرآیند پوشش‌دهی و ایجاد رسانایی بوده است. تمامی مواد شیمیایی بدون انجام هرگونه عملیات بعدی مورد استفاده قرار گرفتند.

۲-۲- تجهیزات، لوازم و دستگاه‌ها

در این مطالعه، جهت انجام مراحل مختلف آماده‌سازی و آزمون نمونه‌ها، از مجموعه‌ای از تجهیزات و ابزارهای آزمایشگاهی استفاده گردید. برای توزین دقیق مواد شیمیایی و نمونه‌ها، از ترازو دیجیتال آزمایشگاهی استفاده شد. عملیات همگن‌سازی محلول‌های واکنش با بهره‌گیری از همزن مغناطیسی به همراه مگنت آزمایشگاهی صورت گرفت. ابزارهایی نظیر قاشقک و میکروپیپت جهت برداشت و انتقال دقیق مواد جامد و مایع به کار گرفته شد. برای تهیه محلول‌ها و انجام فرآیندهای شیمیایی، از بشرهای شیشه‌ای با حجم ۵۰ میلی‌لیتر، استوانه مدرج و ظروف شیشه‌ای مناسب استفاده گردید.

به منظور اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی نمونه پارچه‌های تهیه‌شده، از مولتی‌متر دیجیتال مدل YX-9205A+ ساخت شرکت Yaxun بهره گرفته شد. همچنین جهت خشک‌کردن نمونه‌ها پس از فرآیند پوشش‌دهی، از آون آزمایشگاهی با دمای کنترل‌شده استفاده گردید. برای بررسی تغییرات سطحی و مشاهده مورفولوژی نمونه‌ها، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل TESCAN-Vega3 ساخت جمهوری چک به کار گرفته شد. اندازه‌گیری ضخامت نمونه‌ها، پیش و پس از اعمال پوشش، با استفاده از میکرومتر خارج‌سنج با گستره

اندازه‌گیری ۰ تا ۲۵ میلی‌متر و دقت ۰/۰۱ میلی‌متر انجام گرفت. برای ارزیابی خواص مکانیکی (استحکام کششی و ازدیاد طول تا حد پارگی) نمونه‌های پارچه‌ای نیز از دستگاه تست کشش مدل STM-20 ساخت شرکت SANTAM استفاده شد.

۲-۳-۲ روش‌ها

۲-۳-۲-۱ آماده‌سازی پارچه‌های تهیه‌شده برای

پوشش‌دهی

برای آماده‌سازی پارچه و از بین بردن مواد اضافی سطح آن، ابتدا پارچه‌های تهیه‌شده توسط آب مقطر و محلول شوینده، شست‌وشو داده می‌شود، سپس پارچه‌ها در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد توسط آون آزمایشگاهی خشک می‌گردد تا برای پوشش‌دهی با مواد انتخابی، مهیا شود.

۲-۳-۲-۲ پوشش‌دهی غوطه‌وری پارچه‌ها به منظور

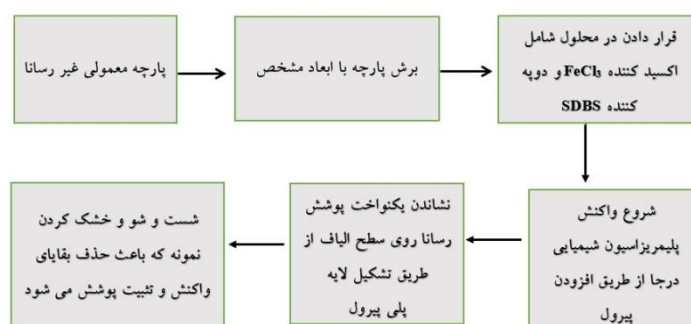
کاهش مقاومت الکتریکی از طریق پلیمریزاسیون

شیمیایی درجا

نمونه‌های پارچه‌ای آماده‌شده، به ابعاد ۳×۲ سانتی‌متر مربع برش داده شدند تا در مقیاس آزمایشگاهی، امکان بررسی تأثیر مواد افزودنی بر کاهش مقاومت الکتریکی و افزایش رسانایی فراهم گردد. هر نمونه در ۵۰ میلی‌لیتر

محلول آب مقطر حاوی ترکیبات فعال شامل آهن (III) کلرید ($FeCl_3$) به‌عنوان اکسیدکننده و آغازگر واکنش و سدیم دودسیل بنزن سولفونات (SDBS) به‌عنوان عامل دوپه‌کننده، با غلظت‌های مشخص، غوطه‌ور گردید. به منظور همگن‌سازی کامل محلول و توزیع یکنواخت مواد روی سطح پارچه، هم‌زدن مغناطیسی به مدت ۶۰ دقیقه در دمای محیط انجام شد. برای بررسی تأثیر غلظت مواد فعال، ترکیب درصد‌های مختلفی از $FeCl_3$ و SDBS در آزمون‌ها به کار گرفته شد.

پس از اشباع کامل نمونه در محلول، مقدار مشخصی از مونومر پیرویل با خلوص ۹۸٪ به‌صورت قطره‌ای و با استفاده از میکروپیپت به محلول اضافه شد. فرآیند پلیمریزاسیون شیمیایی درجا تحت هم‌زدن مغناطیسی به مدت ۲ ساعت ادامه یافت. در طول این فرآیند، پوشش رسانای پلی‌پیرویل بر سطح الیاف پارچه تشکیل گردید. در پایان، نمونه‌ها با آب مقطر شست‌وشو داده شده و سپس در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت در آون آزمایشگاهی خشک گردیدند. روند نمای انجام فرآیند ایجاد هدایت الکتریکی در پارچه‌ها در شکل نشان داده شده است.



شکل ۱- روند نمای فرآیند ایجاد هدایت الکتریکی در پارچه‌ها.

۲-۴- بررسی خواص نمونه ها

۲-۴-۱- اندازه گیری مقاومت الکتریکی سطح

برای ارزیابی رسانایی الکتریکی نمونه‌های پوشش داده‌شده، از روش دو نقطه‌ای (two-point probe) با استفاده از مولتی‌متر دیجیتال یاکسون مدل YX-9205A+ استفاده شد. در این روش، مقاومت الکتریکی ظاهری (R) با اتصال دو الکتروود فلزی اندازه‌گیری دستگاه مولتی‌متر به دو سر نمونه پارچه‌ای (با ابعاد ۳×۲ سانتی‌متر مربع) در امتداد جهت طولی اندازه‌گیری گردید. الکتروودهای اندازه‌گیری با فواصل مشخص و ثابت روی سطح پارچه قرار داده شدند تا مسیر جریان الکتریکی از یک سر پارچه به سر دیگر برقرار گردد. مقدار مقاومت نمایش داده‌شده توسط دستگاه، به‌عنوان مقاومت الکتریکی ظاهری نمونه ثبت شد.

با توجه به اینکه مقاومت اندازه‌گیری شده وابسته به ابعاد نمونه و فاصله بین الکتروودهای اندازه‌گیری می‌باشد، برای مقایسه بهتر میان نمونه‌ها، از رابطه‌ی شماره ۱ جهت محاسبه مقاومت سطحی (Rs) استفاده گردید:

$$R_s = R \times \frac{W}{L} \quad (1)$$

که در آن R مقاومت الکتریکی اندازه‌گیری شده برحسب اهم، W عرض مسیر جریان برحسب سانتی‌متر و L فاصله بین الکتروودهای اندازه‌گیری برحسب سانتی‌متر می‌باشد [۳۱].

در این پژوهش، برای استاندارد سازی اندازه‌گیری‌ها، فاصله بین الکتروودهای اندازه‌گیری برابر با عرض نمونه و معادل ۲ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. انتخاب فاصله ۲

سانتی‌متر بین الکتروودها، مطابق با استانداردهای رایج، امکان مقایسه پذیری نتایج را با سایر مطالعات فراهم می‌کند و از اثرات احتمالی لبه‌های نمونه در اندازه‌گیری جلوگیری می‌نماید. این روش به دلیل تأمین شرایط پایدار و استاندارد در اندازه‌گیری، دقت و صحت نتایج را افزایش می‌دهد. بنابراین ضریب $\frac{W}{L} = 1$ گردید و مقاومت سطحی با واحد اهم بر مربع (Ω/\square) معادل مستقیم مقدار مقاومت ظاهری اندازه‌گیری شده ثبت گردید که با فرض $W=L$ می‌توان فرض نمود که R تقریباً معادل با Rs می‌باشد.

واحد اهم بر مربع برای مقاومت سطحی به این معناست که این کمیت مستقل از اندازه فیزیکی نمونه است و می‌توان از آن برای مقایسه خواص رسانایی نمونه‌های مختلف استفاده نمود. برای دقت بیشتر، اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی هر نمونه در سه نقطه مختلف و در دو جهت تار و پود انجام شد و میانگین آن به‌عنوان مقاومت نهایی در نظر گرفته شد. کلیه مقادیر مقاومت سطحی گزارش شده در جداول نتایج شامل میانگین \pm انحراف معیار حاصل از سه تکرار مستقل است.

دلیل استفاده از مقاومت سطحی (Ω/sq) به جای مقاومت کلی (Ω) این است که مقاومت سطحی، یک معیار استاندارد و مستقل از ابعاد نمونه برای گزارش رسانایی الکتریکی منسوجات رسانیا به شمار می‌رود و امکان مقایسه‌پذیری نتایج را میان پژوهش‌های مختلف فراهم می‌سازد. انتخاب مقاومت سطحی به‌عنوان معیار اصلی، به این دلیل است که پارچه‌ها ماهیتی صفحه‌ای و دوبعدی

نمونه‌ها با ابعاد 20×150 میلی‌متر طبق جهت تار در پارچه‌های تار و پودی، در شرایط محیطی آزمایشگاهی شامل دمای 25 ± 2 درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی 5 ± 65 درصد مورد آزمون قرار گرفتند. سرعت اعمال نیرو 10 میلی‌متر بر دقیقه تنظیم شده و گیره‌های دستگاه به نحوی تنظیم گردید که از لغزش یا آسیب نمونه جلوگیری شود. به منظور افزایش دقت آماری، هر آزمایش حداقل سه بار تکرار شده و میانگین مقادیر به دست آمده به عنوان نتیجه نهایی گزارش گردید. این آزمون با هدف بررسی تأثیر فرآیند پلیمریزاسیون شیمیایی و پوشش‌دهی پلی‌پیرول بر ساختار و پایداری مکانیکی پارچه‌ها اجرا شد.

۲-۴-۴- اندازه گیری ثبات شست و شویی پارچه ها

در این پژوهش، به منظور ارزیابی دوام پوشش رسانای پلی‌پیرول اعمال شده بر سطح پارچه‌های پنبه‌ای و پلی‌استری، آزمون ثبات شست‌وشویی بر اساس استاندارد بین‌المللی ISO 105-C01:1992 انجام گردید.

این آزمون برای شبیه‌سازی شرایط شست‌وشوی خانگی در دمای متوسط طراحی شده است و امکان مقایسه‌ی پایداری فیزیکی و شیمیایی مواد پوششی در برابر شست‌وشو را فراهم می‌سازد. نمونه‌های پوشش‌داده شده با ابعاد 3×2 سانتی‌متر مربع، در محلولی شامل 5 گرم بر لیتر صابون خنثی (تهیه شده مطابق مشخصات استاندارد) در آب مقطر با سختی استاندارد قرار گرفتند. فرآیند شست‌وشو در دمای 40 درجه سانتی‌گراد به مدت 30 دقیقه در یک حمام آزمایشگاهی دارای همزن مغناطیسی و سرعت همزدن یکنواخت انجام شد. نسبت جرم نمونه به

دارند و رسانایی آن‌ها بیشتر به ویژگی‌های سطحی وابسته است تا حجم. از این رو، گزارش مقاومت سطحی امکان مقایسه دقیق‌تر عملکرد نمونه‌ها را با مطالعات مشابه فراهم می‌سازد.

۲-۴-۲- اندازه‌گیری ضخامت نمونه‌ها قبل و بعد از پوشش‌دهی

به منظور بررسی تغییرات ظاهری نمونه‌ها ناشی از میزان قرارگیری پلی‌پیرول در هنگام پوشش‌دهی با مواد مختلف در عملیات پلیمریزاسیون شیمیایی پیروول، ضخامت نمونه‌ها قبل و بعد از پوشش‌دهی با ضخامت سنج میکرومتر اندازه‌گیری گردید. میزان قرارگیری و نشست پلی‌پیرول با $A(\%)$ نمایش داده می‌شود که با استفاده از رابطه شماره ۲ محاسبه می‌گردد:

$$A(\%) = \left(\frac{W_2 - W_1}{W_1} \right) \times 100 \quad (2)$$

در این رابطه، W_2 ضخامت نمونه‌ها بعد از پوشش‌دهی و W_1 ضخامت نمونه‌ها قبل از پوشش‌دهی با پلی‌پیرول می‌باشد.

۲-۴-۳- اندازه گیری خواص مکانیکی پارچه ها

برای ارزیابی تغییرات خواص مکانیکی پارچه‌ها قبل و بعد از فرآیند پوشش‌دهی رسانا، از آزمون استحکام کششی استفاده گردید. در این آزمون، پارامترهای استحکام نهایی (حداکثر نیروی کشش) و ازدیاد طول تا حد پارگی به عنوان شاخص‌های اصلی عملکرد مکانیکی نمونه‌ها اندازه‌گیری شدند.

آزمایش‌ها با استفاده از دستگاه استحکام‌سنج STM-20 ساخت شرکت سنتام (Iran SANTAM) انجام گرفت.

شیمیایی، نشان از موفقیت آمیز بودن فرآیند پلیمریزاسیون شیمیایی دارد.

با افزایش نسبت مولی اکسیدکننده به مونومر از ۱ به ۳، کاهش قابل توجهی در مقاومت الکتریکی سطح هر دو نوع پارچه مشاهده می‌شود. این روند بیانگر آن است که حضور مقادیر بالاتر از FeCl₃ به عنوان اکسید کننده موجب افزایش نرخ و یکنواختی پلیمریزاسیون پیروول و در نتیجه بهبود پیوستگی شبکه پلی پیروول و رسانایی سطحی می‌گردد. پایین‌ترین مقاومت سطحی برای پارچه پنبه‌ای در نسبت مولی اکسید کننده به مونومر برابر با ۱:۳ مشاهده شده است، که نشان‌دهنده تأثیر مؤثر این نسبت در بهینه‌سازی هدایت الکتریکی است. دلیل اصلی کاهش کمتر مقاومت الکتریکی سطح در پارچه پلی استر نسبت به پنبه، می‌تواند به تفاوت‌های فیزیکی ساختاری و شیمیایی بین این دو نوع پارچه مربوط باشد. پارچه پلی استر مورد استفاده دارای ضخامت کمتر، تراکم تار و پود بالاتر و وزن پایه کمتر است. این ویژگی‌ها موجب می‌شوند که سطح مؤثر در تماس با محلول واکنش، یکنواخت‌تر و پیوسته‌تر باشد و در نتیجه فیلم نازک‌تر، یکنواخت‌تر و با چسبندگی بهتر از پلی پیروول روی سطح پلی استر تشکیل شود. از طرفی، علاوه بر خواص فیزیکی، سطح آب دوست پنبه ممکن است باعث جذب ناهمگن مواد واکنش‌گر و ایجاد ساختار پوششی کمتر یکنواخت گردد. بنابراین، ساختار فیزیکی متراکم‌تر و احتمالاً زبری سطح کمتر در پلی استر نسبت به پنبه، منجر به عملکرد بهتر رسانایی در نسبت‌های بهینه شده است.

حجم محلول شست‌وشو برابر با ۱:۵۰ در نظر گرفته شد. پس از شست‌وشو، نمونه‌ها با آب مقطر در دمای محیط آبکشی شده و سپس با استفاده از آون آزمایشگاهی در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه خشک گردیدند. پس از هر نوبت شست‌وشو، مقدار مقاومت الکتریکی سطح نمونه‌ها به روش دو نقطه‌ای با استفاده از دستگاه مولتی‌متر اندازه‌گیری گردید. این آزمون در بیست چرخه متوالی شست‌وشو تکرار شده است و میانگین نتایج به‌عنوان شاخصی از پایداری رسانایی الکتریکی نمونه‌ها گزارش گردید. هدف از اجرای این آزمون، بررسی دوام پوشش پلی پیروول و پایداری خواص الکتریکی منسوجات رسانا در برابر شرایط شبیه‌سازی شده شست‌وشوی خانگی مطابق با الزامات بین‌المللی بود.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مقایسه و بهینه سازی شرایط پوشش دهی

نمونه‌ها با پلی پیروول

۳-۱-۱- اثر نسبت مولی اکسید کننده به مونومر

نتایج حاصل از تغییرات نسبت مولی اکسید کننده به مونومر در حضور ماده دوپه کننده در جدول ۱ نشان داده شده است. با در نظر گرفتن اینکه مقاومت الکتریکی سطح پارچه‌های پنبه‌ای و پلی استری پیش از پوشش‌دهی، در حدود 10^8 تا 10^{14} اهم بر مربع می باشد [۳۲]، در واقع در حالت معمولی در محدوده‌ی عایق کامل قرار دارد، بنابراین کاهش شدید مقاومت الکتریکی پس از فرایند پوشش‌دهی با پلی پیروول تحت نسبت های مختلف مواد

صنعت، امکان بررسی این تأثیرات بنیادین را فراهم می‌آورد. نتایج به دست آمده در واقع تأییدکننده این تفاوت‌های بنیادی هستند و ارزش علمی مطالعه را افزایش می‌دهند.

نتایج تحلیل آماری (ANOVA) نشان داد که اختلاف مشاهده‌شده بین نمونه‌های پوشش‌داده‌شده و شاهد، در سطح اطمینان ۹۵٪ معنادار است و در هر دو پارچه پنبه و پلی استر مشاهده می‌گردد که نسبت‌های مختلف غلظت اکسید کننده به مونومر توانسته است اختلاف معناداری را از لحاظ تغییرات مقاومت الکتریکی در نمونه‌های پوشش داده شده نسبت به نمونه خام و شاهد ایجاد کند که بیانگر این موضوع است که اکسید کننده یکی از عوامل کلیدی در این فرآیند پوشش دهی می باشد. در حالی که تغییرات جزئی بین نمونه‌های پوشش‌داده‌شده با شرایط مشابه در محدوده خطای آزمایش قرار دارد.

این داده‌ها تأیید می‌کنند که نسبت غلظت آغازگر به مونومر پیروول، عامل مهمی در کاهش مقاومت الکتریکی سطح پارچه‌ها می‌باشد به طوری که با افزودن غلظت اکسید کننده در محلول، مقاومت الکتریکی سطح پارچه کاهش می‌یابد و وقتی نسبت مولی اکسید کننده به مونومر پیروول به ۳ می‌رسد کمترین مقدار مقاومت الکتریکی سطح در پارچه‌ها به دست می‌آید. آرمس نشان داده است که برای تبدیل هر مول پیروول به پلی‌پیروول نیاز به ۲/۲۵ مول آغازگر آهن (III) کلرید می‌باشد که با نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش مطابقت دارد [۳۳]. لازم به ذکر است که یکی از اهداف پژوهش حاضر، مقایسه تأثیر پلیمریزاسیون پلی‌پیروول بر روی دو نوع پارچه حاصل از الیاف رایج (طبیعی و مصنوعی) می باشد که ساختار شیمیایی و فیزیکی کاملاً متفاوتی دارند و در صنعت و کارهای نوآورانه به وفور از آن‌ها استفاده می‌شود. انتخاب پارچه‌های پنبه‌ای و پلی‌استری با بافت‌های یکسان در

جدول ۱- نتایج تغییرات مقاومت الکتریکی سطح پارچه‌ها تحت شرایط تغییر نسبت غلظت ماده اکسید کننده به مونومر در غلظت ثابت مونومر و نسبت دوپه کننده ثابت.

| مقاومت الکتریکی (اهم بر مربع) | نسبت غلظت دوپه کننده به مونومر | نسبت غلظت اکسید کننده به مونومر | غلظت مونومر (مولار) | جنس پارچه |
|------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|---------------------|-----------|
| 1250±18 | 0.2 | 1 | 0.04 | پنبه |
| 970±12 | 0.2 | 2 | 0.04 | پنبه |
| 230±10 | 0.2 | 3 | 0.04 | پنبه |
| 600±20 | 0.2 | 1 | 0.04 | پلی‌استر |
| 370±15 | 0.2 | 2 | 0.04 | پلی‌استر |
| 180±8 | 0.2 | 3 | 0.04 | پلی‌استر |

۳-۱-۲- اثر نسبت مولی دوپه کننده به مونومر

نتایج حاصل از تغییرات نسبت مولی دوپه کننده به مونومر در جدول ۲ نشان داده شده است. با انتخاب نسبت مولی اکسید کننده به مونومر برابر با ۱:۳ به عنوان نسبت بهینه به دست آمده از شرایط ذکر شده در بالا، نتایج نشان می‌دهد که با افزایش نسبت غلظت دوپه کننده SDBS به مونومر پیرول، مقدار مقاومت الکتریکی سطح در هر دو نوع پارچه روندی افزایشی دارد. در پارچه پنبه‌ای، مقاومت سطحی از ۱۶۰ اهم بر مربع در نسبت دوپه کننده به پیرول ۱:۰/۲ به ۲۶۰ اهم بر مربع در نسبت دوپه کننده به پیرول ۱:۰/۴ افزایش یافته است. روند مشابهی در پارچه پلی‌استر نیز مشاهده می‌شود، به طوری که مقاومت الکتریکی سطح از ۱۱۰ اهم بر مربع به ۲۳۰ اهم بر مربع در همان بازه نسبت افزایش یافته است. افزایش مقدار دوپه کننده فراتر از حد بهینه، احتمالاً منجر به ایجاد ساختاری کمتر یکنواخت، افزایش فاصله بین زنجیره‌های پلیمری و کاهش تحرک بارهای الکتریکی در ساختار پلی‌پیرول شده که نتیجه آن افزایش مقاومت الکتریکی است. بنابراین، نسبت مولی ۰/۲ به عنوان مقدار بهینه برای غلظت دوپه کننده به پیرول در هر دو نوع پارچه شناسایی می‌شود، زیرا در این نسبت کمترین مقدار مقاومت الکتریکی سطح و در نتیجه بالاترین رسانایی حاصل شده است. همچنین مشاهده می‌شود که در تمامی نسبت‌ها، پارچه پلی‌استر مقاومت سطحی کمتری نسبت به پنبه از

خود نشان داده که با توجه به ساختار متراکم‌تر، سطح یکنواخت‌تر و ضخامت کمتر پلی‌استر قابل توجه است. این تحلیل نشان می‌دهد که به منظور دستیابی به رسانایی بالاتر، انتخاب نسبت مناسب دوپه کننده به مونومر نقش تعیین کننده‌ای دارد و نسبت بیش از حد این ماده ممکن است اثر معکوس بر خواص الکتریکی نهایی داشته باشد. بر اساس داده‌های جدول، نسبت دوپه کننده به مونومر برابر ۰/۲ به عنوان مقدار بهینه شناسایی شد که کمترین مقاومت سطحی را ایجاد نمود. افزایش بیشتر این نسبت تا ۰/۳ و ۰/۴ منجر به افزایش مقاومت سطحی گردید که می‌تواند ناشی از تجمع بیش از حد عامل دوپه کننده و کاهش نظم زنجیره‌های پلی‌پیرول در پوشش باشد.

نتایج تحلیل آماری (ANOVA) نشان داد که اختلاف مشاهده شده بین نمونه‌های پوشش داده شده و شاهد، در سطح اطمینان ۹۵٪ معنادار است و در هر دو پارچه پنبه و پلی‌استر مشاهده می‌گردد که نسبت های مختلف غلظت ماده دوپه کننده به مونومر توانسته است اختلاف معناداری را از لحاظ تغییرات مقاومت الکتریکی در نمونه های پوشش داده شده نسبت به نمونه خام و شاهد ایجاد کند که بیانگر این موضوع است که ماده دوپه کننده یکی از عوامل کلیدی در این فرآیند پوشش دهی می باشد. در حالی که تغییرات جزئی بین نمونه‌های پوشش داده شده با شرایط مشابه در محدوده خطای آزمایش قرار دارد.

جدول ۲- نتایج تغییرات مقاومت الکتریکی سطح پارچه‌ها تحت شرایط تغییر نسبت غلظت ماده دوپه کننده به مونومر در غلظت ثابت مونومر و نسبت ثابت اکسید کننده.

| مقاومت الکتریکی (اهم بر مربع) | نسبت غلظت دوپه کننده به مونومر | نسبت غلظت اکسید کننده به مونومر | غلظت مونومر (مولار) | جنس پارچه |
|------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|------------------------|-----------|
| 160±10 | 0.2 | 3 | 0.04 | پنبه |
| 200±12 | 0.3 | 3 | 0.04 | پنبه |
| 260±15 | 0.4 | 3 | 0.04 | پنبه |
| 110±8 | 0.2 | 3 | 0.04 | پلی‌استر |
| 150±9 | 0.3 | 3 | 0.04 | پلی‌استر |
| 230±14 | 0.4 | 3 | 0.04 | پلی‌استر |

دوباره افزایش یافته و به ۸۰ اهم بر مربع رسیده است. این روند نشان‌دهنده وجود یک غلظت بهینه که در اینجا حدود ۰/۱ مولار است برای مونومر پیرول می باشد؛ چرا که افزایش بیش از حد پیرول می‌تواند منجر به تشکیل لایه‌های ضخیم، ناهمگن و حتی پوسته پوسته شده شود که انتقال الکترون را با اختلال مواجه می‌کند.

در مورد پارچه پلی‌استر نیز روند مشابهی مشاهده می‌شود، با این تفاوت که به طور کلی مقادیر مقاومت الکتریکی سطح بالاتر هستند. با افزایش غلظت پیرول از ۰/۳ به ۰/۱ مولار، مقاومت سطحی از ۳۰۰ اهم بر مربع به ۲۱۰ اهم بر مربع کاهش یافته و سپس با افزایش بیشتر غلظت مونومر به ۰/۲ مولار، مقاومت سطحی به ۴۷۰ اهم بر مربع افزایش یافته است. این افزایش شدید مقاومت در غلظت بالا احتمالاً به دلیل کاهش چسبندگی پلی‌پیرول به سطح صاف تر و با جذب کمتر پلی‌استر در حضور مقدار زیاد مونومر ارتباط دارد و ساختارهای پلیمری با یکنواختی

۳-۱-۳- اثر تغییرات مولی غلظت مونومر پیرول در

پوشش دهی پارچه‌ها

نتایج حاصل از تغییرات مولی غلظت مونومر پیرول در وزن ثابت پارچه‌ها در فرآیند پوشش دهی به روش پلیمریزاسیون درجا در جدول ۳ نشان داده شده است. با انتخاب نسبت مولی اکسید کننده به مونومر برابر با ۱:۳ و نسبت مولی دوپه کننده به مونومر برابر با ۱:۰/۲ به عنوان نسبت های بهینه به دست آمده از شرایط ذکر شده در بالا، داده‌ها نشان می‌دهد که در پارچه پنبه‌ای، با افزایش غلظت پیرول از ۰/۳ به ۰/۱ مولار، مقاومت سطحی الکتریکی به‌طور محسوسی از ۱۹۰ اهم بر مربع به ۵۰ اهم بر مربع کاهش یافته است. این کاهش مقاومت سطحی بیانگر تشکیل بهتر و مؤثرتر پوشش پلی‌پیرول بر سطح پارچه در حضور مقدار کافی مونومر است. اما با افزایش بیشتر غلظت پیرول به ۰/۲ مولار، مقاومت سطحی

کمتر را تشکیل می دهد. به طور کلی می توان گفت، در هر دو نوع پارچه، مقدار $0/1$ مولار برای مونومر پیرول به عنوان غلظت بهینه شناسایی می شود که منجر به کمترین مقاومت الکتریکی سطح و در نتیجه بالاترین رسانایی می گردد. نتایج همچنین نشان می دهند که پاسخ پارچه پنبه‌ای به تغییر غلظت پیرول بهتر و منظم‌تر از پارچه پلی‌استر است که احتمالاً به دلیل ویژگی‌های سطحی و قابلیت جذب بالاتر الیاف پنبه می باشد. این یافته‌ها اهمیت بهینه‌سازی غلظت مونومر در فرآیند پوشش‌دهی رسانا را به خوبی نشان می دهد. در این پژوهش روش مورد نظر برای طراحی آزمایش‌ها، روش یک متغیر در هر زمان^۱ است که یک روش استاندارد در تحقیقات علمی برای بررسی تأثیر هر متغیر به صورت مستقل است. هدف از این کار، درک دقیق تأثیر هر یک از پارامترهای کلیدی بر مقاومت سطحی و انتخاب مقدار بهینه برای هر کدام از متغیرها می باشد. برای مثال، در جدول ۳، هدف تعیین غلظت بهینه پیرول بوده است، در حالی که در جداول ۱ و ۲، سایر پارامترها بررسی شده است. این رویکرد تأثیر هر پارامتر را به صورت مجزا ارزیابی کرده و در نهایت، به ترکیبی از بهترین پارامترها برای رسیدن به حداقل مقاومت سطحی منجر خواهد شد. بدیهی است که مقایسه مستقیم اعداد جدول ۳ با جداول ۱ و ۲ که در آن‌ها غلظت پیرول ثابت بوده و نسبت‌ها تغییر کرده‌اند فاقد اعتبار آماری است؛ از این رو، جمع‌بندی

تطبیقی تنها بر اساس روندها و نیز در شرایط مشترک بهینه ارائه می شود.

نتایج تحلیل آماری (ANOVA) نشان داد که اختلاف مشاهده شده بین نمونه‌های پوشش‌داده شده و شاهد، در سطح اطمینان ۹۵٪ معنادار است و در هر دو پارچه پنبه و پلی استر مشاهده می گردد که غلظت مونومر پیرول توانسته است اختلاف معناداری را از لحاظ تغییرات مقاومت الکتریکی در نمونه های پوشش داده شده نسبت به نمونه خام و شاهد ایجاد کند که بیانگر این موضوع است که غلظت مونومر پیرول یکی از عوامل کلیدی در این فرآیند پوشش دهی می باشد. در حالی که تغییرات جزئی بین نمونه‌های پوشش‌داده شده با شرایط مشابه در محدوده خطای آزمایش قرار دارد.

با توجه به آزمایش های صورت گرفته در این پژوهش، نسبت مولی اکسید کننده به مونومر برابر با ۱:۳، نسبت مولی دوپه کننده به مونومر برابر با $10/2$ و غلظت محلول $0/1$ مولار برای مونومر پیرول به عنوان نسبت ها و مقادیر بهینه در نظر گرفته شده است.

۲-۳- مطالعه ریزساختاری سطح پارچه های خام و

پوشش داده شده با پلی پیرول به روش SEM

شکل ۲ تصاویر میکروسکوپی SEM از سطح پارچه های پنبه‌ای و پلی‌استری را پیش و پس از پوشش دهی با پلی پیرول نمایش می دهند. در شکل ۲ (الف)، سطح الیاف پنبه‌ای قبل از پوشش دهی به وضوح قابل مشاهده است.

¹ one-variable-at-a-time method

جدول ۳- نتایج تغییرات مقاومت الکتریکی سطح پارچه‌ها تحت شرایط تغییر غلظت مونومر پیروول در نسبت های ثابت و بهینه اکسید کننده و دوپه کننده.

| مقاومت الکتریکی (اهم بر مربع) | نسبت غلظت دوپه کننده به مونومر | نسبت غلظت اکسید کننده به مونومر | غلظت پیروول (مولار) | جنس پارچه |
|----------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|------------------------|-----------|
| 190±5 | 0.2 | 3 | 0.03 | پنبه |
| 50±3 | 0.2 | 3 | 0.1 | پنبه |
| 80±2 | 0.2 | 3 | 0.2 | پنبه |
| 300±3 | 0.2 | 3 | 0.03 | پلی استر |
| 210±2 | 0.2 | 3 | 0.1 | پلی استر |
| 470±3 | 0.2 | 3 | 0.2 | پلی استر |

می‌باشد. به نظر می‌رسد وجود حفرات و تخلخل‌های طبیعی در ساختار پارچه پنبه‌ای به جذب بیشتر مونومر و رسوب بهتر پلیمر بر سطح کمک کرده و منجر به پوششی مؤثرتر شده است.

تصاویر SEM مربوط به سطح پارچه پلی‌استری در شکل ۲ (ج) قبل از پوشش دهی و شکل ۲ (د) بعد از پوشش دهی را نشان می‌دهد. در تصویر اولیه، سطح الیاف کاملاً صاف، فشرده و بدون تخلخل قابل مشاهده است، که بازتاب‌دهنده ویژگی‌های سطحی طبیعی الیاف پلی‌استر می‌باشد. پس از پوشش دهی در نمونه های بهینه با شرایط نسبت مولی اکسید کننده به مونومر برابر با ۱:۳، نسبت مولی دوپه کننده به مونومر برابر با ۱:۰/۲ و غلظت محلول ۰/۱ مولار برای مونومر پیروول، تغییرات قابل توجهی در ریخت شناسی مشاهده می‌گردد. لایه‌ای از

این سطح دارای ریخت شناسی نسبتاً زبر با چین و چروک‌های ظریف و نا همواری های مشخص است که ناشی از ساختار طبیعی و متخلخل الیاف پنبه می‌باشد. پس از پوشش دهی با پلی‌پیروول در نمونه های بهینه با شرایط نسبت مولی اکسید کننده به مونومر برابر با ۱:۳، نسبت مولی دوپه کننده به مونومر برابر با ۱:۰/۲ و غلظت محلول ۰/۱ مولار برای مونومر پیروول در شکل ۲ (ب)، تغییرات قابل توجهی در ریخت شناسی سطح مشاهده می‌شود. لایه‌ای یکنواخت و چسبنده از پلی‌پیروول سطح الیاف را پوشانده است که همراه با تشکیل نانوذرات کروی^۱ می‌باشد. حضور این نانوذرات و رشد گره مانند^۲ آن ها بر روی سطح الیاف، گواهی بر موفقیت پلیمریزاسیون شیمیایی درجا و تشکیل پوشش رسانای متراکم و همگن

¹ globular

² nodular growth

همزمان با این افزایش ضخامت و جذب، مقاومت الکتریکی به حداقل مقدار خود 3 ± 50 اهم بر مربع است کاهش یافته است. این داده ها نشان می‌دهد که در این غلظت، مقدار بهینه‌ای از مونومر پیروول برای تشکیل لایه‌ای یکنواخت، متراکم و رسانا فراهم شده است. در غلظت بالاتر (۰/۲ مولار)، کاهش مجدد در ضخامت به 18 ± 370 میکرومتر و کاهش درصد جذب به $2 \pm 23\%$ مشاهده می‌شود که ممکن است ناشی از اشباع سطح پارچه و یا تشکیل ناپایدار پلیمر در محلول باشد. در این حالت، مقاومت الکتریکی افزایش یافته و به 2 ± 80 اهم بر مربع رسیده است که مؤید افت کیفیت پوشش است.

برای پارچه پلی‌استری نیز الگوی مشابهی مشاهده می‌شود. ضخامت اولیه نمونه 8 ± 200 میکرومتر بوده و با افزایش غلظت پیروول به ۰/۱ مولار، ضخامت به 12 ± 340 میکرومتر و میزان جذب به $3 \pm 70\%$ رسیده است که بیشترین مقدار جذب در این گروه از نمونه ها می باشد. در همین غلظت، مقاومت الکتریکی به 2 ± 210 اهم بر مربع کاهش یافته است. در غلظت ۰/۲ مولار، مشابه با نمونه پنبه ای، کاهش ضخامت و کاهش درصد جذب همراه با افزایش مقاومت الکتریکی به میزان 3 ± 470 اهم بر مربع مشاهده شده است. این تغییرات بیانگر آن است که افزایش بیش از حد غلظت پیروول منجر به ته نشینی ناکارآمد پلیمر، افزایش چسبندگی ذرات به یکدیگر به جای سطح پارچه و کاهش یکنواختی پوشش می‌شود.

پلی‌پیروول به صورت یکنواخت بر سطح الیاف پلی‌استر نشسته است. ساختار پوشش پلی‌پیروول در این نمونه بیشتر به فرم دندریت^۱ مانند است که عمدتاً در نواحی هم‌گذاری نخ‌های تار و پود تمرکز یافته است. این الگوهای رشد دندریتی احتمالاً به دلیل شرایط موضعی خاص و نیز ماهیت آب‌گریز و نسبتاً صاف سطح پلی‌استر شکل گرفته‌اند. شواهد نشان می‌دهند که با افزایش غلظت مونومر پیروول در محلول، میزان تشکیل این ساختارهای دندریت مانند افزایش یافته و منجر به پوشش‌دهی مؤثرتر سطح پلی‌استر شده است.

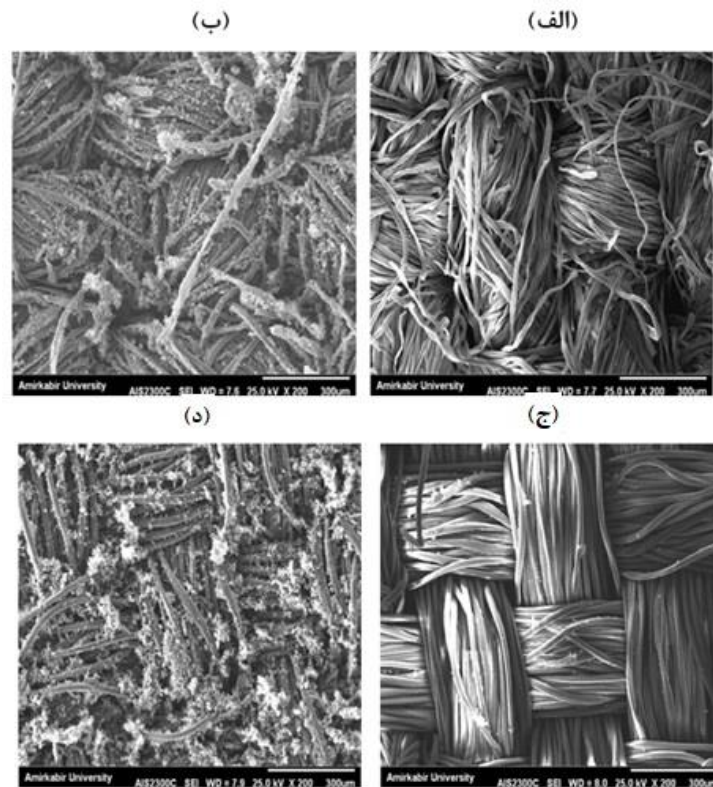
۳-۳- بررسی تغییرات ضخامت و درصد جذب نمونه

پارچه ها بعد از پوشش دهی

بر اساس داده‌های جدول ۴، تغییرات ضخامت و درصد جذب نمونه ها پس از پوشش‌دهی شیمیایی درجا با پلی‌پیروول، به وضوح وابسته به غلظت مونومر پیروول بوده و این اثر در دو نوع پارچه پنبه‌ای و پلی‌استری با الگوهای متفاوتی مشاهده می‌شود.

در مورد پارچه پنبه‌ای، ضخامت اولیه نمونه 10 ± 300 میکرومتر بوده است. با افزایش غلظت پیروول از ۰/۳ به ۰/۱ مولار، ضخامت نمونه به میزان قابل توجهی افزایش یافته و به 15 ± 460 میکرومتر رسیده است که معادل بیشینه درصد جذب $2 \pm 53\%$ در این غلظت می‌باشد.

¹ Dendrite



شکل ۳ - تصاویر SEM از نمونه ها، (الف) پنبه خام بدون پوشش دهی، (ب) پنبه پوشش دهی شده با شرایط نسبت مولی اکسید کننده به مونومر برابر با ۱:۳، نسبت مولی دوپه کننده به مونومر برابر با ۱:۰/۲ و غلظت محلول ۰/۱ مولار برای مونومر پیروول، (ج) پلی استر خام بدون پوشش دهی و (د) پلی استر پوشش دهی شده با شرایط نسبت مولی اکسید کننده به مونومر برابر با ۱:۳، نسبت مولی دوپه کننده به مونومر برابر با ۱:۰/۲ و غلظت محلول ۰/۱ مولار برای مونومر پیروول.

به طور کلی، هر دو نوع پارچه در غلظت ۰/۱ مولار پیروول عملکرد بهینه‌ای را از نظر جذب پلی‌پیروول، افزایش ضخامت پوشش و کاهش مقاومت سطحی از خود نشان دادند. بنابراین، این غلظت به عنوان مقدار بهینه برای پلیمریزاسیون شیمیایی در جا در شرایط مورد بررسی این پژوهش پیشنهاد می‌شود. همچنین، عملکرد بهتر پارچه پنبه‌ای در کاهش مقاومت الکتریکی در مقایسه با پلی‌استر را می‌توان به ساختار متخلخل‌تر، جذب‌پذیری بیشتر و برهم‌کنش بهتر آن با محلول واکنش‌دهنده نسبت داد.

۴-۳- بررسی خواص مکانیکی نمونه های پوشش

داده شده

در این پژوهش، به منظور بررسی اثر فرآیند پوشش‌دهی با پلی‌پیروول در نمونه های بهینه با شرایط نسبت مولی اکسید کننده به مونومر برابر با ۱:۳، نسبت مولی دوپه کننده به مونومر برابر با ۱:۰/۲ و غلظت محلول ۰/۱ مولار برای مونومر پیروول بر خواص مکانیکی پارچه‌های پنبه‌ای و پلی‌استری، آزمون استحکام کششی شامل استحکام و ازدیاد طول تا حد پارگی بر روی نمونه‌ها پیش و پس از

عملیات پوشش‌دهی انجام شد. نتایج حاصل از این بررسی در جدول ۵ ارائه شده و به‌صورت زیر قابل تحلیل است.

جدول ۴- نتایج تغییرات ضخامت و میزان جذب نمونه‌ها تحت فرآیند پوشش‌دهی.

| جنس پارچه | غلظت پیرول (مولار) | ضخامت نمونه (μm) | جذب پیرول (%) | مقاومت الکتریکی (اهم بر مربع) |
|-----------|--------------------|-------------------------------|---------------|-------------------------------|
| پنبه | - | 300±10 | - | - |
| پنبه | 0.03 | 400±26 | 33±3 | 190±5 |
| پنبه | 0.1 | 460±15 | 53±2 | 50±3 |
| پنبه | 0.2 | 370±18 | 23±2 | 80±2 |
| پلی‌استر | - | 200±8 | - | - |
| پلی‌استر | 0.03 | 260±15 | 30±4 | 300±3 |
| پلی‌استر | 0.1 | 340±12 | 70±3 | 210±2 |
| پلی‌استر | 0.2 | 230±15 | 15±5 | 470±3 |

مقایسه داده‌های به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که فرآیند پلیمریزاسیون شیمیایی پلی‌پیرول تأثیر محسوسی بر خواص مکانیکی پارچه‌ها نداشته است. در نمونه‌های پنبه‌ای، مقدار استحکام کششی پس از پوشش‌دهی از ۹/۴۰ کیلوپاسکال به ۹/۰۲ کیلوپاسکال کاهش یافت که حدود ۴٪ افت را نشان می‌دهد؛ این میزان کاهش با توجه به انحراف معیارها در محدوده تغییرات طبیعی قرار دارد و از نظر آماری این تغییرات معنادار تلقی نمی‌شود. همچنین مقدار ازدیاد طول تا حد پارگی نیز از ۷/۸۵٪ به ۷/۶۱٪ رسید که با توجه به خطای اندازه‌گیری، کاهش قابل توجهی نمی‌باشد.

یافته است که حدود ۳/۳٪ کاهش استحکام را نشان می‌دهد، درحالی‌که ازدیاد طول از ۱۹/۳۵٪ به ۱۹/۰۶٪ رسیده است. این تغییرات بسیار جزئی و در محدوده انحراف معیار بوده و به وضوح نشان‌دهنده حفظ خواص مکانیکی نمونه‌ها پس از عملیات رسانا سازی پارچه‌ها می‌باشد. بنابراین به طور کلی می‌توان گفت که در سطح اطمینان ۹۵٪، تفاوت بین نمونه‌های خام و پوشش‌داده‌شده از نظر خواص مکانیکی شامل استحکام کششی و ازدیاد طول تا حد پارگی، از نظر آماری معنادار نیست، چرا که مقادیر میانگین در محدوده‌ی انحراف معیار یکدیگر قرار دارند.

در مورد پارچه‌های پلی‌استری نیز نتایج تقریباً مشابهی مشاهده شد و تغییرات خواص مکانیکی بعد از پوشش‌دهی با پلی‌پیرول در آن معنادار تلقی نمی‌شود. بررسی نتایج در پارچه پلی‌استر نشان می‌دهد که استحکام کششی از ۱۴/۴۳ کیلوپاسکال به ۱۳/۹۵ کیلوپاسکال تنزل

تفاوت در استحکام و ازدیاد طول تا حد پارگی بین پارچه‌های پنبه و پلی‌استر به ویژگی‌های ذاتی الیاف آن‌ها و ساختار پارچه مرتبط است. پلی‌استر به دلیل ماهیت سنتزی، ساختار نیمه‌کریستالی، انعطاف‌پذیری بیشتر و تراکم بالاتر در بافت، دارای استحکام کششی و ازدیاد

طول بیشتری نسبت به پنبه است. در مقابل، پنبه با ساختار طبیعی سلولزی، تراکم کمتر و ضخامت بالاتر، خواص مکانیکی پایین‌تری دارد. این اختلافات در آزمایش‌ها نیز مشهود است و می‌تواند در انتخاب بستر مناسب برای کاربردهای مختلف تأثیرگذار باشد.

این نتایج نشان می‌دهد که پوشش‌دهی سطحی پارچه‌ها با پلی‌پیرول نه تنها باعث ایجاد رسانایی الکتریکی مطلوب در ساختار آن‌ها شده، بلکه ساختار مکانیکی آن‌ها را نیز تا

حد زیادی حفظ کرده است. در واقع، تغییرات ناچیز مشاهده‌شده می‌تواند ناشی از ایجاد لایه نازکی از پلیمر بر سطح الیاف و تأثیر محدود آن بر خصوصیات ماکروسکوپی پارچه باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که پوشش‌دهی شیمیایی درجا با پلی‌پیرول یک روش مؤثر و پایدار برای تولید منسوجات رسانا بدون کاهش چشمگیر در عملکرد مکانیکی است.

جدول ۵- نتایج بررسی خواص مکانیکی پارچه‌های استفاده شده در نمونه‌های پوشش داده شده بهینه با شرایط نسبت مولی اکسید کننده به مونومر برابر با ۱:۳، نسبت مولی دوپه کننده به مونومر برابر با ۱:۰/۲ و غلظت محلول ۰/۱ مولار برای مونومر پیرول.

| جنس پارچه | استحکام کششی (KPa) | ازدیاد طول واحد پارگی (%) | مدول الاستیک (KPa) |
|------------------------|--------------------|---------------------------|--------------------|
| پنبه خام | 9.40 ± 0.75 | 7.85 ± 1.32 | 119.70 ± 22.30 |
| پنبه پوشش داده شده | 9.20 ± 0.67 | 7.61 ± 1.45 | 118.98 ± 24.72 |
| پلی استر خام | 14.3 ± 3.18 | 19.35 ± 0.62 | 73.90 ± 16.66 |
| پلی استر پوشش داده شده | 13.95 ± 3.45 | 19.06 ± 0.67 | 73.21 ± 18.36 |

۳-۵- بررسی عملکرد ثبات شست‌وشویی نمونه‌های پوشش داده شده

به‌منظور ارزیابی دوام و پایداری پوشش پلی‌پیرول اعمال‌شده بر سطح پارچه‌ها در برابر شست‌وشو در نمونه‌های بهینه با شرایط نسبت مولی اکسید کننده به مونومر برابر با ۱:۳، نسبت مولی دوپه کننده به مونومر برابر با ۱:۰/۲ و غلظت محلول ۰/۱ مولار برای مونومر پیرول، آزمون ثبات شست‌وشویی طبق استاندارد بین‌المللی ISO 105-C01:1992 انجام گرفت. در این آزمون، مقاومت

الکتریکی سطح نمونه‌ها در بیست مرحله پس از شست‌وشوی متوالی اندازه‌گیری شد و به عنوان شاخص پایداری عملکرد الکتریکی پوشش‌ها مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج حاصل از آن در شکل ۳ نشان داده شده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، در هر دو نوع پارچه، افزایش اندکی در مقاومت الکتریکی سطح پارچه‌ها پس از شست‌وشو مشاهده گردید. با این حال، شدت این افزایش در پارچه پنبه‌ای اندکی بیشتر از پارچه پلی‌استری بود. به‌طور خاص، مقاومت سطحی نمونه پنبه‌ای از مقدار

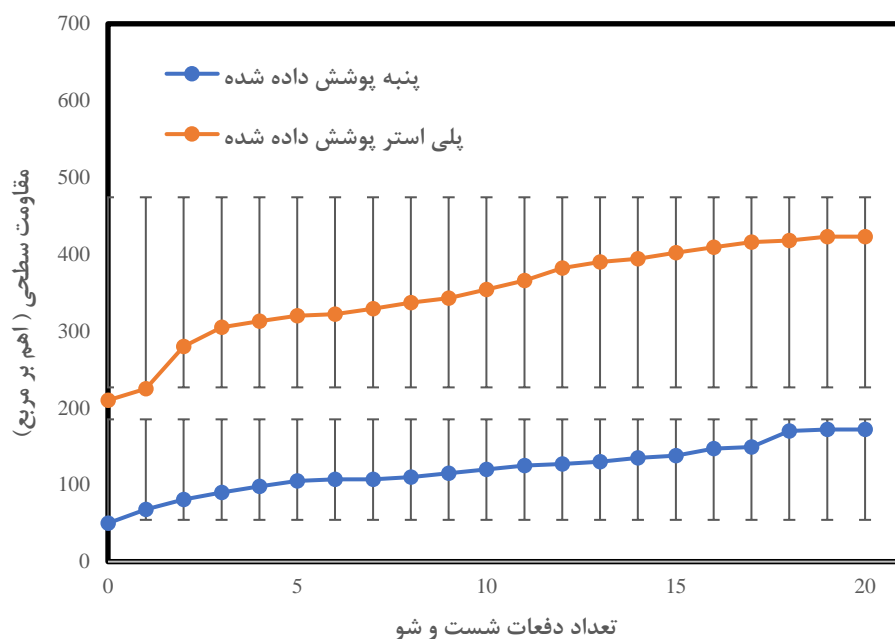
وان دروالسی با پلی‌پیرول تعامل دارد، که موجب پایداری نسبی بیشتر در برابر شست‌وشو می‌شود.

در مجموع، نتایج این آزمون نشان می‌دهد که فرآیند پلیمریزاسیون شیمیایی پلی‌پیرول منجر به تشکیل پوششی نسبتاً پایدار و مؤثر برای رسانا سازی الیاف طبیعی و مصنوعی شده است. اگرچه هر دو نوع پارچه کاهش رسانایی را در اثر شست‌وشو تجربه کردند، ولی مقدار مقاومت سطحی نهایی در محدوده عملکردی قابل قبول برای کاربرد های الکترونیکی باقی ماند.

علاوه بر بهبود خواص الکتریکی و ثبات شست‌وشویی، تغییر رنگ ظاهری نمونه‌ها پس از پوشش‌دهی با پلی‌پیرول نیز به‌وضوح قابل مشاهده بود. همان‌گونه که انتظار می‌رود، هر دو پارچه پنبه و پلی‌استر که به صورت خام و قبل از پوشش‌دهی به ترتیب به رنگ های سفید و مشکی بوده اند، به دلیل ماهیت ذاتی پلی‌پیرول، نمونه‌های پوشش‌داده‌شده به رنگ سیاه متمایل شده و این تغییر رنگ می‌تواند به‌عنوان شاخص کیفی اولیه موفقیت فرآیند پوشش‌دهی در نظر گرفته شود. قابل ذکر است که پس از طی چرخه های مختلف شست و شو ثبات رنگ نمونه های پوشش دهی شده نیز حفظ گردیده است. با این حال، در این پژوهش اندازه‌گیری کمی پارامترهای رنگی با استفاده از اسپکتروفوتومتر رنگی انجام نگردید، زیرا تمرکز اصلی بر بررسی خواص عملکردی از جمله مقاومت سطحی الکتریکی، خواص مکانیکی و ثبات شست‌وشویی بوده است.

اولیه‌ی ۵۰ اهم بر مربع به ۱۷۲ اهم بر مربع پس از بیست چرخه شست‌وشو رسید، در حالی‌که در نمونه پلی‌استری این مقدار از ۲۱۰ اهم بر مربع به ۴۲۳ اهم بر مربع افزایش یافت.

در تحلیل مکانیسم پایداری نسبی پوشش پلی‌پیرول در برابر شست‌وشو می‌توان آن را به ماهیت نامحلول این پلیمر در آب و ساختار شبه آروماتیک آن نسبت داد. هرچند بخشی از پوشش در اثر تنش مکانیکی شست‌وشو از بین رفته یا تخریب شده، اما الیاف پوشش‌داده‌شده همچنان رسانایی قابل‌قبولی از خود نشان دادند، که گواهی بر پایداری نسبی پوشش در شرایط شبیه‌سازی شده خانگی می‌باشد. همچنین، استفاده از دوپه‌کننده‌ی SDBS با زنجیره بلند هیدروکربنی موجب افزایش چسبندگی پوشش به سطح الیاف شده و در مطالعات پیشین نیز به‌عنوان عامل مؤثر در افزایش دوام مکانیکی و الکتریکی پوشش‌ها معرفی شده است [۱۱، ۲۲]. از طرف دیگر نوع برهمکنش با بستر منسوج که پارچه می‌باشد نیز تعیین کننده است و تفاوت در پایداری الکتریکی پس از شست‌وشو را می‌توان به ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی ذاتی الیاف نسبت داد. در پارچه پنبه‌ای، گروه‌های هیدروکسیل موجود در سلولز می‌توانند با زنجیره‌های پلی‌پیرول پیوندهای هیدروژنی ضعیف برقرار کنند. در مقابل، پلی‌استر به‌دلیل سطح صاف و آب‌گریز، بیشتر از طریق جذب سطحی و نیروهای



شکل ۳- نتایج حاصل از عملکرد ثبات شست و شویی نمونه های بهینه با شرایط نسبت مولی اکسید کننده به مونومر برابر با ۱:۳، نسبت مولی دوپه کننده به مونومر برابر با ۱:۰/۲ و غلظت محلول ۰/۱ مولار برای مونومر پیرول.

۳-۶- بررسی نتایج پژوهش حاضر نسبت به

پژوهش های پیشین

به منظور شفاف سازی نوآوری پژوهش حاضر و مقایسه بهتر با مطالعات پیشین، یک جدول مقایسه ای از نتایج پژوهش حاضر با سایر تحقیقات مرتبط تهیه شد. در جدول ۶، نوع پارچه به عنوان منسوج، شرایط فرایند (اکسیدکننده و دوپه کننده)، محدوده مقاومت الکتریکی سطح به دست آمده و ویژگی های متمایزکننده ذکر شده است. هدف از ارائه این جدول، نشان دادن اثر ترکیب اکسیدکننده $FeCl_3$ و دوپه کننده SDBS در مقایسه با سایر مواد است که وجه تمایز پژوهش حاضر محسوب می شود.

برتری نتایج پژوهش حاضر نسبت به پژوهش های پیشین

را می توان در چند محور علمی بیان کرد:

۱- ترکیب بهینه دوپه کننده و اکسیدکننده: در بسیاری از پژوهش های پیشین، تنها از اکسیدکننده هایی مانند $FeCl_3$ یا APS استفاده شده است و دوپه کننده ها یا در نظر گرفته نشده اند یا از نوع معدنی ساده مانند هیدروکلریک اسید بوده اند. در پژوهش حاضر، استفاده از SDBS به عنوان دوپه کننده همراه با $FeCl_3$ منجر به بهبود یکنواختی پوشش، کاهش تجمعات ناهمگن و دست یابی به مقاومت الکتریکی سطح پایین تر شده است.

۲- مقاومت الکتریکی سطح بهینه و مقایسه پذیر با استانداردهای بین المللی: کمترین مقاومت سطحی به دست آمده برای پنبه ۵۰ اهم بر مربع و برای پلی استر

۲۱۰ اهم بر مربع است که نسبت به مقادیر گزارش شده در پژوهش‌های مشابه بهبود دارد.

۳- پایداری در برابر شست‌وشو: در حالی که بسیاری از تحقیقات پیشین کاهش شدید رسانایی پس از چند چرخه شست‌وشو را گزارش کرده‌اند، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که رسانایی پس از بیست چرخه شست‌وشو همچنان در سطح قابل قبول باقی مانده است. این موضوع بیانگر دوام و پایداری بیشتر پوشش PPy دوپه شده با SDBS است.

۴- حفظ خواص مکانیکی پارچه: برخلاف برخی پژوهش‌ها که کاهش استحکام یا انعطاف‌پذیری منسوجات پس از پوشش‌دهی را گزارش کرده‌اند، نتایج این تحقیق نشان داد که تغییرات در استحکام کششی و ازدیاد طول در محدوده انحراف معیار بوده و تغییر معناداری ایجاد نشده است. بنابراین پوشش پلی‌پیرول در شرایط بهینه بدون آسیب جدی به خواص مکانیکی، رسانایی قابل توجهی ایجاد کرده است.

۵- جامعیت بررسی: مزیت دیگر پژوهش حاضر، بررسی همزمان چندین عامل کلیدی شامل غلظت مونومر، نسبت اکسیدکننده، نسبت دوپه‌کننده، خواص مکانیکی و ثبات

شست‌وشویی است. چنین بررسی جامعی در مطالعات قبلی کمتر مشاهده شده است.

همان‌گونه که از جدول مشاهده می‌شود، استفاده همزمان از FeCl_3 و SDBS در پژوهش حاضر موجب دستیابی به مقاومت سطحی پایین‌تر و یکنواخت‌تر در هر دو بستر پنبه‌ای و پلی‌استری شده است. در مقایسه با پژوهش‌های پیشین که یا از دوپه‌کننده استفاده نکرده‌اند یا دوپه‌کننده‌های معدنی به کار برده‌اند، نتایج حاضر نشان می‌دهد که SDBS به دلیل ماهیت آنیونی و توانایی ایجاد برهم‌کنش قوی با زنجیره‌های PPy، موجب پایداری بیشتر و بهبود یکنواختی پوشش می‌شود. بنابراین، وجه تمایز اصلی این کار پژوهشی، بهینه‌سازی شرایط دوپه‌کننده و اکسیدکننده به‌طور همزمان و بررسی جامع خواص الکتریکی، مکانیکی و ثبات شست‌وشویی است. برتری اصلی این پژوهش در دستیابی به تعادلی بین رسانایی بالا، پایداری شست‌وشویی و حفظ خواص مکانیکی منسوجات است که آن را برای کاربردهای واقعی در زمینه منسوجات هوشمند و پوشیدنی‌های الکترونیکی مناسب‌تر می‌سازد.

جدول ۶- مقایسه نتایج پژوهش حاضر با برخی پژوهش‌های پیشین در زمینه رساناسازی منسوجات با پلی‌پیرول.

| منبع | ویژگی متمایز کننده | مقاومت الکتریکی (اهم بر مربع) | ماده دوپه کننده | ماده اکسید کننده | جنس پارچه |
|------------|---|-------------------------------|--------------------------------------|------------------|-----------------|
| [2] | قابلیت کشسانی بالا برای ابرخازن | 10^3 | بدون دوپه کننده | آهن (III) کلرید | نایلون / لایکرا |
| [3] | بهبود یکنواختی پوشش | 10^2 تا 10^3 | مخلوط مواد فعال سطح آنیونی و کاتیونی | آهن (III) کلرید | پنبه |
| [16] | استفاده در منسوجات حرارتی | 10^3 تا 10^4 | بدون دوپه کننده | آهن (III) کلرید | پنبه |
| [18] | مقایسه پلیمرهای رسانا مختلف؛ PPy (بهترین رسانایی) | 10^1 تا 10^3 | هیدروکلریک اسید | آهن (III) کلرید | پنبه |
| [23] | ایجاد پوشش چندکاربردی (رسانا، آنتی‌باکتریال، ضد شعله) | 10^3 | هیدروکلریک اسید | آمونیم پرسولفات | پنبه |
| پژوهش حاضر | بهینه‌سازی همزمان نسبت اکسیدکننده و دوپه‌کننده؛ پایداری نسبی در برابر شست‌وشو | پنبه: 50 / پلی استر: 210 | سدیم دودسیل بنزن سولفونات | آهن (III) کلرید | پنبه و پلی استر |

مقاومت الکتریکی سطح نمونه‌ها نشان داد که کمترین

مقاومت در پارچه پنبه‌ای برابر با ۵۰ اهم بر مربع و در

پارچه پلی‌استری ۲۱۰ اهم بر مربع به دست آمد، که بیانگر

تأثیر ساختار متخلخل‌تر و جذب‌پذیری بالاتر پنبه نسبت

به پلی‌استر در جذب و تثبیت پوشش پلی‌پیرول است.

تغییر نسبت مولی اکسیدکننده و دوپه‌کننده بر خواص

رسانایی مؤثر بود و نسبت بهینه برای کاهش مقاومت

سطحی در هر دو پارچه به ترتیب برابر با نسبت ۱:۳ برای

اکسید کننده $FeCl_3$ به مونومر پیرول و ۱:۲ برای دوپه

کننده SDBS به مونومر پیرول تعیین شد. تصاویر SEM

نیز نشان‌دهنده پوشش همگن، یکنواخت و پیوسته

پلی‌پیرول بر سطح الیاف هر دو نوع پارچه بود. تحلیل

خواص مکانیکی نشان داد که پوشش‌دهی تغییر معناداری

در استحکام و ازدیاد طول تا حد پارگی نمونه‌ها ایجاد

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، هدف اصلی رساناسازی پارچه‌های

پنبه‌ای و پلی‌استری با استفاده از پوشش‌دهی شیمیایی

درجا با پلی‌پیرول بوده است. در این راستا، تأثیر عوامل

مهم از جمله غلظت مونومر پیرول، نسبت مولی آغازگر

$FeCl_3$ و عامل دوپه‌کننده SDBS بر مقاومت سطحی

الکتریکی، خواص مکانیکی و ثبات شست‌وشویی مورد

بررسی قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد که

پارچه‌های پنبه‌ای و پلی‌استری می‌توانند با استفاده از

فرآیند پلیمریزاسیون شیمیایی درجا و اعمال پلی‌پیرول

به صورت مؤثری به منسوجات رسانا تبدیل شوند. بررسی

پایداری مناسب پوشش پلی پیرول است. در مجموع، این پژوهش اثربخشی بالای پوشش‌دهی رسانا با پلی پیرول برای تولید منسوجات هوشمند را تأیید می‌نماید.

۵- مراجع

- Jost, K., Perez, C. R., McDonough, J. K., Presser, V., Heon, M., Dion, G., Gogotsi, Y., Carbon coated textiles for flexible energy storage, *Energy Environ. Sci.*, 4(15), 5060–5067, 2011.
- Yue, B., Wang, C., Ding, X., Wallace, G. G., Polypyrrole coated nylon lycra fabric as stretchable electrode for supercapacitor applications, *Electrochim. Acta*, 68(1), 18–24, 2012.
- Liang, G., Zhu, L., Xu, J., Fang, D., Bai, Z., Xu, W., Investigations of poly(pyrrole)-coated cotton fabrics prepared in blends of anionic and cationic surfactants as flexible electrode, *Electrochim. Acta*, 103(1), 9–14, 2013.
- Alizadeh M, Mirjalili M, Valipour P, Akbarpour., Improving the electrical and antibacterial properties of cotton fabric using graphene oxide, *Journal of Apparel and Textile Science and Technology*, 10(1), 15-23, 2021.
- Joshi, M., Bhattacharyya, A., Nanotechnology—a new route to high-performance functional textiles, *Text. Prog.*, 43(3), 155–233, 2011.
- Darayi Z, Zare A, Arzo, Hadizadeh., Investigating the effect of structural factors of wool-polyester fabrics on abrasion resistance, *Journal of Apparel and Textile Science and Technology*, 7(2), 5-10, 2018.

نکرد و در محدوده انحراف معیار باقی ماند. همچنین پس از سه چرخه شست‌وشو، مقاومت سطحی نمونه‌های پنبه‌ای از ۵۰ به ۹۰ اهم بر مربع و نمونه‌های پلی استری از ۲۱۰ به ۳۰۵ اهم بر مربع افزایش یافت که حاکی از

- Guo, R. H., Jiang, S. X., Yuen, C. W. M., Ng, M. C. F., Lan, J. W., Optimization of electroless nickel plating on polyester fabric, *Fiber. Polym.*, 14(3), 459–464, 2013.
- Guo, R. H., Jiang, S. X., Zheng, Y. D., Lan, J. W., Electroless nickel deposition of a palladium-activated self-assembled monolayer on polyester fabric, *J. Appl. Polym. Sci.*, 127(5), 4186–4193, 2013.
- Wang, B., Cheng, H., Zhu, J., Yuan, Y., Wang, C., A flexible and stretchable polypyrrole/knitted cotton for electrothermal heater, *Org. Electron.*, 85, 105819, 2020.
- Xie, J., Pan, W., Guo, Z., Jiao, S. S., Yang, L. P., In situ polymerization of polypyrrole on cotton fabrics as flexible electrothermal materials, *J. Eng. Fibers Fabr.*, 14, 1558925019827447, 2019.
- Ramirez, D. O. S., Varesano, A., Carletto, R. A., Vineis, C., Perelshtein, I., Natan, M., Gedanken, A., Antibacterial properties of polypyrrole-treated fabrics by ultrasound deposition, *Mater. Sci. Eng. C*, 102, 164–170, 2019.
- Hakansson, E., Kaynak, A., Kouzani, A., Change in dielectric properties in the microwave frequency region of polypyrrole-coated textiles during aging, *Materials*, 9(7), 609, 2016.
- Leonavicius, K., Ramanaviciene, A., Ramanavicius, A., Polymerization model for hydrogen peroxide initiated synthesis

- of polypyrrole nanoparticles, *Langmuir*, 27(17), 10970–10976, 2011.
14. Caringella, R., Patrucco, A., Simionati, M., Gavignano, S., Montarsolo, A., Mossotti, R., Floria, L., Electrically conducting linen fabrics for technical applications, *Text. Res. J.*, 88(2), 144–154, 2018.
 15. Wei, C., Fan, L., Rao, W., Bai, Z., Xu, W., Bao, H., Xu, J., Electrochromic paper fabricated by depositing polypyrrole on one side, *Cellulose*, 24(11), 5187–5196, 2017.
 16. Bhat, N. V., Seshadri, D. T., Nate, M. M., Gore, A. V., Development of conductive cotton fabrics for heating devices, *J. Appl. Polym. Sci.*, 102(5), 4690–4695, 2006.
 17. He, G., Zhu, C., Shi, Y., Yu, Y., Wu, Y., Soutis, C., Liu, X., Development of a mussel-inspired conductive graphene coated cotton yarn for wearable sensors, *iScience*, 28(2), 107893, 2025.
 18. Barani, H., Miri, A., Sheibani, H., Comparative study of electrically conductive cotton fabric prepared through the in situ synthesis of different conductive materials, *Cellulose*, 28(10), 6629–6649, 2021.
 19. Hünnekens, B., Avramidis, G., Ohms, G., Krause, A., Viöl, W., Militz, H., Impact of plasma treatment under atmospheric pressure on surface chemistry and surface morphology of extruded and injection-molded wood-polymer composites (WPC), *Appl. Surf. Sci.*, 441, 564–574, 2018.
 20. Makris, T., Dracopoulos, V., Stergiopoulos, T., Lianos, P., A quasi solid-state dye-sensitized solar cell made of polypyrrole counter electrodes, *Electrochim. Acta*, 56(5), 2004–2009, 2011.
 21. Bu, C., Tai, Q., Liu, Y., Guo, S., Zhao, X., A transparent and stable polypyrrole counter electrode for dye-sensitized solar cell, *J. Power Sources*, 221, 78–83, 2013.
 22. Xu, J., Li, M., Wu, L., Sun, Y., Zhu, L., Gu, S., Liu, L., Bai, Z., Fang, D., Xu, W., Stretchable conductive polypyrrole composites, *J. Power Sources*, 257, 230–236, 2014.
 23. Rafi, A. S., Chaion, M. H., Chakrovarty, T., Islam, M. T., Kundu, C. K., A multi-functional coating on cotton fabric to incorporate electro-conductive, anti-bacterial, and flame-retardant properties, *Heliyon*, 10(17), e26689, 2024.
 24. Veerender, P., Saxena, V., Jha, P., Koiry, S. P., Gusain, A., Samanta, S., Gupta, S. K., Free-standing polypyrrole films as substrate-free and Pt-free counter electrodes for quasi-solid dye-sensitized solar cells, *Org. Electron.*, 13(12), 3032–3039, 2012.
 25. Shang, S., Yang, X., Tao, X. M., Lam, S. S., Vapor-phase polymerization of pyrrole on flexible substrate at low temperature and its application in heat generation, *Polym. Int.*, 59(2), 204–211, 2010.
 26. Hakansson, E., Kaynak, A., Lin, T., Nahavandi, S., Jones, T., Hu, E., Characterization of conducting polymer coated synthetic fabrics for heat generation, *Synth. Met.*, 144(1), 21–28, 2004.
 27. Xia, J., Chen, L., Yanagida, S., Application of polypyrrole as a counter electrode for a dye-sensitized solar cell, *J. Mater. Chem.*, 21(12), 4644–4649, 2011.

28. Hu, J. L., Introduction to active coatings for smart textiles, in *Active Coatings for Smart Textiles*, Woodhead Publishing, Amsterdam, Netherlands, pp. 1–7, 2016.
29. Hu, J., *Active Coatings for Smart Textiles*, 1st edition, Woodhead Publishing, Cambridge, UK, 2016.
30. Xie, J., Pan, W., Guo, Z., Jiao, S.S., Ping Yang, L., In situ polymerization of polypyrrole on cotton fabrics as flexible electrothermal materials, *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 14, 1558925019827447, 2019.
31. Xie, Z., Ventura, H., Ardanuy, M., A review of the electrical conductivity test methods for conductive fabrics, *Textiles*, 4(3), 284–308, 2024.
32. Legerská, Jela, Pavol Lizák, Matej Drobný, Jaroslav Ligas., Electrical properties of the textile fabrics, *University Review*, 6(2), 2012.
33. Armes, Steven P. Optimum reaction conditions for the polymerization of pyrrole by iron (III) chloride in aqueous solution, *Synthetic Metals*, 20 (3), 365-371, 1987.