

ایجاد پوشش نانو رسانا و ابر آبگریز روی پارچه پنبه‌ای با روش پلیمریزاسیون ادمایسلی پلی پیرو و اصلاح آلکیل سیلانی

رامین خواجهی*^۱ و امیرحسین برنج‌چی^۲

۱- مرکز تحقیقات فناوری نانو، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران

۲- گروه مهندسی نساجی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۴/۰۳/۱۶، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۴/۰۵/۱۸، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۴/۰۵/۲۸

چکیده

در این تحقیق هدف بررسی خواص و مزایای رسانایی و ابر آبگریزی پارچه پنبه‌ای پوشش داده شده با پلی پیرو از طریق روش پلیمریزاسیون ادمایسلی و اصلاح سطحی متعاقب آن با آلکیل سیلان است. ابتدا نمونه‌های از پارچه پنبه‌ای با روش پلیمریزاسیون ادمایسلی و همچنین تحت شرایط مشابه و بدون حضور سطح فعال سدیم دودسیل سولفات (SDS) (نمونه شاهد) با پلی پیرو پوشش دهی شدند. سپس با هگزادسیل تری متوکسی سیلان (HDTMS) مورد اصلاح سطحی قرار گرفتند و خصوصیات ابر آبگریزی و هدایت الکتریکی آنها با یکدیگر مقایسه شدند. مشخصه‌سازی نمونه‌ها با طیف‌سنجی مادون قرمز (ATR-FTIR)، مشاهده سطح با میکروسکوپ‌های الکترونی پویشی (SEM) و نیروی اتمی (AFM)، تعیین مقاومت الکتریکی (روش دو الکترودی) و اندازه‌گیری زوایای تماس استاتیک (CA) و دینامیکی (WSA) انجام پذیرفت. طیف‌های مادون قرمز همراه با تصاویر میکروسکوپ‌های الکترونی تشکیل پوشش پلیمری پلی پیرو روی نمونه‌ها را تایید نمودند. نمونه‌های حاصله از روش ادمایسلی پوشش یکنواخت‌تری از پلی پیرو را روی سطح نمونه در مقایسه با نمونه شاهد نشان داد. علاوه بر آن میزان هدایت الکتریکی آنها نیز تا ۵۲٪ نسبت به نمونه شاهد افزایش یافت. پس از اصلاح سطحی نمونه‌ها با HDTMS زاویه تماس ۱۱۵ درجه در مورد نمونه شاهد حاصل گردید که در نمونه حاصله از روش ادمایسلی تا ۱۵۳ درجه افزایش یافت و میزان ناهمواری روی سطح پنبه تا ۳۴۱٪ افزایش یافت. نتایج این تحقیق نشان داد که بکارگیری روش پلیمریزاسیون ادمایسلی جهت ایجاد پلی پیرو روی سطوح ناهموار و آبدوستی نظیر سلولز می‌تواند باعث ارتقا خصوصیت هدایت الکتریکی و خصلت ابر آبگریزی متعاقب آن گردد.

واژه‌های کلیدی: پلیمریزاسیون ادمایسلی، ابر آبگریزی، هدایت الکتریکی، پنبه، پلی پیرو.

۱- مقدمه

استانداردهای زندگی و مواردی نظیر پیشرفت ارتباطات، منسوجات نیز در حال تغییر و تحول جهت توافق یافتن با این مهم هستند. نسل جدیدی از منسوجات روانه بازار شده‌اند که دارای ویژگی‌های خاص هستند. به عنوان مثال

منسوجات را می‌توان از نزدیک‌ترین وسایل و بسترها به انسان محسوب نمود و با توجه به روند افزایشی

* **عهده‌دار مکاتبات:** رامین خواجهی

نشانی: تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، مرکز تحقیقات فناوری نانو

تلفن: ۰۲۱-۲۲۸۲۱۰۷۴-۲۲۸۲۱۰۷۴، **دورنگار:** ۰۲۱-۲۲۸۲۱۰۷۴، **پست الکترونیکی:** rkhajavi@gmail.com

غلظت بحرانی تجمع یا CAC نامیده می‌شود) ساختارهای تجمعی از سطح فعال که ادماپسل نامیده می‌شود شکل می‌گیرد (شکل ۱). CMC بیانگر غلظتی از مولکول‌های سطح فعال می‌باشد که در این غلظت مولکول‌های سطح فعال تشکیل تجمعات میسلی می‌دهند. با توجه به ساختار سطح فعال‌ها که حاوی زنجیرهای آبگریز و سرهای آبدوست می‌باشند، در غلظت CMC هر جز با محیط مطلوب خود ارتباط برقرار می‌نماید. در این حالت مولکول‌های سطح فعال می‌توانند تجمعاتی را تشکیل دهند که بخش آبگریز آن به داخل مجموعه جهت‌گیری کرده و بخش آبدوست آن در محلول پراکنده شود. چنین تجمعی از مولکول‌های سطح فعال میسل نامیده می‌شوند. در غلظتی پایین‌تر از CMC (غلظت CAC) و در حالتی که محلول حاوی سطح فعال با سطحی جامد در تماس باشد به دلیل به حداقل رساندن کشش سطحی و کاهش میزان تماس زنجیرهای آبگریز سطح فعال با آب تجمع مولکول‌های سطح فعال به صورت دو لایه‌ای و به گونه‌ای شکل می‌گیرد که در لایه پایینی سرهای آبدوست سطح فعال با سطح جامد در تماس بوده و در لایه بالایی جهت سرهای آبدوست به سمت محلول آبی می‌باشد (شکل ۱). در این حالت تجمع مولکول‌های سطح فعال به گونه‌ای است که در داخل هسته این تجمعات زنجیرهای آبگریز قرار گرفته‌اند و با محیط مائی در تماس نمی‌باشند.

- به دلیل آبگریز بودن هسته این تجمعات (زنجیرهای آبگریز سطح فعال در این ناحیه با یکدیگر وارد واکنش می‌شوند) ترکیبات آبگریز (همچون مونومرها) در داخل آن قرار می‌گیرند.

- با افزودن آغازگر پلیمریزاسیون (ترجیحا محلول در آب) فرآیند پلیمریزاسیون انجام شده و لایه‌ای پلیمری تشکیل می‌شود.

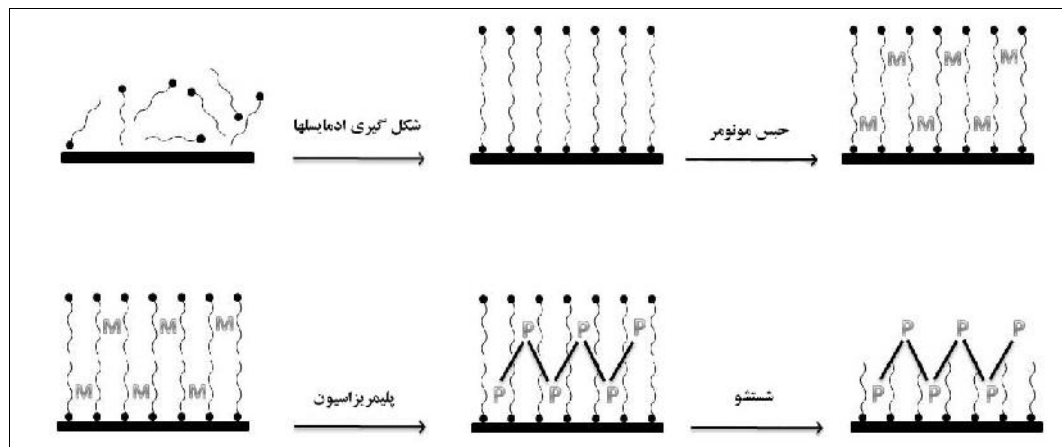
- در نهایت لایه بالایی سطح فعال بوسیله شستشو جدا شده و لایه نازک پلیمری روی سطح ایجاد می‌شود [۵-۷].

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد در غلظت CAC و در داخل

منسوجاتی که بستری مناسب جهت قرار دادن وسایل و تجهیزات الکترونیکی هستند و به نام "تجهیزات الکترونیکی قابل پوشیدن" معرفی شده‌اند. یا منسوجاتی که همزمان دارای چند خاصیت کاربری هستند و منسوجات "چند کاربرده" نام گرفته‌اند. جهت ایجاد این ویژگی‌ها و خصوصیات از علوم گوناگون بهره برده شده است. به عنوان مثال کاربرد فناوری نانو و نانوساختارها در این زمینه رشد چشمگیری داشته و تا بحال تحقیقات زیادی در خصوص سنتز نانوساختارهای آلی و کاربرد آنها بر روی منسوجات در جهت ایجاد خواصی همچون ضد میکروبی، خودتمیزشوندگی، هدایت الکتریکی، ابرآبگریزی انجام گرفته است [۱-۳].

یکی از راه‌های بسیار متداول جهت ایجاد خواص نوین و یا مدنظر اصلاح و یا پوشش سطح منسوج است. بعنوان مثال جهت ایجاد خاصیت الکتریکی می‌توان لایه‌ای از فلزات و یا پلیمرهای هادی را روی سطح منسوج (می‌تواند صرفاً یک روی منسوج باشد) نشانده شود. نشان دادن لایه پلیمری می‌تواند از طریق سنتز در جای پلیمر روی سطح منسوج انجام پذیرد که تاکنون روش‌های مختلفی جهت این مهم معرفی شده‌اند که از جدیدترین آنها فرآیند پلیمریزاسیون ادماپسلی است. در این روش ابتدا یک ساختار دو لایه‌ای از سطح فعال که اصطلاحاً ادماپسل نامیده می‌شود بر سطح الیاف تشکیل شده و به عنوان محلی برای قرارگیری ترکیبات آبگریز همچون مونومرهای آلی عمل می‌نماید. این فرآیند دارای مزایایی چون ایجاد پوشش پلیمری صرفاً روی سطح الیاف منسوج، میزان پایین مصرف انرژی، حفظ تبادل رطوبت و حرارت در پارچه به دلیل عدم مسدود نمودن فضاها بین الیاف و نخ‌ها، حفظ زبردست پارچه، حداقل میزان مصرف مواد شیمیایی و ایجاد لایه بسیار نازک پلیمری (نانومقیاس) می‌باشد [۴-۷]. این فرآیند که نوعی پلیمریزاسیون در محل (in-situ) به شمار می‌رود شامل ۴ مرحله است (شکل ۱):

- در غلظت مشخصی از سطح فعال که دقیقاً پیش از غلظت بحرانی تشکیل مایسل (CMC) اتفاق می‌افتد (این نقطه،



شکل ۱: شکل گیری فیلم پلیمری از طریق فرآیند پلیمریزاسیون ادمایسلی.

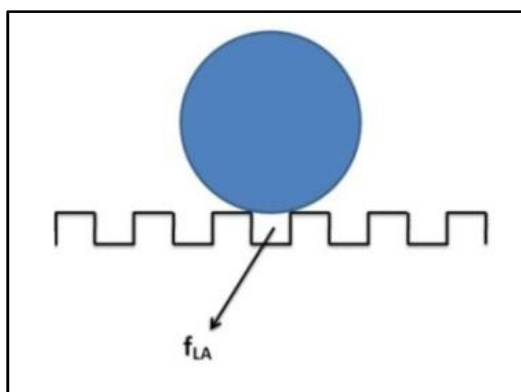
و دمای پلیمریزاسیون به ترتیب ۹ ساعت و صفر درجه سانتیگراد گزارش شده است [۹]. در تحقیق دیگری Sudwilai و همکاران (۲۰۱۱) با استفاده از دو مونومر سیلیکونی آبگریز (متاکریلوکسی متیل تری متیل سیلان-MSi و متاکریلوکسی پروپیل پنتا متیل دی سیلوکسان-MDSi) و فرآیند پلیمریزاسیون ادمایسلی توسط دو سطح فعال نانویونیک و کاتیونیک پارچه پنبه‌ای آبگریز را تولید نمودند. MSi و MDSi جزو مونومرهای سیلانی (حاوی گروه‌های Si-O) می‌باشند. به دلیل انرژی آزاد سطحی گروه‌های سیلوکسانی Si-O این مونومرها جزو ترکیبات آبگریز بوده و در اثر پلیمریزاسیون جهت پوششی آبگریز روی سطوح مختلف مناسب می‌باشند. بر اساس نتایج این تحقیق استفاده از سطح فعال کاتیونیک و مونومر MSi باعث ارتقا خصوصیت آبگریزی پنبه و زوایای تماس بالاتر از ۱۲۰ درجه می‌شود [۱۰].

ایجاد خصوصیت هدایت الکتریکی بر منسوجات به دلیل مزایایی همچون انعطاف پذیری، وزن کم و خصوصیت کشسانی پارچه و کاربردهای فراوان آن در حوزه‌های مختلف از جمله تجهیزات الکترونیکی پوشیدنی (یا نمایشگرهای قابل پوشیدن)، لباس‌های ورزشی پیشرفته، دکوراسیون منزل، سلول‌های خورشیدی، منسوجات ضد الکتریسیته ساکن، پارچه‌های محافظ در برابر امواج الکترومغناطیسی بسیار مورد توجه قرار گرفته است

محللول مولکول‌های سطح فعال بر سطح ترکیبی جامد به صورت دو لایه‌ای تجمع می‌یابند که هسته این تجمعات شامل زنجیرهای ابرآبگریز سطح فعال می‌باشد. در صورت افزودن ترکیبات آبگریز به داخل محللول (همچون مونومرهای آبگریز) به علت عدم تمایل به محیط‌های مائی و از طرفی تمایل آنها به هسته آبگریز تجمعات مولکول‌های سطح فعال، این مولکول‌ها با زنجیرهای آبگریز سطح فعال وارد واکنش شده و در داخل تجمعات آنها جای می‌گیرند. در صورت افزودن آغازگر پلیمریزاسیون و انجام پلیمریزاسیون (یا پلیمریزاسیون ادمایسلی) لایه‌ای پلیمری بر سطح ماده جامد شکل گرفته و بنابراین فقط سطح ماده جامد تحت تاثیر پوشش پلیمری قرار می‌گیرد.

تاکنون برخی تحقیقات در خصوص استفاده از پلیمریزاسیون ادمایسلی و اصلاح خواص منسوجات انجام شده است. Liang و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از ترکیب سطح فعال‌های آنیونیک و کاتیونیک، منسوج رسانای پنبه‌ای پوشش دهی شده با پلی پیرول با مقاومت سطحی ۱۴ اهم بر مربع را با استفاده از فرآیند پلیمریزاسیون ادمایسلی تهیه نمودند [۸]. تولید کامپوزیت‌های رسانای پیرول/سلولز بر الیاف فلسی بوسیله پلیمریزاسیون ادمایسلی پلی وینیل الکل توسط Wang و Yang (۲۰۱۰) گزارش گردید. در این تحقیق مقدار بهینه رسانایی الیاف در شرایط نسبت مولی مونومر به آغازگر ۱:۱، ۱۵۰ دقیقه زمان جذب مونومر و زمان

شد که در برخی از سطوح ناهموار به دلیل شکل ناهمواری‌های سطحی ممکن است از لحاظ ترمودینامیکی قطره آب روی سطح به گونه‌ای قرار گیرد که اصطلاحاً بر سطح معلق گردیده و مابین فرورفتگی‌های سطح و قطره آب پاکت‌های هوایی محبوس شوند (شکل ۲) [۲۰].



شکل ۲: نحوه قرارگیری قطره آب روی سطح ناهموار (Hierarchical) و محبوس شدن هوا مابین قطره و فرورفتگی‌های سطح.

$$\cos\theta_{CB} = R_f \cos\theta_0 - f_{LA}(R_f \cos\theta_0 + 1) \quad (2)$$

در این رابطه $\cos\theta_{CB}$ بیانگر زاویه تماس بر اساس نظریه Cassie-Baxter، R_f فاکتور ناهمواری، $\cos\theta_0$ زاویه تماس قطره آب روی یک سطح هموار فرضی و f_{LA} معادل میزان هوای محبوس شده مابین فرورفتگی‌های ساختار ناهموار و قطره آب می‌باشد. بر اساس این نظریه در یک سطح ناهموار ممکن است از نظر ترمودینامیکی نحوه قرارگیری قطره آب بر سطح به نحوی باشد که مابین قطره و ناهمواری‌های سطحی مقداری هوا محبوس شود (شکل ۲- f_{LA}). این پاکت‌های هوایی تاثیر بسزایی را در افزایش زاویه تماس استاتیک ایفا می‌نمایند، چرا که بر اساس رابطه ۲ با افزایش میزان f_{LA} میزان $\cos\theta_{CB}$ کاهش می‌یابد که کاهش این مقدار بیانگر افزایش θ_{CB} و یا زاویه تماس قطره آب است. همچنین به دلیل دانسته پائین تر هوا نسبت به قطره آب میزان چسبندگی قطره با سطح کاهش یافته و نهایتاً منجر به لغزش

[۱۴-۱۱]. از طرفی منسوجات دافع آب نیز از اهمیت بسزایی برخوردار بوده و کاربردهای فراوانی را در پوشش‌های خارجی، پارچه‌های ابرآبگریز و خودتمیزشونده، چادرهای صحرایی، منسوجات نظامی و غیره دارا می‌باشند [۱۵،۱۶]. با توجه به تعاریف موجود در مقالات سطح ابرآبگریز به سطحی اطلاق می‌شود که زاویه تماسی بالاتر از ۱۵۰ درجه داشته باشد. اثر ابرآبگریزی یا اثر نیلوفر آبی (Lotus effect) بوسیله ناهموار نمودن سطح به صورت تئوریک و همچنین بر پایه مشاهدات آزمایشی در دهه ۱۹۹۰ توسط Barthlott و Neinhuis شناخته شد. ابرآبگریزی عبارت از توانایی یک سطح جامد در برطرف نمودن ذرات چرک توسط قطرات آبی که روی سطح در حال حرکت هستند، می‌باشد. بر اساس تعاریف موجود جهت ایجاد سطحی ابرآبگریز، سطح باید دارای ناهمواری بوده و همزمان کشش سطحی پایینی را داشته باشد (رابطه ۱) [۱۷،۱۸].

در زمینه ترشوندگی سطوح مختلف تاکنون دو نظریه بنیادی در این زمینه مطرح گردیده است. در نخستین نظریه که توسط Wenzel مطرح شد، در یک سطح آبرگریز زاویه تماس استاتیک بطور خطی با افزایش میزان ناهمواری افزایش می‌یابد (رابطه ۱) [۱۹]:

$$\cos\theta_w = R_f \cos\theta_0 \quad (1)$$

در رابطه بالا $\cos\theta_w$ زاویه تماس بر اساس نظریه Wenzel است، R_f که همواره از یک بزرگتر است، فاکتور ناهمواری می‌باشد که بستگی به میزان ناهمواری‌های سطحی دارد و معادل نسبت مساحت سطحی جامد به مساحت سطح هموار فرضی آن است و $\cos\theta_0$ زاویه تماس قطره آب روی یک سطح هموار فرضی می‌باشد. بر اساس معادله ۲ هر چقدر فاکتور ناهمواری بزرگتر باشد و ناهمواری‌های سطحی بیشتر باشد زاویه تماس افزایش می‌یابد. در نظریه دیگری که بعدها توسط Cassie و Baxter ارائه گردید (رابطه ۲)، مشخص

بر خوردارند، لذا بسیاری از تحقیقات معطوف به ارائه منسوجات نوین از این گونه الیاف شده است. لیکن تاکنون هیچ تحقیقی در مورد ایجاد همزمان خواص ابرآبگریزی و هدایت الکتریکی بر پنبه با استفاده از پلیمریاسیون ادمایسلی و اصلاح سطحی با آلکیل سیلانها یافت نگردید. وجود این دو خاصیت در کنار یکدیگر می تواند منجر به تولید منسوج چند کاربردی شود که علاوه بر تامین هدایت الکتریکی مناسب جهت نصب یا بکارگیری تجهیزات الکترونیکی قادر است با توجه به خاصیت ابرآبگریزی خود بتواند از شخص یا تجهیزات الکترونیکی نصب شده بر منسوج حاصل در برابر بارش و رطوبت محافظت نماید. در این پژوهش فرآیند پلیمریاسیون ادمایسلی پلی پیرویل روی پنبه به کمک سطح فعال SDS و مقایسه آن با نمونه شاهد (پوشش داده شده با پلی پیرویل در شرایط مشابه بدون بهره گیری از روش ادمایسلی) انجام پذیرفت است. تاکید بر خواص ابرآبگریزی و رسانایی نمونه ها بوده است ضمن آن که تاثیر عملیات اصلاح سطحی با هگزا دسیل تری متوکسی سیلان نیز بررسی گردید.

۲- فعالیت های تجربی

۲-۱- مواد اولیه

پارچه پنبه ای تاری پودی سفیدگری شده و آهارگیری شده (نمره نخ ۱۶ تکس، تراکم تاری ۳۰ نخ بر سانتی متر، تراکم پودی ۲۵ نخ بر سانتی متر و وزن ۱۵۰ گرم بر مترمربع) از شرکت یزدباف تهیه شد. سدیم دودسیل سولفات، پیرویل، اتانول و پرسولفات آمونیوم (APS) از شرکت مرک آلمان خریداری شدند. پیرویل پیش از استفاده تحت خالص سازی (تقطیر در خلا) قرار گرفت و در محیط تاریک و در دمای 5°C نگهداری شد [۲۳]. هگزا دسیل تری متوکسی سیلان (HDTMS) از شرکت سیگما آلد ریج آلمان تهیه شد. توضیح آن که در تمامی آزمایشات از آب دو بار تقطیر استفاده شد.

و یا سر خوردن قطره آب از روی سطح جامد می گردد. در نظریه Wenzel چنین فرض شده بود که قطره آب بطور کامل درون ناهمواری های سطحی نفوذ کرده و فرورفتگی ها کاملاً توسط قطره آب پر می شوند. در واقع هر دو نظریه فوق الذکر صحیح بوده و هر کدام در برخی از ترکیبات به چشم می خورد. به عنوان مثال در گلبه های گل سرخ نظریه Wenzel صادق بوده و به دلیل نفوذ کامل، کاملاً چسبیده و حتی با واژگون نمودن سطح قطره از روی سطح جدا نمی شود. این پدیده اصطلاحاً اثر گلبه گی نامیده می شود. در مورد گل نیلوفر آبی پدیده عکس مشاهده می شود. در این سطح قطره آب به راحتی از سطح برگ جدا شده و کوچک ترین چسبندگی به آن ندارد. این پدیده که Lotus effect نامیده می شود از فرضیه Cassie-Baxter تبعیت می نماید. تاکنون مطالعات اندکی در خصوص ایجاد همزمان خصوصیات آبگریزی و هدایت الکتریکی بر منسوجات انجام گرفته است. به عنوان مثال Nateghi و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از مونومر پیرویل اصلاح شده اکتیل برماید و پر فلورورو هگزیل یدید و پلیمریاسیون آن روی پارچه های ابریشمی و پنبه ای، منسوجات رسانا و دافع آب را تولید نموده اند. در این تحقیق پارچه پنبه ای عمل شده با مونومر اصلاح شده دارای زاویه تماس 147° درجه بوده و مقاومت الکتریکی آن در حدود $10^8 \times 3/4$ اهم بر مربع گزارش شده است [۲۰]. Xue و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از نانوذرات نقره و سنتز در محل آنها بر پارچه پنبه ای و استفاده از هگزا دسیل تری متوکسی سیلان پارچه پنبه ای ابرآبگریز و رسانا را تولید نموده اند. زاویه تماس استاتیکی 157° درجه و مقاومت الکتریکی 37 اهم بر مربع در این تحقیق گزارش شده است [۲۱]. Varesano و همکاران (۲۰۱۳) با پوشش دهی پارچه پنبه ای با پلی پیرویل و اولئیک اسید خواص فوق آبگریزی (زاویه تماس 130°) و رسانایی (۲۵۴ اهم بر مربع) را بر آن ایجاد نموده اند [۲۲]. منسوجات پنبه ای با توجه به رتبه اول در بازار مصرف از اهمیت ویژه ای

۲-۲- دستگاه‌ها

گروه‌های عاملی موجود در سطح پارچه‌ها توسط طیف‌سنج تبدیل فوریه مادون قرمز انعکاسی کلی ممانعت شده (ATR-FTIR) (Thermo Nicolet Nexus 870) ساخت کشور آمریکا) مورد مطالعه قرار گرفتند. ریخت‌شناسی نمونه‌ها توسط یک میکروسکوپ الکترونی پویشی (SEM) (KYKY مدل EM3200 ساخت کشور چین) مشاهده شد. توپوگرافی سطحی نمونه‌ها بوسیله یک میکروسکوپ نیروی اتمی مورد ارزیابی قرار گرفت. مقاومت الکتریکی نمونه‌ها بر اساس استاندارد دو الکترونی اندازه‌گیری شد و بر اساس رابطه (۳) محاسبه گردید:

$$R_s = R \times W/L \quad (3)$$

در رابطه بالا R_s مقاومت سطحی پارچه (اهم)، R مقاومت الکتریکی خوانده شده (اهم)، W فاصله میان دو الکترونی (سانتی‌متر) و L طول آنها (سانتی‌متر) می‌باشد. جهت بررسی میزان ابرآبگریزی نمونه‌ها از اندازه‌گیری زاویه تماس یک قطره آب دی‌یونیزه (به حجم ۱۰ میکرولیتر در درجه حرارت $23^\circ C$) با سطح پارچه (توسط دستگاه KRUSS مدل G10 ساخت کشور آلمان) استفاده شد. جهت بررسی میزان چسبندگی قطره آب به سطح پارچه‌ها از آزمون دینامیکی WSA استفاده شد. در این آزمون نمونه‌های پارچه‌ای بر سطحی شیب‌دار قرار گرفته و قطره آب به حجم ۱۰ میکرولیتر از ارتفاع ۱ سانتی‌متری بالای نمونه‌ها روی آنها انداخته شد. حداقل زاویه‌ای که در آن قطره از روی پارچه سرازیر می‌شد به عنوان مقدار WSA در نظر گرفته شد. توضیح آن که مقادیر گزارش شده میانگین ۵ بار اندازه‌گیری WSA از نقاط مختلف پارچه می‌باشد.

۲-۳- تعیین غلظت بحرانی تشکیل میسل

جهت تعیین غلظت بحرانی تشکیل میسل سطح فعال از روش اندازه‌گیری رسانایی محلول استفاده شد. در ابتدا محلولی به

غلظت ۲۰ میلی‌مولار از سطح فعال تهیه شد و سپس در نسبت‌های مشخص توسط آب مقطر رقیق شد. هدایت الکتریکی محلول‌ها توسط دستگاه اندازه‌گیری هدایت الکتریکی (Horiba مدل D55 ساخت کشور ژاپن) اندازه‌گیری شد. در نهایت میزان هدایت الکتریکی بر حسب غلظت محلول‌های سطح فعال رسم شد و شکستگی مشاهده شده در نمودار به عنوان غلظت بحرانی تشکیل میسل گزارش شد.

بررسی فازی مواد اولیه با پراش اشعه ایکس (دستگاه پراش پرتو ایکس شرکت فیلیپس (Philips) با مدل PW3710 تحت ولتاژ ۴۰ کیلوولت و جریان ۳۰ میلی‌آمپر) صورت گرفت. برای بررسی سایز، مورفولوژی و توزیع فاز تقویت‌کننده در زمینه آلومینا از میکروسکوپ الکترونی روبشی (با گسیل میدانی ساخت شرکت MIRA3TESCAN و مدل IIXMU) استفاده شد. همچنین اندازه دانه‌ها توسط روش شرر از طریق نرم‌افزار اکسپرت گزین Scherrer Calculator اندازه‌گیری شد.

۲-۴- جذب سطح فعال بر روی پارچه

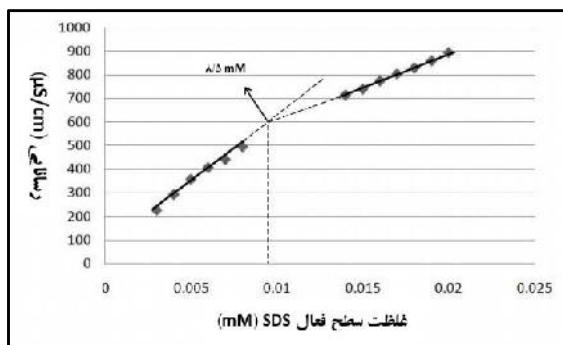
ابتدا محلول‌های متفاوتی از سطح فعال (از غلظت ۲ تا ۲۰ میلی‌مولار) که نواحی بالاتر و پایین‌تر از غلظت بحرانی تشکیل میسل سطح فعال را پوشش می‌دادند تهیه شد. سپس نمونه‌های پارچه‌ای (در ابعاد $2/5 \text{ cm}^2$) در داخل محلول‌ها به مدت ۲۴ ساعت و در دمای $25^\circ C$ قرار گرفتند. غلظت جذب شده سطح فعال توسط پارچه‌ها با کم نمودن غلظت اولیه سطح فعال و غلظت باقیمانده آن در داخل محلول پس از مجاورت با پارچه محاسبه گردید. غلظت باقیمانده سطح فعال در داخل محلول توسط دستگاه اسپکتروفوتومتر جذبی UV-Vis (Carry300 ساخت شرکت Victoria کشور استرالیا) و در طول موج ۲۳۵ نانومتر اندازه‌گیری شد. در نهایت ایزوترم جذب سطح فعال روی پارچه پنبه‌ای (منحنی جذب سطح فعال در واحد جرم پارچه بر حسب غلظت سطح فعال) رسم گردید.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تعیین غلظت بحرانی تشکیل میسل (CMC)

سطح فعال SDS

شکل ۳ مقادیر رسانایی محلول‌های SDS را در غلظت‌های متفاوت آن نشان می‌دهد. در غلظت‌های بسیار پایین، رسانایی به صورت خطی با افزایش غلظت محلول سطح فعال افزایش می‌یابد. این تغییر ناگهانی در منحنی نشان داد که در غلظت ۸/۵ میلی مولار SDS، میسل‌ها تجمع می‌یابند. این غلظت در تطابق با مطالعات مشابه می‌باشد. بر اساس شکل ۳، غلظت بحرانی تشکیل میسل برای سطح فعال SDS ۸/۵ میلی مولار در نظر گرفته شد.



شکل ۳: رسانایی محلول‌های SDS بر حسب غلظت سطح فعال.

۳-۲- جذب سطح فعال SDS روی نمونه پنبه‌ای

همان‌طور که پیش از این نیز اشاره شد، غلظت مورد استفاده در فرآیند پلیمریزاسیون ادمایسلی جهت تشکیل ساختارهای دو لایه‌ای ادمایسلی باید نزدیک به CMC سطح فعال (کمی پایین‌تر از غلظت (CMC)) باشد. در این غلظت علاوه بر شکل‌گیری ساختار ویژه ادمایسلی، حداکثر جذب سطح فعال بر سطح نیز اتفاق افتاده و از طرفی از پلیمریزاسیون امولسیون‌نی نیز جلوگیری به عمل می‌آید (مونومرها به جای محلول روی سطح پلیمریزه می‌شوند). با توجه به شکل ۴-ب روی پنبه ماکزیم جذب SDS در غلظت ۸ میلی مولار اتفاق می‌افتد. پس از این غلظت ایزوترم جذب به مقدار ثابتی می‌رسد. بنابراین در این تحقیق غلظت ۸

۲-۵- حبس مونومر و پلیمریزاسیون ادمایسلی

پلیمریزاسیون ادمایسلی پارچه پنبه‌ای با استفاده از محلول آبی سطح فعال سدیم دودسیل سولفات (در غلظت ۸ میلی مولار) انجام گردید. از غلظت ۰/۱ مولار پیرو و نسبت آغازگر/مونومر (۱/۲۵) استفاده شد. ابتدا جهت شکل‌گیری ادمایسل‌ها روی سطح پارچه، نمونه‌ها داخل محلول سطح فعال به مدت ۲۴ ساعت و در دمای ۲۵ °C قرار گرفتند. سپس مونومر پیرو به محلول افزوده شد و دمای محلول به ۵ °C کاهش یافت و به مدت ۳۰ دقیقه به محلول زمان داده شد تا مونومرها در داخل ادمایسل‌ها قرار گیرند. سپس با افزودن آغازگر، فرآیند پلیمریزاسیون آغاز شد و به مدت ۲/۵ ساعت در دمای ۵ °C ادامه یافت. سپس پارچه‌ها دو مرتبه توسط آب مقطر شستشو داده شده و در نهایت به مدت ۲۴ ساعت در داخل دسیکاتور قرار گرفتند. علاوه بر این، نمونه شاهد تحت شرایط مشابه مورد پلیمریزاسیون قرار گرفت، با این تفاوت که در حین سنتز از محلول سطح فعالی استفاده نشد.

۲-۶- فعال‌سازی ماده آلکیل سیلانی هگزا دسیل

تری متوکسی سیلان

مخلوطی از ۱۷ میلی لیتر هگزا دسیل تری متوکسی سیلان (۵۰ میلی مول) و ۲/۷ میلی لیتر محلول اسید کلریدریک (۰/۰۵ مولار (۱۵۰ میلی مول) به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق و توسط همزن مغناطیسی همزده شد و سپس این محلول با اتانول رقیق شد (۴ درصد وزنی/وزنی در اتانول).

۲-۷- متصل نمودن آلکیل سیلان فعال شده به

شبکه پلیمری تشکیل شده روی سطح پارچه

مخلوطی از ۱۷ میلی لیتر هگزا دسیل تری متوکسی سیلان نمونه‌های پارچه‌ای به مدت ۴ ساعت درون محلول رقیق شده هگزا دسیل تری متوکسی سیلان هیدرولیز شده غرق شدند و سپس به مدت ۱ ساعت و در دمای ۱۲۰ درجه سانتیگراد پخت شدند.

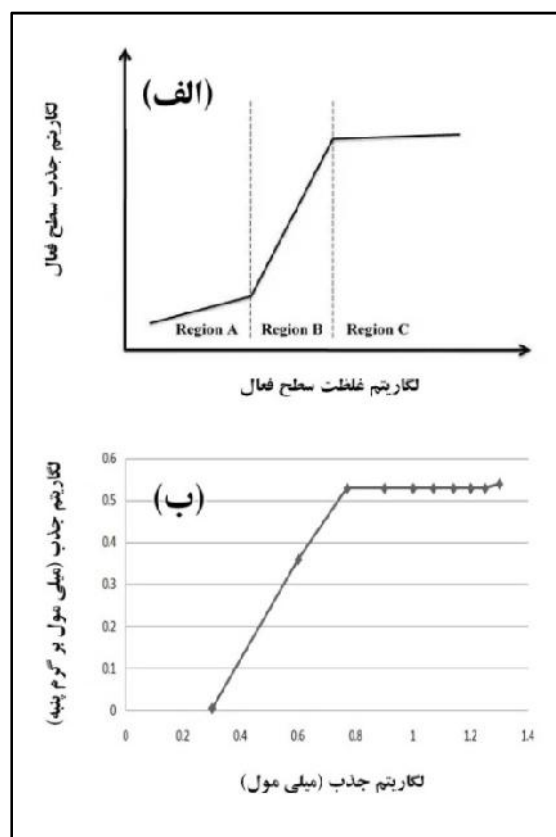
ویژه ادمایسل ها، تماس دم‌های آبگریز سطح فعال با آب کاهش یافته و انرژی آزاد سیستم کاهش می‌یابد. با افزایش تعداد مولکول‌های سطح فعال و دفعه الکترواستاتیکی مابین سرهای آبدوست سطح فعال در ناحیه C کاهش در شیب ایزوترم مشاهده می‌شود. در این ناحیه جذب سطح فعال بر سطح جامد کاهش می‌یابد. تجمعات سطح فعال در سطح مشترک جامد-مایع می‌تواند تحت تاثیر عوامل مختلفی همچون واکنش‌های الکترواستاتیکی، نوع یون متقابل، گروه‌های موجود در سرهای آبدوست سطح فعال، تراکم بارهای سطحی، ثابت دی‌الکتریک و شارژ سطح جامد قرار گیرد. در ایزوترم حاصله از جذب SDS روی پارچه پنبه‌ای، ناحیه A که قبلاً به آن اشاره شد، قابل مشاهده نیست (شکل ۴-ب). این امر به دلیل خطاهای احتمالی در تعیین غلظت‌های بسیار پایین سطح فعال با استفاده از روش طیف سنجی در این مورد است (بعنوان مثال با در نظر گرفتن قانون بیر-لامبرت هنگامی که $T\%$ به 100% نزدیک گردد آنگاه A به سمت صفر میل کند و عدم قطعیت در اندازه‌گیری $T\%$ باعث گسترده‌گی خطا در مقدار A می‌گردد که عدم قطعیت می‌تواند مربوط به محدودیت‌های دستگاه طیف سنج باشد). این موضوع توسط محققین دیگر نیز نظیر Boufi و Gandini تجربه شده است [۲۴].

در ناحیه B، جذب با افزایش غلظت سطح فعال و تجمع آنها بر سطح الیاف افزایش می‌یابد. در غلظت ۸ میلی‌مولار جذب مولکول‌های سطح فعال شروع به کاهش یافته و سپس ثابت می‌شوند (ناحیه C). در این ناحیه با افزایش بیشتر غلظت سطح فعال جذب مولکول‌های آن بر نمونه کاهش می‌یابد. با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل ۴-ب، غلظت مناسب برای انجام پلیمریزاسیون ادمایسل برابری با ۸ میلی‌مولار در نظر گرفته شد.

۳-۳- پوشش پلیمری پلی پیرول روی نمونه‌ها

بر اساس گزارش‌های موجود به محض افزودن آغازگر در طی فرآیند پلیمریزاسیون پلی پیرول رنگ محلول از بی‌رنگ

میلی‌مولار برای فرآیند پلیمریزاسیون ادمایسل مورد استفاده قرار گرفت.



شکل ۴: الف) ایزوترم جذب سطح فعال روی سطوح جامد، ب) ایزوترم جذب سطح فعال SDS روی سطح پارچه پنبه‌ای.

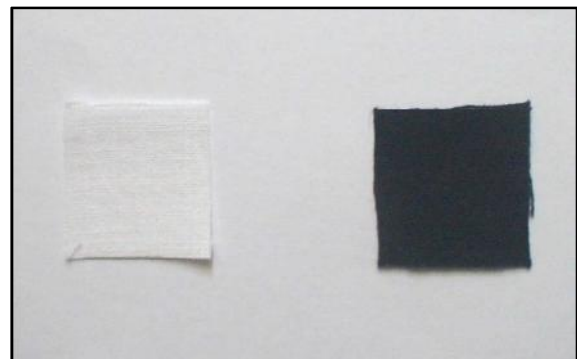
گزارش شده که در تماس با سطوح جامد، منحنی ایزوترم جذب سطح فعال‌ها به شکل S می‌باشد (شکل ۴-الف) [۲۴، ۲۵]. در غلظت‌های بسیار پایین سطح فعال (ناحیه A) جذب اندکی بر اساس تبدیل یونی بر گروه‌های باردار در سطح جامد رخ می‌دهد. در غلظت پایین‌تر از CMC با شروع واکنش مابین زنجیرهای آبگریز مولکول‌های سطح فعال، جذب زیادی در مولکول‌های سطح فعال بر سطح اتفاق می‌افتد (ناحیه B). در این ناحیه در سطح مشترک سطح پارچه و محلول، ساختارهای تجمعی به نام ادمایسل شکل می‌گیرد (در لایه پایینی سرهای آبدوست سطح فعال با گروه‌های باردار سطح پارچه وارد واکنش شده و در لایه بالایی سرها با مولکول‌های آب وارد واکنش می‌شوند). به دلیل ساختار

موجود نمی‌باشد که به دلیل ایجاد پوشش یکنواخت پلی پیرول بر سطح پنبه است. توضیح آن که طیف مادون قرمز نمونه پنبه‌ای شاهد عینا مشابه با نمونه پلیمریزه شده با فرآیند پلیمریزاسیون ادمایسلی بود. طیف سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه حضور پوشش پلی پیرول را بر نمونه‌های پنبه‌ای عمل شده تایید نمود.

۳-۵- ریخت‌شناسی پارچه‌ها

تصاویر میکروسکوپ SEM نمونه شاهد تجمع ذرات پلی پیرول را بر سطح الیاف نشان داد. همچنین سطح الیاف نیز بطور کامل با پلی پیرول پوشش‌دهی نشده و در برخی نواحی پوشش پلیمری روی الیاف تشکیل نشده بود (شکل ۷-ب). مشاهده می‌شود که نمونه پلیمریزه شده توسط فرآیند پلیمریزاسیون ادمایسلی بطور کامل بوسیله پلی پیرول پوشش‌دهی شده و پوشش یکنواختی از پلی پیرول بر آن تشکیل شده است (شکل ۷-ج). بر اساس تصاویر میکروسکوپ الکترونی مشاهده می‌شود که در مقایسه با پنبه خام در اثر پوشش‌دهی با پوشش پلی پیرول ناهمواری سطحی نمونه‌های عمل شده افزایش یافته است ولی در مقایسه با نمونه شاهد، نمونه پلیمریزه شده با استفاده از پلیمریزاسیون ادمایسلی دارای پوششی یکنواخت‌تر بوده و میزان ناهمواری بالاتری را دارد. همان‌طور که در شکل ۷-ب پیداست در بسیاری از قسمت‌ها بر سطح الیاف شاهد پوشش پلیمری تشکیل نشده و فقط در برخی از نواحی تجمعات ذرات پلی پیرول مشاهده می‌شود. ولی با توجه به شکل ۷-د مشاهده می‌شود که در اثر پلیمریزاسیون ادمایسلی سطح الیاف پنبه بطور کامل با ذرات پلی پیرول پوشش‌دهی شده و میزان ناهمواری سطحی در تمامی سطح الیاف بطور یکنواخت افزایش یافته است. با توجه به تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی ملاحظه شد که در نمونه‌های پلیمریزه شده با پلیمریزاسیون ادمایسلی در مقایسه با نمونه شاهد پوشش یکنواخت‌تری بر سطح الیاف تشکیل می‌شود.

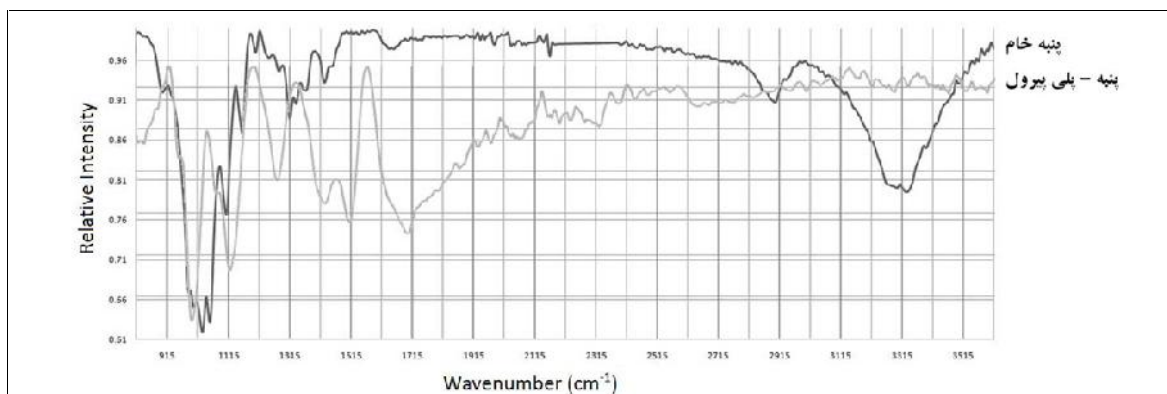
(کمی مایل به زرد کم‌رنگ) به سیاه تغییر می‌یابد که رنگ سیاه نشان دهنده شکل‌گیری پلی پیرول می‌باشد [۷-۵]. در این طرح تحقیقاتی با توجه به مقالات موجود و اینکه استفاده از آغازگر کلرید آهن ($FeCl_3$) باعث رسوب قالب سطح فعالی تشکیل شده بر روی سطح پارچه شده و خاصیت خود را از دست می‌دهد از آغازگر پلیمریزاسیون آمونیوم پرسولفات (APS) استفاده شد [۲۳]. شکل ۵ تصاویر گرفته شده از پارچه پنبه‌ای را پس از انجام فرآیند پلیمریزاسیون نشان می‌دهد. تغییر رنگ پارچه به رنگ مشکی نشان دهنده ایجاد پلی پیرول بر آن می‌باشد. لازم به ذکر است که رنگ نمونه‌های شاهد نیز مشابه با نمونه‌های عمل شده با فرآیند پلیمریزاسیون ادمایسلی می‌باشد.



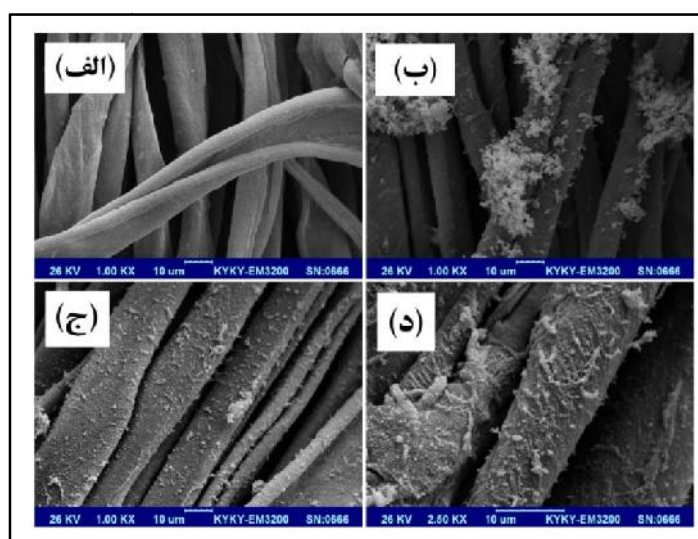
شکل ۵: پارچه پنبه‌ای قبل (سمت چپ) و بعد از (سمت راست) ایجاد پوشش پلی پیرول پس از فرآیند پلیمریزاسیون ادمایسلی.

۳-۴ - مشخصه‌سازی پوشش پلیمری پلی پیرول

در مقایسه با پنبه خام، طیف ATR-FTIR نمونه پنبه‌ای که توسط فرآیند پلیمریزاسیون ادمایسلی پلیمریزه شده بود، پیک‌های شاخص پیرول را در 1506 cm^{-1} (پیوند کششی $C=C$)، 1432 cm^{-1} (پیوند کششی $C=C$)، 1274 cm^{-1} (پیوند کششی $C-N$)، 1082 cm^{-1} (ارتعاشی $C-H$) و 1997 cm^{-1} (پیوند خمشی حلقه پیرول در صفحه $C=C$) نشان داد (شکل ۶) [۲۶]. همچنین ملاحظه شد که پس از پوشش‌دهی با پلی پیرول پیک گروه‌های هیدروکسیل پنبه (3350 cm^{-1}) در طیف سنجی ATR-FTIR



شکل ۶: طیف‌های ATR-FTIR پارچه‌های پنبه‌ای خام و پوشش دهی شده با پلی پیرویل طی فرآیند پلیمریزاسیون ادمایسلی.



شکل ۷: تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM)، (الف) پنبه خام، (ب) پنبه شاهد، (ج) پنبه پلیمریزه شده با فرآیند پلیمریزاسیون ادمایسلی و (د) بزرگنمایی ۲۵۰۰ برابر نمونه پنبه پلیمریزه شده با فرآیند پلیمریزاسیون ادمایسلی.

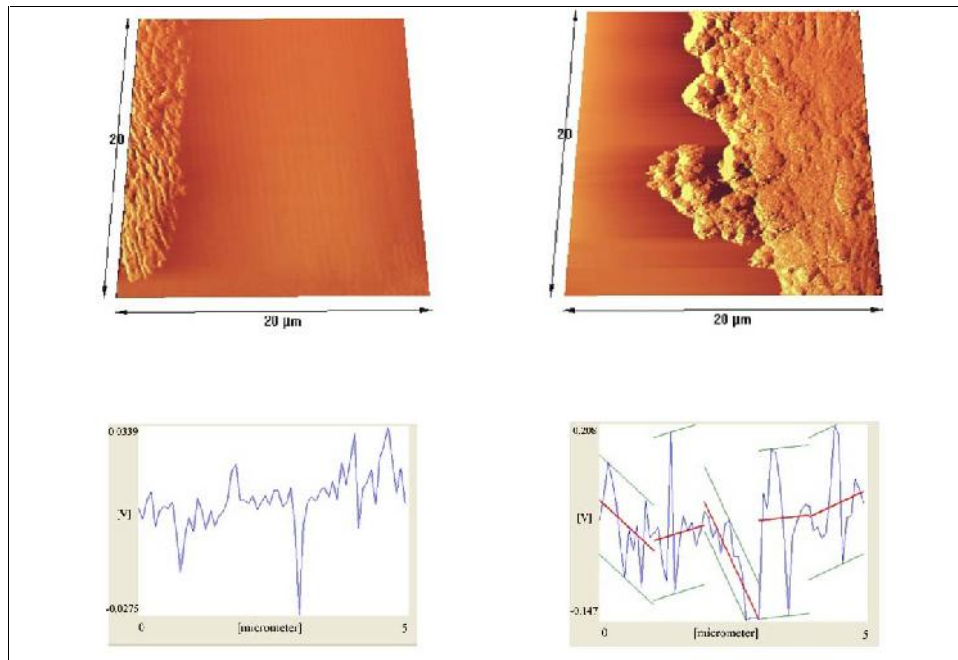
پوشش دهی پنبه کاتیونی با ذرات کروی پلی پیرویل میزان ناهمواری سطحی افزایش چشمگیری یافت (۷۵ نانومتر) و در حدود ۳۴۱٪ افزایش یافت. نتایج میکروسکوپ AFM نشان داد که پلیمریزاسیون ادمایسلی و پوشش دهی الیاف پنبه تاثیر بسزایی را در افزایش ناهمواری سطحی الیاف خواهد داشت.

۷-۳- مقاومت الکتریکی

جدول ۱ نتایج مقاومت الکتریکی نمونه‌های خام و عمل شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود نمونه خام فاقد خصوصیت هدایت الکتریکی می‌باشد. پس از پلیمریزاسیون و پوشش دهی با پلی پیرویل، مقاومت الکتریکی نمونه‌ها کاهش یافت.

۶-۳- توپوگرافی سطحی

در این تحقیق میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) جهت بررسی میزان ناهمواری سطحی الیاف پنبه خام و عمل شده با پلی پیرویل با استفاده از پلیمریزاسیون ادمایسلی مورد استفاده قرار گرفت. همان‌طور که پیش از این در تصاویر میکروسکوپ SEM ملاحظه گردید به دلیل تجمعات ذرات پلی پیرویل بدون حضور سطح فعال تصویربرداری از پنبه عمل شده با پلی پیرویل توسط میکروسکوپ AFM امکان‌پذیر نبود. با توجه به شکل ۸-الف خطوط موازی محور الیاف پنبه خام که حول محور لیف پیچیده‌اند ساختار فیبریلی پنبه را نشان دادند. میزان ناهمواری الیاف پنبه (Rq) با توجه به تصاویر میکروسکوپ AFM در حدود ۱۷ نانومتر به دست آمد. با



شکل ۸: تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی و پروفایل ناهمواری الیاف پنبه: الف) خام و ب) پوشش دهی شده با پلی پیروول طی فرآیند پلیمریزاسیون ادمایسلی.

۳-۸- خواص ابرآبگریزی

با توجه به جدول ۱ ملاحظه می شود که نمونه شاهد پس از اصلاح سطحی با هگزا سدیل تری متوکسی سیلان دارای سطحی آبگریز می شود. در مورد پارچه پلیمریزه شده به وسیله پلیمریزاسیون ادمایسلی پس از اصلاح با آلکیل سیلان زاویه تماس افزایش چشمگیری می یابد. با توجه به ساختار متخلخل و روبانی مانند الیاف پنبه، پارچه پنبه‌ای خود دارای ناهمواری در مقیاس میکرو می باشد. همان طور که پیش از این اشاره شد، با استفاده از پلیمریزاسیون ادمایسلی پوششی نانو ساختار روی الیاف تشکیل می شود. بنابراین در اثر انجام پلیمریزاسیون ادمایسلی پلی پیروول روی سطح پارچه پنبه‌ای، پوششی نانومقیاس روی آن تشکیل می شود که با توجه به نتایج میکروسکوپ نیروی اتمی روی الیاف ساختاری ناهموارتر ایجاد می نماید (شکل ۸). بنابراین ایجاد ناهمواری نانومقیاس پلی پیروول روی پارچه پنبه‌ای که خود دارای ساختار ناهموار میکرومقیاس می باشد منجر به ایجاد ساختار Hierarchical (ناهمواری در دو مقیاس) گردیده و باعث افزایش فاکتور میزان

در مقایسه دو نمونه شاهد و پلیمریزه شده با پلیمریزاسیون ادمایسلی نمونه‌ای که توسط پلیمریزاسیون ادمایسلی پوشش دهی شده رساناتر است، چرا که مقاومت الکتریکی پایین تری را دارد.

همان طور که تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داده بودند با استفاده از پلیمریزاسیون ادمایسلی پوشش یکنواختی از پلی پیروول بر سطح الیاف شکل گرفته و تجمع میان ذرات پلی پیروول به شدت کاهش می یابد. پوشش یکنواخت تر و ارتباط بهتر مابین ذرات پلی پیروول در داخل ماتریکس پلیمری باعث می شود تا الکترون و جریان الکتریکی با سهولت بیشتری انتقال یافته و هدایت الکتریکی در حدود ۵۲٪ نسبت به نمونه شاهد افزایش یابد. با توجه به نتایج هدایت الکتریکی مشخص گردید که استفاده از سطح فعال سدیم دودسیل سولفات به سطح فعال سدیم دودسیل بنزن سولفونات که در تحقیق‌های مشابه جهت پلیمریزاسیون ادمایسلی پلی پیروول مورد استفاده قرار گرفته است باعث افزایش میزان رسانایی تا ۱۲٪ می گردد.

پیرول بدون حضور سطح فعال باعث افزایش میزان چسبندگی قطره آب به سطح پارچه شده و نشان می‌دهد که علاوه بر اینکه میزان ناهمواری سطحی نسبت به حالتی که از سطح فعال استفاده می‌شود کمتر است، مدل ترشوندگی سطح از نظریه Wenzel تبعیت می‌نماید.

جدول ۲: مقادیر زاویه WSA نمونه‌های عمل شده.

زاویه لغزش (WSA)	نمونه
43 ± 1	شاهد
21 ± 1	پوشش دهی شده با پلیمریزاسیون ادمایسلی

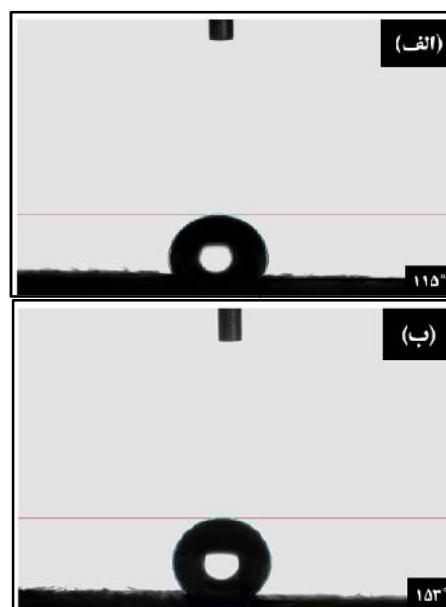
۴ - نتیجه گیری

با توجه به اهمیت منسوجات چند کاربردی در این تحقیق هدف روشی نوین جهت تولید پارچه پنبه‌ای چند کاربردی با خواص هدایت الکتریکی و ابرآبگریزی ارائه گردید. این گونه منسوجات به واسطه هدایت الکتریکی می‌توانند بستری مناسب جهت نصب تجهیزات الکترونیکی و یا برقراری اتصال بین قطعات باشند و از سویی دیگر با اتکا بر خاصیت ابرآبگریزی خود قادرند شخص و تجهیزات نصب شده را در برابر آب و رطوبت محافظت نمایند. نتایج نشان دادند که فرآیند پلیمریزاسیون ادمایسلی پلی پیرول و اصلاح سطحی متعاقب با آلکیل سیلان قادر است خصوصیات ابرآبگریزی و هدایت الکتریکی را در مقایسه با روش معمول ارتقا دهد. از سویی دیگر نتایج نشان دادند که با توجه به خصلت آبرگریزی پلیمرهای هادی نظیر پلی پیرول، نشان دادن آنها روی سطوح ذاتا آبدوستی نظیر پنبه با روش‌های معمول می‌تواند باعث افزایش احتمال غیریکسواختی گردد. در حالی که در روش پلیمریزاسیون ادمایسلی این نقیصه کاهش می‌یابد و پوششی یکنواخت تر حاصل می‌گردد.

مراجع

- [1] C. Yuan, L. Hou, D. Li, L. Shen, F. Zhang, X. Zhang, *Electrochim. Acta*, **56**, 2011, 6683
 [2] A. Schwarz, L. Van Langenhove, "Types and processing of electro- conductive and semiconducting materials for smart

ناهمواری (فاکتور ناهمواری) می‌شود. از طرفی پس از اصلاح سطحی با هگزادسیل تری متوکسی سیلان کشش سطحی پارچه کاهش یافته و باعث می‌شود تا سطحی ابرآبگریز روی پنبه ایجاد شود (شکل ۹).



شکل ۹: تصاویر قطرات آب و زاویه تماس استاتیک آب با سطح پارچه‌های پنبه‌ای پوشش دهی شده با پلی پیرول و اصلاح شده با آلکیل سیلان، (الف) شاهد و (ب) پوشش دهی شده طی فرآیند پلیمریزاسیون ادمایسلی.

در مورد نمونه شاهد (پوشش دهی شده با پلی پیرول بدون حضور سطح فعال) زاویه تماس قطره با سطح پارچه در حدود ۱۱۵ درجه بود که نشان دهنده میزان ناهمواری کمتر الیاف پنبه‌ای در صورت عدم حضور سطح فعال SDS می‌باشد. با توجه به مقادیر WSA (جدول ۲) ملاحظه می‌شود که میزان چسبندگی قطره آب با سطح پارچه پوشش دهی شده با پلی پیرول طی فرآیند پلیمریزاسیون ادمایسلی کمتر از سایر نمونه‌ها می‌باشد. این مسئله نشان می‌دهد که با استفاده از فرآیند پلیمریزاسیون ادمایسلی به دلیل ناهموارتر شدن سطح و محبوس شدن هوا و افزایش f_{LA} مقادیر زاویه تماس استاتیک افزایش یافته و میزان لغزندگی قطره بر سطح افزایش می‌یابد و بنابراین سطح بیشتر از مدل ترشوندگی Cassie-Baxter تبعیت می‌نماید. در خصوص نمونه شاهد، پوشش دهی با پلی

- [14] T. Pongprayoon, N. Yanumet, E.A. O'Rear, *J. Colloid Inter. Sci.*, **249**, 2002, 227.
- [15] A. Berendjchi, M.E. Yazdanshenas, *Nanoscale Res. Let.*, **6**, 2011, 594.
- [16] C.T. Hsieh, F.L. Wu, S.Y. Yang, *Surf. Coat. Tech.*, **202**, 2008, 6103.
- [17] C. Neinhuis, *Annals of Botany*, **79**, 1997, 667.
- [18] W. Barthlott, C. Neinhuis, *Planta*, **202**, 1997, 1.
- [19] M. Nosonovsky, B. Bhushan, *Current Opinion in Colloid Interface Science*, **14**, 2009, 270.
- [20] M.R. Nateghi, S. Dehghan, M. Shateri Khalil-Abad, *Int. J. Polym. Mat. Polym. Biomaterials*, **62**, 2015, 648.
- [21] C.H. Xue, J. Chen, W. Yin, S.T. Jia, J.Z. Ma, *Appl. Surf. Sci.*, **258**, 2012, 2468.
- [22] A. Varesano, F. Rombaldoni, C. Tonetti, *Fibers and Polymers*, **14**, 2013, 703.
- [23] P. Lekpittaya, N. Yanumet, B.P. Grady, *J. Appl. Polym. Sci.*, **92**, 2003, 2629.
- [24] S. Boufi, S.A. Gandidni, *Cellulose*, **10**, 2002, 1.
- [25] T. Pongprayoon, N. Yanumet, E.A. O'Rear, *J. Colloid Interf. Sci.*, **249**, 2002, 227.
- [26] A.J. Patil, A.K. Pandey, *Indian Journal of Fibre and Textile Research*, **37**, 2012, 107.
- textiles, Multidisciplinary know-how for smart-textiles developers*", Woodhead Publishing, England, 2013.
- [3] B. Xu, J. Ding, L. Feng, Y. Ding, F. Ge, Z. Cai, *Surf. Coat. Technol.*, **262**, 2015, 70.
- [4] N. Muthukumar, G. Thilagavathi, *Journal of Textile and Apparel Technology and Management*, **7**, 2012, 1.
- [5] L. Hu, M. Pasta, F. La Mantia, L. Cui, S. Jeong, H. Dawn Deshazer, J.W. Choi, S.M. Han, *Nano Letters*, **10**, 2010, 708.
- [6] S. Hanumansetty, E. O'Rear, D.E. Resasco, *Colloids Surf. A*, **474**, 2015, 1.
- [7] C. Poochai, T. Pongprayoon, *Colloids Surface. A*, **456**, 2014, 67.
- [8] G. Liang, L. Zhu, J. Xu, D. Fang, Z. Bai, W. Xu, *Electrochim. Acta*, **103**, 2013, 9.
- [9] H.T. Yang, L.J. Wang, *Adv. Mat. Res.*, **113**, 2010, 2030.
- [10] T. Sudwilai, J.J. Ng, C. Boonkrai, N. Israsena, S. Chuangchote, P. Supaphol, *J. Biomaterials sci.*, **25**, 2014, 1240.
- [11] C.L. Lai, J.H. Harwell, E.A. Rear, S. Komatsuzaki, J. Arai, T. Nakakawaji, Y. Ito, *Langmuir*, **11**, 1995, 905.
- [12] A. Yella, C.L. Mai, S.M. Zakeeruddin, S.N. Chang, C.H. Hsieh, C.Y. Yeh, *Angewandte Chemie*, **126**, 2014, 3017.
- [13] X. Shi, Y. Hu, F. Fu, J. Zhou, Y. Wang, L. Chen, *J. Mater. Chem. A*, **2**, 2014, 7669.