

## تاثیر نانو ذرات معدنی بر رفتار انعکاس پراکنده پارچه مخلوط پنبه/نایلون چاپ شده در نواحی زیرقرمز

### نزدیک و زیرقرمز با طول موج کوتاه

سیده آمنه سیادت<sup>۱</sup>، جواد مختاری<sup>۲\*</sup>

۱ دکتري، گروه مهندسي نساجي، دانشکده فني، دانشگاه گيلان، رشت، ايران

۲ دانشيار، گروه مهندسي نساجي، دانشکده فني، دانشگاه گيلان، رشت، ايران



تاریخ دریافت:

۹۸/۰۳/۱۸

تاریخ پذیرش:

۹۸/۰۵/۲۰

طيف انعكاسي پراكنده پارچه‌هاي مخلوط پنبه/ نايلون پوشش داده شده با نانو ذرات معدني جهت مطابقت با رفتار انعكاسي پراكنده محيط‌هاي جنگلي و بياباني در نواحی زیرقرمز نزدیک (NIR) و زیرقرمز با طول موج کوتاه (SWIR) مورد بررسی قرار گرفتند. پارچه‌های مخلوط پنبه/ نایلون با الگوی دیجیتالی چهار رنگ به عنوان بستر اصلی مورد استفاده قرار گرفته و غلظت‌های مختلف از نانو ذرات دی اکسید سربیم ( $\text{CeO}_2$ ) و اکسید منیزیم (MgO) همراه و یا بدون سیتريک اسید به عنوان اتصال دهنده عرضی بر روی این پارچه‌ها با استفاده از روش آغشته کردن- خشک کردن- تثبیت پوشش داده شدند.

پارچه‌های پوششی توسط طیف‌سنج انعكاسي پراكنده (DRS)، میکروسکوپ الكتروني روبشی نشر میدانی (FESEM) و طیف‌سنج تفکیک انرژی اشعه ایکس (EDS) ارزیابی شدند. افزودن (w/v) ۱٪ از نانو ذرات به پارچه توانست با کاهش روند انعكاس، طيف انعكاسي پارچه‌ها را به الگو انعكاسي مناطق جنگلي و بياباني نزدیک نماید. همچنین، افزودن (w/v) ۶٪ سیتريک اسید همراه با (w/v) ۱٪ دی اکسید سربیم و اکسید منیزیم به پارچه توانست میزان انعكاس کل را در تمامی طول‌موج‌ها کاهش دهد. با این حال، کاهش شدت انعكاسي اکسید منیزیم در تمامی این طول‌موج‌ها بیشتر بوده‌است. تصاویر میکروسکوپ الكتروني نشان داد که پارچه‌های پوشش داده شده با دی‌اکسید سربیم با میزان پراکندگی بهتر بر روی سطح پارچه، میانگین اندازه ذرات کوچکتری (در حدود ۵۰ تا ۷۰ نانومتر) داشته‌اند. در مقابل نانو ذرات اکسید منیزیم در صورت اتصال با سیتريک اسید جذب بهتری بر روی پارچه از خود نشان داده، اما بیشتر در معرض تجمع قرار دارند.

ناحیه زیرقرمز نزدیک، ناحیه زیرقرمز با طول موج کوتاه، نانو ذرات دی اکسید سربیم، نانو ذرات اکسید منیزیم، پارچه مخلوط پنبه/ نایلون چاپی.

واژگان کلیدی

## The Effect of Mineral Nanoparticles on Diffuse Reflectance Behavior of the Printed Cotton/Nylon Blend Fabric in Near Infrared and Short-Wave Infrared Spectral Ranges

S. A. Siadat<sup>1</sup>, J. Mokhtari<sup>2\*</sup>

1. Ph. D., University of Guilan, Faculty of Engineering, Department of Textile Engineering, Rasht, Iran

2. Associate Professor, University of Guilan, Faculty of Engineering, Department of Textile Engineering, Rasht, Iran

### Abstract

Diffuse reflectance spectra of printed cotton/nylon blend fabrics coated with mineral compounds are investigated in near infrared (NIR) and short-wave infrared (SWIR) in order to tune the diffuse reflectance behavior of them with the ones in woodland and desert backgrounds. Cotton/nylon blend fabrics printed with four-color digital pattern were used as the substrate and different concentrations of magnesium oxide and cerium dioxide (MgO and CeO<sub>2</sub>) with and without citric acid as a cross-linker were loaded on these fabrics using pad-dry-cure method.

Coated fabrics were characterized by diffuse reflectance spectroscopy (DRS), field emission scanning electron microscopy (FE-SEM) and energy dispersive spectroscopy (EDS).

Adding 1% (w/v) of nanoparticles to fabric could approach the reflection spectrum of fabrics to reflection pattern of forest and desert areas by reducing the reflection trend. Also, adding 6% (w/v) citric acid combined with 1% (w/v) cerium dioxide and magnesium oxide to the fabric could reduce the total reflection at all wavelengths. However, the reduction of reflection intensity of magnesium oxide was higher at all wavelengths. Electron microscopy images also showed that fabrics coated with cerium dioxide had a better dispersion on the surface of fabric and a mean particle size about 50 to 70 nanometers. In contrast, magnesium oxide nanoparticles, when bonded with citric acid, exhibit better adsorption on the fabric but are more likely to agglomerate.

### Keywords

Near Infrared Region, Short Wave Infrared Region, Cerium Dioxide Nanoparticle, Magnesium Oxide Nanoparticle, Printed Cotton-Nylon Blend Fabric

## ۱- مقدمه

استتار در ناحیه مرئی و نواحی بالاتر، از موضوعات قابل توجه در اهداف و مقاصد نظامی می‌باشد. برای ایجاد استتار در ناحیه زیرقرمز نزدیک (NIR) تا زیرقرمز با طول موج کوتاه (SWIR) باید مقدار انعکاسی پراکنده اجزای محیط و هدف با هم همانند و منطبق باشند.

پیشرفت در دستگاه‌های تشخیص امواج زیرقرمز در محدوده وسیعی از طول موج‌های الکترومغناطیسی موجب شده تا انجام عملیات نظامی در شب بسیار مشکل باشد [۱،۲]. لذا برای این منظور منسوجات استتاری باید در نواحی مرئی تا زیرقرمز با طول موج کوتاه با مواد رنگزا و رنگدانه‌هایی چاپ و یا رنگرزی شوند تا مقادیر انعکاس آنها مشابه با محیط اطراف گردد [۳].

مطالعات زیادی در خصوص استتار منسوجات در ناحیه زیرقرمز نزدیک (NIR: 700-900 nm) بر روی الیاف مصنوعی و طبیعی انجام گرفته و در آن نقش رنگدانه‌ها و مواد رنگزا و غلظت آنها بر خواص انعکاسی و ویژگی منسوجات تعیین شده است [۴]. گودرزی و همکارانش نیز نشان دادند که اگر ابتدا پارچه با رنگزاهای مختلف رنگرزی و سپس به منظور صحت کاربرد رنگزا برای استتار با استفاده از طیف‌سنج انعکاسی در ناحیه زیرقرمز بررسی شود، زمان، انرژی و هزینه زیادی هدر می‌رود. بنابراین آنها بیان کردند که با بکارگیری طیف‌سنج جذبی UV-Vis طیف انتقالی مواد رنگزای را می‌توان بررسی نمود و از روی شباهت طیف انتقالی مدنظر و رنگزاهای استتاری، امکان معرفی رنگزای جدید برای استتار فراهم می‌شود. با این حال، تمامی این اطلاعات با بررسی تا نواحی زیرقرمز نزدیک بدست آمده و در نواحی بالاتر یعنی زیرقرمز با طول موج کوتاه (SWIR: 900-2500 nm) اطلاعات چندانی در دسترس نیست. در سال‌های اخیر با پیشرفت در دوربین‌های دید در شب، فناوری‌های نظارت در محدوده وسیعی از طیف امواج الکترومغناطیسی به‌ویژه در ناحیه زیرقرمز با طول موج کوتاه گسترش یافته است [۳،۵]. تجهیزات دید در شب تابش الکترومغناطیسی با شدت پایین را در نواحی مرئی، زیرقرمز نزدیک و زیرقرمز با طول موج کوتاه تقویت نموده و حساسیت را در این نواحی بالا می‌برند. مجامع نظامی مدرن نیز خواستار منسوجاتی هستند که ویژگی‌های انعکاسی را نه تنها در ناحیه مرئی از طیف الکترومغناطیسی بلکه در نواحی بالاتر نیز فراهم نمایند. رنگزاهای و رنگدانه‌ها از جمله مواد استتاری هستند که برای ایجاد خاصیت استتار بر روی الیاف به روش‌های چاپ و یا رنگرزی به کار برده می‌شوند [۳، ۴]. به‌طور کلی، رنگزاهایی با قابلیت استتاری پایین در صورتی که با رنگدانه‌هایی که انعکاس بالایی در ناحیه مرئی و زیرقرمز داشته ترکیب شوند، راندمان استتار را بهبود خواهند بخشید [۳،۶].

با مطالعه و بررسی تحقیقات انجام شده در زمینه استتار منسوجات در نواحی زیرقرمز نزدیک تا زیرقرمز با طول موج کوتاه، می‌توان نتیجه‌گیری نمود که جاذب‌های معدنی (مانند اکسیدهای فلزی) نقش مهم و تعیین کننده‌ای در انطباق الگوی انعکاسی منسوج با هدف

مدنظر دارند. البته باید توجه نمود که اگر جاذب‌های معدنی بصورت نانو ذرات تهیه شوند نسبت به حالت توده‌ای خود میزان انعکاس را کاهش داده، بطوریکه هر چه جاذب‌ها کوچکتر باشند میزان کاهش انعکاس در آنها بیشتر خواهد شد. بنابراین بهتر است از اکسیدهای فلزی در حالت نانو ذرات استفاده شود [۷].

استفاده از نانو ذرات معدنی مختلف می‌تواند موجب بهبود انطباق هدف مورد بررسی با محیط‌های پیرامون خود شده بطوریکه موجب اصلاح خاصیت انعکاسی شود. تاکنون نانو ذرات مختلفی برای ایجاد انطباقی موثر با محیط‌های مختلف سنتز و بررسی شده که نتایج مطلوبی را نیز در برداشته‌اند [۸،۹، ۱۰]. در تحقیقات انجام شده توسط مختاری و گروهش و همچنین خواجه مهریزی و همکارانش، تاثیر اکسیدهای فلزی مختلف مانند دی اکسید تیتانیوم و اکسید روی مورد بررسی قرار گرفت و ارزیابی‌های انجام شده حاکی از آن بود که افزایش غلظت این نانو ذرات توانسته موجب نزدیکتر شدن مقدار انعکاس منسوج به انعکاس محیط‌های جنگی و بیابانی شود [۱۱، ۱۲، ۱۳]. از طرفی دیگر این افزایش غلظت باید به نحوی صورت گیرد که ایجاد اثرات جانبی منفی نیز نکند؛ به‌عنوان مثال در مطالعات خواجه مهریزی و همکارانش نشان داده‌شد که اگر چه افزودن ذرات کربن سیاه به منسوج توانسته الگوی انعکاس را در ناحیه زیرقرمز نزدیک کاهش دهد، اما افزایش هر چه بیشتر نانو ذرات کربن سیاه به منسوج موجب تغییر رنگ آن خواهد شد، که این امر می‌بایست در بررسی الگوی انعکاس نانو ذرات با محیط‌های مختلف در نظر گرفته شود [۱۴].

با این حال، تمامی نانو ذرات بررسی شده تا به امروز سعی در ایجاد انطباق تا نواحی زیرقرمز نزدیک را داشته، بنابراین با پیشرفت روزافزون در تجهیزات دید در شب به‌ویژه در تقویت کننده‌های تصاویر نیاز به گسترش دامنه امواج الکترومغناطیسی می‌باشد. پژوهش‌های زیادی نیز در زمینه شبیه‌سازی پاسخ طیفی جاذب‌ها در نواحی زیرقرمز نزدیک تا زیرقرمز با طول موج کوتاه صورت گرفته تا با ارائه شرایط و فاکتورهای مورد بررسی بتوان بهینه‌سازی سریع طیفی را بین سیستم‌های مورد مطالعه و نواحی مشخص NIR/SWIR بوجود آورد [۱۵].

به‌منظور ایجاد استتاری موثر در نواحی زیرقرمز با طول موج کوتاه لازم است تا نانو اکسیدهای معدنی جدیدی معرفی و بررسی شوند، که در این راستا می‌توان نانو اکسیدهای معدنی دی‌اکسید سربیم ( $CeO_2$ ) و اکسید منیزیم ( $MgO$ ) را با هدف انطباق هرچه بیشتر هدف با محیط‌های مختلف بررسی نمود [۱۶، ۱۷]. قابل ذکر است که در بررسی این نانو اکسیدها باید اثرات منفی را نیز در نظر گرفت و سعی در کاهش آنها داشت تا راندمان اثر و قابلیت تطبیق‌پذیری افزایش یابد. بطوریکه افزودن نانو اکسیدها نباید تنها با هدف افزایش میزان انعکاس پارچه صورت گیرد بلکه باید اختلاف رنگ پارچه عمل شده نسبت به پارچه خام را نیز در ناحیه مرئی به کمتر از ۲ برساند. همچنین این نانو اکسیدها نباید موجب ایجاد سفیدک بر روی پارچه‌ها و یا تغییر رنگ آنها نیز شوند [۱۲].

بمنظور ایجاد پیوند قوی بین نانو ذرات و پارچه می‌توان از اتصال دهنده عرضی نیز استفاده نمود. برای این منظور، سیتریک اسید در غلظت  $(6\% \text{ w/v})$  به محلول‌های بالا افزوده شد. در نهایت، محلول‌های حاوی سیتریک اسید و یا بدون آن به وسیله همزن مغناطیسی با سرعت ۲۰۰ دور در دقیقه و به مدت ۵ ساعت برای به دست آوردن محلول‌هایی همگن به خوبی همزده شدند.

سپس، محلول‌های فوق در حمام فراصوت به مدت ۱۰ دقیقه برای رسیدن به یک پراکندگی کاملاً یکنواخت از نانو ذرات در محلول قرار گرفتند. در ادامه پارچه‌ها با الگوهای جنگلی و بیابانی به مدت ۳۰ دقیقه در این محلول‌های کاملاً همگن غوطه‌ور شدند تا انتقال نانو ذرات به پارچه به درستی انجام شود.

پارچه‌های پوشش داده‌شده با نانو ذرات در ادامه از جفت غلطک با مقدار برداشت ۷۵-۸۰٪ عبور کرده و سپس به مدت ۵ دقیقه در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد خشک و در دمای ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳ دقیقه تثبیت شدند.

### ۲-۳- مشخصات دستگاه‌ها

برای فرایند آغشته‌سازی- خشک کردن- تثبیت از دستگاه SDL pad thermosol استفاده شد.

طیف انعکاسی پراکنده از پارچه‌ها در سرتاسر نواحی زیرقرمز نزدیک تا زیرقرمز با طول موج کوتاه توسط دستگاه اسپکتروفتومتر انعکاسی پراکنده (Ocean Optics NIR Quest 256 spectro-photometer, USA) با ۴ بار اندازه‌گیری و گزارش مقدار میانگین از آنها بدست آمد. مشخصات فنی این دستگاه عبارتند از: هندسی اندازه‌گیری d/0؛ محدوده طول موج ۲۵۰۰-۸۶۵ نانومتر؛ سرعت اسکن ۱۰۰۰ نانومتر در دقیقه. طیف انعکاسی این پارچه‌های چاپی پوشش داده‌شده با نانو ذرات مختلف با توجه به مشخصات انعکاسی الگوهای جنگلی و بیابانی موجود (الگوهای مرجع) مورد بررسی قرار گرفتند. برای تشخیص حضور نانو ذرات و تعیین اندازه آنها بر روی سطح پارچه‌های پوشش داده شده، از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (Hitachi S-4160, Japan; FE-SEM) استفاده شد. همچنین طیف‌سنج تفکیک انرژی اشعه ایکس (EDS; Ametek, Japan) برای مطالعه حضور عناصر شیمیایی روی سطح پارچه‌های چاپی پوشش داده شده مورد استفاده قرار گرفت.

### ۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی اثر غلظت نانو ذرات بر مقدار انعکاس پراکنده پارچه در نواحی زیرقرمز نزدیک و زیرقرمز با طول موج کوتاه در این تحقیق اثر غلظت دو نانو ذره دی‌اکسید سربیم و اکسیدمنیزیم پوشش داده‌شده بر روی پارچه‌های چاپی در روند انعکاس پراکنده‌شان نسبت به مقدار انعکاس استاندارد موجود از منابع مختلف در محیط‌های جنگلی و بیابانی مورد بررسی قرار گرفت [۵، ۲۱، ۲۲، ۲۳، ۲۴]. به

بمنظور پایداری اتصال نانو ذرات به پارچه نیز می‌توان از عوامل اتصال دهنده عرضی مختلفی از جمله: ۱،۲،۳،۴- بوتان تتراکربوکسیلیک اسید (BTCA)، مالیک اسید و سیتریک اسید استفاده نمود. اتصال دهنده عرضی، پیوندی یونی یا کووالانسی است که یک زنجیره پلیمری را به دیگری متصل می‌کند [۱۸]. از میان اتصال دهنده‌های عرضی مختلف، سیتریک‌اسید را می‌توان به عنوان موثرترین دی‌کربوکسیلیک اسید شناخت که توانایی ایجاد پیوند استری با گروه‌های هیدروکسیل ماکرومولکول‌ها را دارد. اخیراً توجه زیادی به استفاده از عوامل اتصال دهنده عرضی برای اتصال قوی نانو ذرات به پارچه شده تا از خروج این ذرات در طول عملیات بعدی جلوگیری بعمل آید [۱۹، ۲۰].

با توجه به نقش مهم و موثر نانو ذرات معدنی در تغییر الگوی انعکاسی منسوجات به‌منظور انطباق آنها با محیط‌های مختلف و ایجاد استتاری موثر در نواحی بالا، در این پژوهش سعی شده تا از دو نانو ذره معدنی مختلف با رعایت تمامی اصول و نکات استفاده شود. نانو ذرات معدنی دی‌اکسید سربیم و اکسید منیزیم معرفی شده در این پژوهش به گونه‌ای طراحی شده‌اند، که علیرغم ارائه ویژگی‌های چند منظوره به منسوجات شامل مخلوط الیاف پنبه/ نایلون، امکان انطباق هر چه بیشتر مقدار انعکاس پراکنده منسوج را با محیط پیرامونی خود در طول موج‌های زیرقرمز نزدیک تا زیرقرمز با طول موج کوتاه فراهم نمایند. برای این منظور، غلظت‌های مختلفی از این نانو اکسیدهای معدنی همراه و یا بدون استفاده از عامل اتصال دهنده‌ی سیتریک‌اسید بر روی پارچه بکار رفته تا روند بهینه‌ای از انعکاس پارچه نسبت به محیط پیرامونی خود بدست آید.

### ۲- بخش تجربی

#### ۲-۱- مواد

کربنات سدیم با درجه‌ی خلوص ۹۹/۵٪، اسید سیتریک با خلوص بیش از ۹۹/۹٪ و شوینده آنیونی از شرکت مرک آلمان و نانو ذرات دی‌اکسید سربیم و اکسید منیزیم با متوسط اندازه ذرات کمتر از ۵۰ نانومتر از شرکت نوترینو ایران تهیه شدند. پارچه مخلوط پنبه/ نایلون (۵۰/۵۰) چاپ شده در چهار رنگ با الگوهای بیابانی و جنگلی به عنوان بستر اصلی مورد استفاده قرار گرفت.

#### ۲-۲- روش کار

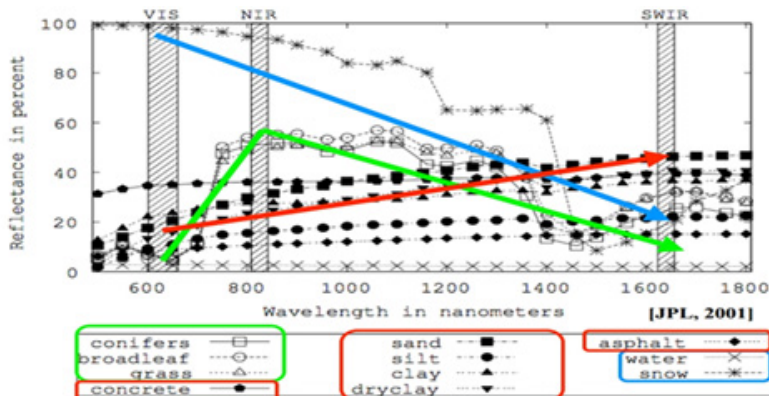
برای بکارگیری نانو ذرات بر روی پارچه‌های چاپی با الگوهای جنگلی و بیابانی، ابتدا پارچه‌ها با محلول کربنات سدیم و شوینده آنیونی (۵/۰٪) در دمای ۷۰ درجه سانتیگراد و به مدت ۳۰ دقیقه شسته‌شده تا ناخالصی‌های باقیمانده از عملیات چاپ و تکمیل از آنها زدوده شوند. در مرحله بعد، بمنظور آماده‌سازی محلول برای پوشش نانو ذرات بر روی پارچه، نانو ذرات دی‌اکسید سربیم و اکسید منیزیم در غلظت‌های (۱، ۱/۵، ۲) و (۲٪) در ۲۰ میلی‌لیتر آب مقطر حل شدند. همچنین،

این روند در شکل ۱ نشان داده شده است [۲۵، ۲۲]. با توجه به طیف انعکاسی محیط جنگلی، انتظار می‌رود تا دو نانو ذره دی‌اکسید سربیم و اکسید منیزیم الگوی انعکاسی منطبق با این محیط را از خود نشان دهند [۳، ۲۵].

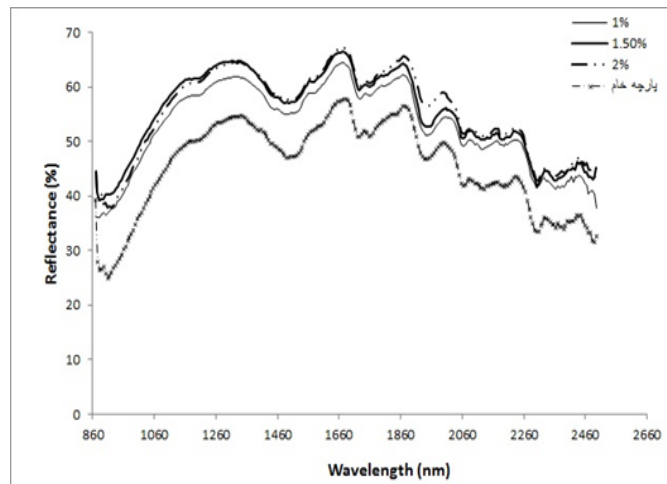
بخش اعظم محیط‌های بیابانی را نیز شن و ماسه‌های بیابان تشکیل می‌دهند که دارای انعکاسی در حدود ۲۰ تا ۴۰٪ در نواحی مرئی و زیرقرمز نزدیک بوده و با افزایش طول موج در نواحی بالاتر میزان افزایش انعکاس در آنها با شیب ملایمی افزایش یافته است. به طوری که در ناحیه SWIR میزان انعکاس محیط بیابانی به حدود ۵۰٪ می‌رسد (شکل ۱) [۲۵، ۲۲].

طیف انعکاسی پراکنده پارچه‌های حاوی غلظت‌های مختلف از نانو ذره دی‌اکسید سربیم در شکل‌های ۲ و ۳ ارائه شده است. شکل ۲ رفتار انعکاسی پارچه‌های چاپ شده با الگوی جنگلی را که حاوی مقادیر مختلف از نانو ذره دی‌اکسید سربیم بوده نسبت به پارچه خام (بدون حضور نانو ذرات) نشان می‌دهد (۱ تا ۲٪ w/v). در شکل ۲ نشان داده شده که با افزایش غلظت نانو ذره دی‌اکسید سربیم در پارچه‌ها، مقدار انعکاس نسبت به پارچه خام روند افزایشی داشته است. با این حال، از آنجائیکه محیط جنگلی در نواحی زیرقرمز نزدیک میزان

منظور ایجاد استتاری موثر در نواحی زیرقرمز باید مقدار انعکاس هدف با انعکاس اجزاء محیط اطراف آن همانند باشد. بنابراین با توجه به اینکه در طبیعت دو محیط جنگلی و بیابانی بیشترین وسعت را داشته باید برای ایجاد یک استتار موثر با روند انعکاس این دو محیط آشنا بود. طیف انعکاسی استاندارد محیط‌های جنگلی نشان داده که هر یک از عناصر جنگل دارای خصوصیات انعکاسی متفاوتی هستند که به ساختار شیمیایی آن‌ها وابسته می‌باشد. به عنوان مثال برگ‌های درختان که جزء اصلی محیط جنگلی به حساب آمده، دارای انعکاس نسبتاً پایینی در ناحیه مرئی و انعکاس نسبتاً بالا در محدوده زیرقرمز نزدیک (NIR) می‌باشند. با افزایش طول موج و رسیدن به ناحیه زیرقرمز با طول موج کوتاه روند انعکاس مجدداً سیر نزولی پیدا کرده، به طوری که در این طول موج‌ها میزان انعکاس به مرز بین ۲۰ تا ۳۰٪ می‌رسد [۲۳]. لذا منسوجات جهت استتار در نواحی مرئی باید به کمک رنگزاهای انعکاسی در حدود ۱۵٪ را از خود نشان داده و در ادامه با رسیدن به نواحی زیرقرمز نزدیک و به کمک نانو مواد جاذب بر میزان انعکاس شان افزوده و به مرز ۵۰٪ برسند. در نواحی SWIR نیز لازم است تا دوباره از انعکاس منسوج کاسته و نهایتاً تا طول موج ۲۵۰۰ نانومتر میزان انعکاس به حدود تقریباً زیر ۲۰٪ کاهش یابد که



شکل ۱: الگوهای انعکاسی بدست آمده از مناطق مختلف و پوشش‌های موجود در آنها (از نواحی مرئی تا زیرقرمز با طول موج کوتاه) [۲۲].



شکل ۲: مقایسه طیف‌های انعکاسی پراکنده پارچه‌های مخلوط پنبه/نایلون پوشش داده شده با غلظت‌های مختلف از نانو ذرات دی‌اکسید سربیم و محیط جنگلی در نواحی NIR و SWIR.

زیرقرمز با طول موج کوتاه ایجاد نمی کند، بنابراین باید با پیدا نمودن غلظت بهینه از نانو ذرات بر روی پارچه بیشترین تطبیق را با محیط پیرامونی بدست آورد. با توجه به این امر می توان گفت پارچه پوشش داده شده با الگوی بیابانی بدلیل دارا بودن مقدار انعکاس بالا در نواحی زیرقرمز نزدیک برای استتار در این محیط مناسب نیست و تنها در نواحی زیرقرمز با طول موج کوتاه برای مطابقت با محیط بیابانی مناسبتر می باشد، که با توجه به این امر بیشترین تطبیق بین پارچه پوشش داده شده و محیط بیابانی در نواحی زیرقرمز با طول موج کوتاه مربوط به پارچه ی پوشش داده شده با ۱٪ نانو ذره دی اکسید سریم می باشد و می توان گفت پارچه با الگوی بیابانی در صورت استفاده از نانو ذره دی اکسید سریم می تواند حساسیت خود را در نواحی زیرقرمز با طول موج کوتاه بالا برده و با کاهش انعکاس در این نواحی موجب ایجاد استتاری موثر شود.

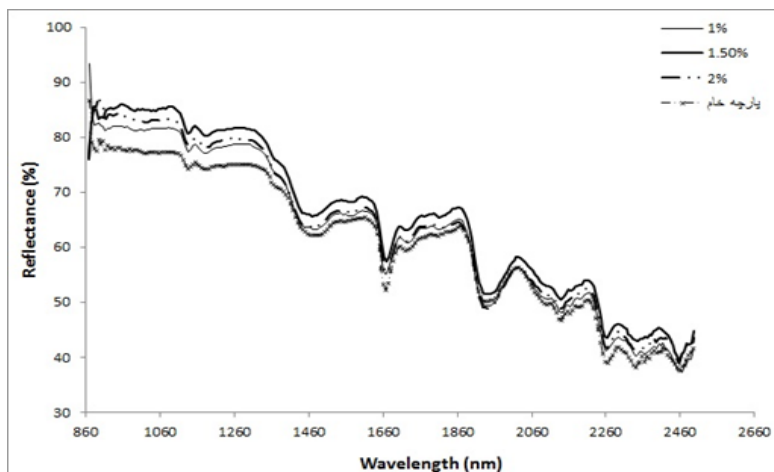
شکل های ۴ و ۵ رفتار انعکاسی پارچه خام و پارچه های پوشش داده شده با مقادیر مختلف از نانو ذره اکسید منیزیم را در غلظت های ۱ تا ۲ (w/v)٪ بمنظور بررسی مطابقت روند انعکاس آنها با محیط های جنگلی و بیابانی نشان می دهند. روشن است که افزایش غلظت اکسید منیزیم بر رفتار انعکاسی پارچه ها نسبت به پارچه خام بمنظور تطبیق با هر دو محیط جنگلی و بیابانی تاثیری نداشته و نمی توان این نانو ذره را برای ایجاد استتار مناسب دانست.

### ۳-۲- بررسی اثر اتصال دهنده عرضی بر مقدار انعکاس پراکنده پارچه ها در نواحی زیرقرمز نزدیک تا زیرقرمز با طول موج کوتاه

تا به اینجا بررسی ها نشان داد که نانو ذرات با غلظت (w/v) ۱٪ طیف انعکاسی مناسبی را در نواحی NIR و SWIR با توجه به محیط پیرامونی خود نشان می دهند. با این حال برای قوی تر نمودن پیوند بین نانو ذرات و پارچه استفاده از اتصال دهنده های

انعکاسی در حدود ۵۰٪ داشته و در نواحی SWIR از انعکاس آن کاسته شده و نهایتاً تا طول موج ۲۵۰۰ نانومتر به حدود تقریباً زیر ۲۰٪ رسیده بنابراین با توجه به این روند انعکاس در محیط های جنگلی می توان گفت بیشترین میزان انطباق بین پارچه پوشش داده شده و محیط جنگلی مربوط به منسوج با ۱٪ نانو ذره دی اکسید سریم بوده بطوریکه در این غلظت، مقدار انعکاس پارچه ها به انعکاس محیط های جنگلی نزدیکتر می باشد و می تواند استتار موثری را در برابر دوربین های دید در شب با حساسیت بالا بوجود آورد.

شکل ۳ عملکرد نانو ذره دی اکسید سریم پوشش داده شده بر روی پارچه را در افزایش و کاهش انعکاس در نواحی NIR و SWIR در مقایسه با الگوی بیابانی نشان می دهد. همان طور که از طیف ها مشخص است با افزودن نانو ذرات به پارچه نسبت به پارچه خام، الگوی انعکاس با افزایش همراه بوده، بطوریکه نانو ذره با غلظت (w/v) ۱/۵٪ بیشترین مقدار انعکاس را از خود نشان داده اما دو غلظت باقی مانده به نسبت با کاهش روند انعکاس همراه بوده اند. نکته ای که لازم است به آن توجه شود این که محیط بیابانی در نواحی زیرقرمز نزدیک مقدار انعکاسی در حدود ۲۰ تا ۴۰٪ داشته و در نواحی بالاتر میزان انعکاس در آنها با شیب ملایمی افزایش یافته به طوری که در ناحیه SWIR میزان انعکاس محیط بیابانی به حدود ۵۰٪ می رسد. با توجه به این سیر صعودی افزایش انعکاس تا مقدار حدود ۵۰٪ می توان گفت که از بین این سه غلظت از نانو ذره دی اکسید سریم، پارچه چاپ شده با الگوی بیابانی در غلظت (w/v) ۱٪ نسبت به دو غلظت دیگر از نانو ذره کمترین میزان انعکاس را در نواحی زیرقرمز با طول موج کوتاه از خود نشان داده اما در نواحی زیرقرمز نزدیک انعکاس پارچه ها در تمامی سه غلظت بکار رفته، نسبت به محیط بیابانی بیشتر بوده است. از آنجائیکه کمترین میزان افزایش یا کاهش در روند انعکاس می تواند خاصیت استتاری پارچه را نسبت به محیط پیرامونی خود تحت شعاع قرار دهد و نیز با توجه به اینکه افزودن نانوذرات به پارچه تغییرات فاحشی را در مقدار انعکاس بویژه در نواحی



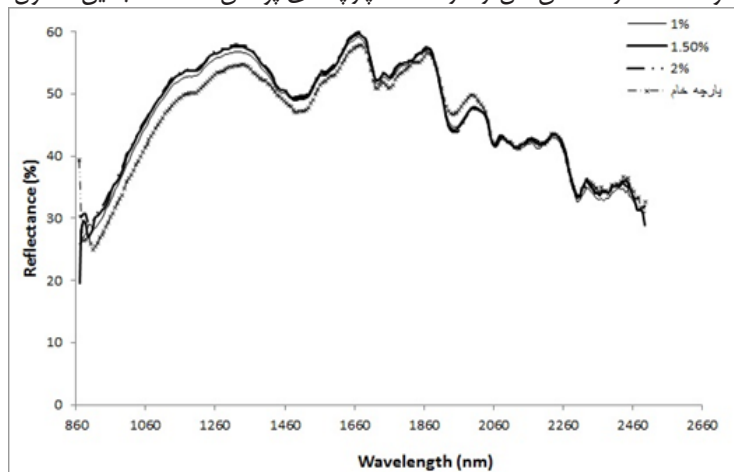
شکل ۳: مقایسه طیف های انعکاسی پراکنده پارچه های مخلوط پنبه/ نایلون پوشش داده شده با غلظت های مختلف از نانو ذرات دی اکسید سریم و محیط بیابانی در نواحی NIR و SWIR.

تمامی طول موجها نسبت به حالتی که پیوند دهنده در ساختار وجود نداشته کاهش دهد. با این حال، میزان کاهش شدت انعکاس در اکسید منیزیم بیشتر از دی اکسید سریم در تمامی طول موجها بوده است. بنابراین با توجه به نتایج بدست آمده می توان گفت که وجود سیتریک اسید در پارچه موجب شده تا اتصال بین اکسید منیزیم با پارچه قوی تر شود، در حالیکه این اتصال دهنده در بهبود پیوند بین دی اکسید سریم با پارچه نقش چندانی ایفا ننموده است. برای بررسی ویژگی استتاری نیز باید گفت که اکسید منیزیم همراه با اتصال دهنده عرضی با کاهش بیشتر در شدت انعکاس توانسته اختلاف انعکاس بین پارچه پوشش داده شده و محیط جنگلی را به حداقل رسانده و برای مقاصد نظامی کارآمدتر باشد و از این رو الگوی استتاری مناسبی را نسبت به محیط جنگلی در تمامی طول موجهای زیرقرمز نزدیک تا زیرقرمز با طول موج کوتاه فراهم نماید.

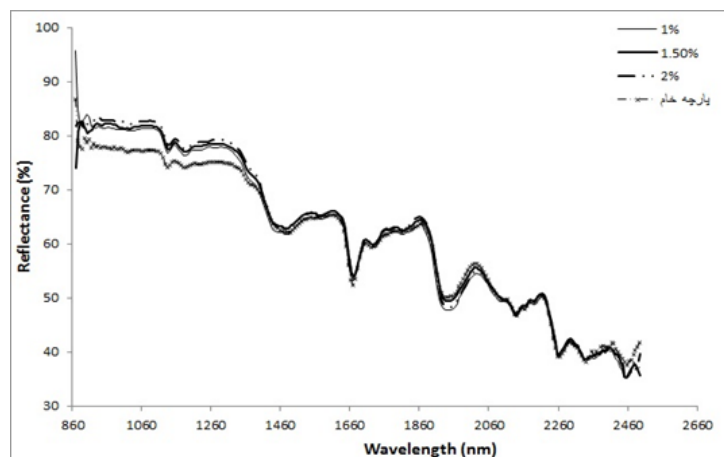
افزودن ۶٪ (w/v) سیتریک اسید به محلولهای حاوی ۱٪ (w/v) نانو ذرات دی اکسید سریم و اکسید منیزیم توانسته انعکاس پارچههای پوشش داده شده با این محلولها را کاهش داده و حتی

عرضی امری اجتناب ناپذیر می باشد تا در عین دارا بودن خاصیت انعکاسی، ثبات عملیات را نیز بهبود ببخشند. مطالعات پیشین نیز نشان داده که اتصال دهندههای عرضی می توانند پیوند قویی را بین یک زنجیره پلیمری با دیگری ایجاد نمایند که این پیوند یونی یا کووالانسی خواهد بود [۱۸]. از بین اتصال دهندههای عرضی مختلف، سیتریک اسید را می توان به عنوان یک دی کربوکسیلیک اسید برای تشکیل پیوندهای استر با گروههای هیدروکسیل ماکرومولکولها نام برد [۱۹، ۲۰]. بنابراین در ادامه کار و برای بهبود روند انعکاس، اکسیدهای فلزی در غلظت ۱٪ (w/v) همراه با ۶٪ (w/v) اتصال دهنده عرضی مورد استفاده قرار گرفتند.

شکل ۴ مقایسه طیف انعکاسی پراکنده پارچه خام و پارچههای پوشش داده شده با اکسیدهای فلزی در غلظت بهینه ۱٪ (w/v) و نیز سیتریک اسید در غلظت ۶٪ (w/v) را نسبت به محیط جنگلی نشان می دهد. با توجه به این شکل، اگرچه با افزودن نانوذرات و اتصال دهنده عرضی مقدار انعکاس نسبت به پارچه خام افزایش یافته اما افزودن سیتریک اسید همراه با دی اکسید سریم و اکسید منیزیم به پارچه توانسته مقدار انعکاس کل را در



شکل ۴: مقایسه طیفهای انعکاسی پراکنده پارچههای مخلوط پنبه/نایلون پوشش داده شده با غلظت‌های مختلف از نانو ذرات اکسید منیزیم و محیط جنگلی در نواحی NIR تا SWIR



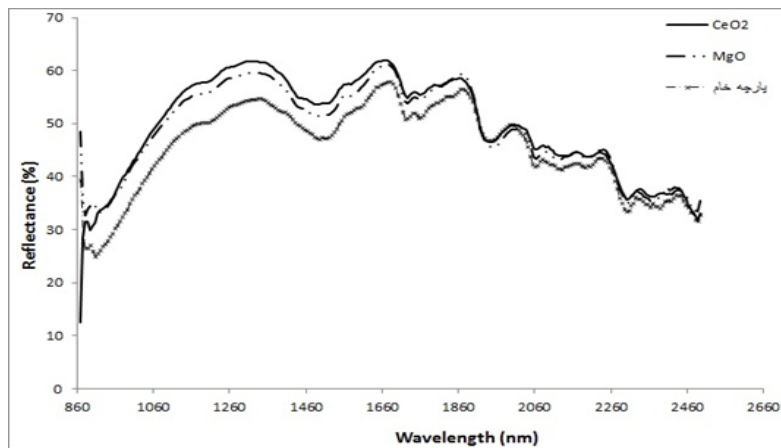
شکل ۵: مقایسه طیفهای انعکاسی پراکنده پارچههای مخلوط پنبه/نایلون پوشش داده شده با غلظت‌های مختلف از نانو ذرات اکسید منیزیم و محیط بیابانی در نواحی NIR تا SWIR.

می‌توان گفت گروه کربوکسیل بخش نایلونی پارچه‌ی مخلوط نیز توانسته از سمتی دیگر به گروه‌های هیدروکسیل نانو ذرات جذب شود. بنابراین، وجود این پیوند استری بین پارچه‌ی مخلوط پنبه/نایلون با سیتریک اسید و نانو ذرات می‌تواند منجر به ایجاد پیوندی قوی بین نانو ذرات با سطح پارچه شده و ویژگی‌های انعکاسی را بهبود ببخشد و در عین حال می‌تواند موجب بهبود ثبات عملیات همچون شستشو، مالش و عرق بدن نیز شود که بررسی این ویژگی نیازمند مطالعات و پژوهش جداگانه‌ای می‌باشد.

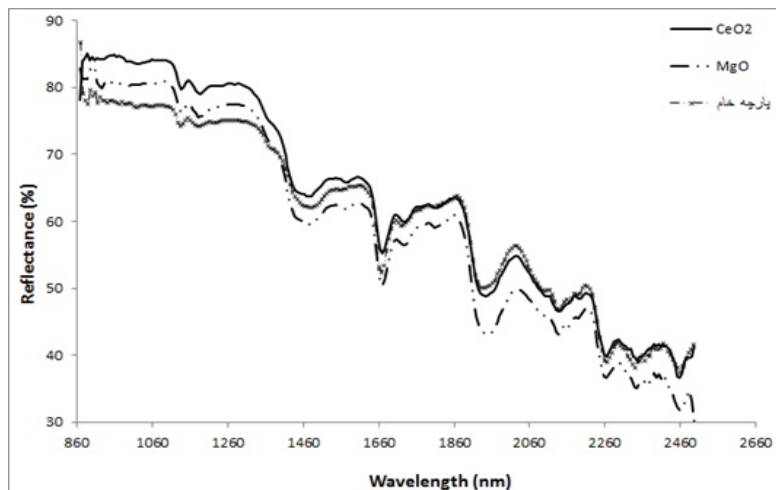
به‌طور کلی می‌توان گفت در غیاب اتصال‌دهنده عرضی، نانو ذرات دی‌اکسید سریم نقش مهمی را در کاهش مقدار انعکاس پارچه‌های مخلوط با الگوی جنگلی در سرتاسر نواحی NIR و SWIR ایفا نموده و در حضور اتصال‌دهنده‌های عرضی این نانو ذرات اکسید منیزیم هستند که نقش پررنگ‌تری داشته و موجب کاهش مقدار انعکاس در سرتاسر نواحی زیرقرمز می‌شوند. بنابراین برای اهداف نظامی که ویژگی ثبات در کنار سایر عوامل همواره قابل توجه بوده بهتر است از اتصال‌دهنده عرضی همراه با اکسیدهای فلزی

میزان انعکاس آنها را در نواحی SWIR به زیر ۴۰٪ نسبت به پارچه خام برساند (شکل ۷). در این شکل، متوسط انعکاس پراکنده پارچه‌ها با الگوی بیابانی پوشش داده شده با اکسیدهای فلزی و اتصال‌دهنده عرضی تا ناحیه NIR تغییر چندانی نکرده، اما بعد از این ناحیه مقدار انعکاس پراکنده در مقایسه با انعکاس نانو ذرات بدون اتصال‌دهنده عرضی به کمتر از ۴۰٪ کاهش یافته‌است. همچنین این کاهش انعکاس برای پارچه‌های پوشش داده‌شده با اکسید منیزیم تقریباً بیشتر از دی‌اکسید سریم بوده است. بنابراین برای ایجاد استتار در محیط بیابانی بهتر است در پارچه از اتصال‌دهنده عرضی نیز همراه با اکسیدهای فلزی استفاده شود تا الگو انعکاس پارچه به محیط بیابانی بسیار نزدیکتر شده و خاصیت استتاری مناسبی را برای اهداف نظامی فراهم آورد.

در اینجا به نظر می‌رسد که گروه کربوکسیل سیتریک اسید توانسته با گروه هیدروکسیل از بخش پنبه‌ای پارچه‌ی مخلوط متصل شود و از سمت دیگر گروه هیدروکسیل سیتریک اسید جذب عناصر اکسیژن نانو ذرات دی‌اکسید سریم یا اکسید منیزیم گردد. همچنین



شکل ۶: مقایسه طیف‌های انعکاسی پراکنده پارچه‌های مخلوط پنبه/نایلون پوشش داده شده با اکسیدهای فلزی در غلظت بهینه ۱٪ (w/v)، سیتریک اسید در غلظت ۶٪ (w/v) و محیط جنگلی در نواحی NIR تا SWIR.



شکل ۷: مقایسه طیف‌های انعکاسی پراکنده پارچه‌های مخلوط پنبه/نایلون پوشش داده شده با اکسیدهای فلزی در غلظت بهینه ۱٪ (w/v)، سیتریک اسید در غلظت ۶٪ (w/v) و محیط بیابانی در نواحی NIR تا SWIR.



استفاده شود.

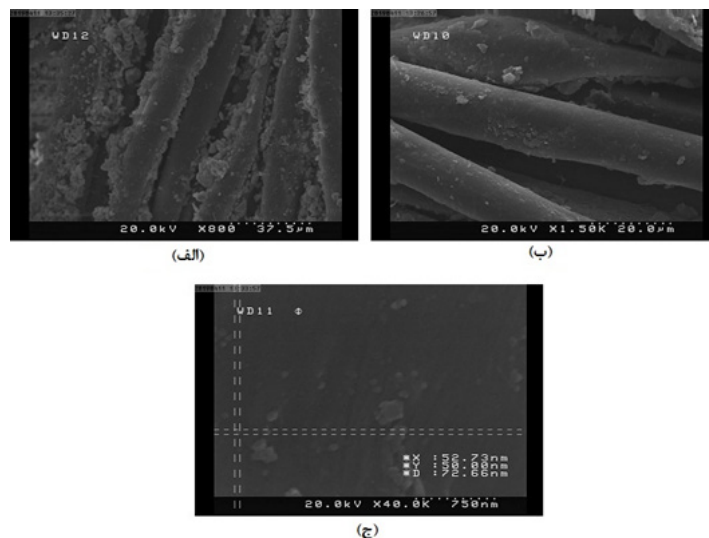
با (w/v) ۱٪ اکسید منیزیم و (w/v) ۶٪ سیتریک اسید نیز در شکل ۹ نشان داده شده است. همانطور که از شکل مشخص است با حضور سیتریک اسید بعنوان اتصال دهنده عرضی در سطح پارچه میزان اتصال نانو ذره اکسید منیزیم به پارچه افزایش یافته است که این بدلیل وجود پیوند استری بین پارچه‌ی مخلوط پنبه/نایلون با سیتریک اسید و نانو ذرات بوده که منجر به ایجاد پیوندی قوی بین نانو ذرات با سطح پارچه شده و از خروج آنها حین عملیات بعدی (عبور از جفت غلطک جهت خشک شدن و در ادامه تثبیت) جلوگیری به عمل آورده و در نتیجه نانو ذرات از جذب بر روی سطح به درون ساختار پارچه نفوذ کرده‌اند و بدین صورت جذب افزایش یافته است. با این حال، در این حالت میزان اندازه ذرات نسبت به نانو ذره دی اکسید سربم بزرگتر بوده (در حدود ۷۰-۱۲۰ نانومتر) و این حاکی از آن است که امکان تجمع این نانو ذره بر روی پارچه علیرغم حضور سیتریک اسید بیشتر می‌باشد.

برای شناسایی نانو ذرات موجود بر روی پارچه‌ی پوشش داده شده از طیف‌سنج تفکیک انرژی اشعه ایکس استفاده شد. در تصویر EDS از شکل ۱۰، حضور نانو ذرات دی‌اکسید سربم بر روی سطح پارچه‌های پوشش داده شده تأیید شد. پیک تالان نشان داده شده در

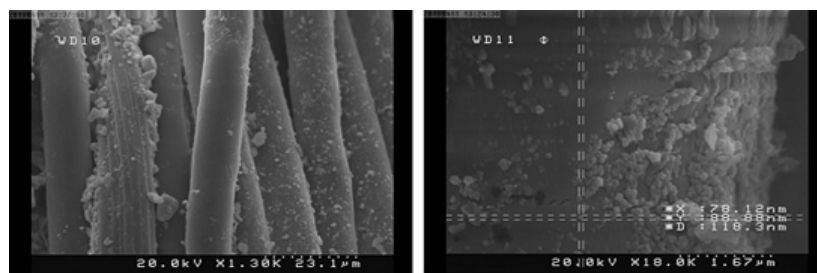
### ۳-۳- مطالعه خواص ساختاری و توزیع اندازه ذرات دی‌اکسید سربم و اکسید منیزیم پوشش داده شده بر روی پارچه‌های مخلوط پنبه/نایلون

برای اثبات حضور نانو ذرات دی‌اکسید سربم و اکسید منیزیم بر روی پارچه‌ها از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FESEM) و همچنین طیف‌سنج تفکیک انرژی اشعه ایکس (EDS) استفاده شده است. شکل ۸ تصاویر FE-SEM از پارچه‌ها با الگوی جنگلی پوشش داده شده با نانو ذرات  $\text{MgO}$  و  $\text{CeO}_2$  در غلظت بهینه (w/v) ۱٪ را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۸ (الف و ب) نشان داده شده، میزان اتصال نانو ذرات دی‌اکسید سربم به پارچه در غیاب سیتریک اسید بیشتر از نانو ذرات دی‌اکسید منیزیم بوده و این نانو ذرات بصورت همگن بر روی تمامی سطح پارچه توزیع شده‌اند. همچنین، مشخص است که متوسط اندازه ذرات دی‌اکسید سربم در پارچه با الگوی جنگلی در حدود ۵۰ تا ۷۰ نانومتر (شکل ۸ ج)) می‌باشد.

تصاویر FE-SEM از پارچه‌ها با الگوی جنگلی پوشش داده شده



شکل ۸: تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی پارچه‌های مخلوط پنبه/نایلون پوشش داده شده با غلظت بهینه (w/v) ۱٪ از نانو ذرات (الف و ج): دی‌اکسید سربم و (ب) اکسید منیزیم.



شکل ۹: تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی پارچه مخلوط پنبه/نایلون پوشش داده شده با (w/v) ۱٪ نانو ذره اکسید منیزیم و (w/v) ۶٪ سیتریک اسید.

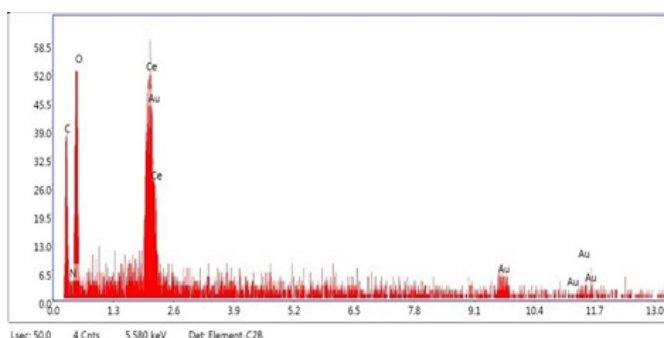
تا اتصال بین اکسید منیزیم با پارچه قوی تر شود، در حالیکه این اتصال دهنده در بهبود پیوند بین دی اکسید سریم با پارچه نقش چندانی نداشته است. بنابراین برای اهداف استتاری استفاده از ۱٪ نانو ذرات اکسید منیزیم همراه با ۶٪ سیتریک اسید نسبت به دی اکسید سریم در پارچه کارآمدتر بوده و حساسیت را در برابر دوربین‌های دید در شب بالاتر خواهد برد. تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی نشر میدانی نیز نشان داد که پارچه‌های پوشش داده شده با دی اکسید سریم میانگین اندازه ذرات کوچکتری داشته (در حدود ۵۰ تا ۷۰ نانومتر) و میزان پراکندگی این نانو ذرات در سطح پارچه نیز بهتر بوده است. در مقابل نانو ذرات اکسید منیزیم در صورت اتصال با سیتریک اسید جذب بهتری بر روی سطح پارچه از خود نشان داده، اما میزان پراکندگی آنها نسبت به دی اکسید سریم کمتر بوده و بیشتر در معرض تجمع قرار دارند.

تصویر مربوط به استفاده از یک لایه‌ی پوششی برای انجام آزمایش EDS بوده و عناصر اکسیژن، کربن و نیتروژن نشان داده شده در تصویر جزء اصلی ترکیبات منسوج پنبه/ نایلون پوشش داده شده می‌باشند.

#### ۴- نتیجه‌گیری

پارچه‌های مخلوط پنبه/ نایلون چاپ شده در الگوهای جنگلی و بیابانی با غلظت‌های مختلف از نانو ذرات دی اکسید سریم و اکسید منیزیم پوشش داده شدند تا مقدار انعکاس پراکنده و ویژگی استتاری این پارچه‌ها با انعکاس مناطق جنگلی و بیابانی در نواحی زیرقرمز نزدیک تا زیرقرمز نزدیک با طول موج کوتاه (NIR-SWIR) بررسی شود. نتایج نشان داد که با افزودن (w/v) ۱٪ از نانو ذرات به پارچه روند انعکاس کاهش یافته و به طیف انعکاسی مناطق جنگلی و بیابانی نزدیک شده است. با این حال نانوذره دی اکسید سریم در غلظت (w/v) ۱٪ بیشترین کاهش انعکاس را در برداشته و به الگوی جنگلی و بیابانی نزدیکتر بوده اما این کاهش برای نانو ذره اکسید منیزیم ناچیز بوده است.

برای محکم نمودن پیوند بین نانو ذرات و پارچه می‌توان از سیتریک اسید به عنوان یک دی کربوکسیلیک اسید برای تشکیل پیوندهای استر با گروه‌های هیدروکسیل استفاده نمود و ثبات عملیات را بهبود بخشید. بنابراین افزودن (w/v) ۶٪ سیتریک اسید همراه با (w/v) ۱٪ دی اکسید سریم و اکسید منیزیم به پارچه توانسته میزان انعکاس کل را در تمامی طول موج‌ها کاهش دهد. با این حال، کاهش شدت انعکاس اکسید منیزیم بیشتر از دی اکسید سریم در تمامی این طول موج‌ها بوده است. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان گفت که وجود سیتریک اسید در پارچه موجب شده



Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
CK	26.5	35.6	5.0	15.4	0.1059	1.0690	0.3743	1.0000
NK	8.9	10.3	0.9	33.2	0.0144	1.0451	0.1544	1.0000
OK	51.9	52.4	9.7	14.5	0.0861	1.0242	0.1617	1.0000
CeL	7.4	1.3	8.1	15.2	0.0715	0.7196	1.3334	0.9997
AuL	5.2	0.4	2.0	52.0	0.0388	0.5269	1.3843	1.0209

شکل ۱۰: تصویر طیفسنج تفکیک انرژی اشعه ایکس پارچه مخلوط پنبه/ نایلون پوشش داده شده با (w/v) ۱٪ نانو ذره دی اکسید سریم و (w/v) ۶٪ سیتریک اسید.

## ۵- مراجع

- [1] T. Haran, Short-wave infrared diffuse reflectance of textile materials, College of Arts and Sciences, Georgia State University, 2008.
- [2] C.L. Ho, Imaging and reflectance spectroscopy for the evaluation of effective camouflage in the SWIR, Naval Postgraduate School, Monterey California, 2007.
- [3] U. Goudarzi, J. Mokhtari, M. Nouri, Camouflage of cotton fabrics in visible and NIR region using three selected vat dyes. *Color Res. Appl.* 39(2) (2014), 200-207.
- [4] ا. گودرزی، ج. مختاری، م. نوری، امکان‌سنجی کاربرد ماده رنگزا برای ایجاد اثر استتار در ناحیه زیرقرمز نزدیک با استفاده از طیف نورسج UV-Vis. *مجله علوم و فناوری نساجی*. ۳(۴) (۱۳۹۱)، ۱۳۵-۱۴۱.
- [5] V. Rubežienė, I. Padleckienė, J. Baltušnikaitė, S. VARNAITĖ, Evaluation of camouflage effectiveness of printed fabrics in visible and near infrared radiation spectral ranges. *Mater Sci-Medzg.* 14(4) (2008), 361-365.
- [6] N. Puzikova, E. Uvarova, I. Filyaev, L. Yarovaya, Principles of an approach for coloring military camouflage. *Fibre Chem.* 40(2) (2008), 155-159.
- [7] J.P. Singh, S.O. Won, W.C. Lim, C-H. Shim, K.H. Chae, Optical behavior of MgO nanoparticles investigated using diffuse reflectance and near edge X-ray absorption spectroscopy. *Mater. Lett.* 198 (2017), 34-37.
- [8] M. Montazer, M. Maali Amiri, ZnO nano reactor on textiles and polymers: ex situ and in situ synthesis, application, and characterization. *J. Phys. Chem. B.* 118(6) (2014), 1453-1470.
- [9] M.A. Hossain, M. Rahman, A review of nano particle usage on textile material against ultra violet radiation. *Journal of Textile Science and Technology.* 1(03) (2015), 93.
- [10] V. Fang, J.V. Kennedy, J. Futter, J. Manning, A review of near infrared reflectance properties of metal oxide nanostructures. *GNS Science.* 39(2013), 1-20.
- [11] M.K. Mehrizi, S.M. Mortazavi, S. Mallakpour, S.M. Bidoki, The effect of nano-and micro-TiO<sub>2</sub> particles on reflective behavior of printed cotton/nylon fabrics in vis/NIR regions. *Color Res. Appl.* 37(3) (2012), 199-205.
- [12] U. Goudarzi, J. Mokhtari, M. Nouri, Investigation on the effect of titanium dioxide nano particles on camouflage properties of cotton fabrics. *Fiber Polym.* 15(2) (2014), 241-247.
- [13] H. Jafari, M.K. Mehrizi, S. Fattahi, The effect of Inorganic Nanoparticles on Camouflage Properties of Cotton/Polyester Fabrics. *Prog. Color Colorants Coat.* 9(2016), 29-40.
- [14] M.K. Mehrizi, S. Mortazavi, S. Mallakpour, S. Bidoki, M. Vik, M. Vikova, Effect of carbon black nanoparticles on reflective behavior of printed cotton/nylon fabrics in visible/near infrared regions. *Fiber Polym.* 13(4) (2012), 501-506.
- [15] S. Ramsey, T. Mayo, S.G. Lambrakos, A parametric model of NIR and SWIR reflectance spectra for dyed fabrics. *J. ELECTRO-MAGNET WAVE.* (2017), 1-12.
- [16] C. Peverari, A. Pires, R. Gonçalves, O. Serra, Synthesis, structural and morphological characterization of CeO<sub>2</sub>-ZnO nanosized powder systems from Pechini's method. *Eclat. Quím.* 30(1) (2005), 59-64.
- [17] S. Balamurugan, L. Ashna, P. Parthiban, Synthesis of nanocrystalline MgO particles by combustion followed by annealing method using hexamine as a fuel. *J. Nanotechnol.* 2014(2014), 1-6.
- [18] J. Maitra, V.K. Shukla, Cross-linking in Hydrogels - A Review. *American Journal of Polymer Science.* 4(2) (2014), 25-31.
- [19] P. Bajaj, Ecofriendly finishes for textiles. *Indian j. fibre text. res.* 26(2001), 162-186.
- [20] D. Gyawali, P. Nair, Y. Zhang, R.T. Tran, Ch. Zhang, M. Samchukov, M. Makarov, H. K.W. Kim, J. Yang, Citric acid-derived in situ crosslinkable biodegradable polymers for cell delivery. *Biomaterials.* 31(2010), 9092-9105.
- [21] J. Dozier, Remote sensing of snow in visible and near-infrared wavelengths NASA Snow Remote Sensing Workshop Boulder. Aug. (2013).
- [22] Introduction to Remote Sensing: 1. Physical Basics, <https://www.seos-project.eu/remotesensing/remotesensing-c01-p05.html>, accessed online June, 2019.
- [23] Optical Remote Sensing, <http://www.crisp.nus.edu.sg/~research/tutorial/optical.htm>, accessed online June, 2019.
- [24] L.D. Santos, Camouflage U.S. Marine corps utility uniform: pattern, fabric, and design, US Pat. 6805957 B1, 2001.
- [25] H. Zhang, J.C. Zhang, Near-infrared green camouflage of cotton fabrics using vat dyes. *J. TEXT. I.* 99(1) (2008), 83-88.