



رویکردی نوین در شبیه‌سازی فاکتور انعکاسی پارچه‌های پوشش داده شده با نانوذرات

نگین پیری^۱، علی شمس ناتری^{۱،۲}، جواد مختاری^۱

۱- دانشکده فنی، گروه مهندسی نساجی- شیمی نساجی و علوم الیاف، دانشگاه گیلان، رشت، ایران، صندوق پستی: ۱۳۷۶۹-۴۱۹۹۶

۲- قطب علمی رنگ، موسسه پژوهشی علوم و فناوری رنگ و پوشش، تهران، ایران، صندوق پستی: ۶۵۴-۱۶۷۶۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۴/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۲۲ در دسترس به صورت الکترونیکی از: ۱۳۹۷/۸/۳۰

چکیده

پوشش‌دهی پارچه با نانوذرات به منظور ایجاد تغییر و اصلاح خصوصیات طیفی و انتشاری آنها فناوری جدیدی است که در سال‌های اخیر معرفی شده است. این روش حوزه جدیدی از منسوجات با کارایی بالا مانند استتار، پارچه‌های محافظ در مقابل پرتو فرابنفش، سلول‌های خورشیدی و منسوجات خنک‌کننده را تحت پوشش خود قرار می‌دهد. یکی از مهم‌ترین رویکردها در تخمین فاکتور انعکاسی این منسوجات استفاده از مدل‌های مختلف براساس تئوری مختصات گسسته می‌باشد که شامل مدل‌هایی نظیر کیوبلکا-مانک و چند پرتوی می‌شود. در این مدل‌ها غالباً از انعکاس سطحی الیاف، چشم‌پوشی شده و پارچه به صورت محیطی پیوسته در نظر گرفته می‌شود که خود منبع خطای بالایی است. تئوری کلاسیک هندسه نور از دیگر مدل‌هایی است که بطور گسترده برای پیشگویی فاکتور انعکاسی ذراتی مورد استفاده قرار می‌گیرد که دارای ابعادی خیلی بزرگ‌تر از طول موج پرتو تابیده هستند. در این مدل محدودیت موجود در مدل مختصات گسسته وجود ندارد ولی برای پیشگویی رفتار انعکاسی نانوذرات مناسب نمی‌باشد. با توجه به اینکه پارچه‌های پوشش داده شده سیستمی متشکل از موادی با ابعاد میکرومتر و نانومتر هستند، در این تحقیق یک مدل نظری براساس تئوری کلاسیک هندسه نور برای مطالعه انتقال پرتو از پارچه‌های پوشش داده شده با نانوذرات پیشنهاد شد که در آن خصوصیات تابشی ذرات با ابعاد نانومتر و زیر میکرومتر توسط تئوری انتشار می و خصوصیات تابشی الیاف توسط تئوری هندسه نور توصیف می‌شود. دقت مدل پیشنهاد شده با استفاده از پارچه پلی‌استر پوشش داده شده با نانوذرات دی اکسید تیتانیم ارزیابی شد و نتیجه مقایسه نتایج حاصل از مدل و داده‌های آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده نشانگر موفق بودن مدل پیشنهادی بوده و روش نوینی را برای اندازه‌گیری انتقال پرتو از محیط‌های شامل اجزایی با اندازه‌های متفاوت معرفی می‌کند.

واژه‌های کلیدی: تئوری انتشار می، مدل هندسی، پارچه پوشش داده شده، نانوذرات.

A Novel Approach in Simulation of Spectral Reflectance of Nanopigment Coated Fabrics

N. Piri¹, A. Shams-nateri^{*1,2}, J. Mokhtari¹

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

2- Center of Excellence for Color science and Technology, Institute for Color Science and Technology, PO Box: 16765-654, Tehran, Iran

Received: 13-07-2017

Accepted: 13-03-2018

Available online: 21-11-2018

Abstract

Coating of fabrics with spectrally selective nanopigments, in order to manipulate their optical properties, has been introduced in recent years. This method presents a new field in high performance textiles which covers high technological aspects such as UV protective fabrics, Solar cells and cool fabrics as well. One of the most important approaches in prediction of reflectance factor of coated fabrics is based on Discrete Ordinate Method (DOM), namely, Kubelka-Munk or Multi Flux Model, where the fabric is considered as a continuous medium consists of a dispersion of nanopigments. However, ignored surface scattering on interfaces causes considerable error. Geometric optic, on the other hand, is utilized widely for prediction of spectral behavior of particles with very large dimension compared with incident wavelength. The model lacks limitation of DOM but is not appropriate for nanopigments of small diameters. According to the fact that, coated fabrics are systems consists of nano and micron sized materials, a theoretical model is proposed in which radiative properties of micro particles are described using Geometric Optic, and those for nano and submicron sized particles are described using Mie scattering theory. Subsequently, the experimental realization of proposed model has been conducted on Titanium dioxide nanopigments coated on polyester fabrics, and the successful comparison of the proposed model with experimental results confirms its suitability, and introduces a rather new procedure in the field of radiation transfer through mixed beds of elements with extremely different sizes. *J. Color Sci. Tech.* 12(2018), 229-240©. Institute for Color Science and Technology.

Keywords: Mie scattering theory, Geometric optic, Coated fabrics, Nanopigments.

۱- مقدمه

امروزه نانوذرات و نانو رنگدانه‌ها دارای کاربردهای گسترده‌ای در صنایع مختلف هستند [۱، ۲]. تکمیل کالای نساجی یکی از مهم‌ترین زمینه‌هایی است که در آن از نانوذرات و نانو رنگدانه‌ها برای ایجاد خصوصیات مختلفی مانند آبریزی [۳]، ضدباکتری [۴]، ضد قارچ [۵] و خودتمیز شونده‌گی [۶، ۷] به منسوج استفاده می‌شود.

یکی از جدیدترین کاربردهای نانوذرات در تکمیل کالاهای نساجی، اصلاح خصوصیات نوری منسوجات می‌باشد. مطالعات مختلف نشان می‌دهند که فاکتور انعکاسی سطوح در اثر پوشش‌دهی با ذرات اکسید فلزی تغییر می‌کند [۸]. علت این موضوع این است که پرتو تابیده شده زمان برخورد با سطح، ابتدا به لایه رنگدانه برخورد می‌کند و با توجه به خصوصیات انتشاری^۱ لایه رنگدانه دچار انعکاس^۲، انتقال^۳ و جذب^۴ می‌شود. پرتو منتقل شده از لایه رنگدانه در مرحله بعد به سطح برخورد کرده و با آن برهم‌کنش ایجاد می‌کند. با توجه به متفاوت بودن خصوصیات انتشاری رنگدانه مورد استفاده نسبت به سطح مورد مطالعه، برآیند انعکاس از یک سطح پوشش داده شده دارای تفاوت‌هایی با مقدار انعکاس از سطح بدون پوشش خواهد بود [۹، ۱۰].

روش‌های مختلفی برای پیشگویی فاکتور انعکاسی منسوجات ارائه شده است که مهم‌ترین آنها شامل مدل‌های مختصات گسسته^۵ و تئوری کلاسیک هندسه نور^۶ می‌شود. در مدل مختصات گسسته، مانند مدل چند پرتوی یا کیوبلکا-مانک، محیط، که در واقع همان منسوج است، به صورت پیوسته در نظر گرفته می‌شود و روابط انتقال پرتو برای یک المان حجمی از آن نوشته و حل می‌شود. در این حالت خصوصیات نوری محیط مانند جذب، انتشار و انعکاس‌های داخلی در قالب یک ضریب تجربی بیان می‌شود که به عنوان ضریب خاموشی^۷ شناخته شده است.

برای پیشگویی فاکتور انعکاسی پارچه پوشش داده شده با نانوذرات، می‌توان پارچه را به صورت لایه‌ای پیوسته در نظر گرفت که نانوذرات در آن پخش شده است، و سپس مدل مختصات گسسته را روی این لایه پیاده نمود. در این لایه‌ها، که ذرات مهم‌ترین نقش را در خصوصیات نوری دارند، ضرایب جذب و انتشار لایه را می‌توان به کمک تئوری انتشار می^۸ محاسبه نمود. تئوری انتشار می، انتشار

امواج الکترومغناطیس توسط یک ذره کروی همگن و ایزوتروپیک، که در یک محیط فاقد قدرت جذب قرار گرفته است، را توصیف می‌کند. این مدل برای ذرات ریزی که دارای قطری در مقیاس طول موج پرتو تابیده هستند، مناسب می‌باشد. با استفاده از این مدل می‌توان خصوصیات نوری مهمی مانند بازده خاموشی^۹ و انتشار^{۱۰}، تابع فاز^{۱۱} و پارامتر عدم تقارن^{۱۲} را محاسبه نمود. این پارامترها را می‌توان در مرحله بعد به ضرایب جذب و انتشار لایه تبدیل نموده و فاکتور انعکاسی آن را اندازه‌گیری کرد. بر اساس تئوری انتشار می، ضریب شکست مختلط ذرات ($N=n+ki$)، قطر ذره (d) و طول موج پرتو تابیده (λ) مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده خصوصیات انتشاری ذرات هستند [۱۱، ۱۲]. در این روش، با توجه به اینکه پارچه به صورت یک لایه پیوسته در نظر گرفته می‌شود، از انعکاس‌های سطحی الیاف صرف‌نظر می‌شود که منشا خطای بالایی است [۱۳، ۱۴].

مدل هندسه نور از دیگر مدل‌هایی است که به طور گسترده برای پیش‌بینی خصوصیات نوری اجسامی که دارای ابعادی خیلی بزرگ‌تر از طول موج پرتو تابیده هستند، مورد استفاده قرار گرفته است [۱۵]. بر این اساس، در دهه ۷۰ میلادی روش جدیدی توسط آلن و گلدفینگر برای تخمین فاکتور انعکاسی منسوجات تدوین شد که در آن پارچه به صورت آرایه‌ای از استوانه‌های ایزوتروپیک رنگین و طول بینهایت در نظر گرفته می‌شوند که در لایه‌های مشخص و معینی آرایش یافته‌اند. در این حالت، مسیر هر پرتو در سطح مشترک ذره و محیط، در درون ذره و در تقابل با ذرات دیگر دنبال می‌شود و در نهایت، با استفاده از خصوصیات الیاف، مانند ضریب شکست لیف و محیط اطراف، قطر الیاف و ضریب جذب طیفی رفتار طیفی ماده پیش‌بینی می‌شود [۱۶]. از طرف دیگر، پارچه‌های پوشش داده شده با نانوذرات مجموعه‌ای متشکل از ذراتی با ابعاد میکرومتر (الیاف) و نانومتر (نانو رنگدانه‌ها) می‌باشند که با توجه به محدودیت‌های موجود در مدل، نمی‌توان تئوری کلاسیک هندسه نور را به شکل اولیه آن، روی این منسوجات پیاده نمود.

پوشش دادن کالاهای نساجی ممکن است به روش‌های مختلفی صورت گیرد که نتیجه آن به وجود آمدن حالت‌های متفاوت می‌باشد. می‌توان رنگدانه مورد نظر را با استفاده از یک پیونده مناسب روی سطح کالا قرار داد که این حالت دارای شباهت زیادی با سایر کاربردهای مهندسی می‌باشد. ولی در بسیاری از کاربردها، پوشش دادن منسوج به روش غوطه‌وری-پد-پخت انجام می‌شود تا خصوصیت مورد انتظار از رنگدانه به واسطه وجود رزین دچار تغییر نشود. در این حالت ذرات به داخل پارچه نفوذ کرده و روی الیاف آن

- 1- Radiative Properties
- 2- Reflectance
- 3- Transmittance
- 4- Absorption
- 5- Discrete Ordinate Method (DOM)
- 6- Classic Geometric Optics
- 7- Extinction Coefficient
- 8- Mie Scattering Theory

- 9- Extinction Efficiency
- 10- Scattering Efficiency
- 11- Phase Function
- 12- Asymmetry Parameter

خارج می‌شود. با توجه به شکل ۱ الف، بخشی از پرتو که از لایه اول به سمت پایین منتشر شده است (τ_1) را می‌توان با استفاده از یک فرآیند ازدیاد تدریجی و با توجه به رابطه ۱ به دست آورد [۱۶، ۲۱].

$$\tau_1 = \frac{k^2(1-a)^2}{(1+k)^2 - (1-a)^2} \quad (1)$$

به طور مشابه می‌توان بخشی از پرتو اولیه که از سطح لایه در جهت بالانتشر شده است با استفاده از رابطه ۲ قابل محاسبه است [۱۶، ۲۱].

$$\sigma_1 = \frac{(1-a)(1+\tau_1)}{(1+k)} \quad (2)$$

در روابط ۲ و ۳، میزان پرتو جذب شده توسط الیاف، a ، با استفاده از رابطه ۵ محاسبه می‌شود [۱۶، ۲۱].

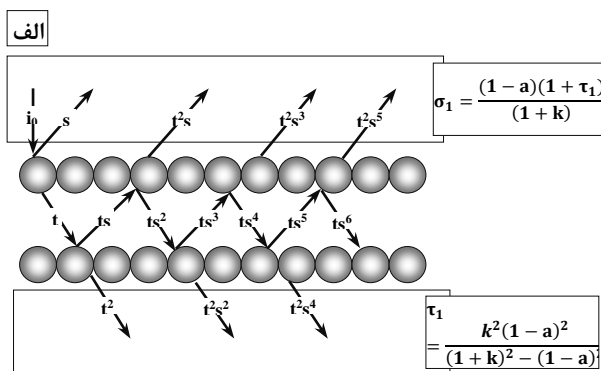
$$a = (1 - \rho)(1 - e)/(1 - \rho e) \quad (3)$$

که در آن، e نور منتقل شده می‌باشد و می‌توان آن را با استفاده از قانون بیر-لامبرت محاسبه نمود [۱۶، ۲۱].

در گام بعدی یک لایه که از دو آرایه از الیاف تشکیل شده است، به عنوان یک لایه جدید در نظر گرفته می‌شود و محاسبات را در تقابل با لایه مشابه بعدی انجام شده و مقادیر τ_2 و σ_2 محاسبه می‌شود (شکل ۱ ب). برای محاسبه انعکاس از سطح یک لایه پشت پوش از الیاف، n تا جایی افزایش می‌یابد که τ_n قابل چشم‌پوشی شود و در نهایت، با استفاده از خصوصیات الیاف، مانند ضریب شکست لیف و محیط اطراف و قطر الیاف رفتار طیفی ماده پیش‌بینی می‌شود. نور منتشر شده از لایه n ام به سمت بالا (انعکاس لایه) و پایین را به ترتیب می‌توان با استفاده از روابط ۴ و ۵ محاسبه نمود [۱۶، ۲۱].

$$\sigma_n = \sigma_{n-1}(1 + \tau_n) \quad (4)$$

$$\tau_n = \frac{\tau_{n-1}^2}{1 - \sigma_{n-1}^2} \quad (5)$$



قرار می‌گیرد و در شرایط خاص ممکن است به درون الیاف نیز نفوذ کنند. علاوه بر آن به دلیل بالا بودن غلظت ذرات روی منسوج ممکن است تجمع در ذرات نیز مشاهده شود که تخمین فاکتور انعکاسی منسوج را پیچیده‌تر می‌کند [۱۷، ۱۸].

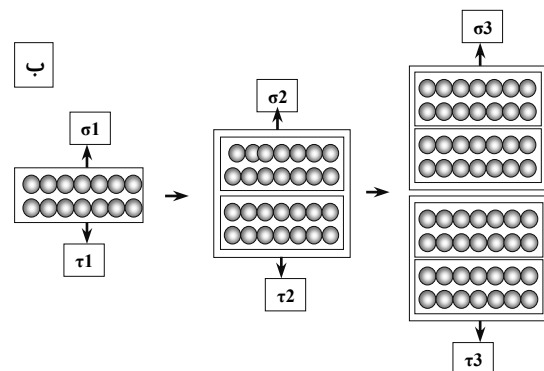
برخلاف استفاده گسترده از رنگدانه‌ها در صنعت نساجی، هنوز مطالعات نظری و عملی کمی روی تاثیر آنها بر طیف انعکاسی منسوج صورت گرفته است [۱۹]. به همین دلیل در کار تحقیقی پیش رو یک روش نوین جهت شبیه‌سازی فاکتور انعکاسی پارچه پوشش داده شده با نانوذرات پیشنهاد شد که بر اساس مدل کلاسیک هندسه نور بوده و در آن خصوصیات تابشی نانوذرات با استفاده از تئوری انتشار می‌محاسبه می‌شود. جهت ارزیابی عملکرد مدل پیشنهاد شده، فاکتور انعکاسی پارچه پلی‌استر پوشش داده شده با ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم با قطرها و غلظت‌های مختلف به روش آزمایشگاهی اندازه‌گیری شد و این نتایج با نتایج حاصل مدل مقایسه گردید.

۲- مدل سازی

۲-۱- مدل هندسی پایه

جهت محاسبه فاکتور انعکاسی منسوج پوشش داده شده با نانوذرات از یک روش نوین بر اساس مدل هندسی، که اولین بار توسط آلن و گلدفینگر ارائه شد [۱۶]، استفاده شده است. در مدل اولیه، پارچه به صورت آرایه‌ای از استوانه‌های ایزوتروپیک رنگین، که دارای قطری خیلی بزرگ‌تر از طول موج پرتو تابیده می‌باشند، در نظر گرفته می‌شود. این موضوع در شکل ۱ نشان داده شده است.

با توجه به شکل، در پارچه‌های عمل نشده، فرض بر این است که، دولا لایه از الیاف روی هم قرار دارند. پرتو با شدت i_0 ، با زوایای مختلف به آرایه فوقانی الیاف برخورد می‌کند. با توجه به شکل ۱ الف، بخش s از پرتو از الیاف رو به بالا منتشر شده و بخش t از آن در جهت پایین منتشر می‌شود و به الیاف تحتانی برخورد می‌کند. بطور مشابه، بخش t_s از پرتو از الیاف تحتانی به سمت بالا منتشر شده و به الیاف لایه فوقانی برخورد می‌کند و بخش t^2 از سمت دیگر الیاف



شکل ۱: الف) نمای شمایی از پدیده‌های انعکاس و انتقال از لایه سطحی الیاف و ب) نحوه شکل‌گیری لایه‌ها در مدل هندسی [۲۲].

۲-۲- مدل پیشنهادی برای محاسبه فاکتور انعکاسی پارچه پوشش داده شده با نانوذرات

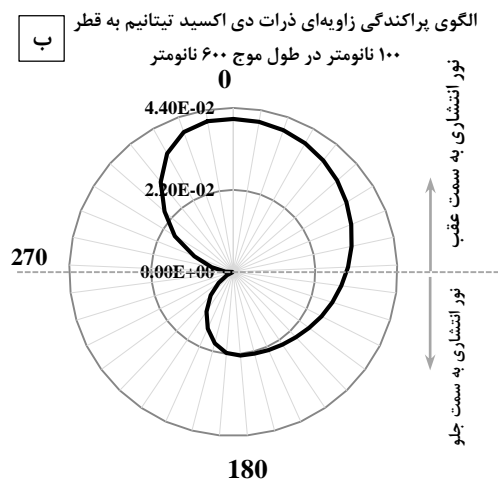
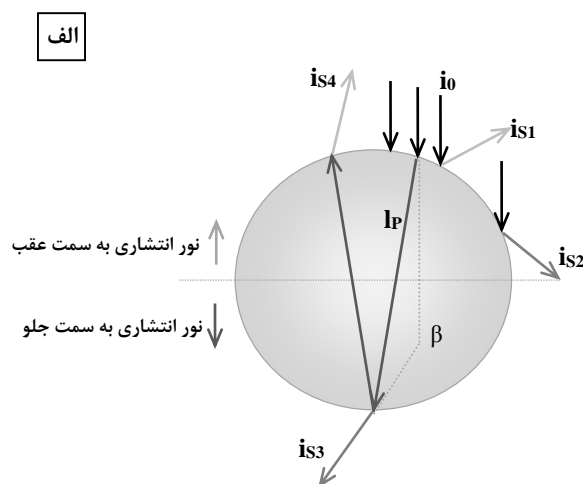
مهم‌ترین تفاوت پارچه‌های پوشش داده شده با نانوذرات با پارچه‌های عمل شده در این است که منسوجات پوشش داده شده سیستم‌های متشکل از نانو و میکرو ذرات هستند که خصوصیات نوری هر دو گروه ذره در پیش‌بینی فاکتور انعکاسی و عملکرد طیفی پارچه پوشش داده شده موثر می‌باشد. ابعاد ذرات یکی از محدودیت‌های موجود در مدل هندسی می‌باشد که امکان استفاده از این مدل را در حوزه نانوذرات نمی‌دهد. به همین دلیل در مقاله حاضر تغییراتی در محاسبه ضرایب مدل هندسی صورت گرفته است که این مدل را برای محاسبه خصوصیات انتشاری نانو ذرات مناسب می‌سازد. میزان پرتو جذب شده توسط نانوذره، a ، و ضریب k از جمله خصوصیات هستند که نمی‌توان آنها را توسط مدل هندسه نور محاسبه نمود. مدل مناسب برای محاسبه این ضرایب در نانوذرات و ذراتی که ابعاد آنها در مقیاس پرتو تابیده شده هستند، تئوری انتشار می‌باشد. به همین دلیل پیشنهاد می‌شود این مقادیر با استفاده از تئوری انتشار می‌اندازه‌گیری و در محاسبات مدل هندسی جایگزین شوند. میزان پرتو جذب شده در نانوذرات را می‌توان با استفاده از رابطه ۷ محاسبه نمود [۱۱، ۱۲].

$$a = C_{abs} / (4\pi r^3 / 3) \quad (7)$$

برای محاسبه ضریب k در رابطه ۲، با توجه به شکل ۲ ب فرض می‌شود که بخشی از پرتوهای تابیده شده به الیاف به سمت بالا منتشر می‌شوند، s ، که شامل مجموع پرتوهای است که از سطح لیف و یا پس از چند شکست و انعکاس داخلی به سمت بالا منتشر شده‌اند (به عنوان مثال پرتوهای is_1 و is_4). به طور مشابه، t بخشی از پرتو است که به سمت پایین منتشر می‌شود (به عنوان مثال پرتوهای is_2 و is_3) و در نهایت، بخشی از پرتو جذب لیف می‌شود، ضریب k برابر با نسبت پرتوهای منتشر شده رو به عقب به پرتوهای منتشر شده رو به جلو می‌باشد و در ذراتی با قطر خیلی بزرگ‌تر از طول موج پرتو تابیده، مانند الیاف، با استفاده از رابطه ۶ محاسبه می‌شود.

$$k = \frac{t}{s} = \frac{\rho_{d \rightarrow r} \cos 45 + (1-p)^2 \left(e^{\cos \beta 1(-)} + \dots + e^{\cos \beta 1(-)^{n-1}} \right)}{\rho_{d \rightarrow -r} \cos 45 + (1-p)^2 \left(e^{\cos \beta 1(+)} + \dots + e^{\cos \beta 1(+)^{n-1}} \right)} \quad (6)$$

که در آن ρ پرتو منعکس شده از سطح الیاف می‌باشد که با استفاده از قانون فرسنتل برای نور پلاریزه محاسبه می‌شود. با توجه به شکل ۲ الف، در صورتی که d در بازه $(0, \cos 45)$ قرار بگیرد- یا به عبارت دیگر $(d=0 \rightarrow \cos 45)$ به عنوان مثال پرتو $-is_1$ پرتو منعکس شده به سمت بالا و در صورتی که در بازه $(\cos 45, r)$ قرار بگیرد- به عبارت دیگر $(d=\cos 45 \rightarrow r)$ مانند پرتو $-is_2$ پرتو منعکس شده به سمت بالا حرکت خواهد کرد. همچنین، با توجه به شکل ۲ الف، β_1 زاویه‌ای است که امتداد پرتو تابیده شده با امتداد پرتو منتقل شده می‌سازد. منفی بودن زاویه β_1 ، $(\cos \beta 1(-))$ ، نشان می‌دهد نور منتقل شده رو به پایین حرکت می‌کند و مثبت بودن آن $(\cos \beta 1(+))$ نشان‌گر حرکت رو به بالای پرتو منتقل شده است [۱۶].



شکل ۲: (الف) برهم‌کنش نور با ذرات بزرگی که دارای اندازه‌ای بزرگ‌تر از طول موج پرتو تابیده هستند؛ i_0 : پرتو تابیده؛ is_1 و is_2 : پرتو انتشار یافته از سطح ذره؛ is_3 : پرتو انتشار یافته پس از اولین شکست و is_4 : پرتو انتشار یافته پس از دومین شکست، و (ب) الگوی پراکندگی زاویه‌ای نوعی (ذرات دی‌اکسید تیتانیوم به قطر ۱۰۰ نانومتر در طول موج ۶۰۰ نانومتر).

می‌شود. بخش t_2 در مرحله بعد به لیف برخورد کند. در این صورت بخش t_2s_1 از آن از سطح لیف به سمت بالا منتشر شده و دوباره به نانوذره برخورد می‌کند و بخش t_1t_2 به سمت پایین منتشر می‌شود و این فرآیند تا زمانی تکرار می‌شود که انرژی پرتو به مقدار ناچیزی برسد. در این حالت کل پرتو منتشر شده به سمت بالا و پایین با استفاده از روابط ۹ و ۱۰ قابل محاسبه است.

$$\sigma_{TF}(1) = s_2 + t_2^2s_1 + t_2^2s_1^2s_2 + t_2^2s_1^3s_2^2 + \dots = s_2 + \frac{t_2^2s_1}{1 - s_1s_2} \quad (9)$$

$$\tau_{TF1}(1) = t_1t_2 + t_2t_1s_1s_2 + t_2t_1s_1^2s_2^2 + \dots = \frac{t_1t_2}{1 - s_1s_2} \quad (10)$$

که در آن s_1, s_2 و t_1, t_2 به ترتیب نور منتشر شده از سطح لیف و ذره به سمت بالا و نور منتشر شده از لیف و ذره به سمت پایین می‌باشد. در مرحله بعد مقادیر $\sigma_{TF1}(1)$ و $\tau_{TF1}(1)$ به ترتیب برابر با σ_1 و τ_1 در نظر گرفته شده و $\sigma_{TF1}(n)$ و $\tau_{TF1}(n)$ با استفاده از روابط ۴ و ۵ اندازه‌گیری می‌شوند.

با انجام محاسباتی مشابه می‌توان انعکاس و انتقال از لیف پوشیده شده با دو، سه یا چهار لایه از ذرات دی‌اکسید تیتانیوم را تخمین زد و در نهایت لازم است میانگین این مقادیر برای تعیین انعکاس منسوج پوشش داده شده با نانوذرات محاسبه شود [۲۲]. در نهایت، برای محاسبه انعکاس از منسوج، R ، میانگین وزن داده شده‌ای از سطح پوشیده شده با نانوذرات $R_{\text{coated fabric}}$ و سطح پوشیده نشده، R_{fabric} ، با استفاده از رابطه ۱۱ محاسبه می‌شود.

$$R = a_1R_{\text{coated fabric}} + a_2R_{\text{fabric}} \quad (11)$$

که در آن a_1 نشان دهنده درصد سطح پوشیده شده با نانوذرات و a_2 نشان دهنده درصد سطح پوشیده نشده می‌باشد. در پژوهش حاضر مقادیر a_1 و a_2 توسط طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDX) اندازه‌گیری شده است.

که در آن C_{abs} ضریب جذب^۱ بوده و روش محاسبه آن به همراه کلیه محاسبات مربوط به تئوری انتشار می‌بطور کامل توضیح داده شده است [۲۰].

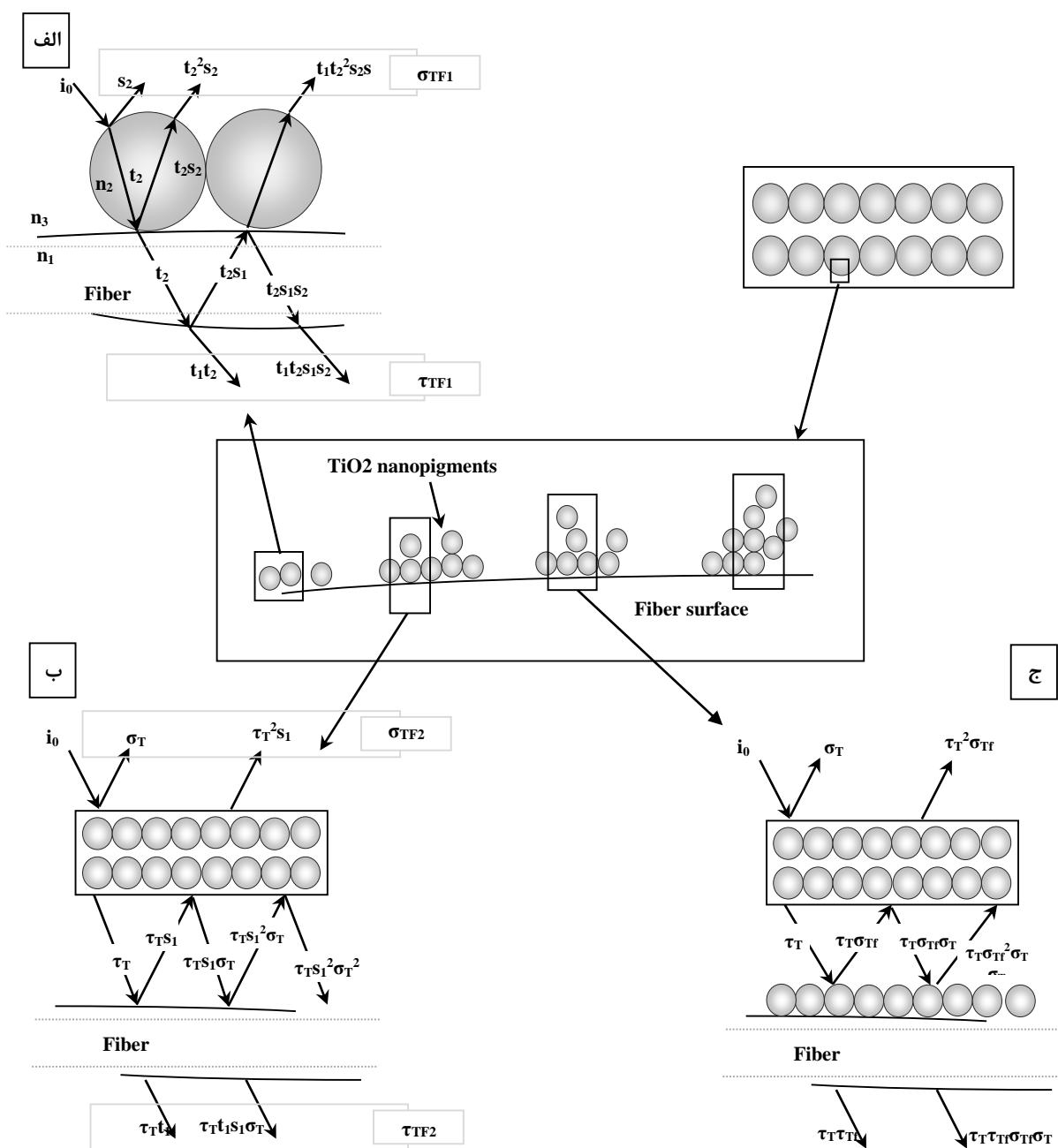
جهت محاسبه ضریب k در نانوذرات، پیشنهاد می‌شود از تابع فاز استفاده شود که احتمال انتشار پرتو تابیده شده به ذره را در جهات مختلف نشان می‌دهد و توسط تئوری انتشار می‌قابل محاسبه است. شکل ۲ ب الگوی پراکندگی زاویه‌ای یک ذره نوعی (ذره دی‌اکسیدتیتانیوم با قطر ۱۰۰ نانومتر در طول موج ۶۰۰ نانومتر که جهت محاسبه ضریب k در این مقاله اندازه‌گیری شده است) را نشان می‌دهد. در این حالت ضریب k بصورت مجموع احتمالات انتشار پرتو در جهت پایین به مجموع احتمالات انتشار پرتو در جهت بالا تعریف می‌شود. در نتیجه، ضریب k را می‌توان با استفاده از رابطه شماره ۸ اندازه‌گیری کرد.

$$k = \frac{\text{scattering in backward direction}}{\text{scattering in forward direction}} = \frac{\sum_{\theta \in (\pi/2 \rightarrow 3/2\pi)} |S|}{\sum_{\theta \in (3\pi/2 \rightarrow \pi/2)} |S|} \quad (8)$$

که در آن، S الگوی پراکندگی زاویه‌ای و علامت $||$ نشانگر قدر مطلق می‌باشد. در محاسبه الگوی پراکندگی زاویه‌ای، بزرگی نور پراکنده شده در هر جهت بستگی به جزء تفرق یافته نور، بخش منعکس شده و قسمت منکسر شده آن دارد. الگوی پراکندگی زاویه‌ای که با نماد S شناخته می‌شوند، دارای کاربردهای فراوانی از جمله محاسبه تابع فاز ذره منتشر کننده می‌باشد، به طوری که تابع فاز در زوایای مختلف ضریبی از بزرگی الگوی پراکندگی در آن زاویه می‌باشد [۲۱].

جهت پیش‌بینی فاکتور انعکاسی پارچه پوشش داده شده، فرض شده است که بخش‌هایی از لیف با نانوذرات پوشش داده شده و بخش‌های دیگری از لیف بدون پوشش باقی می‌مانند. همچنین با توجه به شکل ۳، فرض می‌شود، بخش‌های پوشش داده شده از سطح الیاف شامل یک، دو، سه یا چهار ردیف رنگدانه دی‌اکسید تیتانیوم باشند. انعکاس از سطح الیاف زمانی که پوشش دی‌اکسید تیتانیوم روی آنها قرار نگرفته است مستقیماً از روابط ۱ تا ۵ محاسبه می‌شوند. زمانی که سطح الیاف از یک لایه رنگدانه دی‌اکسید تیتانیوم پوشیده شده باشد، می‌توان با استفاده از روشی مشابه با پارچه عمل نشده، انتشار رو به جلو و روبه عقب را محاسبه نمود. در این حالت فرض می‌شود پرتو تابیده ابتدا به ذره برخورد می‌کند (شکل ۳ الف) و بخش s_2 از آن به سمت بالا و بخش t_2 به سمت پایین منتشر

1- Absorption Coefficient



شکل ۳: نمای شمایی از پارچه پوشش داده شده با نانوذرات دی اکسید تیتانیوم.

بازدارنده مهاجرت و ۰,۵ گرم بر لیتر ماده خیس کننده در آب دوبار تقطیر حل شد. سپس پارچه پلی استر در دمای اتاق و به مدت ۵ دقیقه در محلول فوق غوطه ور گردید و پس از آن عملیات پد با میزان برداشت ۷۰ درصد انجام شد. در مرحله بعد عملیات خشک کردن توسط دستگاه پد-ترموزول در دمای ۱۱۰-۱۰۰ درجه سانتی گراد به مدت ۴ دقیقه صورت گرفت و به دنبال آن عملیات ترموزول جهت نفوذ ماده رنگزای دیسپرس در الیاف پلی استر در دمای ۲۰۰-۱۹۰ درجه سانتی گراد و به مدت ۶۰-۴۵ ثانیه انجام شد.

۳- بخش تجربی

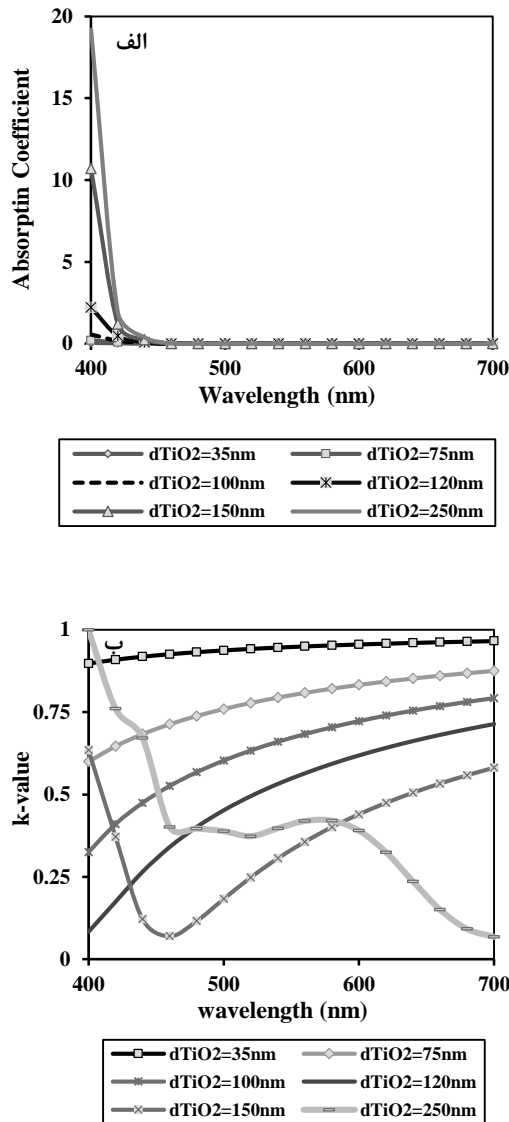
۳-۱- رنگریزی

برای مطالعه اثر شدید رنگ بر اختلاف رنگ ایجاد شده در اثر پوشش دهی، پارچه پلی استر در سه رنگ قرمز، آبی و زرد و با دو غلظت ۱ و ۳ درصد رنگریزی شد. رنگریزی به روش پد-ترموزول در کارخانه برلیان مهتاب بافت شهرستان شفت انجام گردید. جهت انجام رنگریزی مقادیر مختلفی از مواد رنگزای دیسپرس، ۵ گرم بر لیتر

۴- نتایج و بحث

۴-۱- نتایج حاصل از مدل

محاسبات می‌روی نانو رنگدانه‌های با قطر ۳۵، ۷۵، ۱۰۰، ۱۲۰، ۱۵۰ و ۲۵۰ نانومتر در محدوده مرئی از طیف الکترومغناطیس، با توجه به روش ارائه شده در منبع شماره [۲۲] انجام شد. ضریب جذب رنگدانه‌های دی‌اکسید تیتانیوم به عنوان عامل مهمی که رفتار طیفی این رنگدانه را تحت تاثیر قرار می‌دهند اندازه‌گیری و در شکل ۴ الف خلاصه گردید.



شکل ۴: (الف) ضریب جذب و (ب) ضریب k رنگدانه‌های دی‌اکسید تیتانیوم با قطر مختلف.

۲-۲- پوشش‌دهی پارچه پلی‌استر با رنگدانه دی‌اکسید

تیتانیوم

جهت بررسی درستی مدل پیشنهاد شده، پارچه‌های پلی‌استر سفید و رنگی با ذرات دی‌اکسید تیتانیوم به قطر ۱۲۰ نانومتر و با غلظت‌های مختلف پوشش داده شدند. جهت تهیه یک دیسپرسیون یکنواخت و فاقد تجمع، سوسپانسیونی از ذرات دی‌اکسید تیتانیوم با غلظت‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ گرم بر لیتر در آب، به مدت ۱۵ دقیقه تحت عملیات هم‌زدن با انرژی صوتی با قدرت ۳۰ وات قرار گرفت. پس از آن پارچه‌های سفید و رنگی با نسبت $L:G=10:1$ در دمای اتاق و به مدت ۳۰ دقیقه در مخلوط فوق غوطه‌ور شدند و سپس تحت عملیات پد با میزان برداشت ۸۰ درصد قرار گرفتند. پس از عملیات پد، عملیات خشک کردن در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۴ دقیقه صورت گرفت. در نهایت عملیات پخت در دمای ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۵ دقیقه انجام شد. نمونه‌های پخت شده جهت اندازه‌گیری طیف انعکاسی مورد استفاده قرار گرفتند.

۳-۳- تجهیزات

دستگاه پد-ترموزول ساخت شرکت شرلی جهت رنگرزی پارچه پلی‌استر با رنگزای دیسپرس و همچنین پوشش دادن پارچه پلی‌استر با رنگدانه دی‌اکسید تیتانیوم به کار گرفته شد. دستگاه هم‌زن با استفاده از انرژی صوتی مدل BANDELIN sonopuls برای تهیه پخش یکنواخت و از بین بردن تجمع ذرات دی‌اکسید تیتانیوم مورد استفاده قرار گرفت. جهت مطالعه ریخت‌شناسی سطح پارچه پوشش داده شده با نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم و همچنین طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDX) برای محاسبه کسر وزنی رنگدانه قرار گرفته روی پارچه و درصد سطح پوشیده شده با رنگدانه دی‌اکسید تیتانیوم، از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی با مشخصات MIRA3 TESCAN ساخت کشور جمهوری چک استفاده شد. اثر پوشش‌دهی با ذرات دی‌اکسید تیتانیوم بر طیف انعکاسی پارچه پلی‌استر توسط طیف‌سنج انعکاسی^۱ با مشخصات color-Eye 7000A ساخت شرکت X-rite از کشور آمریکا در بازه طول موج‌های ۴۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر و در ۱۶ طول موج مورد بررسی قرار گرفت. این ۱۶ طول موج برای بهنجار کردن^۲ خطای RMS بین طیف‌های اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده مطابق رابطه ۱۲ لحاظ شدند:

$$RMS\ error = \sqrt{\sum (R_{measured} - R_{simulated})^2 / 16} \quad (12)$$

1- Diffuse reflectance spectrophotometer

2-Normalize

فاکتور انعکاسی پارچه پلی استر سفید و رنگی پوشش داده شده با رنگدانه‌های دی اکسید تیتانیوم با قطر ۱۲۰ نانومتر توسط مدل پیشنهاد شده پیشگویی شد. شکل ۵ فاکتور انعکاسی، روشنایی و خلوص پارچه‌های قرمز روشن پوشش داده شده با ذرات دی اکسید تیتانیوم با غلظت‌های مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به شکل انعکاس تمامی نمونه‌ها در اثر پوشش‌دهی با نانوذرات دی اکسید تیتانیوم افزایش می‌یابد. همچنین، با افزایش غلظت نانوذرات انعکاس پارچه در کل طیف مرئی افزایش می‌یابد. اثر غلظت رنگدانه‌های دی اکسید تیتانیوم بر روشنایی و خلوص پارچه در شکل‌های ۵ - ب و ۵ - ج نشان داده شده است. با توجه به شکل در صورت ثابت بودن شرایط، با افزایش غلظت ذرات روشنایی نمونه افزایش و بطور هم‌زمان خلوص نمونه کاهش می‌یابد.

۴-۲- نتایج آزمایشگاهی

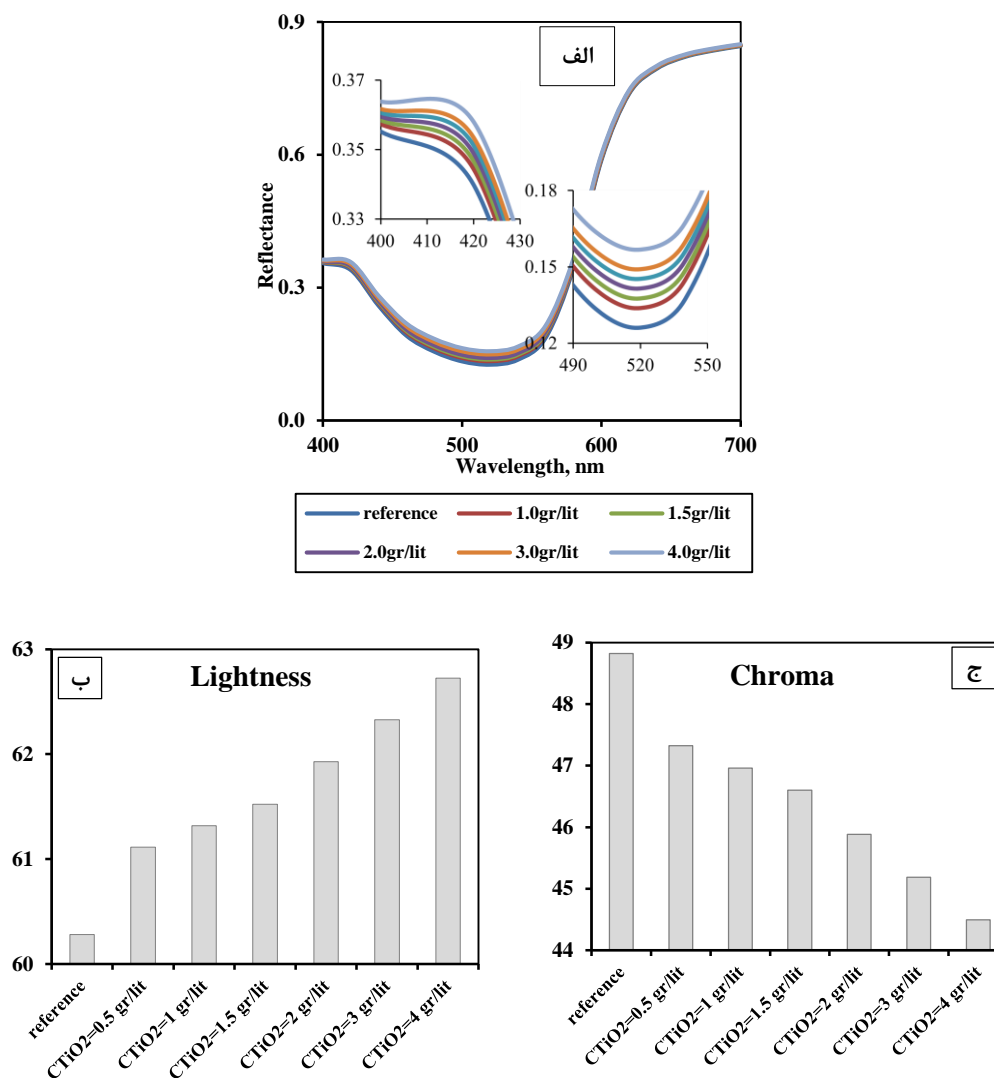
جهت ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی در تخمین فاکتور انعکاسی، پارچه‌های پلی استر سفید و رنگی با رنگدانه دی اکسید تیتانیوم به قطر ۱۲۰ نانومتر و غلظت‌های مختلف پوشش داده شد. شکل ۶ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی با بزرگ‌نمایی‌های متفاوت از نمونه‌های پوشش داده شده با نانوذرات دی اکسید تیتانیوم با قطر ۱۲۰ نانومتر و با غلظت ۴ گرم بر لیتر در حمام پوشش‌دهی را نشان می‌دهد. شکل ۶ نشان می‌دهد رنگدانه‌های دی اکسید تیتانیوم ذرات نسبتاً کروی هستند و در نتیجه شرایط مرزی در نظر گرفته شده در تئوری انتشار می‌باشد برای این ذرات صادق است. همچنین رنگدانه‌ها دارای توزیع اندازه ذرات می‌باشند و قطر ذرات روی لیف تا حدودی تغییر می‌کند. علاوه بر آن، تجمع در ذرات مشاهده می‌شود. وجود ذرات با اندازه‌های متفاوت و همچنین تجمع بین این ذرات مهم‌ترین منابع خطا در داده‌های جمع‌آوری شده آزمایشگاهی هستند.

فاکتور انعکاسی نمونه‌های سفید و رنگی مرجع و پوشش داده شده با ذرات دی اکسید تیتانیوم توسط دستگاه طیف‌سنج انعکاسی اندازه‌گیری شد و نتایج با مقادیر پیشگویی شده توسط مدل پیشنهادی مقایسه گردید. شکل ۷ مقادیر فاکتور انعکاسی سه نمونه انتخاب شده واقعی (خطوط ممتد) را در مقایسه با مقادیر متناظر محاسبه شده توسط مدل هندسی (خط چین) نشان می‌دهد. با توجه به شکل هم‌خوانی خوبی بین داده‌های واقعی و پیشگویی شده در کل طیف مرئی مشاهده می‌شود.

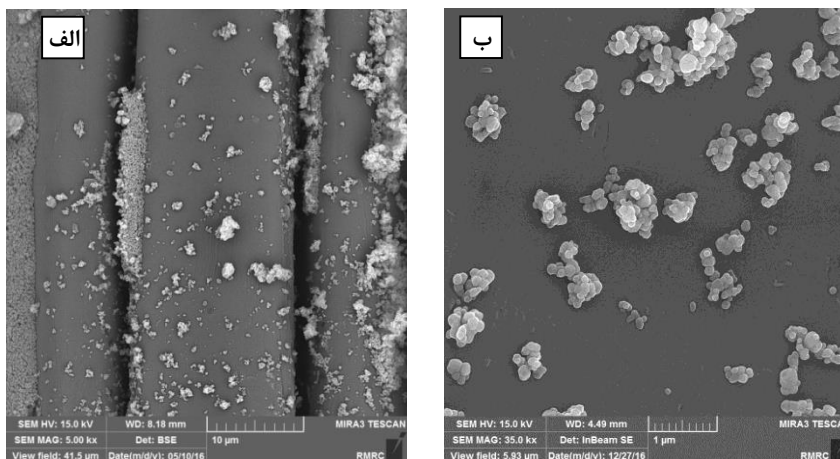
با توجه به شکل ۴ الف، ضریب جذب تمامی نانو رنگدانه‌ها بجز در بازه باریکی از طول موج‌های کوتاه بسیار ناچیز و نزدیک به صفر می‌باشد. مقدار حداکثر ضریب جذب برای نانو رنگدانه‌های با قطر ۳۵، ۵۰، ۱۲۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۵۰ نانومتر به ترتیب برابر با ۰،۲۰، ۰،۵۵، ۰،۲۱، ۱۰،۷۰ و ۱۹،۱۸ و در طول موج ۴۰۰ نانومتر واقع می‌شوند. این نتایج نشان می‌دهند، با افزایش قطر ذرات، حداکثر ضریب جذب افزایش می‌یابد. همچنین، مقدار ضریب جذب تمامی رنگدانه‌ها در محدوده طول موج‌های ۴۲۰ تا ۷۰۰ نانومتر، تقریباً برابر با صفر می‌باشد، که نشان می‌دهد این رنگدانه‌ها نور مرئی را جذب نمی‌کنند.

شکل ۴ ب نشان‌دهنده ضریب k می‌باشد که برای تمامی رنگدانه‌های دی اکسید تیتانیوم با قطرهای بیان شده در طول موج‌های مرئی، با توجه به رابطه ۲ و شکل ۱ - ب اندازه‌گیری شده است. با توجه به شکل، نانو رنگدانه‌های دی اکسید تیتانیوم با قطر ۳۵ نانومتر دارای بیشترین مقدار k در محدوده طیف مرئی می‌باشد. مقدار k برای این ذرات در بازه (۰،۹۷-۰،۹۰) قرار دارد که نشان می‌دهد شدت پرتوهای منتشر شده در جهت بالا تقریباً با شدت پرتوهای منتشر شده در جهت پایین برابر است. با افزایش قطر ذرات به ۱۲۰ نانومتر، مقدار k کاهش می‌یابد که نشان می‌دهد با افزایش قطر ذرات، شدت پرتو منتشر شده به سمت بالا نسبت به شدت پرتو منتشر شده به سمت پایین افزایش یافته است. علاوه بر آن با توجه به شکل، مقدار k در رنگدانه‌های با قطر (۱۲۰-۳۵) نانومتر، دارای کمترین مقدار در منطقه طول موج‌های کوتاه بوده و با افزایش طول موج مقدار k افزایش می‌یابد. این امر نشان می‌دهد که در این ذرات، در طول موج‌های کوتاه‌تر انتشار رو به بالا شدیدتر از انتشار رو به پایین بوده و با افزایش طول موج شدت انتشار در این دو جهت بهم نزدیک می‌شود.

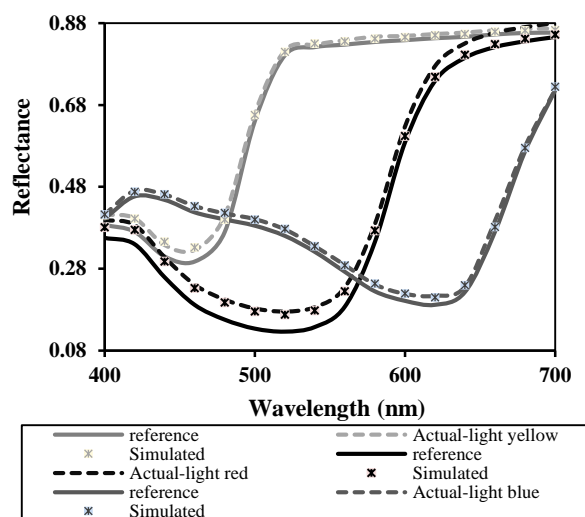
با افزایش بیشتر قطر ذرات به ۱۵۰ نانومتر و ۲۵۰ نانومتر تغییرات اساسی در نمودار k مشاهده می‌شود. با توجه به شکل، در ذرات به قطر ۱۵۰ نانومتر ضریب k با افزایش طول موج از ۴۰۰ نانومتر به ۴۵۰ نانومتر ابتدا کاهش می‌یابد و با افزایش بیشتر طول موج به ۷۰۰ نانومتر مجدداً افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، رفتار ضریب k در ذرات به قطر ۲۵۰ نانومتر کاملاً متفاوت می‌باشد. همان‌طور که شکل نشان می‌دهد، ذرات به قطر ۲۵۰ نانومتر دارای بیشترین مقدار خود در ناحیه طول موج‌های کوتاه‌تر طیف مرئی بوده و با افزایش طول موج از مقدار آن کاسته می‌شود که نشان می‌دهد با افزایش طول موج انتشار رو به بالا در این ذرات افزایش یافته است.



شکل ۵: (الف) طیف انعکاسی، (ب) روشنایی و (ج) خلوص نمونه‌های قرمز پوشش داده شده با ذرات دی اکسیدتیتانیوم به قطر ۱۲۰ نانومتر، شبیه‌سازی شده توسط مدل پیشنهادی.



شکل ۶: تصاویر FESEM از پارچه پوشش داده شده با ذرات دی اکسیدتیتانیوم با قطر ۱۲۰ نانومتر و غلظت ۴ گرم برلیتر. (الف: بزرگ نمایی ۵۰۰۰ و ب: بزرگ نمایی ۱۵۰۰۰)



شکل ۷: مقادیر انعکاس طیفی نمونه‌های واقعی (خط‌چین) و پیشگویی شده (ستاره) توسط مدل هندسی برای پارچه مرجع (خطوط پر) و پوشش داده شده با ذرات دی اکسید تیتانیوم با قطر ۱۲۰ نانومتر و غلظت ۴ گرم بر لیتر.

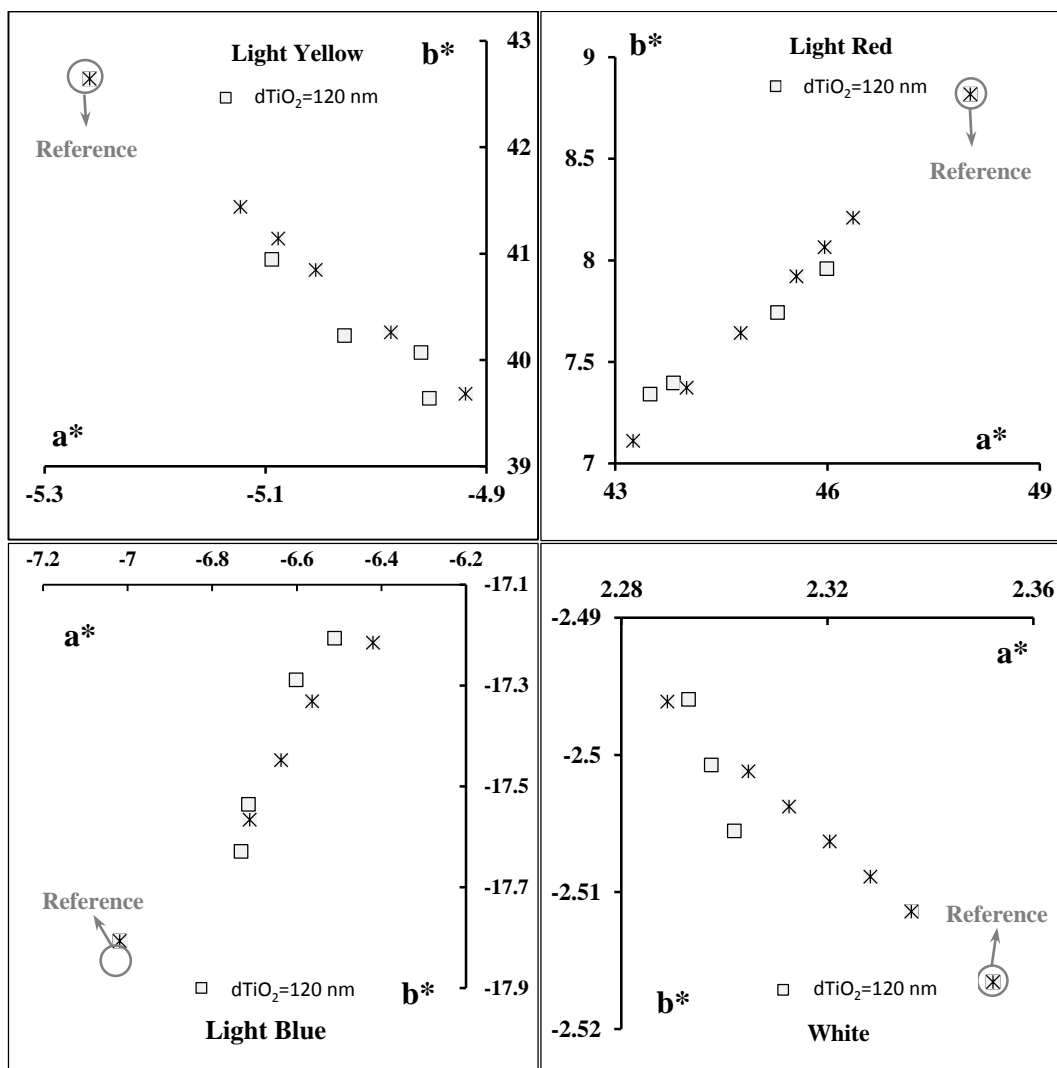
جدول ۱ خلاصه گردید. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول، کم‌ترین خطای ΔE^*_{ab} و RMS مشاهده شده مربوط به نمونه‌های سفید می‌باشد. در نمونه‌های رنگی با عمق پایین، کمترین خطای ΔE^*_{ab} در نمونه‌های زرد و بیشترین آن در نمونه‌های قرمز مشاهده شد. از طرف دیگر، کم‌ترین و بیشترین خطای RMS بین فاکتور انعکاسی نمونه‌های واقعی و پیشگویی شده به ترتیب در نمونه‌های قرمز و زرد مشاهده شد. علاوه بر آن، خطای ΔE^*_{ab} و RMS موجود بین نمونه‌های واقعی رنگریزی شده با عمق بالا و نتایج پیشگویی شده بزرگ‌تر از نمونه‌های روشن‌تر می‌باشد ولی از روند مشابهی پیروی می‌کند.

شکل ۸ مختصات رنگی پارچه‌های واقعی پوشش داده شده با نانوذرات دی اکسید تیتانیوم با غلظت‌های مختلف و نتایج متناظر آنها که توسط مدل پیشنهادی در این مقاله پیشگویی شده است را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، عمق رنگی پارچه‌های پوشش داده شده با تغییر در غلظت نانوذرات تغییر می‌کنند. همچنین، تغییرات مختصات رنگی نمونه‌های واقعی و پیشگویی شده از روند مشابهی پیروی می‌کنند.

دقت مدل پیشنهاد شده در پیشگویی فاکتور انعکاسی منسوج پوشش داده شده، در قالب خطای RMS و خطای ΔE^*_{ab} ارزیابی و در

جدول ۱: خطای کالریمتریک (ΔE^*_{ab}) و طیفی (RMS error) بین مقادیر فاکتور انعکاسی نمونه‌های پوشش داده شده (با نانوذرات دی اکسید تیتانیوم با قطر ۱۲۰ نانومتر) واقعی و مقادیر پیشگویی شده.

فام	قطر (نانومتر)	ΔE^*_{ab}			RMS error	
		کمترین	میانگین	بیشترین	کمترین	بیشترین
سفید	۱۲۰	۰,۰۷۴۳	۰,۰۶۴۳	۰,۱۷۰۵	۰,۰۰۱۴	۰,۰۰۶۱
آبی روشن	۱۲۰	۰,۴۰۴۶	۰,۱۵۰۷	۰,۷۸۱۴	۰,۰۰۵۵	۰,۰۰۷۲
آبی تیره	۱۲۰	۰,۲۲۱۹	۰,۰۵۴۵	۰,۵۵۰۰	۰,۰۰۱۵	۰,۰۰۹۵
زرد روشن	۱۲۰	۰,۵۹۰۵	۰,۴۹۲۹	۱,۰۹۴۵	۰,۰۰۲۳	۰,۰۱۸۷
زرد تیره	۱۲۰	۰,۹۱۱۹	۰,۴۶۷۳	۱,۸۳۵۹	۰,۰۰۶۴	۰,۰۱۵۶
قرمز روشن	۱۲۰	۰,۴۲۳۳	۰,۲۸۸۸	۰,۶۵۳۸	۰,۰۰۲۵	۰,۰۰۶۴
قرمز تیره	۱۲۰	۱,۳۳۹۴	۰,۹۲۶۴	۲,۴۵۴۱	۰,۰۰۶۲	۰,۰۰۹۴



شکل ۸: مولفه‌های رنگ نمونه‌های واقعی (مربع) و شبیه‌سازی شده (ستاره).

نانوذرات دی اکسیدتیتانیوم با قطر ۱۲۰ نانومتر ارزیابی شد. با توجه به نتایج کسب شده، در اثر پوشش‌دهی پارچه پلی‌استر با نانوذرات دی اکسیدتیتانیوم با غلظت‌های مختلف، انعکاس افزایش یافته و تغییرات قانونمندی در مولفه‌های رنگ منسوج مشاهده می‌شود. هم‌خوانی خوبی بین داده‌های واقعی و نتایج آزمایشگاهی مشاهده شد که نشانگر توانایی مدل پیشنهاد شده در پیشگویی فاکتور انعکاسی پارچه پوشش داده شده بوده و می‌توان این مدل را برای سایر کاربردهایی که در آن سیستمی از ذرات با ابعاد مختلف حضور دارند بسط داد.

۵- نتیجه‌گیری

در این کار تحقیقی برای اولین بار روشی پیشنهاد شد که توسط آن می‌توان فاکتور انعکاسی پارچه‌های پوشش داده شده با نانوذرات را (که سیستم‌هایی متشکل از میکروذراتی با قطر خیلی بزرگ‌تر از طول موج پرتو تابیده و نانوذرات با قطری در مقیاس پرتو تابیده شده هستند) با استفاده از خصوصیات بنیادی آنها پیشگویی نمود. این روش بر اساس تئوری کلاسیک هندسه نور می‌باشد، که توسط آلن و گلدفینگر ارائه شده است، و در آن از تئوری انتشار می‌برای تخمین خصوصیات انتشاری نانوذرات استفاده می‌شود. کارایی این مدل توسط اندازه‌گیری طیف انعکاسی پارچه پلی‌استر پوشش داده شده با

۶- مراجع

۱. م. رستمی، ر. امینی، بررسی اثر اصلاح سطحی نانو ذرات آلومینا با وینیل سیلان بر خواص فیزیکی مکانیکی رزین وینیل استر. نشریه علمی پژوهشی علوم و فناوری رنگ. (۱۳۹۵)، ۱۰، ۲۴۶-۲۳۳.
۲. آ. زمانی، ع. دهقانی، س. ح. میرحسینی، ل. شریفی، ارزیابی تأثیر افزودن نانوذرات کاربیدسیلیسیم و آلومینا بر خواص مکانیکی نانوکامپوزیت پلی یورتان. نشریه علمی پژوهشی علوم و فناوری رنگ. (۱۳۹۵)، ۱۰، ۱۷۶-۱۶۹.
3. R. Dastjerdi, M. Montazer, A review on the application of inorganic nano-structured materials in the modification of textiles: Focus on anti-microbial properties. *Colloid Surface B*. 79 (2010) 5-18.
4. A. Shams Nateri, A. Oroumei, S. Dadvar, A. Fallah-Shojaie, Gh. Khayati, O. Emamgholipur, antibacterial nanofinishing of cotton fabrics using silver nanoparticles via simultaneous synthesizing and coating process. *Syn React Inorg Met*. 41(2011)1263-1267.
5. M. Rastgoo, M. Montazer, R. M. A. Malek, T. Harifi, M. M. Rad, Ultrasound mediation for one-pot sonosynthesis and deposition of magnetite nanoparticles on cotton/polyester fabric as a novel magnetic, photocatalytic, sonocatalytic, antibacterial and antifungal textile. *Ultrason. Sonochem*. 31(2016), 257-266.
6. M. Norouzi, L. Maleknia, Photocatalytic Effects of Nanoparticles of TiO₂ in order to design self-cleaning textiles. *Asian. J. Chem*. 22(2010), 5930-5936.
7. B. Acar, L. Budama, Ö. Topel, N. Hoda, Synthesis of ZnO nanoparticles using PS-b-PAA reverse micelle cores for UV protective, self-cleaning and antibacterial textile applications. *Colloids Surf. A*. 414(2012) 132-139.
۸. ح. احمدی، ا. صالحی کاخکی، ع. عابد اصفهانی، رابطه رنگ و درخشش فلزی با اندازه نانوذرات فلزی در تزئینات زرین فام. نشریه علمی پژوهشی علوم و فناوری رنگ. (۱۳۹۵)، ۱۱، ۷۷-۶۹.
9. M. Baneshi, H. Gonome, Sh. Maruyama, Cool black roof impacts into the cooling and heating load demand of a residential building in various climates. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*. 152(2016), 21-33.
10. M. Baneshi, Sh. Maruyama, A. Komia, The effects of TiO₂ pigmented coatings characteristics on temperature and brightness of a coated black substrate. *Sol. Eng*. 86(2012), 200-207.
11. N. Piri, A. Shams-nateri, J. Mokhtari, Solar spectral performance of nanopigments. *Sol. Energy Mater.Sol. Cells*. 162(2017), 72-82.
12. A. Shams-nateri, Scattering behavior of nonabsorbing metallic nanoparticles. *Opt. Laser Technol*. 44(2012), 1670-1674.
13. K. T. Mehta, Estimation of the Kubelka—Munk scattering coefficient from single particle scattering parameters. *Dyes Pigm*. 30(1997), 59-66.
14. M. Senthilkumar, N. Selvakumar, R. Shamey, The effect of humidity, fabric surface geometry and dye type on the colour of cotton fabrics dyed with a select range of anionic dyes. *Dyes Pigm*. 90(2011), 225-232.
15. C. F. Bohren, D. R. Huffman, Absorption and Scattering of Light by Small Particles. JOHN WILEY & SONS, 1983
16. E. Hope Allen, G. Goldfinger, The color of absorbing scattering substrates i.the color of fabrics. *J Appl. Polym. Sci*. 16(1972), 2973-2982.
17. M. Baneshi, H. Gonome, A. Komia, Sh. Maruyama, The effect of particles size distribution on aesthetic and thermal performances of polydisperse TiO₂ pigmented coatings: Comparison between numerical and experimental results. *J. Quant. Spectrosc. Radiat.Transfer*. 113(2012), 594-606.
18. M. Baneshi, Sh. Maruyama, H. Nakai, A. Komia, A new approach to optimizing pigmented coatings considering both thermal and aesthetic effects. *J. Quant. Spectrosc. Radiat.Transfer*. 110(2009), 192-204.
19. M. Abbasipour, M. K.Mehrizi, Investigation of changes of reflective behavior of cotton/polyester fabric by TiO₂ and carbon black nanoparticles. *ScientiaIranica F.*, 19(2012), 954-957.
20. N. Piri, A. Shams-Nateri, J. Mokhtari, The relationship between refractive index and optical properties of absorbing nanoparticle. *Col. Res. Appl*. 41(2016), 477-483.
21. M. Xu, R. R. Alfano, More on patterns in Mie scattering. *Opt. Commun*. 226 (2003), 1-5.
۲۲. ن. پیری، پیشگویی فاکتور انعکاسی پارچه پوشش داده شده با نانوذرات دی اکسیدتیتانیوم، پایان نامه دکتری، دانشگاه گیلان، ایران، ۱۳۹۶.