

Prediction of the Reflectance of Wet Nylon Fabric Using the Geometric Model and Kubelka-Munk Theory

Sanaz Tofighi, Ali Shams Nateri*

Department of Textile Engineering, University of Guilan, P.O. Code: 4199613776, Rasht, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 11-01-2025

Accepted: 16-04-2025

Available online: 24-05-2025

Print ISSN: 1735-8779

Online ISSN: 2383-2169

DOI: 10.30509/jcst.2025.167444.1249

Keywords:

Prediction

Reflection

Wetting

Geometric Model

Kubelka-Munk

Color

ABSTRACT

Wetting the fabric changes its color; therefore, to control the fabric's color in the dyeing process, it is crucial to predict the fabric's color in its wet state. In this article, a geometric model was used to predict the reflectance spectra of wet nylon fabric based on the reflectance spectra of its dry state. For this purpose, nylon fabric samples were dyed individually and in mixtures with red, blue, and yellow acid dyes. Analysis of the color parameters of the samples shows that wetting causes color change, a decrease in lightness, and increases in color depth of the dyed fabric. To predict the fabric's reflectance in the wet state using the geometrical model, the molar absorption coefficient of the dye (ϵ), modified molar absorption coefficient (ϵ), unit k/s , and modified unit k/s values were utilized. The prediction error according to color difference (ΔE_{CMC}) in four prediction methods, using molar absorption coefficient (ϵ), modified molar absorption coefficient (ϵ), unit k/s , and modified unit k/s , were 18.69, 15.51, 6.87, and 5.71, respectively. The best prediction was achieved by the geometrical model using the modified unit k/s .

*Corresponding author: a_shams@guilan.ac.ir





پیش‌بینی انعکاس پارچه نایلونی خیس با استفاده از مدل هندسی و تئوری کیوبلکا-مانک

ساناز توفیقی^۱، علی شمس ناتری^{۲*}

۱- دانشجوی دکترا، گروه مهندسی نساجی، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران، کدپستی: ۴۱۹۹۶۱۳۷۷۶

۲- استاد، گروه مهندسی نساجی، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران، کدپستی: ۴۱۹۹۶۱۳۷۷۶

چکیده

خیس شدن پارچه باعث تغییر رنگ آن می‌شود. بنابراین، برای کنترل رنگ پارچه در فرایند رنگرزی، پیش‌بینی رنگ پارچه در حالت خیس بسیار مهم است. در این مقاله از مدل هندسی برای پیش‌بینی طیف انعکاسی پارچه نایلونی خیس بر اساس طیف انعکاسی حالت خشک آن استفاده شد. برای این منظور، نمونه‌های پارچه نایلونی با رنگزای اسیدی قرمز، آبی و زرد به صورت تکی و مخلوط رنگرزی شدند. آنالیز عامل‌های رنگی نمونه‌ها نشان داد خیس شدن سبب تغییر رنگ، کاهش روشنایی و افزایش عمق رنگی پارچه می‌شود. از یک مدل هندسی و کیوبلکا-مانک، برای پیش‌بینی طیف انعکاسی پارچه نایلونی خیس استفاده شد. به منظور پیش‌بینی انعکاس پارچه در حالت خیس به روش مدل هندسی، از مقادیر ضریب جذب مولار رنگزا (ε)، ضریب جذب مولار رنگزا اصلاح شده، k/s واحد و k/s واحد اصلاح شده استفاده شد. خطای پیش‌بینی بر حسب اختلاف رنگ (ΔECMC) در چهار روش پیش‌بینی، استفاده از مقادیر ضریب جذب مولار رنگزا، ضریب جذب مولار رنگزا اصلاحی، k/s واحد و k/s واحد اصلاح شده، به ترتیب ۱۸،۶۹، ۱۵،۵۱، ۶،۸۷ و ۵،۷۱ است. بهترین پیش‌بینی توسط مدل هندسی با استفاده از k/s واحد اصلاح شده به دست آمد.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۲۷

در دسترس به صورت الکترونیکی: ۱۴۰۴/۰۳/۰۳

شاپا چاپی: ۱۷۳۵-۸۷۷۹

شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۲۱۶۹

DOI: 10.30509/jcst.2025.167444.1249

واژه‌های کلیدی:

پیش‌بینی

انعکاس

خیس

مدل هندسی

کیوبلکا-مانک

رنگ

۱- مقدمه

پارچه‌های نایلونی به طور گسترده برای کاربردهای مختلف مانند لباس‌های ورزشی و لباس‌های زمستانی، تجهیزات فضای باز و محصولات صنعتی استفاده می‌شوند. خاصیت انعکاسی پارچه‌های نایلونی عامل مهمی در تعیین ظاهر و عملکرد آنهاست. رنگ محصولات نساجی به عوامل مختلفی از جمله فرآیند رنگرزی، نوع الیاف و شرایط محیطی که محصول در معرض آن قرار می‌گیرد، بستگی دارد. یکی از عوامل مهمی که بر خواص نوری منسوجات تأثیر می‌گذارد، جذب رطوبت و ترشوندگی است. این عوامل در نهایت بر عمق رنگ، خلوص رنگ و ظاهر کلی رنگ منسوجات تأثیر می‌گذارند. درک تأثیر خیس شدن بر ظاهر رنگ پارچه رنگرزی شده برای تولیدکنندگان، طراحان و محققان پارچه از اهمیت بالایی برخوردار است. هنگامی که پارچه خیس می‌شود، آب در منافذ بین الیاف و میکروالیاف پارچه قرار می‌گیرد و در هنگام برخورد نور، پارچه تیره‌تر به نظر می‌رسد (۱). الیاف مصنوعی نسبت به الیاف طبیعی رطوبت بازتابی کمی دارند. نایلون اغلب به عنوان الیاف آب‌گریز شناخته می‌شود. اما در عمل، به طور قابل توجهی آب‌دوست است و می‌تواند مقداری آب را در ساختار خود جذب کند (۲). هنگامی که نور به سطح منسوج برخورد می‌کند، انعکاس سطحی رخ می‌دهد که به ویژگی‌های سطح آن بستگی دارد. بخشی از نور وارد منسوج شده و در درون منسوج پدیده جذب و انتشار صورت می‌گیرد. در نهایت، نور پراکنده از ماده به صورت بازتاب خارج می‌شود که بستگی به میزان پراکندگی و انتشار داخلی دارد (۳، ۴). انتشار داخلی به تعداد مولکول‌های رنگزا و سایر مواد موجود در منسوج بستگی دارد. هنگامی که منسوجات رنگی از حالت خشک به خیس تغییر حالت می‌دهند، رفتار انعکاسی آن‌ها تغییر می‌کند و در نتیجه میزان انعکاس نور کاهش می‌یابد. کاهش انعکاس به دلیل کاهش میزان پراکندگی نور است، در حالی که جذب نور ثابت است. غالباً این تغییر از حالت خشک به حالت خیس نیز با تغییر رنگ همراه بوده و افت انعکاس به واسطه رطوبت به بستر و میزان انعکاس بستگی دارد (۵، ۶). لی و همکارانش بیان کردند هنگامی که یک منسوج مایعی را جذب می‌کند، عمق رنگ آن نسبت به حالت خشک افزایش یافته و به همین دلیل تفاوت در انعکاس ظاهر می‌شود. اختلاف در بازتاب بین هوا و مایع منجر به اختلاف در عمق رنگ بین حالت خشک و مرطوب می‌شود (۷). اسمیت نیز اشاره نمود که پدیده تغییر رنگ پارچه در اثر خیس شدن به علت اختلاف ضریب شکست آب جایگزین شده به جای هوا است. او بیان کرد که نور بیشتری در مرزی که در آن اختلاف ضریب شکست بزرگی وجود

دارد پراکنده می‌شود. به همین دلیل، انتظار می‌رود که الیاف با ضریب شکست بالا، در هنگام خیس شدن، تغییر رنگ کمتری از خود نشان دهند (۸). گرت و پیترز مهم‌ترین دلیل اینکه پارچه در هنگام خیس بودن تیره‌تر از زمان خشک بودن به نظر می‌رسد را کاهش قابل توجه نسبت ضریب شکست ذرات (الیاف) با محیط (آب یا هوا) در نظر گرفتند (۹). آلن و گلدفینگر یک مدل ریاضی برای تعیین ضریب جذب مولی رنگزا، ضریب شکست الیاف و تأثیر هندسه پارچه و نخ و توزیع رنگزا در داخل الیاف بر روی رنگ پیشنهاد کردند. مدل هندسی آن‌ها نشان داد که ضریب شکست پارچه خیس شده، کمتر از پارچه خشک است و به همین دلیل پارچه خیس تیره‌تر از حالت خشک به نظر می‌رسد (۱۰-۱۲). به منظور پیشگویی رنگ و رفتار نوری منسوجات مطالعات زیادی صورت گرفته و نظریه‌های متعددی به کار گرفته شده‌اند (۱۳، ۱۴). از معروف‌ترین این مدل‌ها که رابطه بین انعکاس و ظاهر رنگ پارچه در حالت خیس و خشک را نیز بررسی می‌کند، مدل کیوبلکا مانک و مدل هندسی است (۱۵-۱۷).

مدل هندسی یا مدل آلن و گلدفینگر، ظاهر مواد را با در نظر گرفتن ملاحظات هندسی و نوری مدل می‌کند. با توجه به حجم عملیات ریاضی سنگین و نیاز به تکرار مراحل، با عرضه کامپیوترهای قدرتمند استفاده از این مدل پس از مدت‌ها نسبت به مدل کیوبلکا مانک با استقبال محققان مواجه گردید. بر اساس این مدل، وقوع سه پدیده انعکاس سطحی، جذب و انتقال از میان نخ‌های تشکیل‌دهنده یک پارچه، با توجه به ضرایب شکست محیط و لیف در زوایای مختلف، مبنای نور منعکس شده از آن را تشکیل می‌دهند. همچنین با این مدل می‌توان با داشتن ضریب جذب مولار رنگزا، ضریب شکست الیاف و تأثیر هندسه پارچه و نخ و توزیع رنگزا در داخل الیاف، پیش‌بینی انجام دهند. نتایج نشان می‌دهند که این روش در غلظت‌های بالای ماده رنگزا، انعکاس کم و در اجسام شفاف نسبت به روش کیوبلکا مانک جواب دقیق‌تر و خطای کمتری از خود نشان می‌دهد (۱۳-۱۱ و ۲۳-۱۸).

در مدل هندسی، منسوج به عنوان مجموعه‌ای از لایه‌های متشکل از الیاف استوانه‌ای منفرد، با قطر مساوی و ساختاری همسان‌گرد از نظر رنگ و ویژگی‌های نوری در نظر گرفته می‌شود. همچنین فرض بر این است که الیاف به صورت استوانه‌های موازی در کنار یکدیگر آرایش یافته‌اند و تشکیل یک مجموعه می‌دهند. در ادامه، هر مجموعه بر مبنای مدل صفحات میله‌ای استوکس به عنوان یک

4- Garrett and Peters

5- Allen and Goldfinger

6- Molar absorptivity Coefficient

7- Geometric Model

8 - Isotropic

1- Lee

2- Smith

3- Refractive index

هنگامی که نور بر سطح خارجی الیاف برخورد می‌کند. بخشی از آن طبق قوانین فرسnel از روی سطح منعکس شده و بقیه در داخل لیف پراکنده می‌شود. در این مدل، محیط شفاف فرض شده و مواد درون لیف هیچ پراکندگی ندارند، لذا نوری پراکنده نمی‌شود. بنابراین نور در داخل لیف تا زمانی که دوباره انعکاس یابد و یا شکست بخورد به صورت خطی به حرکت خود ادامه می‌دهد. پرتو نور طی عبور از درون لیف می‌تواند با پدیده جذب بر اساس قانون بیر-لامبرت آبرو شود. نور شکست‌خورده به حرکت خود در درون لیف یعنی در محیطی که در معرض جذب‌های بعدی است ادامه می‌دهد و تحت عنوان نور منتقل شده ارزیابی می‌شود. طول عبور نور در درون لیف قبل از هر گونه انعکاس و یا شکست را می‌توان با توجه به اصول هندسی حاکم بر استوانه از رابطه ۱ (۸) که در آن شعاع لیف و یا شعاع سیلندره‌ای استوانه‌ای است [۲۱]. براساس قوانین نوری $m \sin \alpha = \sin \theta$ که θ زاویه تابش و α زاویه بازتاب، $m = \frac{n_2}{n_1}$ نیز همان‌طور که در بالا تعریف شده است نسبت ضرایب شکست لیف به محیط می‌باشد. اگر در رابطه ۱ شعاع دایره‌ای را که سطح مقطع الیاف استوانه‌ای را نشان می‌دهد برابر با ۱ قرار دهیم آنگاه $\sin \theta = d$ و $\sin \alpha = \frac{d}{m}$ از این‌رو طول مسیر نور (رابطه ۲) برابر است با [۱۲]:

$$L_p = 2r \cos \alpha = 2r \sqrt{1 - \frac{d^2}{m^2}} \quad (1)$$

$$L_p = 2 \cos \alpha = 2 \sqrt{1 - \frac{d^2}{m^2}} \quad (2)$$

مقدار نور منعکس‌شده در سطح لیف به صورت دو نور پلاریزه شده موازی $\rho_{\parallel}$ و عمودی $\rho_{\perp}$ تفکیک‌شده و برای محاسبه آنها از رابطه‌های ۳ و ۴ استفاده می‌شود (۱۲):

$$\rho_{\parallel} = \left[\frac{n_1 \cos \theta_2 - n_2 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_2 + n_2 \cos \theta_1} \right]^2 \quad (3)$$

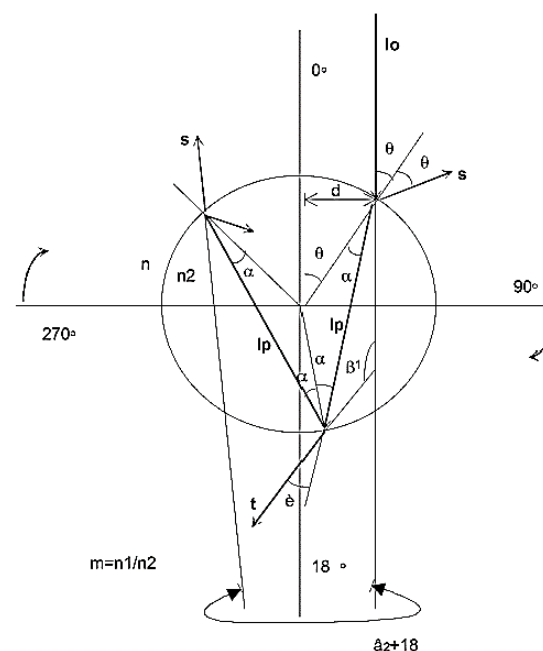
$$\rho_{\perp} = \left[\frac{n_1 \cos \theta_2 - n_1 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_2 + n_2 \cos \theta_2} \right]^2 \quad (4)$$

نور پلاریزه شده تصادفی، انعکاس سطحی متوسط دو جزء می‌باشد که در رابطه ۵ نشان داده شده است.

$$\rho = \frac{\rho_{\parallel} + \rho_{\perp}}{2} \quad (5)$$

براساس قانون بیر-لامبرت نور منتقل شده T پس از طی کردن فاصله L_p در درون لیف را می‌توان به صورت رابطه ۶ نشان داد.

صفحه در نظر گرفته می‌شود. پیش‌بینی انعکاس مجموعه فوق را می‌توان با استفاده از قوانین نوری، قطر الیاف، ضریب شکست آن، ضریب جذب مولار رنگزا و ضریب شکست محیط انجام داد. نور به صورت یک پرتو موازی شده به صورت عمود بر روی اولین صفحه ماده برخورد کرده و به طور پراکنده در لایه‌های بعدی انتشار می‌یابد. فرض بر این است که الیاف بسیار نزدیک به یکدیگر قرار گرفته‌اند، به طوری که تمام نور با آنها تعامل دارد، اما آنها با یکدیگر تماس نوری ندارند تا در سازوکار انعکاس و شکست تداخل ایجاد کنند. برهم‌کنش نور در سطح مقطع عرضی لیف در شکل ۱ نشان داده شده است. در شکل ۱، I_0 پرتو تابیده شده، θ زاویه نور تابیده شده بر سطح، d فاصله نقطه برخورد از عمود به صفر درجه، s نوری که در جهت رو به بالا و t نوری که در جهت رو به پایین حرکت می‌کند و L_p طول مسیر نوری که در درون لیف قبل از شکست طی می‌شود. همچنین n_1 ضریب شکست لیف، n_2 ضریب شکست محیط، $m = \frac{n_1}{n_2}$ نسبت ضرایب شکست لیف به محیط، α و β زوایای داخلی هستند که جهت شکست و انعکاس را مشخص می‌کنند (۱۰).



شکل ۱: مقطع عرضی لیف استوانه‌ای و مسیرهای نور انعکاسی، انکساری و عبوری (۱۰).

Figure 1: Cross-section of cylindrical fiber and the paths of reflected, refracted and transmitted light (10).

1- Fresnel law

2- Beer-Lambert law

بخشی از پرتو اولیه که از لایه اول به سمت پایین τ_1 و از سطح لایه به سمت بالا σ_1 منتشر می‌شود، با استفاده از یک فرایند ازدیاد تدریجی و رابطه‌های ۱۱ و ۱۲ به دست می‌آید (۸، ۱۸).

$$\tau_1 = \frac{k^2(1-A)^2}{(1+k)^2 - (1-A)^2} \quad (11)$$

$$\sigma_1 = \frac{1-A}{1+A}(1-\tau_1) \quad (12)$$

بر اساس صفحات میله‌ای ارائه شده توسط استوک، بردارهای زوج شده به عنوان صفحاتی با مجموع انعکاسی σ_1 و مجموع انتقالی τ_1 در نظر گرفته می‌شوند. براساس مدل ذکر شده مجموع نور منتشر شده از لایه n ام که در جهت رو به بالا و پایین حرکت می‌کنند به ترتیب از رابطه ۱۳ و ۱۴ به دست می‌آیند.

$$\sigma_n = \sigma_{n-1}(1+\tau_n) \quad (13)$$

$$\tau_n = \frac{\tau_{n-1}^2}{1-\sigma_{n-1}^2} \quad (14)$$

در صورتی که الیاف به نحوی آرایش یابند و به اندازه‌ای در نظر گرفته شوند که مقدار انتقال یعنی σ_n آنها برابر صفر شود، نور بالایی برابر مقدار انعکاس در نظر گرفته می‌شود (۸، ۱۳، ۲۰). طبق قانون بیر-لامبرت، در طی انتشار خطی، مقداری از انرژی به دلیل جذب از بین می‌رود. نور انعکاس یافته داخلی به حرکت در داخل الیاف، در جهتی متفاوت ادامه می‌دهد. نور شکست خورده اگر به سمت پایین منتشر شود به عنوان نور عبوری در نظر گرفته می‌شود یا اگر به سمت بالا منتشر شود انعکاس در نظر گرفته می‌شود. این مدل می‌تواند ویژگی‌های هندسی و نوری الیاف، محیط اطراف، ضریب جذب مولی ماده رنگزا را گرفته و آنها را برای پیش‌بینی انعکاس مواد نساجی ترکیب کند (۱۰). توجه این مدل به اختلاف در ضرایب شکست محیط باعث گردیده است تا این مدل بتواند تغییر در رفتار انعکاسی منسوجات در حالت مرطوب و خیس را که موجب تغییر در رفتار انعکاسی آنان می‌گردد به نحو مطلوب توجیه نماید (۱۸، ۲۲).

در این مقاله، ابتدا تاثیر خیس شدن بر ظاهر رنگی پارچه نایلونی رنگریزی شده با رنگزای اسیدی مورد بررسی قرار گرفت. سپس از مدل هندسی برای پیش‌بینی انعکاس پارچه نایلونی خیس استفاده گردید. در مدل هندسی از مقادیر ضریب جذب مولار رنگزا، k/s واحد پارچه رنگریزی شده و حالت بهینه‌شده آنها با استفاده از ضریب بهینه‌سازی جهت پیش‌بینی انعکاس خیس پارچه رنگی از حالت خشک استفاده شد.

$$T = \frac{\text{transmitted - light}}{\text{incident - light}} = 10^{-\epsilon_{\text{clp}}} \quad (6)$$

زاویه انعکاس β در شکل ۱ نشان داده شده است. برای β_1 و به دنبال آن β_n از رابطه‌های ۷ و ۸ استفاده می‌شود (۲۴-۲۶).

$$\beta_1 = 180 - 2 \left[\arctan \left(\frac{d}{\sqrt{r^2 - d^2}} \right) - \arctan \left(\frac{\sqrt{r^2 - \frac{l_p^2}{4}}}{\frac{l_p}{2}} \right) \right] \quad (7)$$

$$\beta_n = \beta_{n-1} + \left[180 - 2 \arctan \left(\frac{\sqrt{r^2 - \frac{l_p^2}{4}}}{\frac{l_p}{2}} \right) \right] \quad (8)$$

می‌توان با یک فرایند تکرار، نور انعکاس و انتقال یافته شده توسط جسم را بدست آورد. محاسبات با نوری که به طور عمودی به لیف در $d=0$ برخورد می‌کند آغاز می‌شود. کلیه انتقال‌های داخلی و شکست‌های صورت گرفته بر روی پرتو نوری، تا زمانی که به دلیل جذب‌های مکرر مقدار آنها ناچیز شود و در واقع نور از بین برود در نظر گرفته می‌شود. بخشی از پرتو اولیه که به سمت بالا منعکس شده به عنوان نور منعکس شده s شناخته می‌شود، همچنین بخش دیگری از پرتو که در جهت پایین حرکت می‌کند نور منتقل شده t می‌باشد. نور جذب شده A طبق رابطه ۹ محاسبه می‌شود (۱۸).

$$A = \frac{(1-p)}{(1-T_p)} \quad (9)$$

ضریب k ، نسبت نور منتشر شده در جهت پایین به نور منتشر شده به سمت بالا، k عبارت از $k = \left(\frac{t}{s} \right)$ است. مقدار k از رابطه ۱۰ محاسبه می‌شود (۸، ۱۸).

$$k = \frac{t}{s} = \frac{P_{d=r \cos 45 \dots r} + (1-P)^2 \sum_{n=1}^{\infty} T p^{n-1} \cos \beta_n (-)}{P_{d=0 \dots r \cos 45} + (1-P)^2 \sum_{n=1}^{\infty} T^n p^{n-1} \cos \beta_n (+)} \quad (10)$$

مقدار A و k با استفاده از فرایند تکرار، برای یکسری از مقادیر d در محدوده صفر تا قطر لیف r به نحوی که تمامی جهات تابش در محاسبات در نظر گرفته شود، به دست می‌آیند. سپس نتایج حاصله جمع و میانگیری می‌شود. در یک پارچه، می‌توان با اعمال اصلاحاتی این مدل را به سادگی به دسته الیاف موازی شده نیز تعمیم داد، الیاف به صورت موازی برای ایجاد بردارهای زوج به یکدیگر ملحق می‌شوند.

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد

در این تحقیق از نمونه‌های پارچه تار پودی نایلون ۶ به وزن ۲۳۵ گرم بر متر مربع با نمره نخ ۸۰۰ دنیر استفاده شد. سه رنگزای اسیدی مطابق جدول ۱ محصول شرکت فارب شیمی کشور آلمان، برای رنگرزی پارچه نایلونی استفاده گردید. نمونه‌های پارچه نایلونی به صورت تکی و ترکیبی (ترکیب دو و سه رنگزا) در چندین عمق رنگ با غلظت‌های ۰٫۵، ۱، ۱٫۵ و ۲ درصد براساس وزن پارچه (O.W.F) رنگرزی شدند.

۲-۲- روش کار

نمونه‌های پارچه مورد استفاده با ۲ گرم در لیتر مواد شوینده صابونی و ۱ گرم در لیتر کربنات سدیم در دمای ۶۰°C به مدت ۳۰ دقیقه شستشو و در دستگاه رنگرزی آزمایشگاهی (ماشین رنگرزی آزمایشگاهی با دمای بالا) با نسبت حجم محلول به جرم کالا ۴۰:۱ (L:G)، در دمای جوش، حاوی ۱ درصد یکنواخت کننده، ۰٫۵-۱ درصد استیک اسید و ۲-۴ درصد آمونیم سولفات رنگرزی شدند. گراف رنگرزی نایلون با رنگزای اسیدی در شکل ۲ نشان داده شده است. نمونه‌ها در غلظت‌های ۰٫۵، ۱، ۱٫۵ و ۲ درصد نسبت به وزن

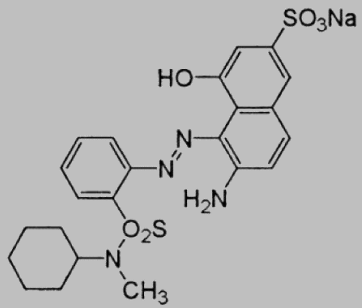
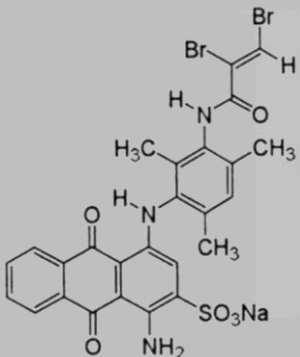
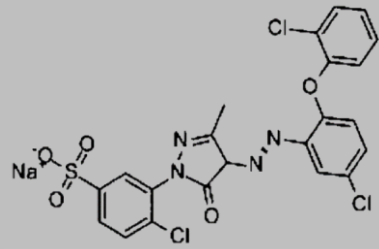
کالا رنگرزی و در دمای ۱۴۰°C به مدت ۳ دقیقه خشک و سپس ۳۰ دقیقه با بخار ثابت شده (۳۷) و در نهایت با صابون ۲ گرم بر لیتر در دمای ۸۰°C به مدت ۱۰ دقیقه شستشو شدند. به منظور بررسی اثر خیس شدن بر انعکاس و رنگ پارچه، نمونه‌های پارچه رنگی در آب غوطه‌ور گردید و آب اضافی به صورت یکنواخت و به نحوی خارج شد که فشار یا کشش زیادی به پارچه وارد نکند و منجر به تغییر شکل یا آسیب به ساختار آن نشود. سپس طیف انعکاسی در محدوده طول موج ۴۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر در فواصل ۱۰ نانومتر با اسپکتروفتومتر X.Rite SP60 اندازه‌گیری شد. همچنین عوامل رنگی نمونه‌ها در فضا رنگ CIELAB تحت روشنایی استاندارد D65 و مشاهده کننده استاندارد ۱۰ درجه محاسبه گردید. همچنین برای بررسی اختلاف رنگ بین دو نمونه، از رابطه اختلاف رنگ ΔE_{CMC} (رابطه ۱۵) استفاده شد (۳۱).

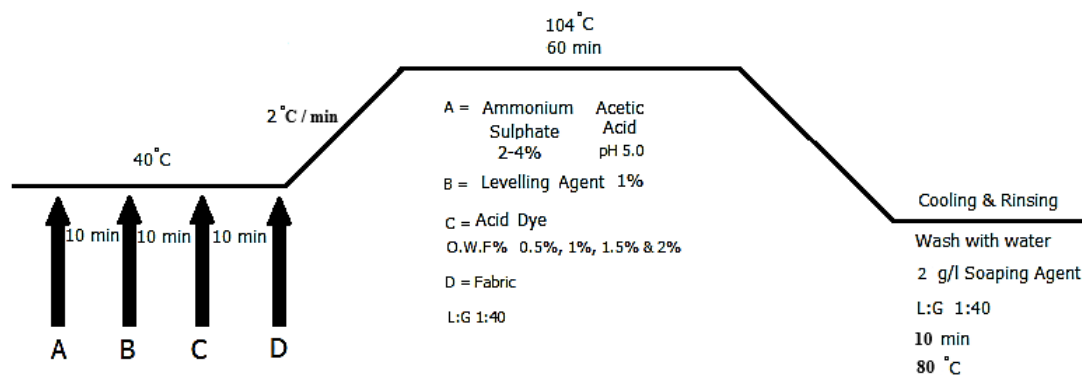
$$\Delta E_{CMC}^* = \sqrt{\left(\frac{L_2^* - L_1^*}{IS_L}\right)^2 + \left(\frac{C_2^* - C_1^*}{cS_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H_{ab}^*}{S_H}\right)^2} \quad (15)$$

1- Farbchemie Braun KG

جدول ۱: مشخصات مواد رنگزای اسیدی.

Table 1: Characteristics of Acid Dyes.

Trade Name	Sellan Red 2B	Sellan Blue 2R	Sellan Yellow 5GN
Generic Name	C.I. Acid Red 361	C.I. Acid Blue 225	C.I. Acid Yellow 110
Molecular Weight (g/mol)	540.59	685.32	534.4
λ_{max} (nm)	500	580	395
Chemical structure [27].			



شکل ۲: نمودار رنگ‌رزی نایلون با رنگ‌زای اسیدی.

Figure 2: The dyeing profile of nylon with acid dye.

پیش‌بینی شده مدل با داده‌های واقعی مقایسه شدند. سپس، یک ضریب اصلاحی در ضرایب جذب مولار رنگزا و k/s واحد ضرب گردید. اصلاح ضریب فوق به روش سعی و خطا انجام شد تا زمانی که مقدار بهینه‌ای که کمترین اختلاف را بین نتایج پیش‌بینی شده و داده‌های واقعی است، مشخص گردد. در نهایت، مقدار بهینه این ضریب در مدل اعمال شد تا دقت پیش‌بینی افزایش یابد. به عبارتی مقادیر ضریب جذب مولار و k/s واحد بهینه‌سازی و اصلاح گردیدند. در حالت خیس، ضریب شکست الیاف نایلون ۱٫۵۳ و ضریب شکست محیط آب ۱٫۳۳ در نظر گرفته شد (۳۳). با توجه به عامل‌های ورودی و روابط فیزیکی و هندسی حاکم در این مدل، انعکاس حالت خیس پارچه نایلونی نسبت به مقادیر واقعی پیش‌بینی گردید. در انتها به منظور ارزیابی روش فوق در پیش‌بینی طیف انعکاسی نمونه‌ها، از اختلاف رنگ ΔE_{CMC} (رابطه ۱۵) و میانگین مربع خطا RMS (رابطه ۱۷) استفاده شد (۳۶-۳۸، ۲۸).

$$RMS_{Error} = \sqrt{\sum (R_{Actual} - R_{Predict})^2 / 16} \quad (17)$$

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی مقادیر عوامل رنگی پارچه در حالت‌های خشک

و خیس

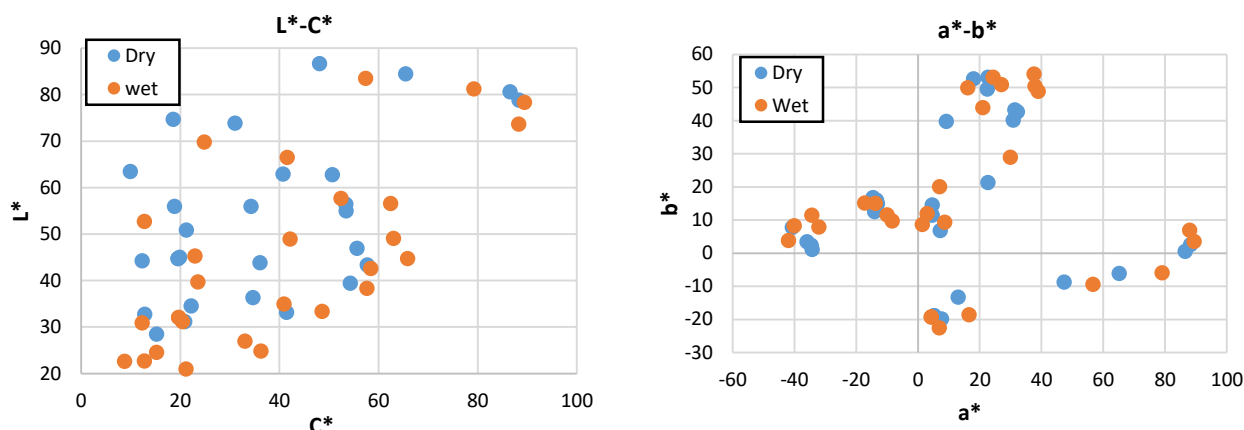
مقادیر عوامل رنگی ۲۸ نمونه پارچه در حالت خیس (نقاط قرمز) و حالت خشک (نقاط آبی) در نمودار دو بعدی a^*-b^* و L^*-C^* در فضا رنگ CIELAB در شکل ۳ نشان داده شده است. تغییر مختصات نمونه‌ها در حالت خیس (نقاط قرمز) نسبت به حالت خشک (نقاط آبی) در شکل‌ها به وضوح مشخص است. همان‌طور که اشاره شد تغییرات ضریب شکست محیط و الیاف در حالت خیس، منجر به تغییرات رنگی و در نتیجه تغییر مختصات نمونه‌ها در نمودار دوبعدی a^*-b^* در فضا رنگ CIELAB می‌شود.

۳-۲- پیش‌بینی انعکاس به روش مدل هندسی

به منظور پیش‌بینی انعکاس حالت خیس پارچه بر اساس انعکاس حالت خشک به روش مدل هندسی ضروری است که عامل‌های شعاع لیف، ضریب شکست الیاف، شکست محیط و ضریب جذب مولار رنگزا به عنوان ورودی مشخص شود. محاسبات و برنامه‌نویسی در نرم‌افزار متلب نسخه ۲۰۲۳ انجام شد. روش‌های متعددی برای جایگزینی مقدار ضریب جذب مولار در مدل هندسی توسط محققان بیان شده است (۱۲، ۱۳، ۱۸، ۲۰، ۲۹، ۳۰). در مدل هندسی، انعکاس طیفی پارچه رنگ شده به طور مستقیم با هندسه و خواص نوری آن و همچنین حاصلضرب غلظت رنگزا (C) و ضریب جذب مولار رنگزا (k) در الیاف ارتباط دارد (رابطه ۱۶).

$$R = f(Ck.m.D) \quad (16)$$

R فاکتور انعکاس، Ck حاصل ضرب غلظت رنگ و ضریب جذب مولار رنگزا در الیاف، m نسبت ضریب شکست الیاف به ضریب شکست محیط اطراف و D قطر الیاف بر حسب میکرومتر است (۳۰). ضریب جذب مولار رنگزا با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر UV-Visible شرکت جنوی با گام اندازه‌گیری ۵ نانومتر و در محدوده طیفی از فرابنفش (۳۰۰ نانومتر) تا فروسرخ نزدیک (۹۰۰ نانومتر) برای سه رنگ‌زای قرمز، زرد و آبی در ۵ غلظت مختلف اندازه‌گیری شد. k/s واحد، به عنوان شیب خط در نمودار (K/S) بر حسب غلظت رنگزا، را می‌توان برای تعریف خواص نوری نمونه‌های رنگی استفاده کرد. در تئوری تک ثابت کیوبلکا مانک k/s واحد برای ایجاد رابطه بین تابع انعکاس (K/S) و غلظت رنگزا استفاده می‌شود (۱۳، ۳۱، ۳۲). همچنین به منظور کاهش خطای پیش‌بینی مدل هندسی، یک ضریب اصلاحی برای ضرایب جذب مولار و k/s واحد اعمال شد. فرایند اصلاح به این صورت انجام گرفت که ابتدا مقادیر



شکل ۳: نمودار پراکندگی a^*b^* و L^*C^* نمونه‌ها در حالت خیس و خشک.

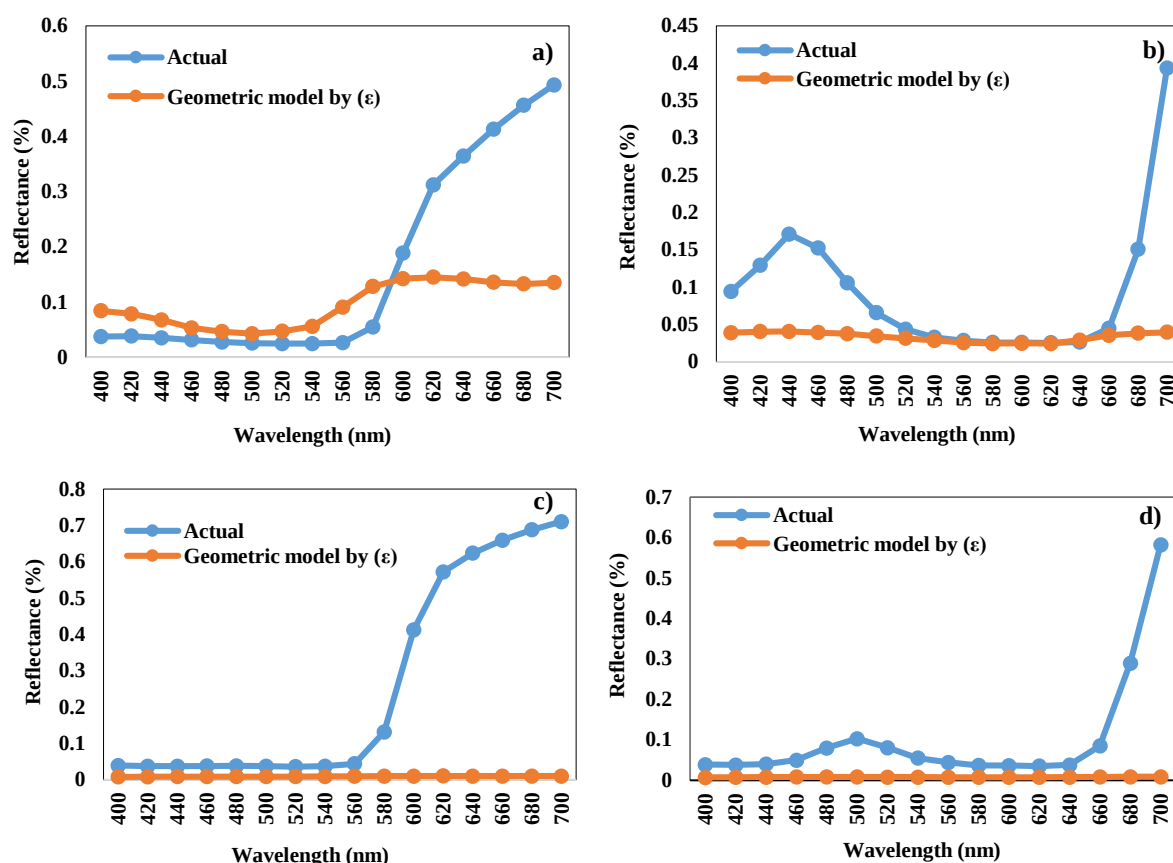
Figure 3: The a^*b^* and L^*C^* scatter plot of the samples in wet and dry state.

قرمز، آبی، قرمز-زرد و آبی-زرد به ترتیب در شکل ۴ نشان داده شده است. مقادیر رنگ $L^*a^*b^*$ ، اختلاف رنگ ΔE_{CMC} و اختلاف طیف انعکاسی RMS بین نمونه‌های واقعی و پیش‌بینی شده در حالت خیس و در غلظت‌های ۰،۵، ۱، ۱،۵ و ۲ درصد به ترتیب در جدول ۲ نشان داده شده است. با توجه به جدول، میانگین، انحراف معیار، حداکثر و حداقل مقدار اختلاف طیف انعکاسی (RMS) به ترتیب ۰،۲۷۷، ۰،۱۳۱، ۰،۵۲۶ و ۰،۱۳۸ است. همچنین میانگین، انحراف معیار، حداکثر و حداقل مقدار اختلاف رنگ (ΔE_{CMC}) به ترتیب ۱۸،۶۹، ۸،۰۴، ۳۴،۸۱ و ۸،۰۱ می‌باشد. همچنین نتایج مندرج در این جدول نشان می‌دهد که خطای RMS و اختلاف رنگ پیش‌بینی شده توسط روش مدل هندسی با استفاده از ضریب جذب مولار برای نمونه‌های با عمق رنگی روشن مانند نمونه‌های زرد و قرمز-زرد نسبت به نمونه‌های با عمق رنگی تیره مانند نمونه‌های آبی و آبی-قرمز بیشتر است. به دست آمدن چنین نتیجه‌ای با نتایج کارهای تحقیقات قبلی ناشی از محدودیت به‌کارگیری نظریه مدل هندسی در محاسبه مقادیر انعکاسی بالا می‌باشد [۱۰، ۱۳، ۱۹، ۲۲]. همان‌گونه که در شکل ۴ نشان داده شده است، مقادیر انعکاس پیش‌بینی شده در مدل هندسی با استفاده از ضریب جذب مولار کمتر از مقادیر واقعی بوده است. علاوه بر این اختلاف قابل‌توجهی میان مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده انعکاس در تمام نمونه‌ها مشاهده گردید. مقادیر حاصل از اختلاف رنگ ΔE_{CMC} و خطای RMS در جدول ۲ نیز عدم پیش‌بینی مناسب با این روش را تایید می‌کند.

همچنین بررسی مختصات نمونه‌ها در نمودار پراکندگی L^*C^* برای حالت خیس (نقاط قرمز) و حالت خشک (نقاط آبی) نشان می‌دهد که خیس شدن تأثیر قابل‌توجهی بر میزان روشنایی و خلوص رنگ پارچه نایلونی دارد. پراکندگی بیشتر نواحی خیس نسبت به خشک، نشان‌دهنده تأثیر بالای آب بر عوامل روشنایی و خلوص رنگ پارچه است. خیس شدن باعث کاهش میزان روشنایی و افزایش عمق رنگی پارچه می‌شود.

۲-۳ روش مدل هندسی با استفاده از ضریب جذب مولار رنگزا

در اولین مرحله پیش‌بینی، طیف انعکاسی پارچه نایلون در حالت خیس به کمک مدل هندسی از مقادیر ضریب جذب مولار مواد رنگزا استفاده گردید. برای اندازه‌گیری مقادیر ضریب جذب مولار مواد رنگزا، ابتدا طیف جذبی محلول‌هایی در ۵ غلظت از ۳ رنگزای قرمز، زرد و آبی با اسپکتروفوتومتر UV-Visible اندازه‌گیری شد. سپس براساس روابط بیر-لامبرت، مقادیر ضریب جذب مولار مواد رنگزا محاسبه گردید. با توجه به اینکه در مدل هندسی (رابطه ۶) از حاصل‌ضرب غلظت رنگزا در ضریب جذب مولار مواد رنگزا ($C \times \epsilon$) استفاده می‌شود. برای مخلوط رنگزا از رابطه بیر-لامبرت برای مخلوط دو رنگزا (معادله $C_{1\epsilon_1} + C_{2\epsilon_2}$) و مخلوط مخلوط سه رنگزا (معادله $C_{1\epsilon_1} + C_{2\epsilon_2} + C_{3\epsilon_3}$) استفاده گردید. طیف انعکاس واقعی و پیش‌بینی شده توسط مدل هندسی با استفاده از ضریب جذب مولار رنگزا در حالت خیس پارچه نایلونی در غلظت ۲ درصد رنگزا و در شیدهای



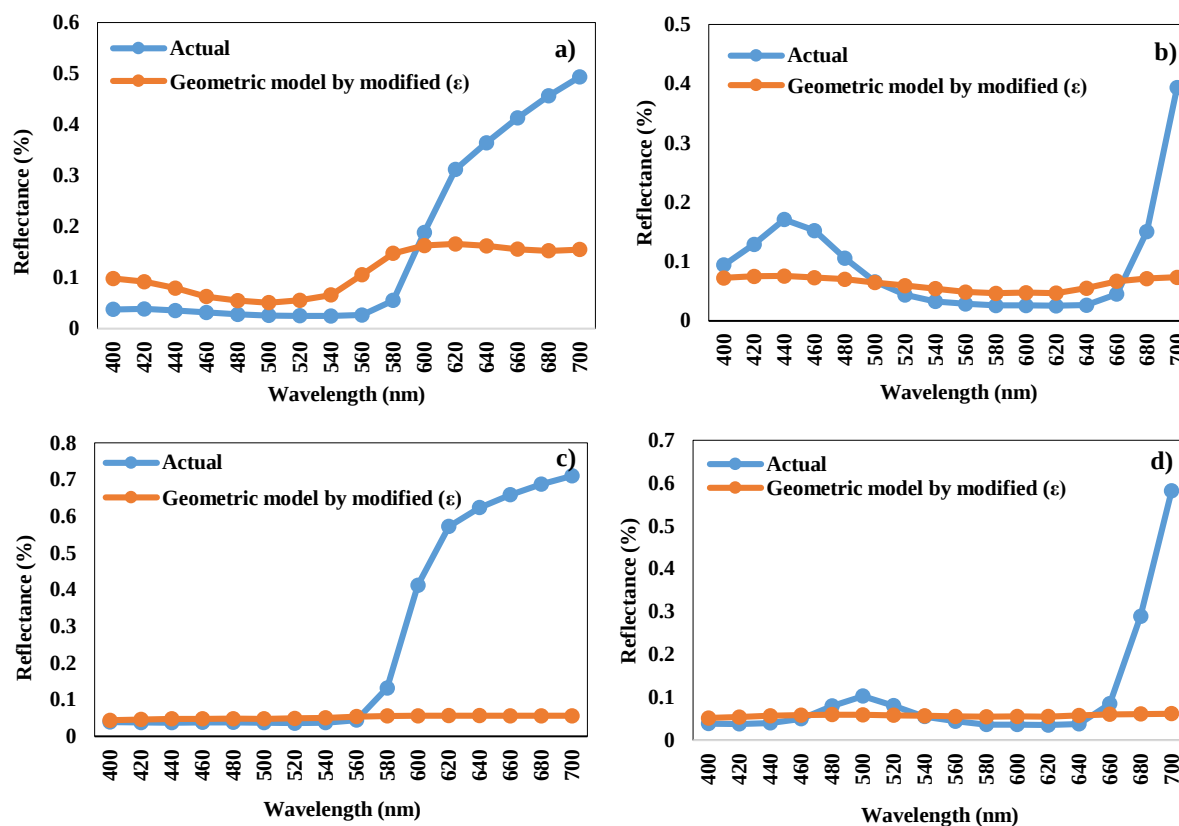
شکل ۴: طیف انعکاسی واقعی و پیش‌بینی شده حالت خیس پارچه نایلونی رنگرزی شده با ۲ درصد رنگزا توسط مدل هندسی با استفاده از ضریب جذب مولار ((قرمز (A)، آبی (B)، قرمز-زرد (C) و آبی-زرد (D)).

Figure 4: Actual and predicted reflectance spectra of dyed nylon fabric with 2% dye in the wet state by the geometric model using the molar absorption coefficient (Red (A), Blue (B), Red-Yellow (C), and Blue-Yellow (D)).

ΔE_{CMC}) بین مقادیر واقعی و پیش‌گویی شده در جدول ۳ نشان داده شده است. با توجه به جدول، میانگین، انحراف معیار، حداکثر و حداقل مقدار اختلاف طیف انعکاسی (RMS) به ترتیب ۰,۲۳۴، ۰,۱۲۵، ۰,۵۰۰ و ۰,۰۹۱ است. همچنین میانگین، انحراف معیار، حداکثر و حداقل مقدار اختلاف رنگ ΔE_{CMC} به ترتیب ۱۵,۵۱۱، ۷,۶۹۱، ۳۲,۸۷ و ۵,۶۵۴ می‌باشد. با توجه به نتایج حاصل، اختلاف طیف انعکاسی (RMS) و اختلاف رنگ ΔE_{CMC} بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده در مدل هندسی با ضریب جذب مولار اصلاح شده نسبت به حالت ضریب جذب مولار معمولی کمی بهبود یافته و روند کاهشی مشاهده می‌شود. لذا روش مدل هندسی با ضریب جذب مولار اصلاح شده نسبت به روش مدل هندسی با ضریب جذب مولار اصلاح نشده برای پیش‌بینی انعکاس پارچه در حالت خیس بهتر و مناسب‌تر است.

۳-۳- روش مدل هندسی با استفاده از ضریب جذب مولار اصلاح شده رنگزا

در ادامه به منظور کاهش خطای پیش‌بینی مدل هندسی، ضریب اصلاحی برای مقادیر ضریب جذب مولار رنگزا اعمال شد. به عبارتی مقادیر ضریب جذب مولار رنگزا بهینه‌سازی و اصلاح گردید. همان‌گونه که از نتایج قابل مشاهده است پس از بهینه‌سازی و اصلاح مقادیر ضریب جذب مولار رنگزا، دقت پیش‌بینی مدل هندسی افزایش یافته است. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شد، برای پارچه نایلونی رنگی در غلظت ۲ درصد با شیدهای قرمز، آبی، قرمز-زرد و آبی-زرد، میزان اختلاف بین طیف انعکاس واقعی و پیش‌بینی شده توسط مدل هندسی به ضریب جذب مولار رنگزا اصلاح شده نسبت به حالت بهینه‌سازی نشده کمتر می‌باشد. مقادیر رنگ $L^*a^*b^*$ در حالت خیس و اختلاف طیف انعکاسی (RMS) و اختلاف رنگ



شکل ۵: طیف انعکاسی واقعی و پیش‌بینی شده حالت خیس پارچه نایلونی رنگ‌ریزی شده با ۲ درصد رنگ‌زا توسط مدل هندسی با استفاده از ضریب جذب مولار اصلاح شده ((قرمز (A)، آبی (B)، قرمز-زرد (C) و آبی-زرد (D)).

Figure 5: Actual and predicted reflectance spectra of dyed nylon fabric with 2% dye in the wet state by the geometric model using the modified molar absorption coefficient (Red (A), Blue (B), Red-Yellow (C), and Blue-Yellow (D)).

جدول ۲: عوامل رنگ L^* ، a^* و b^* واقعی و پیش‌بینی شده پارچه نایلونی رنگ شده در حالت خیس توسط مدل هندسی با استفاده از ضریب جذب مولار و خطای RMS و اختلاف رنگ ΔE_{CMC} پیش‌بینی.

Table 2: Actual and predicted L^* , a^* , and b^* color parameters of dyed nylon fabric in the wet state by the geometric model using the molar absorption coefficient, color difference ΔE_{CMC} , and RMS error of prediction.

Dyed Samples	Dye Concentration (%)	Actual data			Calculated Geometric model by Molar Absorption Coefficient (ϵ)			RMS	ΔE_{CMC}
		L^*	a^*	b^*	L^*	a^*	b^*		
Red	0.5	57.64	49.91	16.12	55.16	19.32	9.78	0.18	12.26
	1	42.54	53.15	24.26	45.16	19.50	10.46	0.22	13.35
	1.5	38.28	50.93	27.03	39.30	18.91	10.44	0.22	13.21
	2	33.31	43.90	20.97	35.25	18.23	10.23	0.19	11.11

جدول ۲: ادامه.

Table 2: Continue.

Dyed Samples	Dye Concentration (%)	Actual data			Calculated Geometric model by Molar Absorption Coefficient (ϵ)			RMS	ΔE_{CMC}
		* L	a*	b*	* L	a*	b*		
Yellow	0.5	83.47	-9.44	56.67	32.82	-0.53	2.01	0.52	27.34
	1	81.17	-5.90	79.02	23.70	-0.46	1.74	0.53	32.55
	1.5	78.30	3.58	89.40	18.99	-0.41	1.57	0.52	34.81
	2	73.64	6.93	88.02	15.93	-0.38	1.45	0.47	34.66
Blue	0.5	48.91	3.85	-42.00	37.59	-0.37	-8.52	0.25	15.25
	1	34.94	8.33	-40.09	27.94	-0.26	-7.72	0.20	15.10
	1.5	26.91	7.89	-32.12	22.85	-0.21	-7.09	0.17	13.07
	2	24.78	11.43	-34.43	19.52	-0.18	-6.61	0.17	14.56
Blue-Red	0.5	45.22	15.14	-17.27	32.87	4.49	-4.08	0.23	11.36
	1	31.12	15.08	-13.81	23.75	3.95	-3.59	0.18	10.11
	1.5	24.48	11.53	-10.02	19.03	3.58	-3.25	0.15	8.18
	2	22.67	9.68	-8.39	15.97	3.32	-3.01	0.14	8.02
Red-Yellow	0.5	66.48	28.92	29.90	22.32	1.41	2.16	0.43	24.26
	1	56.54	48.83	38.92	14.78	1.17	1.79	0.44	28.03
	1.5	49.02	50.39	37.87	11.00	1.04	1.59	0.38	27.97
	2	44.73	54.11	37.57	8.58	0.96	1.45	0.38	28.47
Blue-Yellow	0.5	69.77	-18.57	16.50	20.04	-0.60	-0.27	0.40	23.68
	1	39.64	-22.56	6.86	12.89	-0.49	-0.23	0.21	19.12
	1.5	32.02	-19.22	4.33	9.32	-0.44	-0.20	0.18	17.99
	2	28.57	-14.10	2.41	7.08	-0.37	-0.17	0.17	17.03
Red-Yellow-Blue	0.5	52.71	9.38	8.68	18.98	0.75	0.19	0.30	17.73
	1	30.84	11.96	2.98	12.02	0.62	0.15	0.21	14.53
	1.5	22.59	8.71	1.36	8.55	0.55	0.14	0.16	12.84
	2	20.96	20.03	6.97	6.45	0.44	0.11	0.18	16.84

جدول ۳: عامل‌های رنگ L^* ، a^* و b^* واقعی و پیش‌بینی شده پارچه نایلونی رنگ‌شده در حالت خیس توسط مدل هندسی با استفاده از ضریب جذب مولار اصلاح شده و خطای RMS و اختلاف رنگ ΔE_{CMC} پیش‌بینی.

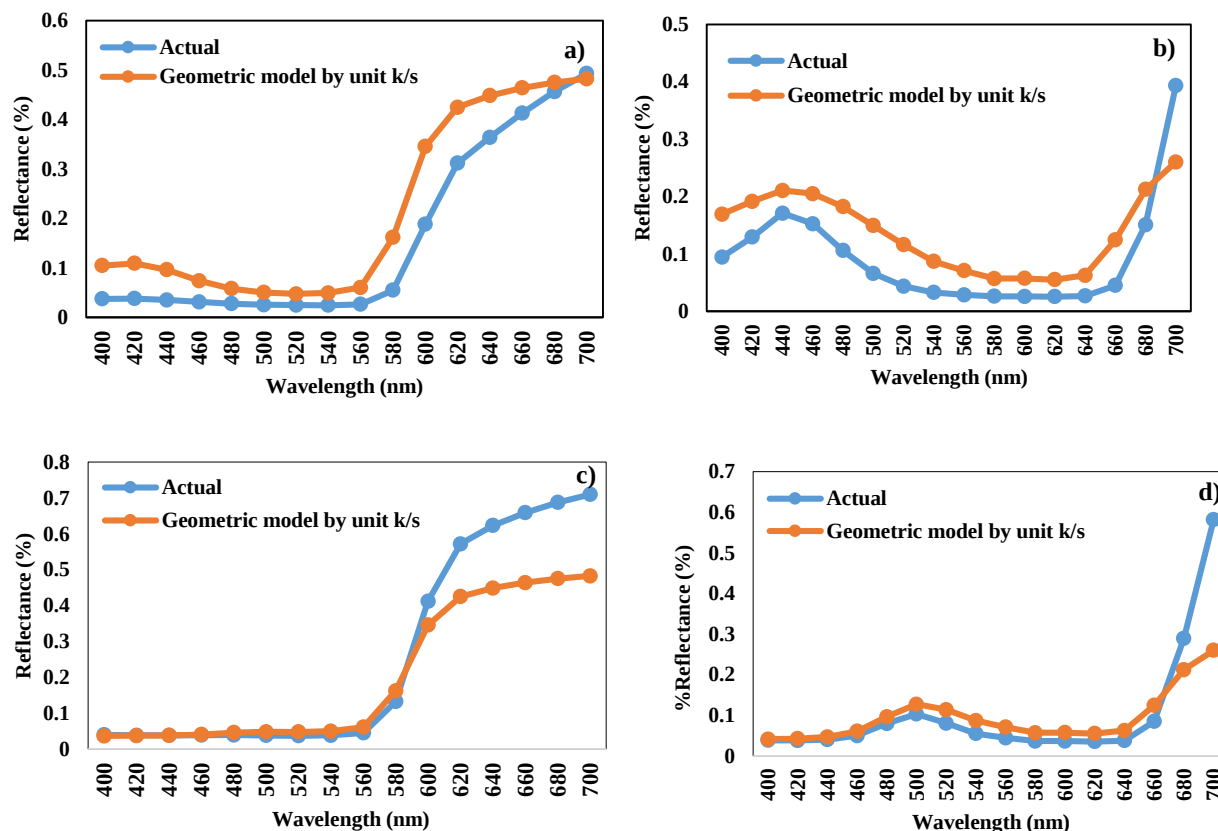
Table 3: Actual and predicted L^* , a^* , and b^* color parameters of dyed nylon fabric in the wet state by the geometric model using the modified molar absorption coefficient, color difference ΔE_{CMC} , and RMS error of prediction.

Dyed Samples	Dye Concentration (%)	Actual data			Calculated Geometric model by modified Molar Absorption Coefficient (ϵ)			RMS	ΔE_{CMC}
		L^*	a^*	b^*	L^*	a^*	b^*		
Red	0.5	57.64	49.91	16.12	57.71	19.02	9.46	0.16	12.32
	1	42.54	53.15	24.26	47.81	19.60	10.37	0.20	13.51
	1.5	38.28	50.93	27.03	41.92	19.23	10.49	0.19	13.22
	2	33.31	43.90	20.97	37.80	18.68	10.38	0.15	11.17
Yellow	0.5	83.47	-9.44	56.67	42.96	-0.58	2.18	0.46	24.98
	1	81.17	-5.90	79.02	32.82	-0.53	2.01	0.49	30.44
	1.5	78.30	3.58	89.40	27.33	-0.49	1.86	0.50	32.88
	2	73.64	6.93	88.02	23.70	-0.46	1.74	0.45	32.80
Blue	0.5	48.91	3.85	-42.00	47.96	-0.48	-8.72	0.19	14.26
	1	34.94	8.33	-40.09	37.58	-0.37	-8.52	0.14	14.38
	1.5	26.91	7.89	-32.12	31.81	-0.30	-8.11	0.10	12.85
	2	24.78	11.43	-34.43	27.94	-0.26	-7.72	0.09	13.91
Blue-Red	0.5	45.22	15.14	-17.27	43.01	4.78	-4.34	0.18	9.49
	1	31.12	15.08	-13.81	32.87	4.49	-4.08	0.16	8.69
	1.5	24.48	11.53	-10.02	27.38	4.19	-3.81	0.14	6.94
	2	22.67	9.68	-8.39	23.75	3.95	-3.59	0.13	5.65
Red-Yellow	0.5	66.48	28.92	29.90	47.36	1.79	2.77	0.33	18.10
	1	56.54	48.83	38.92	36.98	1.72	2.65	0.39	22.84
	1.5	49.02	50.39	37.87	31.23	1.63	2.50	0.35	22.96
	2	44.73	54.11	37.57	27.37	1.54	2.36	0.35	23.66
Blue-Yellow	0.5	69.77	-18.57	16.50	48.76	-0.80	-0.37	0.27	15.86
	1	39.64	-22.56	6.86	38.31	-0.78	-0.36	0.17	12.96
	1.5	32.02	-19.22	4.33	32.49	-0.74	-0.34	0.15	11.73
	2	28.57	-14.10	2.41	28.57	-0.70	-0.32	0.14	9.80
Red-Yellow-Blue	0.5	52.71	9.38	8.68	42.96	1.02	0.25	0.22	10.23
	1	30.84	11.96	2.98	32.81	0.95	0.24	0.17	8.71
	1.5	22.59	8.71	1.36	27.33	0.89	0.22	0.14	7.79
	2	20.96	20.03	6.97	23.70	0.83	0.21	0.17	12.20

مقادیر رنگ $L^*a^*b^*$ و اختلاف طیف انعکاسی (RMS) و اختلاف رنگ (ΔE_{CMC}) بین نمونه‌های واقعی و پیش‌بینی‌شده حالت خیس در غلظت‌های ۰,۵، ۱، ۱,۵ و ۲ درصد در جدول ۴ نشان داده شده است. با توجه به جدول زیر، میانگین، انحراف معیار، حداکثر و حداقل مقدار اختلاف طیف انعکاسی (RMS) به ترتیب ۰,۱۱۲، ۰,۰۶۷، ۰,۳۰۳ و ۰,۳۸ است. همچنین میانگین، انحراف معیار، حداکثر و حداقل مقدار اختلاف رنگ (ΔE_{CMC}) به ترتیب ۶,۸۷، ۳,۳۰، ۱۵,۷۷ و ۲,۴۵ می‌باشد. نتایج جدول ۴ نشان می‌دهد که خطای RMS و اختلاف رنگ پیش‌بینی شده توسط روش مدل هندسی با استفاده از جایگزینی مقادیر k/s واحد به عنوان ضریب جذب مولار برای نمونه‌هایی که دارای عمق رنگی روشن مانند نمونه‌های زرد و قرمز-زرد نسبت به نمونه‌هایی با عمق رنگی تیره مانند نمونه‌های آبی و آبی-قرمز بیشتر است.

۴-۲- روش مدل هندسی با استفاده از k/s واحد

در تئوری تک ثابت کیوبلکا مانک، k/s واحد برای ایجاد رابطه بین تابع انعکاس (K/S) و غلظت رنگزا استفاده می‌شود. لذا استفاده از مقادیر k/s واحد، به عنوان جایگزین ضریب جذب مولار رنگزا در مدل هندسی می‌تواند به بهبود نتایج پیش‌بینی انعکاس پارچه در حالت خیس کمک کند. به منظور پیش‌بینی طیف انعکاسی پارچه نایلون در حالت خیس به کمک مدل هندسی از مقادیر k/s واحد در حالت خشک برای نمونه‌های تک‌رنگ ($C \times (k/s)$)، مخلوط دوتایی ($C_1 \times (k/s)_1 + C_2 \times (k/s)_2$) و مخلوط سه‌تایی ($C_1 \times (k/s)_1 + C_2 \times (k/s)_2 + C_3 \times (k/s)_3$) استفاده شد. طیف انعکاس واقعی و پیش‌بینی شده به روش مدل هندسی با استفاده از مقادیر k/s واحد در حالت خیس به ترتیب برای پارچه نایلونی در غلظت ۲ درصد و در شیده‌های قرمز، آبی، قرمز-زرد و آبی-زرد در شکل ۶ نشان داده شده است. نتایج



شکل ۶: طیف انعکاسی واقعی و پیش‌بینی شده حالت خیس پارچه نایلونی رنگرزی شده با ۲ درصد رنگزا توسط مدل هندسی با استفاده از k/s واحد ((قرمز (A)، آبی (B)، قرمز-زرد (C) و آبی-زرد (D)).

Figure 6: Actual and predicted reflectance spectra of dyed nylon fabric with 2 % dye in the wet state by the geometric model using unit k/s (Red (A), Blue (B), Red-Yellow (C), and Blue-Yellow (D)).

جدول ۴: عامل‌های رنگ L^* ، a^* و b^* واقعی و پیش‌بینی‌شده پارچه نایلونی رنگ شده در حالت خیس توسط مدل هندسی با استفاده از k/s واحد و خطای RMS و اختلاف رنگ ΔE_{CMC} پیش‌بینی.

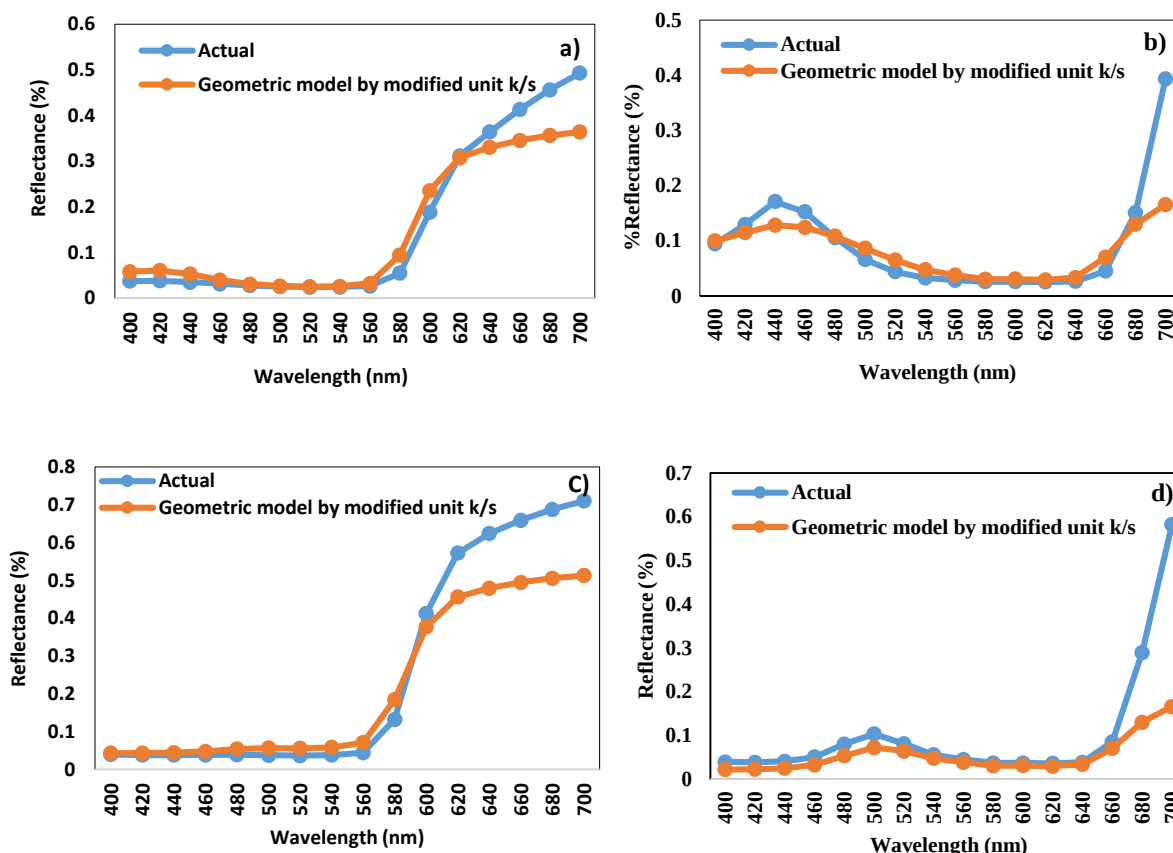
Table 4: Actual and predicted L^* , a^* , and b^* color parameters of dyed nylon fabric in the wet state by the geometric model using unit k/s , color difference ΔE_{CMC} , and RMS error of prediction.

Dyed Samples	Dye Concentration (%)	Actual data			Calculated Geometric model by unit k/s			RMS	ΔE_{CMC}
		L^*	a^*	b^*	L^*	a^*	b^*		
Red	0.5	57.64	49.91	16.12	60.30	40.68	8.97	0.04	5.12
	1	42.54	53.15	24.26	52.02	44.23	12.56	0.07	8.30
	1.5	38.28	50.93	27.03	47.13	45.07	14.51	0.07	8.67
	2	33.31	43.90	20.97	43.66	45.09	15.69	0.08	7.12
Yellow	0.5	83.47	-9.44	56.67	94.73	-5.30	67.96	0.24	6.46
	1	81.17	-5.90	79.02	66.30	-10.39	35.45	0.25	15.78
	1.5	78.30	3.58	89.40	92.74	-1.32	90.19	0.25	5.96
	2	73.64	6.93	88.02	92.18	0.18	95.63	0.30	8.36
Blue	0.5	48.91	3.85	-42.00	56.74	-3.41	-24.00	0.08	9.96
	1	34.94	8.33	-40.09	46.74	-2.37	-25.81	0.09	11.81
	1.5	26.91	7.89	-32.12	40.84	-1.63	-25.95	0.11	12.37
	2	24.78	11.43	-34.43	36.75	-1.10	-25.63	0.11	12.99
Blue-Red	0.5	45.22	15.14	-17.27	44.02	14.46	-11.91	0.08	3.80
	1	31.12	15.08	-13.81	33.92	13.98	-11.37	0.08	2.45
	1.5	24.48	11.53	-10.02	28.41	13.26	-10.69	0.08	3.11
	2	22.67	9.68	-8.39	24.74	12.61	-10.11	0.08	3.01
Red-Yellow	0.5	66.48	28.92	29.90	59.71	36.60	29.19	0.04	6.68
	1	56.54	48.83	38.92	51.52	40.87	32.50	0.10	4.21
	1.5	49.02	50.39	37.87	46.68	42.20	33.60	0.09	3.58
	2	44.73	54.11	37.57	43.26	42.55	33.94	0.11	4.88
Blue-Yellow	0.5	69.77	-18.57	16.50	54.63	-16.81	8.36	0.16	7.92
	1	39.64	-22.56	6.86	44.35	-17.07	8.33	0.08	4.37
	1.5	32.02	-19.22	4.33	38.38	-16.56	8.02	0.09	5.28
	2	28.57	-14.10	2.41	34.28	-15.95	7.70	0.09	6.09
Red-Yellow-Blue	0.5	52.71	9.38	8.68	43.31	8.34	4.39	0.10	6.74
	1	30.84	11.96	2.98	33.23	8.14	4.21	0.09	4.07
	1.5	22.59	8.71	1.36	27.77	7.76	3.98	0.08	5.26
	2	20.96	20.03	6.97	24.14	7.41	3.77	0.10	8.21

در جدول ۵ نشان داده شده است. با توجه به جدول ۵، میانگین، انحراف معیار، حداکثر و حداقل مقدار اختلاف طیف انعکاسی به ترتیب ۰،۱۱۱، ۰،۰۷۳، ۰،۲۹۱ و ۰،۰۲۵ است. همچنین میانگین، انحراف معیار، حداکثر و حداقل مقدار اختلاف رنگ (ΔE_{CMC}) به ترتیب ۵،۷۱، ۲،۵۰، ۱۱،۲۴ و ۱،۵۳ می‌باشد. با توجه به نتایج حاصل، اختلاف طیف انعکاسی و اختلاف رنگ (ΔE_{CMC}) بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده در مدل هندسی با k/s واحد اصلاح شده نسبت به حالت k/s واحد اصلاح نشده کمتر است. لذا روش مدل هندسی با استفاده از مقادیر k/s واحد اصلاح شده نسبت به روش مدل هندسی با k/s واحد اصلاح نشده برای پیش‌بینی انعکاس پارچه در حالت خیس بهتر و مناسب‌تر عمل کرده است.

۳-۵. روش مدل هندسی با استفاده از k/s واحد اصلاح شده

در ادامه به منظور کاهش خطای پیش‌بینی مدل هندسی، ضریب اصلاحی برای مقادیر k/s واحد اعمال و مقادیر آن بهینه‌سازی و اصلاح گردید. همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شد، برای پارچه نایلونی رنگی در غلظت ۲ درصد با شیده‌های قرمز، آبی، قرمز-زرد و آبی-زرد میزان اختلاف بین طیف انعکاس واقعی و پیش‌بینی شده توسط مدل هندسی به روش k/s واحد اصلاح شده نسبت به حالت k/s واحد بهینه‌سازی نشده کمتر بوده و پس از بهینه‌سازی و اصلاح مقادیر k/s واحد، دقت پیش‌بینی مدل هندسی افزایش یافته است. مقادیر رنگ $L^*a^*b^*$ در حالت خیس و اختلاف طیف انعکاسی (RMS) و اختلاف رنگ (ΔE_{CMC}) بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده



شکل ۷: طیف انعکاسی واقعی و پیش‌بینی شده حالت خیس پارچه نایلونی رنگ‌گری شده با ۲ درصد رنگزا توسط مدل هندسی با استفاده از k/s واحد اصلاح شده ((قرمز (A)، آبی (B)، قرمز-زرد (C) و آبی-زرد (D)).

Figure 7: Actual and predicted reflectance spectra of dyed nylon fabric with 2 % dye in the wet state by the geometric model using modified unit k/s (Red (A), Blue (B), Red-Yellow (C), and Blue-Yellow (D)).

جدول ۵: مقادیر رنگ L^* ، a^* و b^* واقعی و پیش‌بینی‌شده پارچه نایلونی رنگ‌شده در حالت خیس توسط مدل هندسی با استفاده از k/s واحد اصلاح شده و خطای RMS و اختلاف رنگ ΔE_{CMC} پیش‌بینی.

Table 5: Actual and predicted L^* , a^* , and b^* color parameters of dyed nylon fabric in the wet state by the geometric model using modified unit k/s , color difference ΔE_{CMC} , and RMS error of prediction.

Dyed Samples	Dye Concentration (%)	Actual data			Calculated Geometric model by modified unit k/s			RMS	ΔE_{CMC}
		L^*	a^*	b^*	L^*	a^*	b^*		
Red	0.5	57.64	49.91	16.12	52.02	44.23	12.56	0.07	3.62
	1	42.54	53.15	24.26	43.66	45.09	15.69	0.07	5.05
	1.5	38.28	50.93	27.03	38.81	44.33	16.94	0.08	5.73
	2	33.31	43.90	20.97	35.41	43.28	17.47	0.08	2.54
Yellow	0.5	83.47	-9.44	56.67	95.83	-6.24	54.11	0.25	4.88
	1	81.17	-5.90	79.02	94.73	-5.30	67.96	0.26	6.10
	1.5	78.30	3.58	89.40	94.02	-4.18	76.30	0.27	8.21
	2	73.64	6.93	88.02	90.82	4.29	107.57	0.29	9.09
Blue	0.5	48.91	3.85	-42.00	46.74	-2.37	-25.81	0.12	8.20
	1	34.94	8.33	-40.09	36.75	-1.10	-25.63	0.11	9.01
	1.5	26.91	7.89	-32.12	31.18	-0.46	-24.64	0.10	7.89
	2	24.78	11.43	-34.43	27.43	-0.08	-23.63	0.11	9.51
Blue-Red	0.5	45.22	15.14	-17.27	41.31	14.44	-11.86	0.09	4.24
	1	31.12	15.08	-13.81	31.39	13.69	-11.09	0.07	1.99
	1.5	24.48	11.53	-10.02	26.06	12.86	-10.33	0.07	1.53
	2	22.67	9.68	-8.39	22.53	12.16	-9.71	0.06	2.14
Red-Yellow	0.5	66.48	28.92	29.90	61.83	35.14	28.08	0.03	6.02
	1	56.54	48.83	38.92	53.69	39.97	31.79	0.06	4.20
	1.5	49.02	50.39	37.87	48.86	41.72	33.19	0.05	3.61
	2	44.73	54.11	37.57	45.43	42.38	33.77	0.10	4.89
Blue-Yellow	0.5	69.77	-18.57	16.50	44.35	-17.07	8.33	0.20	11.25
	1	39.64	-22.56	6.86	34.28	-15.95	7.70	0.11	4.93
	1.5	32.02	-19.22	4.33	28.76	-14.86	7.14	0.10	4.34
	2	28.57	-14.10	2.41	25.09	-13.96	6.70	0.10	4.58
Red-Yellow-Blue	0.5	52.71	9.38	8.68	46.04	8.28	4.38	0.07	6.04
	1	30.84	11.96	2.98	35.81	8.25	4.29	0.06	4.84
	1.5	22.59	8.71	1.36	30.18	7.95	4.09	0.06	6.76
	2	20.96	20.03	6.97	26.41	7.64	3.90	0.08	8.81

پیشگویی‌شده نشان داده شده است. با توجه به نتایج حاصل بهترین نتیجه توسط مدل هندسی برای حالت استفاده از k/s واحد اصلاح شده است. همان‌طور که نتایج نیز نشان داد، شکل رایج مدل هندسی که از ضریب جذب مولار استفاده می‌کند منجر به مقادیر خطای بزرگی در پیش‌بینی طیف انعکاسی می‌شود. بنابراین، زمانی که در

در شکل ۸ و ۹ مقادیر خطای پیش‌بینی طیف انعکاسی پارچه نایلون رنگی در حالت خیس توسط مدل هندسی برای حالت‌های استفاده از ضریب جذب مولار، ضریب جذب مولار اصلاح شده، k/s واحد و k/s واحد اصلاح شده به ترتیب بر اساس اختلاف طیف انعکاسی (RMS) و اختلاف رنگ (ΔE_{CMC}) بین مقادیر واقعی و

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تاثیر خیس‌شدن بر انعکاس و رنگ پارچه نایلون رنگ‌ریزی‌شده با رنگزای اسیدی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مقدار روشنایی (L^*) کمتر و عمق رنگ (C^*) در حالت خیس نسبت به حالت خشک بیشتر است. همچنین در ادامه از مدل هندسی برای پیش‌بینی انعکاس پارچه در حالت خیس استفاده شد. برای این منظور از مقادیر ضریب جذب مولار، k/s واحد و مقادیر اصلاح شده ضریب جذب مولار و k/s واحد در مدل هندسی استفاده شد. برای ارزیابی دقت پیش‌بینی طیف انعکاسی توسط مدل هندسی، مقدار اختلاف طیف انعکاسی RMS و مقدار اختلاف رنگ (ΔE_{CMC}) محاسبه گردید. مقدار اختلاف رنگ (ΔE_{CMC}) مدل هندسی با استفاده از مقادیر ضریب جذب مولار، مقادیر ضریب جذب مولار اصلاحی، k/s واحد و k/s واحد اصلاح شده به ترتیب ۱۵،۵۱، ۶،۸۷ و ۵،۷۱ به‌دست آمد. مقدار خطای پیش‌بینی طیف انعکاسی (RMS) مدل هندسی با استفاده از مقادیر ضریب جذب مولار، مقادیر ضریب جذب مولار اصلاحی، k/s واحد و k/s واحد اصلاح شده به ترتیب ۰،۲۷۷، ۰،۲۳۴، ۰،۱۱۲ و ۰،۱۱۱ است. با توجه به نتایج حاصل بهترین روش پیش‌بینی طیف انعکاسی و رنگ پارچه نایلونی در حالت خیس روش مدل هندسی با استفاده از مقادیر k/s واحد اصلاح شده می‌باشد.

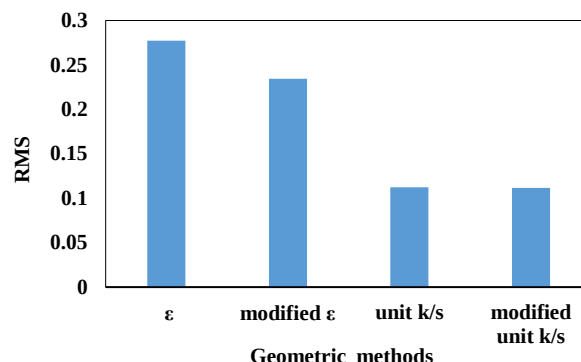
تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از حمایت دانشگاه گیلان تشکر و قدردانی می‌کنند.

تعارض منافع

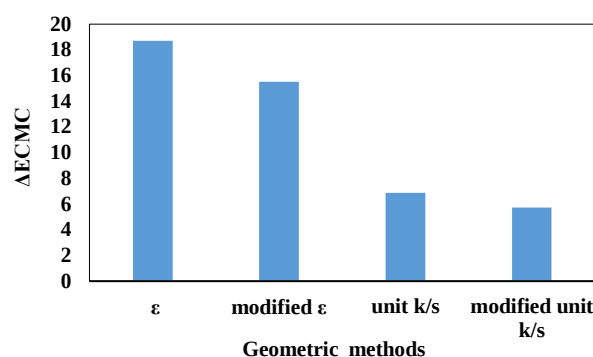
هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

روش مدل هندسی از k/s واحد به جای ضریب مولار استفاده شود، نتایج بهتری حاصل می‌شود.



شکل ۸: خطای پیش‌بینی طیف انعکاسی در روش‌های مختلف مدل هندسی برحسب اختلاف طیف انعکاسی (RMS).

Figure 8: The error in predicting reflection spectra using different geometric model methods based on the difference in reflection spectra (RMS).



شکل ۹: خطای پیش‌بینی طیف انعکاسی در روش‌های مختلف مدل هندسی بر حسب اختلاف رنگ (ΔE_{CMC}).

Figure 9: The error in predicting reflection spectra using different geometric model methods based on color difference (ΔE_{CMC}).

۵- مراجع

- Nazir A, Hussain T, Ahmad F, Faheem S. Effect of knitting parameters on moisture management and air permeability of interlock fabrics. *AUTEX Res J*. 2014;14(1):39-46. <https://doi.org/10.2478/v10304-012-0045-1>
- McIntyre JE. Synthetic fibers: nylon, polyester, acrylic, polyolefin. Cambridge: Woodhead Publishing; 2005. <https://doi.org/10.1016/B978-1-85573-588-0.50008-9>
- Munsell AEO, Sloan LL, Godlove IH. Neutral value scales I Munsell neutral value1 scale. *J Opt Soc Am*. 1993; 23(11): 394. <https://doi.org/10.1364/josa.23.000394>
- Senthilkumar M, Selvakumar N, Shamey R. The effect of humidity, fabric surface geometry and dye type on the color of cotton fabrics dyed with a select range of anionic dyes. *Dyes Pigm*. 2011;90(3):225-32. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2010.12.015>
- Sokkar TZN, El Sherif M, Bayoumi OA, Fouda IM. Color prediction of absorbing-scattering fibers dyed with a colorant mixture. *J Appl Polym Sci*. 1997; 63:1165-72. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4628\(19970228\)63:9<1165::AID-APP8>3.0.CO;2-F](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4628(19970228)63:9<1165::AID-APP8>3.0.CO;2-F)
- Senthilkumar M, Selvakumar N. Parameters involved in assessment of dry state color of fabrics from their wet state color. *Indian J Fibre Text Res*. 2007; 32:126-34.
- Lee JH, Kim SH, Lee KJ, Lim DY, Jeon HY. Determining the Absorption Properties of Split-Type Microfiber Fabrics by Measuring the Change in Color Depth. *Text Res J*. 2004; 74(3):271-8. <https://doi.org/10.1177/004051750407400315>
- Smith C. The colour of textiles when wet: the relationship between wet and dry reflectance values for common textile materials. *J Soc Dyers Colour*. 1979;220-5. <https://doi.org/10.1111/j.1478-4408.1979.tb03477.x>
- Garret DA, Peters RH. Effect of penetration on reflectance of dyed textile fibres. *J Text Inst Trans*. 1995; 47:314-6. <https://doi.org/10.1080/19447027.1956.10750388>

10. Tsoutseos AA, Nobbs JH. An alternative approach to the color appearance of textile materials with an application to the wet/dry reflectance prediction. Proceeding of the international conference and exhibition, 1998 April 1-3, Harrogate, Tennessee; 1998;22(25):334-46.
11. Goldfinger G, Goldfinger HS, Hersh SP, Leonard TM. Effect of the continuous medium on the color of discontinuous substrates. I. Empirical relationship between the light reflectance of dry textile samples and samples immersed in water. J Polym Sci Part C: Polym Symp. 1970; 31:25-32. <https://doi.org/10.1002/polc.5070310105>.
12. Hope Allen EH, Goldfinger G. The Color of Absorbing Scattering Substrates. I. The Color of Fabrics. J Appl Polym. 1972;16:2973-2982. <https://doi.org/10.1002/app.1972.070161121>.
13. Amiri S, Amirshahi HA. Comparison between Kubelka-Munk and Geometric Models for Prediction of Reflectance Factor of Transparent Fibers. Ravesh-haye Adadi dar Mohandesi. 2007;26(2):31-45. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22287698.1386.26.2.8.7> [In Persian].
14. Gorji M, Ansari K, Ameri F, Moradian S. A Concise Review on Color Match Prediction Models. J Sci Technol Color. 2014;8(3):249-60. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.17358779.1393.8.3.9.9> [In Persian].
15. Bernard P, Vanderhaeghen K, Kiekens P. Color Measurement of Pile Fabrics. Text Res J. 1999;69(8):552-558. <https://doi.org/10.1177/004051759906900802>.
16. Safi M, Ameri F, Ansari K. Determination of suitable wavelengths in dye concentration estimation by spectral analysis of K/S's scalability. Phys Scr. 2021;96:1-10. <https://doi.org/10.1088/1402-4896/ac2b4a>.
17. Shams-Nateri A, Amirshahi SH, Latifi M. Prediction of Yarn Cross-Sectional Color from Longitudinal Color by Neural Network. Res J Text Apparel. 2006;10(2):25-35. <https://doi.org/10.1108/RJTA-10-02-2006-B004>.
18. Goldfinger G, Wiggs H. The Effect of Internal Scattering on the Color of Fabrics. J Appl Polym Sci. 1978; 22:3459-68. <https://doi.org/10.1002/app.1978.070221210>.
19. Allen EH, Faulkner DL, Goldfinger G, McGregor R. Effect of Continuous Medium on the Color of Discontinuous Substrate, IV. The Effect of the Refractive Index of the Continuous Medium. J Appl Polym Sci. 1973;17(3):873-84. <https://doi.org/10.1002/app.1973.070170317>.
20. Goldfinger G, Stafford L. The Color of Absorbing Scattering Substrates. II. The Prediction of the Color of a Fiber Bundle. J Appl Polym Sci. 1973;11(11):701-4. <https://doi.org/10.1002/pol.1973.130111107>.
21. Pirie N, Shams-Nateri A, Mokhtari J. A Novel Approach in Simulation of Spectral Reflectance of Nanopigment Coated Fabrics. J Sci Technol Color. 2018;12(3):229-40. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.17358779.1397.12.3.7.5> [In Persian].
22. Shams-Nateri A, Amirshahi SH. Prediction of Reflective Values of Acrylic Fibers along the Length and Cross Section Using Geometrical Model. Amirkabir J Sci Technol. 2002;29(1):287-304 [In Persian].
23. Shams-Nateri A, Amirshahi SH, Latifi M. Use of Geometrical Model to Explain the Dual Reflective Behavior of Acrylic Yarns in Longitudinal and Cross Sections. Ravesh-haye Adadi dar Mohandesi. 2002;21(2):167-80 [In Persian].
24. Kubelka P. New contributions to the optics of intensity light-scattering materials. Part I. J Opt Soc Am. 1948;38(5):448-57. <https://doi.org/10.1364/josa.38.000448>.
25. Kubelka P. New contributions to the optics of intensity light-scattering materials. Part II: Nonhomogeneous layers. J Opt Soc Am. 1954; 44(4):330-5. <https://doi.org/10.1364/JOSA.44.000330>.
26. Chickering KD. Optimization of the macadam-modified 1965 friele color-difference formula. J Opt Soc Am. 1967; 57(4): 537-541. <https://doi.org/10.1364/JOSA.57.000537>.
27. World dye variety. Available from: <http://www.worlddyevariety.com>.
28. Chaouch S, Moussa A, Marzoug IB, Ladhari N. Application of genetic algorithm to color recipe formulation using reactive and direct dyestuffs mixtures. Color Res Appl. 2020; 45:896-910. <https://doi.org/10.1002/col.22533>.
29. Hasenloo A, Shams-Nateri A, Izadan H. The effect of scanner resolution and bit depth on measuring color changes of fabric in small color space. J Sci Technol Color. 2022;16(2):123-134. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.17358779.1401.16.2.3.7> [In Persian].
30. Safi M, Amirshahi SH. Estimation of dye concentration by using Kubelka-Munk and Allen-Goldfinger reflective models: comparing the performance. Sci Rep. 2019; 13:1-11. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-29264-x>.
31. American society for testing and materials. ASTM D2244-07. Standard Practice for Calculation of Color Tolerances and Color Differences from Instrumentally Measured Color Coordinates. ASTM; 2007.
32. Walowit E, McCarthy CJ, Berns RS. An algorithm for the optimization of kubelka munk absorption and scattering coefficients. Color Res Appl 1987;12(6):340-43. <https://doi.org/10.1002/col.5080120609>.
33. Mark JE. Polymer data handbook. Oxford University Press; 1998.
34. Roy Choudhury AK. Principles of color and appearance measurement. Volume 2: Visual measurement of color, color comparison and management. Woodhead Publishing; 2015.
35. Brainard DH. 5 - Color appearance and color difference specification. In: The science of color. Elsevier B.V.; 2003; 191-216. <https://doi.org/10.1016/B978-044451251-2/50006-4>.
36. Mokrzycki W, Tatol M. Color difference Delta E: A survey. Mach Graph Vis. 2011;20(4):383-411.
37. Tsuruta M, Koshimo A. Steam and heat setting of nylon 6 fiber. II. Effects of heat setting of nylon 6 fiber on dyeability and fine structure. J Appl Polym Sci. 1965;9(1): 11-23. <https://doi.org/10.1002/app.1965.070090103>.

How to cite this article:

Tofighi S, Shams Nateri A. Prediction of the reflectance of wet nylon fabric using the geometric model and kubelka-munk theory. J Color Sci Tech. 2024;18(4):271-288. <https://doi.org/10.30509/jcst.2025.167444.1249> [In Persian].