

## مشخصه یابی و تعیین کارایی فوتوکاتالیستی نانوالیاف SiO<sub>2</sub> ساخته شده به روش الکتروریسی

رقیه سلطانی ناصری و حبیب حمیدی نژاد\*

گروه فیزیک حالت جامد، دانشکده علوم پایه، دانشگاه مازندران، بابلسر، مازندران، ایران

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۹/۱۲/۰۹، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۴۰۰/۰۲/۲۹، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۴۰۰/۰۳/۲۵

### چکیده

در این کار، نانوالیاف دی اکسید سیلیکون به روش الکتروریسی ساخته شد. سپس نانوالیاف تولید شده در یک کوره الکتریکی در سه دمای ۳۰۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ °C و هر کدام به مدت ۲ h در معرض عملیات حرارتی قرار گرفتند. به منظور تعیین مشخصات ساختاری نانوالیاف دی اکسید سیلیکون، از تکنیک‌های XRD، FESEM و EDX استفاده شد و همچنین پراکندگی عناصر آن با آنالیز X-MAP مشاهده شد. برای بررسی اثر فوتوکاتالیستی، تجزیه رنگ‌های متیلن آبی و متیل نارنجی با استفاده از نانوالیاف دی اکسید سیلیکون به عنوان یک نانوفتوکاتالیست و با بکارگیری اشعه فرابنفش، بررسی شد. تصاویر FESEM، ساختار نانوالیاف SiO<sub>2</sub> را با قطری در محدوده ۵۰۰-۴۰۰ nm نشان داد. نتایج XRD مربوط به نمونه‌های نانوالیاف اکسید سیلیکون کلسینه نشده، قله‌های گسترده‌ای در محدوده  $2\theta = 15-25^\circ$  را با ساختاری آمورف نشان می‌دهد، نتایج نشان داد که بیشترین سرعت واکنش برابر  $163 \times 10^{-4} \text{ min}^{-1}$  و کمترین سرعت واکنش برابر  $61 \times 10^{-4} \text{ min}^{-1}$  و مربوط به رنگ متیل است. نانوالیاف SiO<sub>2</sub> کلسینه شده در دمای ۷۰۰ °C، خاصیت فوتوکاتالیستی بهتری از نانوالیاف SiO<sub>2</sub> کلسینه شده در دمای ۵۰۰ و ۳۰۰ °C به ترتیب برای تجزیه رنگ متیلن آبی و متیل نارنجی دارد. بر این اساس نانوالیاف اکسید سیلیکون به عنوان یک ماده جاذب ارزان و با امکان آماده‌سازی آسان در شرایط مختلف می‌تواند در تصفیه آب و فاضلاب مورد استفاده قرار گیرد.

**واژه‌های کلیدی:** نانوالیاف اکسید سیلیکون، متیلن آبی، متیل نارنجی، نانوفتوکاتالیست، الکتروریسی.

### ۱- مقدمه

شیمیایی، آفت کش‌ها، علف کش‌ها و قارچ کش‌ها در صنعت کشاورزی موجب آلودگی محیط زیست و آب می‌شود. مواد رنگزای آلی در پساب‌های صنعتی به دلیل وجود آروماتیک‌ها، نمک‌ها و کلریدها برای زندگی آبزیان مضر هستند و با کاهش نفوذ نور، بر فعالیت فتوسنتزی گیاهان

امروزه آلودگی محیط زیست یک معضل جهانی به شمار می‌آید. روزانه هزاران نوع رنگ مختلف سنتزی تولید شده در صنایع مختلف و همچنین استفاده فزاینده از کودهای

\* عهده‌دار مکاتبات: حبیب حمیدی نژاد

نشانی: گروه فیزیک حالت جامد، دانشکده علوم پایه، دانشگاه مازندران، بابلسر، مازندران، ایران

تلفن: ۰۱۱-۳۵۳۰۲۴۸۵، دورنگار: ۰۱۱-۳۵۳۰۲۴۸۵، پست الکترونیکی: h.hamidinezhad@umz.ac.ir

شکل می‌دهند [۲۱، ۲۰]. الیاف در ابعاد نانومتری خواص فیزیکی و شیمیایی منحصربفردی دارند که آن‌ها را از سایر ساختارهای یک بعدی متمایز می‌سازد. نسبت سطح به حجم بالای نانوالیاف موجب افزایش سرعت واکنش‌های شیمیایی می‌شود که این سطح برای فناوری‌های جدید بسیار مفید است. چگالی پایین و نسبت سطح به جرم بالا از دیگر ویژگی نانوالیاف می‌باشد که آن‌ها را برای گستره وسیعی از کاربردها در زمینه‌های مختلف پزشکی، تصویربرداری، دارورسانی هدفمند، شناسایی سلول‌های سرطانی، مهندسی بافت و ... مناسب می‌سازد [۲۳، ۲۲].

در این تحقیق، از نانوالیاف  $\text{SiO}_2$ ، به علت مساحت سطح بزرگتر و ظرفیت بالاتر برای جذب رنگ‌های آلی، به منظور از بین بردن رنگ‌های متیلن آبی و متیل نارنجی استفاده شده است. روش الکترورسی یک روش ساده و آسان برای تهیه نانوالیاف پیوسته و با قطر متفاوت با استفاده از مواد گوناگون تحت تاثیر میدان الکترواستاتیکی می‌باشد [۲۵، ۲۴]. ویژگی‌هایی چون سطح ویژه بالا، یک بعدی بودن و قابلیت بازیافت مناسب نانوالیاف اکسید فلزی، رادمان فعالیت فتوکاتالیستی آن‌ها افزایش می‌دهد [۲۷، ۲۶]. خصوصاً، نانوالیاف  $\text{SiO}_2$  که شامل مجموعه‌ای از نانوذرات اکسید سیلیکون می‌باشد به دلیل زیست‌سازگاری، ویژگی‌های جذب، غیرسمی بودن، پایداری شیمیایی بالا و آبدوست بودن که برای جذب سطحی مطلوب است، در صنایعی همچون داروسازی هدفمند، صنعت بسته‌بندی، میکروالکترونیک، انرژی، فتوکاتالیست‌ها، پزشکی، ساختارهای کوانتومی، محیط زیست و ... کاربرد فراوان دارد [۲۸-۳۴]. روش کلی برای بررسی عوامل موثر بر فعالیت فتوکاتالیستی، تغییر یک عامل موثر به صورت مجزا و یا استفاده از مواد با خواص و ساختاری ویژه صورت می‌گیرد. در این تحقیق تلاش شده است تا علاوه بر در نظر گرفتن ویژگی‌ها و خواص مذکور برای نانوالیاف  $\text{SiO}_2$ ، فعالیت فتوکاتالیستی  $\text{SiO}_2$  کلسینه شده در سه دمای مختلف، بررسی شود تا مقادیر بهینه‌ای از فعالیت فتوکاتالیستی این نانوالیاف

آبزی تاثیر می‌گذارند و موجب کند شدن فرآیند فتوستنتز می‌گردند [۵-۱]. از این رو، بکارگیری روش‌هایی موثر و کم هزینه برای حذف رنگ از پساب‌ها بسیار حائز اهمیت است [۶]. متیلن آبی رایج‌ترین ترکیب رنگی مورد استفاده برای رنگ آمیزی پنبه، پشم، ابریشم و ... است. استنشاق بخار این ماده سبب اختلال در تنفس شده و مواجهه مستقیم با آن سبب آسیب دائمی به چشم، سوختگی موضعی، تهوع و استفراغ، افزایش تعریق، اختلالات ذهنی و ... می‌شود [۷]. رنگ آنیونی متیل نارنجی به شدت سمی می‌باشد و اگر بلعیده یا استنشاق گردد موجب آسیب دائمی به بدن انسان می‌شود. این رنگ در مقابل نور یا شستشو بسیار پایدار بوده و مقاومت بالایی دارد و به آسانی تجزیه نمی‌شود [۸-۱۰]. بنابراین کاهش و حذف این رنگ‌ها از پساب‌ها بسیار ضروری است. در مطالعه‌ای فخری و همکاران [۱۱] به بررسی فعالیت فتوکاتالیستی نانوکامپوزیت  $\text{Cr}_2\text{S}_3\text{-SiO}_2$  پرداختند و با اندازه گیری فاکتورهای بهینه‌ای مانند زمان و pH، توانستند فعالیت ضد میکروبی خوبی را در تحقیقات بیولوژیکی نشان دهند. در مطالعه‌ای دیگر سوی و همکاران [۱۲] فعالیت فوتوکاتالیستی نانوالیاف  $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$  را بررسی کردند که در نتیجه آن دمای  $600^\circ\text{C}$  بهترین بازده تخریب را نشان داد. در میان تمامی روش‌های موجود جهت تصفیه پساب‌های حاوی رنگدانه‌ها، تجزیه نانوفتوکاتالیستی به دلیل مقرون به صرفه بودن و عدم تولید لجن در طی فرآیند و قابلیت استفاده در مقیاس بالا، از توجه زیادی برخوردار است. در این روش ذرات نیمه‌رسانا تحت تابش فرابنفش برانگیخته شده و با تولید رادیکال‌های آزاد منجر به تخریب آلاینده‌های آلی می‌گردد [۱۳-۱۶]. نیمه هادی‌هایی با ساختار نانو، مانند نانوذرات، نانولوله‌ها و نانوغشاهای دی اکسید تیتانیوم و اکسید روی به عنوان کاتالیست جهت تجزیه و معدنی کردن رنگزهای آلی استفاده می‌شوند [۱۷-۱۹]. دی اکسید سیلیکون که از دو عنصر سیلیسیوم و اکسیژن تشکیل شده است، ساختاری مشابه ساختار مولکول آب دارد. نانوذرات اکسید سیلیکون بسیار سخت و محکم بوده و کمتر تغییر

به منظور انجام آزمایش فتوکاتالیستی، نانوالیاف دی‌اکسید سیلیکون را در محلول‌های آلی متیلن آبی و متیل نارنجی ریخته و سپس به جهت یکنواختی، آن‌ها را سونیک کردیم و تحت یک لامپ مهتابی UV در محیط آزمایشگاه قرار دادیم و در بازه‌های ۰/۵ ساعته فعالیت فتوکاتالیستی  $\text{SiO}_2$  را مورد بررسی قرار دادیم [۳۵،۳۶].

### ۳- نتایج و بحث

تصویربرداری FESEM به منظور بررسی مورفولوژی و ریزساختار نانوالیاف سنتز شده، انجام گرفت. شکل (a-c) ۱ تصاویر FESEM نانوالیاف  $\text{SiO}_2$  با بزرگنمایی ۱۰، ۲ و  $1 \mu\text{m}$  را نشان می‌دهد. این تصاویر نشان می‌دهند که نانوالیاف مذکور به صورت پیوسته ساخته شده و دارای قطری در مقیاس نانومتر و طولی در مقیاس میکرومتر می‌باشند. قطر نانوالیاف ساخته شده بین  $400 \text{ nm}$  تا  $500 \text{ nm}$  می‌باشد که در مقایسه با مطالعه ماتسیاک و همکاران [۳۷] و همچنین کار تانسکی و همکاران [۳۸] که به بررسی خواص نوری الیاف نازک  $\text{SiO}_2$  پرداختند، کمتر است. همچنین این نانوالیاف سطحی هموار و صاف دارند که به علت دارا بودن نسبت سطح به حجم بالا، برای فعالیت فتوکاتالیستی بسیار مناسب است. با توجه به شکل ۱ می‌توان دریافت که طول نانوالیاف بسیار بلند و دارای چگالی سطحی بالایی به صورت درهم تنیده بر ساخته شده‌اند.

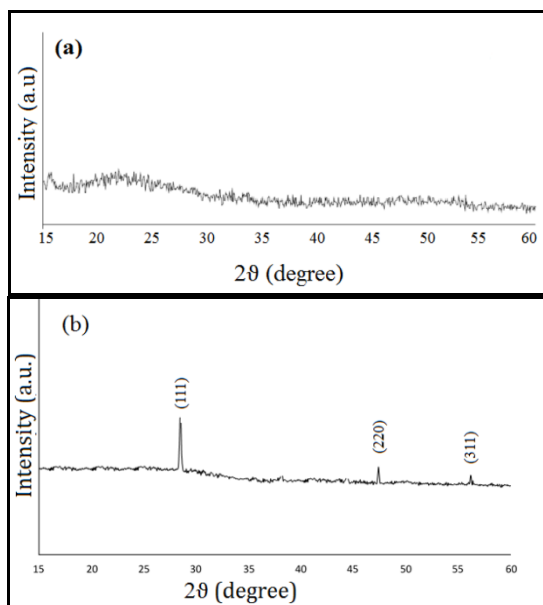
آنالیز XRD به منظور بررسی ساختاری نانوالیاف سنتز شده، انجام شد. شکل ۲ الگوی پراش اشعه ایکس نانوالیاف  $\text{SiO}_2$  خام و پخته شده را نشان می‌دهد. با بهره‌گیری از آنالیز XRD به مطالعه ساختاری نمونه‌های بدست آمده بعد از الکترورسی و قبل و بعد از عملیات حرارتی پرداختیم. شکل ۲a تصویر XRD به خوبی نشان می‌دهد که نمونه نانوالیاف  $\text{SiO}_2$  پخته نشده دارای ساختار آمورف و بی‌شکل است و فرآیند بلوری شدن بصورت کامل انجام نشده است، زیرا حضور قله‌های پهن در محدوده  $2\theta$  بین  $15^\circ$ – $25^\circ$  معمولاً به عنوان قله سیلیکای آمورف مطرح می‌شود که با مطالعات ماتسیاک

بدست آید. در این پژوهش، ابتدا نانوذره  $\text{SiO}_2$  به روش سل-ژل سنتز شد و سپس از آن برای ساخت نانوالیاف اکسید سیلیکون به روش الکترورسی استفاده شد. مورفولوژی و ساختار نانوالیاف ساخته شده، با استفاده از تکنیک‌های پراش پرتو ایکس (XRD)، میکروسکوپ الکترون روبشی انتشار میدان (FESEM) و طیف‌سنجی پراش انرژی ایکس (EDX) مورد مطالعه قرار گرفت. در نهایت اثر نانوالیاف اکسید سیلیکون در حذف رنگدانه‌های متیلن آبی و متیل نارنجی از محیط آبی بررسی شد.

### ۲- فعالیت‌های تجربی

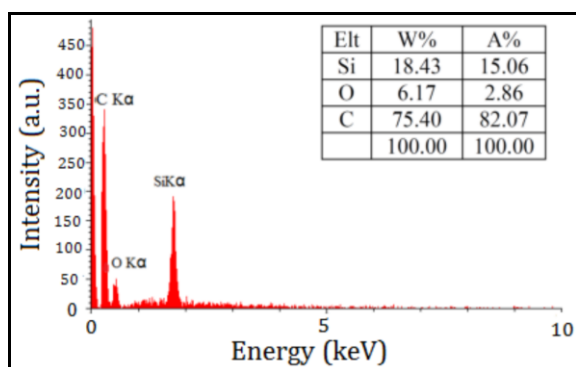
مواد شیمیایی مورد استفاده در این پژوهش، محصول شرکت مرک و شامل تترااتیل اورتوسیلیکات (TEOS)، پلی‌وینیل پیرولیدون (PVP)، اتانول، متیلن آبی و متیل نارنجی می‌باشد. دستگاه‌های استفاده شده جهت آنالیز شامل اسپکتروفوتومتر UV-Vis مدل Optizen POP محصول کمپانی Mecasys برای اندازه‌گیری میزان رنگبری، پراش اشعه ایکس مدل Philips PW1730-Holland میکروسکوپ الکترون روبشی انتشار میدان مدل Hitachi S-4800، Japan، طیف‌سنجی پراش انرژی ایکس (EDX) و X-MAP می‌باشد. وسایل مورد استفاده در این پژوهش شامل لامپ فرابنفش کم فشار، دستگاه اولتراسونیک، ترازوی دیجیتال، همزن مغناطیسی، کوره الکتریکی و دستگاه الکترورسی می‌باشد.

ابتدا نانوذره  $\text{SiO}_2$  به روش سل-ژل سنتز شد. محلول نانوذره بوسیله حل کردن تترااتیل اورتوسیلیکات و اتانول به ترتیب با نسبت‌های مولی ۱۰:۰/۲ یا ۰/۷ گرم پلی‌وینیل پیرولیدون در دمای اتاق تهیه شد و به مدتی هم‌زده شد و سپس برای تهیه نانوالیاف مورد نظر به سرنگ الکترورسی تزریق گردید. برای بررسی ساختار و مشخصه‌یابی نانوالیاف تولید شده، آنالیزهای XRD، EDS، X-MAP، FESEM بر روی آن‌ها انجام گرفت. همچنین جهت بررسی فعالیت نانوفتوکاتالیستی، نانوالیاف  $\text{SiO}_2$  را در کوره الکتریکی در سه دمای  $300^\circ\text{C}$ ،  $500^\circ\text{C}$  و  $700^\circ\text{C}$  کلسینه کردیم.



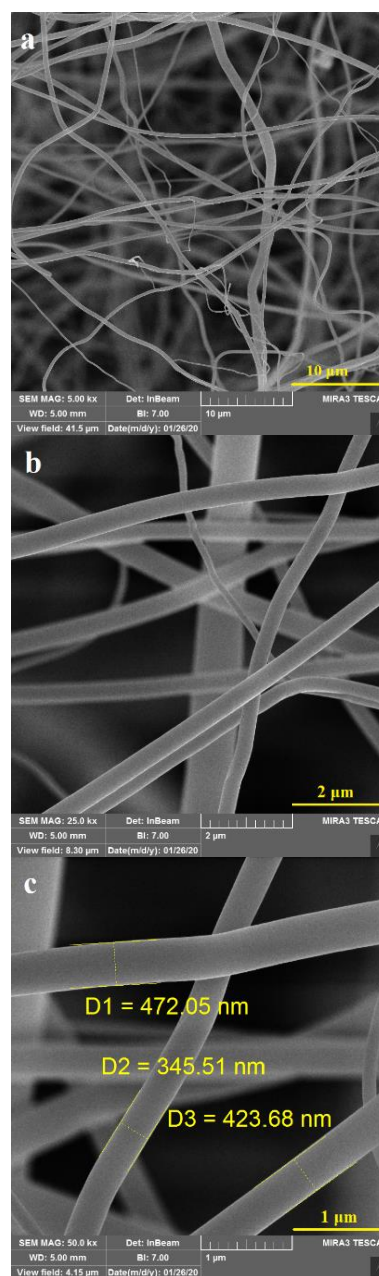
شکل ۲: منحنی XRD نانوالیاف  $\text{SiO}_2$ ، (a) قبل از عملیات حرارتی و (b) بعد از عملیات حرارتی.

شکل ۳ آنالیز EDX مربوط به نانوالیاف  $\text{SiO}_2$  می‌باشد. این آنالیز به جهت تعیین عناصر موجود در ساختار نانوالیاف تولید شده، انجام شد. نتایج حاصل از این آنالیز نشان می‌دهد که فقط سیلیکون و اکسیژن در نمونه مشاهده می‌شود و عنصر کربن به دلیل استفاده از چسب کربنی برای ثابت نگه داشتن نمونه، در این آنالیز مشاهده می‌شود. با توجه به شکل ۳، شدت پیک سیلیکون بسیار بزرگتر از شدت پیک اکسیژن است.



شکل ۳: آنالیز EDX نانوالیاف  $\text{SiO}_2$

[۳۷] و تانسکی [۳۸] و همکاران مطابقت دارد. شکل ۲b تصویر XRD بعد از عملیات کلسینه شدن را نشان می‌دهد که قله پراش اصلی تقریباً در  $2\theta = 28.5^\circ$  مربوط به صفحه (۱۱۱) می‌باشد. سایر قله‌های پراکندگی در  $2\theta$  برابر با  $48^\circ$  و  $57^\circ$  به ترتیب مربوط به صفحات (۲۲۰) و (۳۱۱) هستند.

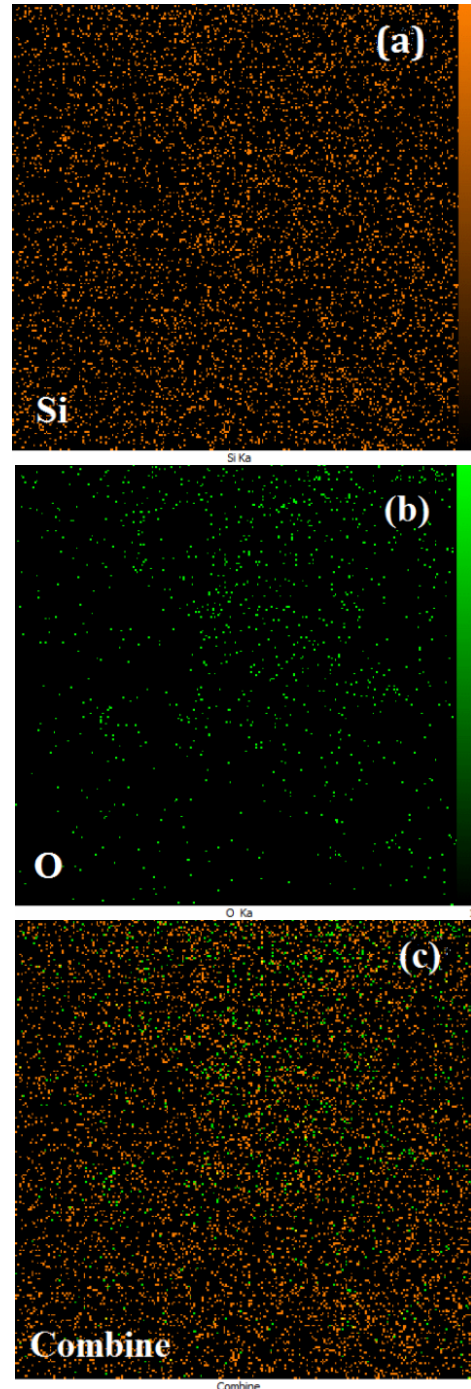


شکل ۱: تصویر SEM انتشار میدان نانوالیاف  $\text{SiO}_2$

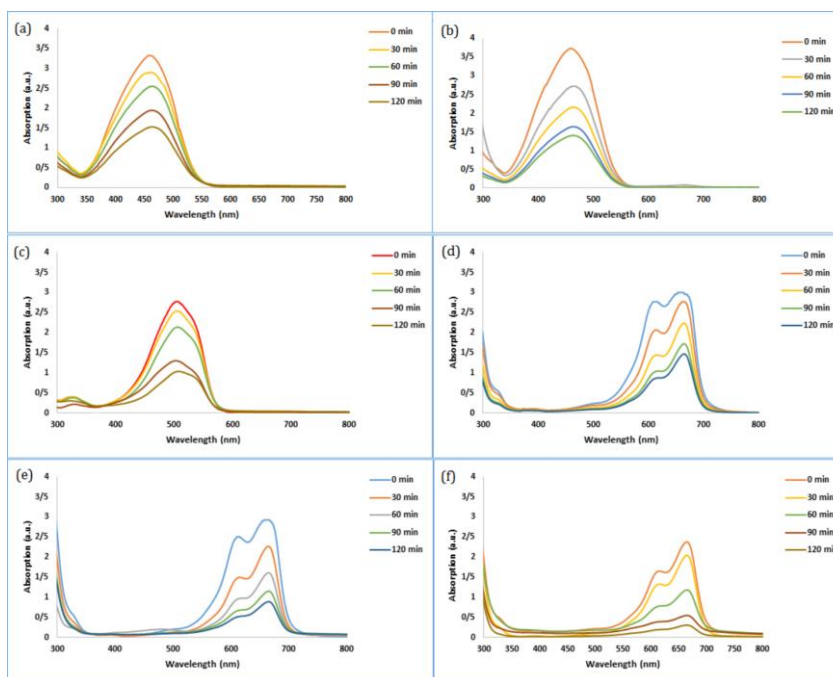
در تحقیق حاضر، جهت بررسی اثر فتوکاتالیستی نانوالیاف  $\text{SiO}_2$  پخته شده در سه دمای  $300^\circ\text{C}$ ،  $500^\circ\text{C}$  و  $700^\circ\text{C}$ ، از رنگ‌های متیلن آبی و متیل نارنجی به عنوان آلاینده استفاده شد. پس از تهیه ترکیب رنگ مذکور با نانوالیاف، نمونه‌های آماده شده در زمان‌های مختلف تحت تابش نور UV مورد بررسی قرار گرفتند. با توجه به نمودارهای بدست آمده در شکل‌های ۵ مشاهده می‌شود که با افزودن نانوالیاف  $\text{SiO}_2$  قله جذب رنگ به صورت کاهشی تغییر می‌کند. همانطوری که در نمودارهای شکل ۵c و ۵f دیده می‌شود تغییرات قله‌های جذب رنگ‌های مورد آزمایش، در دمای  $700^\circ\text{C}$  بطور محسوسی نسبت به تغییرات قله‌های جذب رنگ‌ها در دماهای  $500^\circ\text{C}$  و  $300^\circ\text{C}$  کاهش یافته است، که تاییدی بر اثر مثبت ویژگی فتوکاتالیستی نانوالیاف  $\text{SiO}_2$  در دمای  $700^\circ\text{C}$  می‌باشد که حاصل آن کاهش در غلظت رنگ‌های بکار رفته در آزمایش، می‌باشد. اگر چه مطالعه انجام شده بر روی  $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$  توسط سوی و همکاران [۱۲] نشان می‌دهد که آنها در دمای  $600^\circ\text{C}$  به فعالیت فتوکاتالیستی خوبی دست یافتند، ولی در آزمایش آن‌ها غلظت بالای از ماده فتوکاتالیست در پایان کار باقی می‌ماند. طیف جذبی نانوالیاف سنتز شده در این تحقیق نسبت به مطالعه کیانی و همکاران [۳۹] که بر روی نانوذرات کامپوزیتی  $\text{CoZnAg}_{0.0}$ ،  $\text{CoZn}$ ،  $\text{ZnAg}$ ،  $\text{CoZnAg}_{0.03}$  انجام دادند، تغییرات محسوسی دارد.

برای بررسی تاثیر افزودن نانوالیاف  $\text{SiO}_2$  بر فعالیت فتوکاتالیستی در ناحیه نور فرابنفش نمودار تغییرات غلظت را رسم کردیم تا ویژگی فتوکاتالیستی این نانوالیاف را به صورت متفاوت بررسی کنیم. شکل ۶، نمودار تغییرات غلظت رنگ‌های متیل نارنجی و متیلن آبی توسط نانوالیاف  $\text{SiO}_2$  را در دماهای  $300^\circ\text{C}$ ،  $500^\circ\text{C}$  و  $700^\circ\text{C}$  نشان می‌دهد که در آن،  $C_0$  غلظت اولیه‌ی محلول و C غلظت محلول در زمان t است. درصد جذب نانوالیاف  $\text{SiO}_2$  بوسیله رابطه بدست می‌آید:

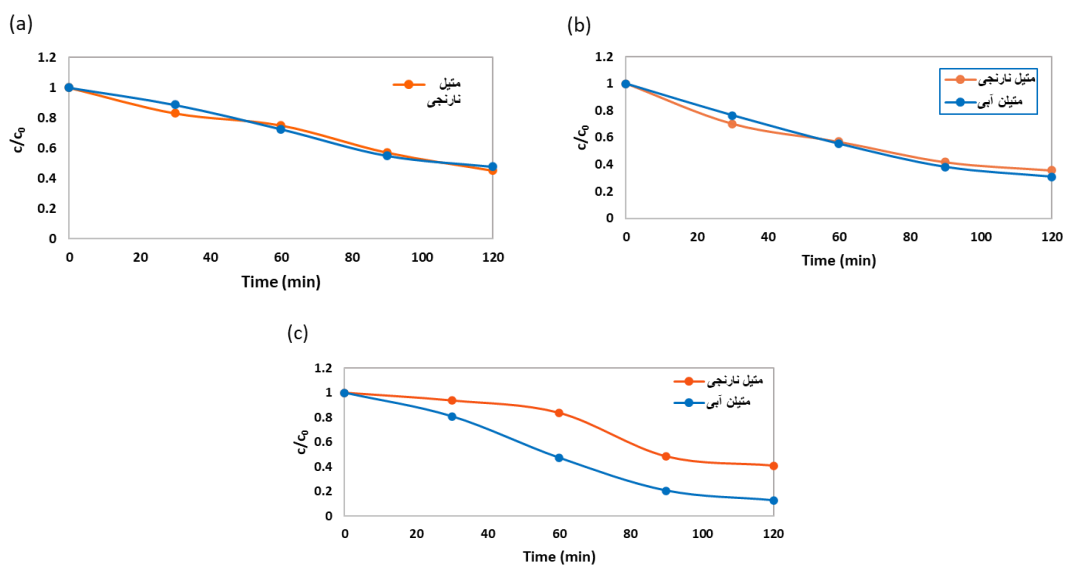
شکل ۴ آنالیز XMAP مربوط به نانوالیاف  $\text{SiO}_2$  می‌باشد که به جهت بررسی همگنی عناصر در این نانوالیاف مورد بررسی قرار گرفته است. این آنالیز نشان می‌دهد که توزیع سیلیکون در نانوالیاف بسیار زیاده‌تر از توزیع اکسیژن است.



شکل ۴: XMAP نانوالیاف  $\text{SiO}_2$  (a) Si، (b) O و (c) ترکیبی از دو عنصر.



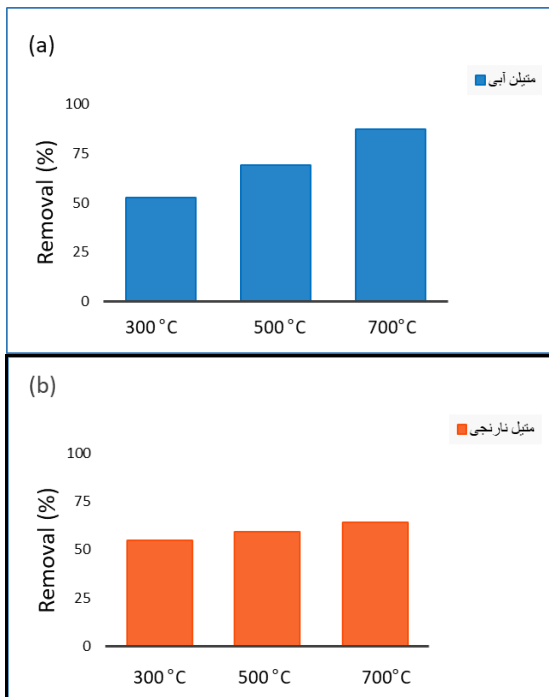
شکل ۵: آنالیز UV-Vis نانوالیاف  $\text{SiO}_2$  کلسینه شده در دماهای: (a) ۳۰۰، (b) ۵۰۰ و (c) ۷۰۰ °C برای متیل نارنجی و در دماهای: (d) ۳۰۰، (e) ۵۰۰ و (f) ۷۰۰ °C برای متیلن آبی.



شکل ۶: نمودار تغییر غلظت رنگ‌های متیل نارنجی و متیلن آبی توسط نانوالیاف  $\text{SiO}_2$  کلسینه شده در دماهای: ۳۰۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ °C.

$61 \times 10^{-4}$ ،  $100 \times 10^{-4}$  و  $163 \times 10^{-4}$  در  $\text{min}^{-1}$  محاسبه شده است.

در شکل ۸، درصد تجزیه‌ی فتوکاتالیستی دو رنگ آلی توسط نانوالیاف  $\text{SiO}_2$  در سه دمای متفاوت ۳۰۰، ۵۰۰ و  $700^\circ\text{C}$  مورد بررسی قرار گرفت و با یکدیگر مقایسه شد. با توجه به نمودار، درصد تجزیه متیلن آبی در سه دمای ۳۰۰، ۵۰۰ و  $700^\circ\text{C}$  به ترتیب ۵۲/۴۳، ۶۹/۱۳ و ۸۷/۲۷ درصد تجزیه متیل نارنجی در سه دمای ۳۰۰، ۵۰۰ و  $700^\circ\text{C}$  به ترتیب ۵۵/۰۳، ۵۹/۱۸ و ۶۴/۳۰ است. با توجه به نمودار شکل ۸، نانوالیاف اکسید سیلیکون پخته شده در  $700^\circ\text{C}$ ، بیشترین تاثیر را در تخریب رنگ متیل آبی دارد.

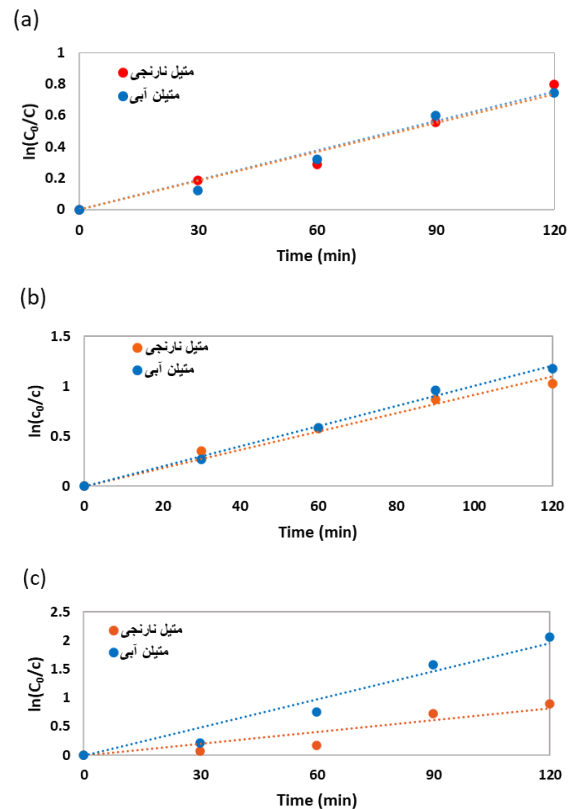


شکل ۸: درصد تجزیه فتوکاتالیستی دو رنگ (a) متیلن آبی و (b) متیل نارنجی توسط نانوالیاف  $\text{SiO}_2$  کلسینه شده در سه دمای ۳۰۰، ۵۰۰ و  $700^\circ\text{C}$ .

#### ۴- نتیجه گیری

این پژوهش، به منظور تعیین مشخصه‌یابی و بررسی فعالیت فتوکاتالیستی نانوالیاف  $\text{SiO}_2$  سنتز شده به روش الکتروسی، انجام شد. نتایج حاصل از آنالیز XRD بیان کننده این است

$$\eta = \left( \frac{C_0 - C}{C_0} \right) * 100 \quad (1)$$



شکل ۷: نمودار آهنگ تجزیه فتوکاتالیستی رنگ‌های متیل نارنجی و متیلن آبی توسط نانوالیاف  $\text{SiO}_2$  کلسینه شده در دماهای: (a) ۳۰۰، (b) ۵۰۰ و (c)  $700^\circ\text{C}$ .

به منظور بررسی بیشتر فعالیت فتوکاتالیستی نانوالیاف  $\text{SiO}_2$  ساخته شده در این پژوهش، نمودار لگاریتمی شدت قله جذب رنگ‌های مذکور طی مدت زمان قرارگیری تابش نور فرابنفش نسبت به مقدار اولیه آن در غیاب تابش را برحسب مدت زمان قرارگیری در معرض تابش نور فرابنفش را در شکل ۷ رسم کردیم. سرعت انجام واکنش تجزیه رنگ را می‌توان با اندازه‌گیری شیب نمودار نسبت غلظت‌ها به زمان تابش بدست آورد. بر اساس این نمودار، سرعت انجام واکنش تجزیه رنگ متیل نارنجی در دماهای ۳۰۰، ۵۰۰ و  $700^\circ\text{C}$  به ترتیب  $63 \times 10^{-4}$ ،  $69 \times 10^{-4}$  و  $92 \times 10^{-4}$  در  $\text{min}^{-1}$  و برای رنگ متیلن آبی در دماهای ۳۰۰، ۵۰۰ و  $700^\circ\text{C}$  به ترتیب

- [12] L. Cui, Y. Song, F. Wang, Y. Sheng, H. Zou, *Applied Surface Science*, **488**, 2019, 284.
- [13] Y. Li, S. Sun, M. Ma, Y. Ouyang, W. Yan, *Chemical Engineering Journal*, **142**, 2008, 147.
- [14] F. Adnan, S. Phattarapattamawong, *Water Environment Research*, **91**, 2019, 722.
- [15] V.A. Peyman, S. Azizian, "A sharp jump in photocatalytic activity of elemental sulfur for dye degradation in alkaline solution", Wiley, New York, 2020.
- [16] H. Sugimoto, B. Somogyi, T. Nakamura, H. Zhou, Y. Ichihashi, S. Nishiyama, M. Fujii, *The Journal of Physical Chemistry C*, **123**, 2019, 23226.
- [17] Q. Zhu, X. Tang, S. Feng, Z. Zhong, J. Yao, Z. Yao, *Journal of Membrane Science*, **581**, 2019, 252.
- [18] F. Achouri, M.B. Said, M.A. Wahab, L. Bousselmi, S. Corbel, R. Schneider, A. Ghrabi, *Environmental Technology*, **18**, 2020, 1.
- [19] F. Hamidi, F. Aslani, *Nanomaterials*, **9**, 2019, 1444.
- [20] X. Shen, Y. Shi, H. Shao, Y. Liu, Y. Zhai, *Water Science and Technology*, **80**, 2019, 1986.
- [21] J. Zhai, X. Tao, Y. Pu, X.F. Zeng, J.F. Chen, *Applied Surface Science*, **257**, 2010, 393.
- [22] S. Soltani, N. Khanian, T.S.Y. Choong, U. Rashid, *New Journal of Chemistry*, **44**, 2020, 9581.
- [23] J. Mahendran, J.P. St-Pierre, "Nanomaterials Applications in Cartilage Tissue Engineering", *Nanoengineering Materials for Biomedical Uses*, 2019.
- [24] S. Liu, H. Shan, S. Xia, J. Yan, J. Yu, B. Ding, *ACS Applied Materials & Interfaces*, **12**, 2020, 31439.
- [25] J. Xue, T. Wu, Y. Dai, Y. Xia, *Chemical Reviews*, **119**, 2019, 5298.
- [26] C. Liu, Y. Li, Q. Duan, *Applied Surface Science*, **503**, 2020, 144111.
- [27] X. Wang, L. Chen, L. Wang, Q. Fan, D. Pan, J. Li, F. Luo, *Science China Chemistry*, **62**, 2019, 933.
- [28] Y. Liu, S. Sagi, R. Chandrasekar, L. Zhang, N.E. Hedin, H. Fong, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, **8**, 2008, 1528.
- [29] X. Wang, Y. Hu, L. Li, H. Fang, X. Fan, S. Li, *e-Polymers*, **19**, 2019, 470.
- [30] A.C. Pradhan, T. Uyar, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **58**, 2019, 12535.
- [31] C. Huan, S. Shu-Qing, *Chinese Physics B*, **23**, 2014, 088102.
- [32] Y. Wang, W. Zhang, M. Liu, Z. Geng, Y. Li, L. Feng, Y. Zhu, *Journal of Materials Science*, **55**, 2020, 1.
- [33] M.I. Ojovan, *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters*, **79**, 2004, 632.
- [34] H. Hamidinezhad, H. Mozafari, R. Naseri, *Silicon*, **15**, 2020, 1.
- [35] A.A. Ashkarran, H. Hamidinezhad, H. Haddadi, M. Mahmoudi, *Applied Surface Science*, **301**, 2014, 338.
- [36] A.A. Ashkarran, M. Fakhari, H. Hamidinezhad, H. Haddadi, M.R. Nourani, *Journal of Materials Research and Technology*, **4**, 2015, 126.
- [37] W. Matysiak, T. Tanski, *Applied Surface Science*, **489**, 2019, 34.
- [38] T. Tanski, W. Matysiak, L. Krzeminski, P. Jarka, K. Golombek, *Applied Surface Science*, **424**, 2017, 184.
- [39] L. Kiani, S.A. Hassanzadeh Tabrizi, A. Saffar Teluri, *Advanced Materials and Novel Coatings*, **8**, 2019, 2166.

که نانوالیاف قبل از فرآیند کلسینه، دارای ساختاری آمورف می باشند و پس از عمل کلسینه شدن ساختاری بلوری با صفحات بلوری (۱۱۱)، (۲۲۰) و (۳۱۱) به خود می گیرند. تصاویر FESEM گویای تشکیل نانوالیافی پیوسته با طولی در حدود چند ده میکرومتر و با قطری در گستره ۴۰۰ nm تا ۵۰۰ nm است که مناسب برای انجام فعالیت فتوکاتالیستی می باشد. همچنین، بررسی پراکندگی عناصر تشکیل دهنده نانوالیاف و ترکیبات موجود در آن به ترتیب با آنالیزهای XMAP و EDX نشان دهنده حضور سیلیکون و اکسیژن با توزیع یکنواخت در نمونه ها است. نتایج بدست آمده از فعالیت فتوکاتالیستی این نانوالیاف نشان دهنده افزایش میزان تجزیه آلاینده ها به ترتیب توسط  $\text{SiO}_2$  کلسینه شده در دماهای ۳۰۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ °C می باشد. در نهایت، نانوالیاف اکسید سیلیکون کلسینه شده در دمای ۷۰۰ °C، بیشترین تاثیر را در تخریب رنگ متیل آبی داشت.

## مراجع

- [1] S.A. Yasin, J.A. Abbas, M.M. Ali, I.A. Saeed, I.H. Ahmed, *Materials Today: Proceedings*, **20**, 2020, 482.
- [2] F. Akhlaghian, H. Azadi, *Iranian Journal of Health and Environment*, **10**, 2017, 249.
- [3] Z. Karcioglu-Karakas, R. Boncukcuoglu, I.H. Karakas, *Separation Science and Technology*, **54**, 2019, 1141.
- [4] A. Gallo-Cordova, J. Lemus, F.J. Palomares, M.P. Morales, E. Mazario, *Science of the Total Environment*, **7**, 2020, 134.
- [5] C.A. Matias, P.B. Vilela, V.A. Becegato, *International Journal of Environmental Research*, **13**, 2019, 991.
- [6] Z. Zhu, Y. Zhang, Y. Shang, Y. Wen, *Food and Bioprocess Technology*, **12**, 2019, 281.
- [7] L. Liu, S. Fan, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **15**, 2018, 1321.
- [8] Z. Chen, H. Zhang, W. Luo, Z. He, L. Zhang, *BioResources*, **15**, 2020, 265.
- [9] X.Q. Wu, Z.D. Shao, Q. Liu, Z. Xie, F. Zhao, Y.M. Zheng, *Journal of Colloid and Interface Science*, **553**, 2019, 156.
- [10] A. Khalil, N.M. Aboamera, W.S. Nasser, W.H. Mahmoud, G.G. Mohamed, *Separation and Purification Technology*, **224**, 2019, 509.
- [11] A. Fakhri, A. Feizbakhsh, E. Kono, A. Niazi, *Materials Research Express*, **6**, 2019, 105909.