

The Effect of Color Depth on Color Sensitivity in Wool Dyeing with Weld Natural Dye

Mohammad Veysian, Ali Shams-Nateri*

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

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 15-07-2023

Accepted: 11-12-2023

Available online: 21-01-2024

Print ISSN: 1735-8779

Online ISSN: 2383-2169

DOR: 20.1001.1.17358779.1402.17.4.1.6

Keywords:

Color sensitivity

Color depth

Natural dyes

Weld

Wool

ABSTRACT

The color sensitivity of the dyeing recipe is one of the most important parameters for controlling the dyeing process. This work studied the effect of color depth on the color sensitivity of a recipe of wool dyeing with weld natural dye. For this purpose, the woollen yarn was dyed with weld at low and high color depth using pre-mordanting method. The color sensitivity of the dyeing recipe was evaluated by measuring the color depth (K/S), color difference, and color sensitivity coefficient. The color sensitivity coefficient was measured by 10 % change in parameters of the dyeing recipe, such as dye concentration, mordant concentration, temperature, time, pH, and L.R. Also, the simultaneous color sensitivity of two, three, four, five, and six parameter combinations were measured by experimental and computational methods. The measured color sensitivity by the computational method was higher than the experimental method. In general, the color sensitivity at low color depth is more than high color depth.

*Corresponding author: * a_shams@guilan.ac.ir



اثر عمق رنگی بر حساسیت رنگی در رنگرزی پشم با رنگزای طبیعی اسپرک

سیدمحمد ویسیان^۱، علی شمس ناتری^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی نساجی، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران، صندوق پستی: ۴۱۹۹۶۱۳۷۷۶

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

چکیده

حساسیت رنگی نسخه رنگرزی یکی از عوامل خیلی مهم برای کنترل فرایند رنگرزی است. در این تحقیق اثر عمق رنگی بر حساسیت رنگی نسخه رنگرزی پشم با ماده رنگزای طبیعی اسپرک مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور نخ پشمی با رنگزای طبیعی اسپرک در دو عمق رنگی کم و زیاد به روش پیش‌دندان رنگرزی شد. میزان حساسیت نسخه رنگرزی از طریق اندازه‌گیری تغییر عمق رنگی (K/S) و اختلاف رنگ و همچنین محاسبه ضریب حساسیت ناشی از ۱۰ درصد تغییر در عوامل نسخه رنگرزی شامل غلظت رنگزا، غلظت دندان، دما، زمان، pH و $L^*a^*b^*$ ارزیابی گردید. همچنین حساسیت هم‌زمان ترکیب دوتایی، سه تایی، چهار تایی، پنج تایی و شش تایی این عوامل به روش‌های آزمایشگاهی و محاسباتی اندازه‌گیری شد. مقادیر ضریب حساسیت رنگی محاسبه شده به روش محاسباتی بیشتر از مقادیر حساسیت رنگی اندازه‌گیری شده به روش آزمایشگاهی بود. به طور کلی حساسیت رنگی در عمق رنگی کم بیشتر از عمق رنگی زیاد بود.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۴/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۹/۲۰

در دسترس به صورت الکترونیکی: ۱۴۰۲/۱۱/۱

شاپا چاپی: ۱۷۳۵-۸۷۷۹

شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۲۱۶۹

DOR: 20.1001.1.17358779.1402.17.4.1.6

واژه‌های کلیدی:

حساسیت رنگی

عمق رنگی

رنگزای طبیعی

اسپرک

پشم

*Corresponding author: * a_shams@guilan.ac.ir



۱- مقدمه

مواد رنگزای طبیعی به سه دسته گیاهی، حیوانی و معدنی تقسیم‌بندی می‌شوند. همچنین طبقه‌بندی مواد رنگزا می‌تواند براساس ساختار شیمیایی و شیوه رنگرزی باشد. مواد رنگزای طبیعی یکی از ویژگی‌های‌شان دوست‌دار محیط‌زیست بودن است (۳-۱)، امروزه علاقه به استفاده از مواد رنگزای طبیعی در صنعت نساجی و فرش دست‌باف رو به افزایش است. این موضوع به دلیل رعایت استانداردها توسط بسیاری از کشورها و واکنش به سمی بودن و حساسیت داشتن به مواد رنگزای مصنوعی است. کاربردهای جدید مواد رنگزای طبیعی در سلول‌های خورشیدی، صنایع غذایی، دارویی، صنایع‌دستی و اسباب‌بازی است (۵-۴). مواد رنگزای طبیعی دارای ویژگی‌های دیگری از جمله زیست‌تخریب‌پذیری، تولید فام‌های رنگی خاص، ویژگی‌های ضد باکتری بودن است (۸-۶)، در سال‌های اخیر، بازگشت به استفاده از مواد سبز و فناوری‌های سبز در تولید فرش وجود دارد (۹). مشکلات اصلی رنگرزی با مواد رنگزای طبیعی شامل بازده رنگ پایین، پیچیدگی فرآیند رنگرزی، تکرارپذیری ضعیف، رنگ‌های محدود و مشکل ترکیب کردن آن است (۱۰).

۱-۲- مواد دندانه

معمولاً مواد رنگزای طبیعی تمایل خوبی برای جذب در الیاف ندارند در نتیجه در بیشتر موارد، از مواد دندانه برای بهبود خواص رنگرزی استفاده می‌شود (۱۶). برخی دندانه‌های معدنی مشکلات زیست‌محیطی دارند به همین دلیل دندانه‌های گیاهی مانند هلیله، پوست انار و اسید تانیک که جز دندانه‌های گیاهی هستند استفاده می‌شوند (۱۷). برای افزایش ثبات شستشویی از دندانه‌ها که نمک فلزات چند ظرفیتی هستند، استفاده می‌شود، برخی از آنها مانند املاح مس، آهن، کروم، کبالت و نیکل رنگی هستند، برخی دیگر مانند املاح آلومینیم، قلع، روی بدون رنگ هستند، این نمک‌ها که ظرفیت فلزی آنها زیاد است در حمام رنگرزی، با رنگزا و لیف پیوند تشکیل می‌دهند و باعث ثبات رنگزا در داخل لیف می‌شوند. نمک‌های فلزی با همه نوع الیاف طبیعی پیوند برقرار می‌کنند و با گروه‌های مناسب موجود در مواد رنگزای طبیعی، ترکیب می‌شوند. در نتیجه، با تشکیل کمپلکس رنگزا-دندانه-لیف ثبات رنگ افزایش می‌یابد (۱۸). دندانه دادن به سه روش پیش‌دندانه، هم‌زمان، دندانه بعد، انجام می‌شود (۱۹).

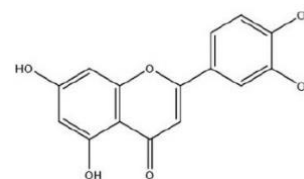
۱-۳- حساسیت رنگی

یکی از مهم‌ترین مشکلات رنگرزی عدم دستیابی به شید رنگی استاندارد است (۲۰). برای محاسبه اختلاف رنگ فرمول‌های مختلفی ارائه شده است. یکی از معروف‌ترین آن فرمول اختلاف رنگ CMC می‌باشد که براساس سیستم رنگی CIELAB تعریف می‌شود (۲۱). اگر نوسانات غیر منتظره‌ای در یک نسخه رنگرزی به وجود آید ارزیابی آن به وسیله حساسیت رنگی صورت می‌گیرد (۲۲). برای اندازه‌گیری حساسیت رنگی به عنوان یک کمیت عددی از فرمول اختلاف رنگ استفاده می‌شود (۲۳). در یکی از کارهای تحقیقاتی، مطالعاتی در زمینه حساسیت رنگی مخلوط مواد رنگزا انجام شد. در این کار تحقیقاتی مدل پیش‌بینی عددی حساسیت رنگی نسخه‌های رنگرزی الیاف پلی‌استر با مواد رنگزای دیسپرس بر اساس حد رواداری مشخصه‌های رنگی نسخه‌های تکی ارائه گردید. براساس مدل فوق مشخص گردید دو عامل غلظت و دما مهم‌ترین عوامل موثر بر نتایج رنگرزی هستند (۲۴). فرایند کار فوق دو مرحله‌ای است. در مرحله اول مشخصه‌های رنگرزی به صورت شیمیایی یا مکانیکی تغییر داده می‌شود، در مرحله دوم مقدار حساسیت براساس تغییر در مقدار تابع انعکاس K/S و مقادیر پارامترهای رنگی سیستم رنگی CIELAB محاسبه می‌شود. روش پیش‌بینی حساسیت رنگی برای حساسیت تمامی مشخصه‌های موثر همچون غلظت رنگزا، دما، مواد کمکی و L.R در شکل ۲ نشان داده شده است (۲۵).

۱-۱- اسپرک

اسپرک با نام لاتین Weld و نام علمی رسدا لوتئلا^۱ یکی از مهم‌ترین مواد رنگزای طبیعی با شماره کالرایندکس 2 C.I. Natural Yellow است. فراوانی زیاد و توزیع گسترده اسپرک در جهان آن را جزء اولین و پر مصرف‌ترین ماده رنگزای زرد فام قرار داده است. اسپرک از ۵۰۰ سال قبل در ایران و سایر کشورها مورد استفاده قرار گرفته است. گیاه اسپرک بومی ایران است و هر سال می‌توان دو مرتبه آن را کاشت و برداشت کرد (۱۱).

از شاخه، گل و تمام قسمت‌های این گیاه برای رنگرزی استفاده می‌شود (۱۳). اسپرک از منابع مهم فلاونوئیدی است. لوتئولین ماده اصلی فام زرد اسپرک است (شکل ۱). فام‌های حاصل از اسپرک با دندانه‌های آلومینیم، مس و آهن به ترتیب زرد روشن، زیتونی، قهوه‌ای تیره است (۱۴). ماده رنگزای اسپرک در رنگرزی به تنهایی و یا ترکیب با مواد رنگزای شیمیایی و طبیعی دیگر استفاده می‌شود (۱۵).



شکل ۱: ساختار شیمیایی لوتئولین (۱۲).

Figure 1: The chemical structure of Luteolin (12).

محاسبه می‌گردد. به عبارتی مقدار اختلاف رنگ واقعی بر اساس پارامترهای رنگی نمونه استاندارد و نمونه های رنگرزی شده محاسبه می‌شود. مقدار اختلاف رنگ واقعی با توجه به فرمول اختلاف رنگ CMC، براساس سامانه رنگی CIELAB مطابق رابطه ۲ تعریف می‌شود:

$$\Delta E_{CMC(lc)} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L^*}{L^* S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C^*}{C^* S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H^*}{H^* S_H}\right)^2} \quad (2)$$

هریک از مقادیر S_L ، S_C و S_H بر اساس معادلات ۳ تا ۶ محاسبه می‌شود: که اگر $L^* > 16$ آنگاه معادلات به صورت ذیل تعریف می‌شوند. اگر $L^* < 16$ باشد آنگاه $S_L = 0.511$ است.

$$S_L = \frac{0.04975 L^*}{(1 + 0.01765 L^*)} \quad (3)$$

$$S_C = \frac{0.0638 C^*}{(1 + 0.0131 C^*) + 0.638} \quad (4)$$

$$S_H = S_C(Tf + 1 - f) \quad (5)$$

$$f = \sqrt{\frac{C^*}{C^* + 1900}} \quad (6)$$

$$T = 0.036 + |0.4 \cos(hab + 35)| \quad (7)$$

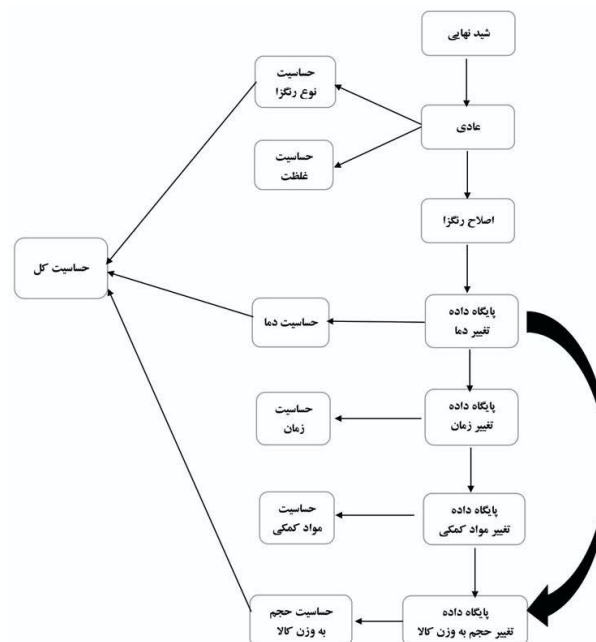
اگر h_s بین ۱۶۴ و ۳۴۵ درجه قرار بگیرد مقدار T بر اساس رابطه ۸ محاسبه می‌شود:

$$T = 0.56 + |0.2 \cos(h_{ab,1} + 168^\circ)| \quad (8)$$

در ادامه مقدار حساسیت بر اساس رابطه ۹ محاسبه می‌گردد. براساس این رابطه مقدار حساسیت براساس تقسیم اختلاف رنگ بر میزان تغییرات مشخصه‌ها و متغیرهای رنگرزی تعریف می‌شود (۲۷).

$$S_i = \frac{\Delta E}{\Delta i} \quad (9)$$

در روش محاسباتی، مقدار حساسیت نسخه رنگرزی براساس تغییرات پارامترهای رنگی ناشی از تغییرات متغیرها بصورت تکی به کمک رابطه ۱۰ محاسبه می‌گردد. معادله فوق مشابه معادله اختلاف رنگ CMC است با این تفاوت که تغییرات روشنایی ΔL^* ، تغییرات خلوص ΔC^* و تغییرات فام ΔH^* براساس تغییرات متغیرها به صورت تکی به کمک رابطه ۱۰ محاسبه می‌شود (۳۱). با توجه به رابطه فوق با تغییر هر متغیر و پارامتر نسخه رنگرزی، تغییرات روشنایی ΔL^* ، خلوص ΔC^* و فام ΔH^* محاسبه می‌گردد. در ادامه مجموع تغییرات روشنایی ΔL^* ، تغییرات خلوص ΔC^* و تغییرات فام ΔH^* بر اساس رابطه ۱۱ محاسبه و در رابطه ۱۰ جاگذاری می‌گردد.



شکل ۲: روش پیش‌بینی حساسیت رنگی (۲۵).

Figure 2: Color sensitivity prediction method (25).

قابلیت دوباره تولید رنگ نسخه‌های رنگ همانندی متاثر از تغییرات در حین فرایند رنگرزی است، به طوری که خطاهای متعدد فرایند رنگرزی می‌توانند منجر به بروز اختلاف رنگ زیاد بین نمونه استاندارد و رنگ نهایی کالا شود. یکی از مهم‌ترین عواملی که منجر به کاهش قابلیت بازتولید رنگ کالا می‌گردد، تغییر در قدرت رنگزایی مواد رنگزای مورد استفاده در فرایند رنگرزی است. علی‌رغم کنترل فرایند تولید مواد رنگزا، رنگزاهای تولیدی توسط مراکز و شرکت‌های مختلف می‌تواند قدرت رنگزایی متفاوتی داشته باشند (۲۶). با توجه به تحقیقات انجام شده بر روی رنگرزی کالای اکریلیکی با مواد رنگزای کاتیونیک، برای خلوص رنگی ثابت، با کاهش روشنایی و افزایش عمق رنگی میزان حساسیت رنگی نسخه رنگرزی نسبت غلظت رنگزا ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. همچنین میزان حساسیت به قدرت رنگزایی نسخه‌هایی که دارای روشنایی یکسانی هستند، با افزایش خلوص رنگی نمونه‌ها همواره کاهش می‌یابد (۲۶). قدرت رنگی با استفاده از معادله کیوبلکا-مانک براساس رابطه ۱ محاسبه می‌گردد. در این معادله K ضریب جذب، S ضریب انتشار و R حداقل انعکاس در طول موج بیشینه جذب است.

$$\frac{K}{S} = \frac{(1-R)^2}{2R} \quad (1)$$

پس از محاسبه تغییر مشخصه‌های رنگی L^* ، a^* و b^* نمونه‌ها، اختلاف رنگ (ΔE) نمونه‌ها با نمونه استاندارد براساس رابطه ۲

قطر نخ ۱,۲۹ میلی متر و نایکناختی (CV %) ۹,۰۶ درصد تهیه شده از شرکت وزیری استفاده گردید. رنگزای طبیعی اسپرک که از گل آن برای رنگرزی استفاده شده است از استان یزد و دندانه سولفات آلومینیم ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ M=666.42 g/mol) با خلوص ۱۰۰ درصد از شرکت مرک آلمان، اسید استیک از شرکت مرک آلمان و صابون غیریونی از شرکت نیک فام شیمی تهیه گردید، شستشو قبل از رنگرزی و بعد از رنگرزی در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد با ۲ گرم بر لیتر صابون به مدت ۱۵ دقیقه انجام شد. همچنین قبل از رنگرزی، رنگزای اسپرک به کمک فراصوت پروبی عصاره گیری شد. رنگرزی با رنگزای طبیعی اسپرک به روش پیش دندانه با دندانه سولفات آلومینیم انجام شد و در ادامه حساسیت رنگزای طبیعی در حالت تک متغیر، دو متغیر، سه متغیر، چهار متغیر، پنج متغیر و شش متغیر (رنگزا، دندانه، اسید، دما، زمان و L.R) مورد بررسی قرار گرفت. طیف سنج انعکاسی i1 Pro با مارک تجاری XRite برای اندازه گیری طیف انعکاسی و پارامترهای رنگی نمونه ها به کار برده شد. طیف انعکاسی در محدوده ۳۸۰ نانومتر تا ۷۸۰ نانومتر با گام ۱۰ نانومتر اندازه گیری شد. همچنین پارامترهای رنگی نمونه ها در فضای رنگی CIELAB تحت روشی استاندارد D65 و مشاهده کننده استاندارد ۱۰ درجه اندازه گیری شد. دستگاه اندازه گیری میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل دستگاه MIRA II ساخت شرکت TESCAN کشور جمهوری چک برای تصویربرداری SEM از نمونه ها استفاده شد.

۲-۲- استخراج مواد رنگزای طبیعی

به منظور عصاره گیری مواد رنگزای طبیعی اسپرک، از دستگاه فراصوت پروبی استفاده شد. دستگاه فراصوت پروبی مورد استفاده، Sigma Sonic ساخت شرکت Iranbta مدل UH20- با توان ۲۰ هزار هرتز استفاده شد. استخراج رنگزا در ۴ مرحله و به مدت نیم ساعت با استفاده از آب و اتانل ۹۹ درصد شرکت جهان الککل به نسبت ۵۰ درصد تحت عملیات فراصوت انجام شد. بعد از آن مخلوط در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد به مدت یک ساعت حرارت داده و صاف شد.

۳-۲- فرایند دندانه دادن و رنگرزی

نخ های پشمی قبل از رنگرزی در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد، با ۴۰:۱ L.R و ۲ گرم بر لیتر شوینده غیریونی به مدت ۱۵ دقیقه شستشو داده شدند. سپس نخ پشمی با سولفات آلومینیم به مقدار ۱۰ درصد نسبت به وزن کالا دندانه داده شد. برای این کار نخ پشمی در دمای ۴۰ درجه سانتی گراد وارد حمام دندانه شد. محلول دندانه طی ۳۰ دقیقه به دمای جوش رسانده و دندانه دادن به مدت یک ساعت در این دما ادامه یافت.

در ادامه نخ دندانه دار شده با سولفات آلومینیم، در حمام رنگرزی حاوی اسید استیک (۲ درصد) (pH= ۴,۵) و رنگزای طبیعی اسپرک

$$\Delta E = \sqrt{\left\{ \left(\frac{\sum \Delta L}{2S_L} \right)^2 + \left(\frac{\sum \Delta C}{S_C} \right)^2 + \left(\frac{\sum \Delta H}{S_H} \right)^2 \right\}} \quad (10)$$

$$\Delta L^* = \sum \Delta L = \sum L_i \Delta i = L_c \Delta c + L_T \Delta T + L_i \Delta t + L_r \Delta r$$

$$\Delta C^* = \sum \Delta C = \sum C_i \Delta i = C_c \Delta c + C_T \Delta T + C_i \Delta t + C_r \Delta r$$

$$\begin{aligned} \Delta H^* &= \sum \Delta H = \sum H_i \Delta i \\ &= H_c \Delta c + H_T \Delta T + H_i \Delta t + H_r \Delta r \end{aligned} \quad (11)$$

متغیرهای L_r ، L_t ، L_c و به ترتیب تغییرات در روشی ازای یک واحد تغییر در غلظت رنگزا، دما، زمان و نسبت L.R است. متغیرهای C_r ، C_t ، C_T ، C_c به ترتیب تغییرات در خلوص به ازای یک واحد تغییر در غلظت رنگزا، دما، زمان و نسبت L.R است. متغیرهای H_r و H_t ، H_T ، H_c به ترتیب تغییرات در فام متریک به ازای یک واحد تغییر در غلظت رنگزا، دما، زمان و نسبت L.R است. متغیرهای Δc ، ΔT ، Δt و Δr به ترتیب تغییرات در غلظت رنگزا، دما، زمان و نسبت L.R است.

در تحقیق دیگری حساسیت رنگی مواد رنگزای طبیعی نسبت به متغیرهای رنگرزی نظیر غلظت رنگزا، دما و اسیدیته بررسی شد. در تحقیق فوق حساسیت رنگی نسخه رنگرزی نسبت به متغیرهای رنگرزی نظیر غلظت رنگزا، دما و اسیدیته مختلف در رنگرزی نخ پشمی با ماده رنگزای آنتوسیانین (پوست تخمه آفتابگردان) ارزیابی شد. نتایج نشان داد که رنگرزی با پوست تخمه آفتابگردان به دما و pH حساس است (۲۸). همچنین در مطالعه دیگری پارامترهای موثر در رنگرزی نخ پشمی با روناس شامل نوع روناس، غلظت دندانه، سختی آب، pH و L.R مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که pH و L.R و سختی آب بر قدرت رنگی نمونه های مختلف موثر است (۲۹).

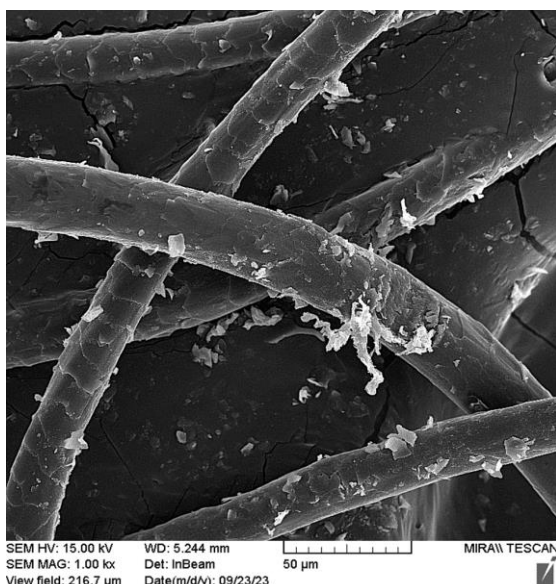
مطالعات کتابخانه ای نشان می دهد تاکنون تحقیقی به صورت آزمایشگاهی و محاسباتی در زمینه ارزیابی حساسیت رنگی در رنگرزی با مواد رنگزای طبیعی انجام نشده است. هدف از انجام این تحقیق، بررسی اثر عمق رنگی (غلظت رنگزا) بر حساسیت رنگی نسخه رنگرزی نخ پشمی با رنگزای طبیعی اسپرک است. برای این منظور اثر متغیرهای نسخه رنگرزی شامل غلظت رنگزا، غلظت دندانه، دما، زمان، غلظت اسید (pH) و L.R بر حساسیت رنگی در دو عمق رنگی کم و زیاد مورد ارزیابی قرار گرفت.

۲- مواد و روش

۲-۱- مواد و تجهیزات

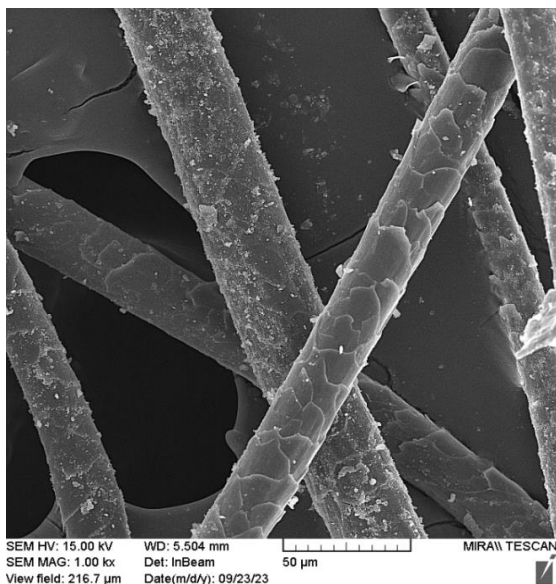
در این پژوهش از نخ پشمی ۱۲ شش لا یزد که شستشو داده شده، سفیدگری نشده و شانه شده مورد مصرف در پرز فرش دستباف (با مشخصات نژاد سیرجان، تاب ۵۷ TPM و استحکام ۶,۸۱ گرم بر تکس،

شده (شکل ۵) سطح الیاف تغییراتی قابل توجهی ندارد. اثرات این تغییرناچیز بر خواص نوری این نمونه‌ها قابل چشم پوشی است. در این مطالعه جهت ارزیابی حساسیت رنگی نسخه رنگرزی اثر ۶ پارامتر مهم رنگرزی شامل غلظت رنگزا (۱۰ و ۴۰ درصد)، غلظت دندان (۱۰ درصد)، غلظت اسید (۲ درصد)، درجه حرارت (۱۰۰ درجه سانتی‌گراد یا جوش)، زمان (۶۰ دقیقه) و حجم حمام (۴۰، ۱) مورد بررسی قرار گرفت. که اثر هر کدام از پارامترهای فوق به صورت تکی، دوتایی، سه‌تایی، چهارتایی، پنج‌تایی و شش‌تایی به طور هم‌زمان بررسی گردید.



شکل ۳: تصویر SEM نخ پشم خام.

Figure 3: SEM images of untreated Wool.



شکل ۴: تصویر SEM نمونه نخ دندان شده با سولفات آلومینیم.

Figure 4: SEM images of mordanted Wool with 10 % Alum.

(۱۰ و ۴۰ درصد) رنگرزی شد. برای انجام رنگرزی، نمونه نخ پشمی دنداندار شده در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد وارد حمام رنگرزی گردید و دمای حمام طی ۳۰ دقیقه به جوش رسانده و رنگرزی در دمای جوش به مدت ۶۰ دقیقه ادامه داده شد. پس از رنگرزی نمونه‌ها توسط حمام حاوی صابون غیریونی شستشو داده شدند.

۴-۲- اندازه‌گیری حساسیت رنگی

حساسیت رنگی نسخه رنگرزی نسبت به تغییر پارامترهای رنگرزی به دو روش آزمایشگاهی و روش محاسباتی اندازه‌گیری شد. در روش آزمایشگاهی، پس از تغییر مقادیر پارامترهای رنگرزی، تغییرات اختلاف رنگ و ضریب حساسیت بر اساس مشخصه‌های رنگی نمونه شاهد و نمونه رنگرزی شده براساس فرمول اختلاف رنگ CMC محاسبه گردید. در روش آزمایشگاهی، تعداد ۶۳ نمونه یک متغیر (۶ حالت)، دو متغیر هم‌زمان (۱۵ حالت)، سه متغیر هم‌زمان (۲۰ حالت)، چهار متغیر هم‌زمان (۱۵ حالت)، پنج متغیر (۶ حالت) و شش متغیر هم‌زمان (یک حالت) با نمونه استاندارد برای هر کدام از نمونه‌های رنگرزی شده با ۱۰ و ۴۰ درصد مواد رنگزای اسپرک و دندان سولفات آلومینیم در نظر گرفته شد. برای محاسبه اختلاف رنگ از فرمول اختلاف رنگ CMC (رابطه ۲) و برای محاسبه ضریب حساسیت رنگی از رابطه ۹ استفاده شد.

در روش محاسباتی، اختلاف رنگ برای حالت‌های دو متغیر هم‌زمان (۱۵ حالت)، سه متغیر هم‌زمان (۲۰ حالت)، چهار متغیر هم‌زمان (۱۵ حالت)، پنج متغیر (۶ حالت) و شش متغیر هم‌زمان (یک حالت) براساس تغییرات مشخصه‌های رنگی نمونه یک متغیر (۶ حالت) در نظر گرفته شده و به کمک روابط ۱۰ و ۱۱ محاسبه شد و در ادامه برای محاسبه ضریب حساسیت رنگی از رابطه ۹ استفاده گردید. اندازه‌گیری‌ها و محاسبات فوق برای دو عمق رنگی کم (۱۰ درصد) و زیاد (۴۰ درصد) با دندان سولفات آلومینیم انجام گردید.

۳- نتایج و بحث

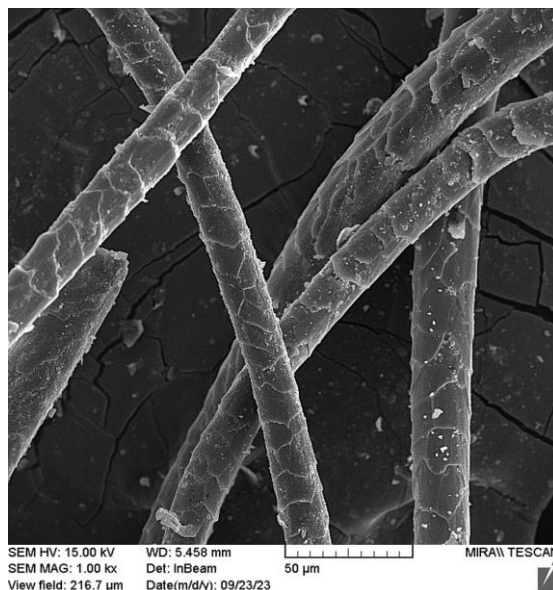
تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نمونه نخ خام پشمی، دنداندار شده با سولفات آلومینیم و نمونه رنگرزی شده با اسپرک در شکل‌های ۳ تا ۵ نشان داده شد. شکل ۳ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نخ پشم خام را نشان می‌دهد ناخالصی در سطح الیاف ناشی از عدم شستشو نخ پشمی است. در نخ پشمی دنداندار شده با ۱۰ درصد دندان سولفات آلومینیم در شکل ۴ نشان داده شده است. همچنین تصویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) نخ پشمی رنگرزی شده با رنگزای طبیعی اسپرک و دندان سولفات آلومینیم در شکل ۵ نشان داده شده است. انجام هر عملیات منجر به تغییراتی در الیاف می‌شود میزان تغییرات بستگی به شرایط شیمیایی و فیزیکی مکانیکی عملیات دارد. در نمونه دنداندار شده (شکل ۴) و همچنین نمونه رنگرزی

درصد تغییر مقدار غلظت رنگزا ۳۶ درصد استفاده گردید. همچنین موقعیت نمونه های حالت تکی، دوتایی، سه تایی، چهارتایی، پنج تایی و شش تایی در دو عمق کم (۱۰ درصد اسپرک) و زیاد (۴۰ درصد اسپرک) در فضای رنگ CIELAB در شکل ۶ نشان داده شد.

با توجه به شکل ۶، نمونه قرمز رنگ شاهد بوده و برای نمونه های رنگرزی شده با رنگزای اسپرک با عمق رنگی کم (غلظت ۱۰ درصد)، بیشترین میزان قرمزی در حالت استاندارد ($a^*=0.93$)، بالاترین میزان زردی ($b^*=53.94$) برای حالت تغییر هم زمان دو متغیر دما و حجم حاصل گردید و پایین ترین میزان زردی ($b^*=37.68$) برای حالت تغییر در چهار متغیر (رنگزا-اسید-زمان-حجم) حاصل گردید.

در خصوص نمونه ها با عمق رنگی زیاد (۴۰ درصد)، بیشترین میزان قرمزی ($a^*=7.62$) در حالت استاندارد و بالاترین میزان زردی ($a^*=71.38$) برای حالت تغییر هم زمان در دو متغیر حاصل شد. پایین ترین میزان زردی ($b^*=57.25$) و پایین ترین میزان قرمزی ($a^*=0.57$) با تغییر هم زمان چهار متغیر (رنگزا-دندانه-دما-زمان) حاصل گردید.

در ادامه حساسیت نسخه رنگرزی پشم با رنگزای اسپرک در دو عمق رنگی کم (۱۰ درصد اسپرک) و زیاد (۴۰ درصد اسپرک) مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این منظور اختلاف رنگ و در ادامه ضریب حساسیت رنگی بر اساس ۱۰ درصد تغییر در مشخصه های نسخه رنگرزی شامل غلظت رنگزا، غلظت دندانه، غلظت اسید، درجه حرارت، زمان و حجم حمام محاسبه گردید. نتایج حاصله در جدول ۲ نشان داده شده است.



شکل ۵: تصویر SEM نخ پشمی رنگرزی شده با اسپرک ۴۰ درصد.

Figure 5: SEM images of dyed Wool with 40 % Weld and 10 % Alum.

جدول ۱ نسخه رنگرزی به کار رفته جهت اندازه گیری حساسیت رنگی در حالت تک متغیره را نشان می دهد. با توجه به جدول فوق، جهت اندازه گیری حساسیت رنگی هر بار مقدار یکی از پارامترهای رنگرزی به میزان ۱۰ درصد کاهش داده شد. به عنوان مثال برای ارزیابی حساسیت رنگی نسبت به غلظت رنگزا در عمق رنگی زیاد، در حالت استاندارد غلظت رنگزا ۴۰ درصد می باشد و برای حالت ۱۰

جدول ۱: نسخه رنگرزی برای اندازه گیری حساسیت رنگی (حالت تک متغیر).

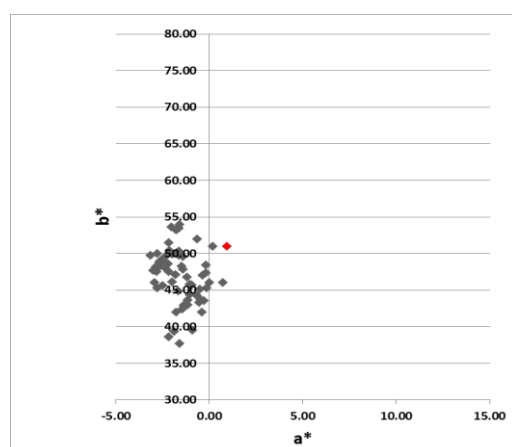
Table 1: Dyeing recipe for measuring the color sensitivity (single factor method).

Sample	Low Color Depth	High Color Depth
Blank	Weld 10 %-Alum 10 %- Acid 2 %-90 °C- 60 Min- L.R 40.1	Weld 40 %-Alum 10 %- Acid 2 %-90 °C- 60 Min- L.R 40.1
1	Weld 9 %-Alum 10 %- Acid 2 %-90 °C - 60 Min- L.R 40.1	Weld 36 %-Alum 10 %- Acid 2 %-90 °C- 60 Min- L.R 40.1
2	Weld 10 %-Alum 9 %- Acid 2 %-90 °C - 60 Min- L.R 40.1	Weld 40 %-Alum 9 %- Acid 2 %-90 °C- 60 Min- L.R 40.1
3	Weld 10 %-Alum 10 %- Acid 1.8 %-90 °C - 60 Min- L.R 40.1	Weld 40 %-Alum 10 %- Acid 1.8 %-90 °C- 60 Min- L.R 40.1
4	Weld 10 %-Alum 10 %- Acid 2 %-90 °C - 60 Min- L.R 36.1	Weld 40 %-Alum 10 %- Acid 2 %-90 °C- 60 Min- L.R 36.1
5	Weld 10 %-Alum 10 %- Acid 2 %-81 °C - 60 Min- L.R 40.1	Weld 40 %-Alum 10 %- Acid 2 %-81 °C- 60 Min- L.R 40.1
6	Weld 10 %-Alum 10 %- Acid 2 %-90 °C- 54 Min- L.R 40.1	Weld 40 %-Alum 10 %- Acid 2 %-90 °C- 54 Min- L.R 40.1

جدول ۲: حساسیت نسخه رنگرزی پشم با رنگزای اسپرک نسبت به تغییر یک متغیر.

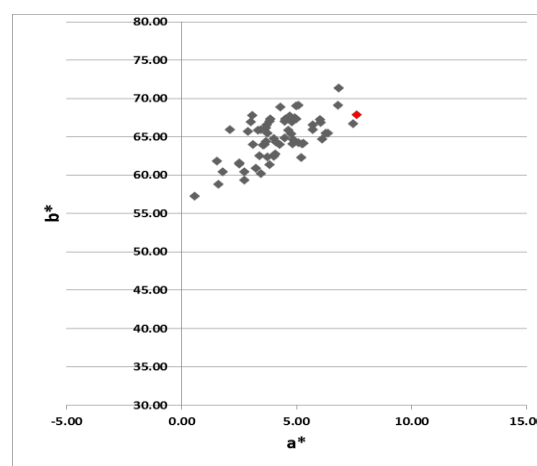
Table 2: Color sensitivity of wool dyeing recipe with Weld dye due to change in one parameter.

Changed Parameters	Low Color Depth (10 %)			High Color Depth (40 %)		
	L*	Sum(K/S)	S _A	L*	Sum (K/S)	S _A
Standard	67.73	93.76	0	63.67	222.88	0
Dye	69.28	78.31	0.19	65.42	198.28	0.14
Mordant	72.23	55.31	0.37	63.30	214.28	0.12
Acid	70.79	78.67	0.14	65.23	179.97	0.19
L.R	70.82	74.59	0.30	63.97	202.24	0.13
Temp.	70.13	64.67	0.26	66.28	192.38	0.31
Time	70.99	65.55	0.30	61.55	223.77	0.09



(a) عمق رنگی کم (۱۰ درصد)

a) The low color depth



(b) عمق رنگی زیاد (۴۰ درصد)

b) The high color depth

شکل ۶: موقعیت نمونه‌ها در فضا رنگ CIELAB.

Figure 6: Position of samples in CIELAB color space.

برای عمق رنگی زیاد (۴۰ درصد اسپرک)، بیشترین حساسیت مربوط به دما با ضریب حساسیت $S_A=0.31$ و کمترین حساسیت مربوط به زمان با ضریب حساسیت $S_A=0.09$ بود. ۱۰ درصد کاهش در مقدار غلظت رنگزا، غلظت دندانه، غلظت اسید، درجه حرارت، زمان و حجم حمام منجر به کاهش در روشنایی L^* شد. بیشترین روشنایی ناشی از ۱۰ درصد کاهش در دما با روشنایی L^* برابر ۶۶،۲۸ حاصل گردید. کمترین روشنایی مربوط زمان با روشنایی L^* برابر ۶۱،۵۵ حاصل شد. همچنین با ۱۰ درصد کاهش در مقدار غلظت رنگزا، غلظت دندانه، غلظت اسید، درجه حرارت، زمان و حجم حمام منجر به کاهش در عمق رنگی K/S شد. بیشترین عمق رنگی K/S ناشی از ۱۰ درصد کاهش در زمان با عمق رنگی K/S برابر ۲۲۳،۷۷ به دست آمد. کمترین عمق رنگی K/S برابر ۱۷۹،۹۷ می‌باشد که مربوط به تغییر در اسید است. در ادامه حساسیت رنگی نسخه رنگرزی پشم با رنگزای اسپرک در

برای عمق رنگی کم (۱۰ درصد اسپرک)، بیشترین حساسیت مربوط به دندانه با ضریب حساسیت رنگی $S_A=0.37$ و کمترین حساسیت مربوط به غلظت اسید با ضریب حساسیت رنگی $S_A=0.14$ است. ۱۰ درصد کاهش در مقدار غلظت رنگزا، غلظت دندانه، غلظت اسید، درجه حرارت، زمان و حجم حمام منجر به کاهش در روشنایی L^* می‌گردد. بیشترین افزایش در روشنایی ناشی از ۱۰ درصد کاهش در غلظت دندانه با روشنایی L^* برابر ۷۲،۲۳ به دست آمد. کمترین افزایش در روشنایی مربوط به غلظت رنگزا با روشنایی L^* برابر ۶۹،۲۸ به دست آمد. همچنین با ۱۰ درصد کاهش در مقدار غلظت رنگزا، غلظت دندانه، غلظت اسید، درجه حرارت، زمان و حجم حمام منجر به کاهش در عمق رنگی K/S شد. بیشترین کاهش در عمق رنگی K/S ناشی از ۱۰ درصد کاهش در غلظت دندانه با عمق رنگی K/S برابر ۵۵،۳۱ حاصل شد. کمترین کاهش در عمق رنگی K/S مربوط به غلظت اسید با K/S برابر ۷۸،۶۷ حاصل گردید.

۱۰ درصد)، مقدار حساسیت محاسباتی بیشتر از مقدار حساسیت حاصله به روش محاسباتی است. بیشترین حساسیت پیشگویی (حالت دندان - زمان) $S_p = 0.61$ به دست آمده است. کمترین حساسیت رنگی پیشگویی با (حالت رنگزا- اسید) $S_p = 0.26$ است.

برای عمق رنگی زیاد (۴۰ درصد اسپرک)، بیشترین حساسیت مربوط به دندان- دما با ضریب حساسیت واقعی ($S_A = 0.41$) و کمترین حساسیت مربوط به اسید- زمان و رنگزا- حجم با ضریب حساسیت واقعی ($S_A = 0.11$) است. ۱۰ درصد کاهش هم‌زمان دو متغیر منجر به کاهش در روشنایی L^* می‌گردد. بیشترین افزایش در روشنایی ناشی از ۱۰ درصد کاهش در دندان- دما با روشنایی L^* برابر ۶۸.۴۲ حاصل شد.

کمترین افزایش در روشنایی مربوط به ۱۰ درصد کاهش در رنگزا- حجم با روشنایی L^* برابر با ۶۲.۹۳ حاصل گردید. همچنین با ۱۰ درصد کاهش هم‌زمان در دو متغیر منجر به کاهش در عمق رنگی K/S می‌گردد. بیشترین کاهش در عمق رنگی K/S ناشی از ۱۰ درصد کاهش در دندان- دما با K/S برابر ۱۳۴.۶۹ حاصل شد. کمترین کاهش در عمق رنگی K/S مربوط به دما- حجم با K/S برابر ۲۲۳.۶۳ حاصل شد.

دو عمق رنگی کم (۱۰ درصد اسپرک) و زیاد (۴۰ درصد اسپرک) بر اساس تغییر هم‌زمان دو متغیر مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این منظور اختلاف رنگ و در ادامه ضریب حساسیت رنگی براساس ۱۰ درصد تغییر هم‌زمان در دو پارامتر نسخه رنگرزی محاسبه گردید. نتایج حاصله در جدول ۳ نشان داده شده است.

با توجه به جدول ۳، برای عمق رنگی کم (۱۰ درصد اسپرک)، بیشترین حساسیت مربوط به دندان- دما با ضریب حساسیت واقعی $S_A = 0.48$ و کمترین حساسیت رنگی مربوط به حالت دندان- حجم با ضریب حساسیت واقعی $S_A = 0.19$ است. ۱۰ درصد کاهش هم‌زمان دو متغیر منجر به کاهش در روشنایی L^* می‌گردد. بیشترین افزایش در روشنایی ناشی از ۱۰ درصد کاهش در رنگزا- حجم با روشنایی L^* برابر ۷۴.۴۵ حاصل گردید. کمترین افزایش در روشنایی مربوط به ۱۰ درصد کاهش در رنگزا- زمان با روشنایی L^* برابر با ۷۰ حاصل شد. همچنین با ۱۰ درصد کاهش هم‌زمان در دو متغیر منجر به کاهش در عمق رنگی K/S شد. بیشترین کاهش در عمق رنگی K/S ناشی از ۱۰ درصد کاهش در دندان- دما با عمق رنگی K/S برابر ۴۷.۹۸ حاصل گردید. کمترین کاهش در عمق رنگی K/S مربوط به زمان- حجم با K/S برابر ۸۷.۳۳ حاصل شد. برای عمق رنگی کم (اسپرک

جدول ۳: حساسیت رنگی نسخه رنگرزی پشم با رنگزای اسپرک بر اساس دو متغیر .

Table 3: Color sensitivity of wool dyeing recipe with Weld dye due to change in Two parameters.

Changed Parameters	Low Color Depth (10 %)				High Color Depth (40 %)			
	L^*	Sum (K/S)	S_A	S_p	L^*	Sum (K/S)	S_A	S_p
Standard	67.73	93.76	0	0	63.67	222.88	0	0
Dye-Mordant	71.35	57.88	0.33	0.50	66.10	146.55	0.36	0.22
Dye-Acid	73.40	62.18	0.28	0.26	66.87	149.44	0.30	0.31
Dye-L.R	74.45	59.27	0.39	0.39	62.93	218.34	0.11	0.23
Dye-Temp.	72.02	78.29	0.27	0.42	64.66	201.96	0.19	0.43
Dye-Time	70.00	75.01	0.21	0.44	65.83	157.37	0.32	0.12
Acid-L.R	73.69	62.33	0.35	0.34	66.30	190.14	0.20	0.32
Acid-Temp.	73.78	62.32	0.34	0.33	66.37	175.50	0.32	0.51
Acid-Time	72.06	62.56	0.29	0.37	64.90	184.91	0.11	0.21
Time-L.R	72.13	87.33	0.28	0.49	65.08	201.71	0.18	0.18
Temp.-L.R	72.59	79.52	0.28	0.46	65.17	223.63	0.15	0.42
Temp.-Time	73.16	67.91	0.35	0.52	65.77	200.39	0.20	0.31
Mordant-Acid	71.07	59.25	0.32	0.43	66.12	177.03	0.20	0.31
Mordant-Temp.	71.22	47.98	0.48	0.58	68.42	134.69	0.41	0.42
Mordant-Time	70.99	61.90	0.27	0.61	65.36	175.55	0.21	0.18
Mordant-L.R	71.72	84.16	0.19	0.56	64.05	196.61	0.18	0.24

رنگی کم (۱۰ درصد اسپرک) و زیاد (۴۰ درصد اسپرک) براساس تغییر هم‌زمان سه متغیر در جدول ۴ نشان داده شده است. تعداد ترکیب ۳ متغیره شامل ۲۰ حالت است. در عمق رنگی کم (۱۰ درصد اسپرک)، در تمامی ۲۰ حالت میزان روشنایی نسبت به حالت استاندارد کاهش یافته است و کمترین روشنایی بعد از استاندارد (اسید- زمان- حجم) با روشنایی $L^*=69.28$ و بالاترین میزان روشنایی $L^*=74.23$ به دست آمد. بیشترین حساسیت رنگی واقعی (رنگزا- دندان- دما) $S_A=0.41$ و بیشترین حساسیت رنگی پیشگویی (دندان- دما- زمان) $S_P=0.90$ و کمترین حساسیت رنگی واقعی (اسید- زمان- حجم) $S_P=0.14$ و کمترین حساسیت پیشگویی (رنگزا- اسید- حجم) $S_P=0.49$ است.

برای عمق رنگی زیاد (۴۰ درصد اسپرک)، مقدار حساسیت رنگی محاسباتی در بیشترین حالات (رنگزا- اسید، رنگزا- حجم، رنگزا- دما، اسید- حجم، اسید- دما، اسید- زمان، زمان- حجم، دما- حجم، دما- زمان، دندان- اسید، دندان- دما، دندان- حجم) بیشتر از مقدار حساسیت حاصله به روش محاسباتی است. در سایر حالات (رنگزا- دندان، رنگزا- زمان و دندان- زمان) مقدار حساسیت رنگی محاسباتی کمتر از مقدار حساسیت رنگی حاصله به روش محاسباتی است، در غلظت زیاد بیشترین حساسیت پیشگویی (اسید- دما) $S_P=0.51$ به دست آمده است. کمترین حساسیت پیشگویی با (رنگزا- زمان) $S_P=0.12$ به دست آمد.

حساسیت رنگی نسخه رنگرزی پشم با رنگزای اسپرک در دو عمق

جدول ۴: حساسیت رنگی نسخه رنگرزی پشم با رنگزای اسپرک براساس سه متغیر .

Table 4: Color sensitivity of wool dyeing recipe with Weld dye due to change in 3 parameters.

Changed Parameters	Low Color Depth (10 %)				High Color Depth (40 %)			
	L*	Sum (K/S)	S _A	S _P	L*	Sum (K/S)	S _A	S _P
Standard	67.73	93.76	0	0	63.67	222.88	0	0
Dye-Mordant-Acid	72.85	55.79	0.34	0.59	66.53	200.90	0.20	0.42
Dye-Mordant-L.R	70.75	71.49	0.27	0.72	65.70	199.43	0.21	0.34
Dye-Mordant-Temp.	73.64	57.46	0.41	0.74	68.38	171.19	0.39	0.54
Dye-Mordant-Time	72.22	64.34	0.29	0.78	66.94	178.06	0.28	0.24
Mordant-Acid- L.R	72.33	82.13	0.27	0.66	64.32	217.25	0.08	0.43
Mordant-Acid- Temp.	71.76	72.32	0.23	0.66	67.48	188.77	0.23	0.62
Mordant-Acid- Time	72.47	68.29	0.25	0.70	64.52	191.06	0.24	0.33
Mordant- Temp.-L.R	73.36	65.03	0.35	0.80	67.39	175.62	0.25	0.53
Mordant- Time-L.R	73.41	73.11	0.30	0.83	64.82	182.05	0.31	0.29
Acid- Temp.-L.R	72.55	69.99	0.29	0.55	66.02	190.43	0.21	0.62
Acid- Temp.-Time	74.18	57.76	0.38	0.60	66.23	204.69	0.20	0.50
Temp.-Time-L.R	74.23	64.43	0.36	0.73	69.17	140.79	0.47	0.43
Dye-Acid- Temp.	72.08	51.23	0.41	0.49	67.58	129.10	0.41	0.62
Dye-Acid- Time	71.49	62.95	0.23	0.53	66.51	146.07	0.29	0.31
Dye-Acid- L.R	71.49	62.66	0.28	0.49	66.31	167.29	0.29	0.24
Dye-Temp.- Time	71.29	52.38	0.38	0.69	68.43	129.95	0.46	0.42
Dye-Temp.- L.R	70.66	66.84	0.23	0.63	68.53	137.44	0.41	0.53
Dye- Time-L.R	71.25	58.13	0.34	0.66	66.06	169.28	0.28	0.25
Mordant-Temp.- Time	70.20	65.68	0.21	0.90	64.54	198.25	0.19	0.43
Acid- Time-L.R	69.28	80.23	0.14	0.59	65.26	178.09	0.13	0.34

جدول ۵: حساسیت رنگی نسخه رنگرزی پشم با رنگزای اسپرک براساس چهار متغیر.

Table 5: Color sensitivity of wool dyeing recipe with Weld dye due to change in 4 parameters

Changed Parameters	Low Color Depth (10 %)				High Color Depth (40 %)			
	L*	Sum (K/S)	S _A	S _P	L*	Sum (K/S)	S _A	S _P
Standard	67.73	93.76	0	0	63.67	222.88	0	0
Dye-Mordant-Acid-L.R	72.10	70.59	0.25	0.82	65.25	180.52	0.25	0.53
Dye-Mordant-Acid-Temp.	72.95	61.09	0.36	0.83	65.96	195.13	0.26	0.73
Dye-Mordant-Acid-Time	73.85	51.67	0.39	0.86	67.18	174.50	0.22	0.43
Mordant-Acid-Temp.-L.R	71.20	77.63	0.25	0.88	67.97	182.26	0.33	0.72
Mordant-Acid-Time-L.R	72.64	68.22	0.28	0.92	64.61	198.95	0.21	0.45
Mordant-Temp.-Time-L.R	74.15	57.96	0.36	1.07	67.21	183.79	0.27	0.55
Mordant-Acid-Temp.- Time	70.71	78.02	0.27	0.94	65.17	183.33	0.24	0.62
Acid-Temp.- Time-L.R	72.64	65.56	0.34	0.82	67.27	181.33	0.27	0.62
Dye-Mordant-Temp.-Time	72.42	48.57	0.43	1.02	68.83	118.93	0.58	0.54
Dye-Mordant-Temp.-L.R	71.51	55.93	0.33	0.96	64.74	169.90	0.23	0.64
Dye-Mordant-Time-L.R	72.02	52.28	0.39	1.00	64.56	183.94	0.19	0.36
Dye-Acid-Temp.-Time	72.60	43.08	0.52	0.77	66.67	139.27	0.48	0.61
Dye-Acid- Temp.-L.R	69.46	71.89	0.32	0.71	67.66	135.98	0.38	0.73
Dye-Acid- Time-L.R	72.90	40.89	0.58	0.75	64.82	192.39	0.14	0.43
Dye-Temp.- Time-L.R	73.26	45.40	0.57	0.90	66.36	159.88	0.31	0.53

زمان- حجم با ضریب حساسیت رنگی $S_A=0.58$ و بیشترین حساسیت پیشگویی مربوط به تغییر همزمان دندان- دما- زمان- حجم با ضریب حساسیت رنگی $S_P=1.07$ است. کمترین حساسیت واقعی برای حالت تغییر همزمان در چهار متغیر دندان- اسید- دما- حجم و رنگزا- دندان- اسید- حجم با ضریب حساسیت رنگی $S_A=0.25$ و کمترین حساسیت پیشگویی برای حالت تغییر همزمان در چهار متغیر رنگزا- اسید- دما- حجم با ضریب حساسیت رنگی $S_P=0.71$ به دست آمد. در غلظت زیاد یا عمق رنگی زیاد (40% درصد اسپرک) با تغییر همزمان چهار متغیر، میزان روشنایی افزایش یافته است. کمترین روشنایی بعد از استاندارد در حالت چهار متغیر مربوط به تغییر همزمان رنگزا- دندان- زمان- حجم با روشنایی $L^*=64.56$ و بیشترین روشنایی مربوط به تغییر همزمان رنگزا- دندان- دما- زمان با روشنایی $L^*=68.83$ است. بیشترین حساسیت واقعی در حالت چهار متغیر مربوط به تغییر همزمان چهار مشخصه رنگزا- دندان- دما- زمان با ضریب حساسیت رنگی $S_A=0.58$ و بیشترین حساسیت پیشگویی مربوط به تغییر همزمان چهار مشخصه رنگزا- اسید- دما- حجم با ضریب حساسیت رنگی $S_P=0.73$ و کمترین حساسیت واقعی

در غلظت زیاد (40% درصد اسپرک)، میزان روشنایی نسبت به حالت استاندارد افزایش یافته است، کمترین روشنایی بعد از استاندارد (دندان- اسید- حجم) با روشنایی $L^*=64.32$ و بالاترین میزان روشنایی برای حالت دما- زمان- حجم با روشنایی $L^*=69.17$ است. بیشترین حساسیت واقعی (دما- زمان- حجم) $S_A=0.47$ و بیشترین حساسیت پیشگویی (حالت رنگزا- اسید- دما) $S_P=0.62$ و کمترین میزان حساسیت واقعی (حالت دندان- اسید- حجم) $S_A=0.08$ و کمترین حساسیت پیشگویی (حالت رنگزا- دندان- زمان) $S_P=0.24$ است.

حساسیت نسخه رنگرزی پشم با رنگزای اسپرک در دو عمق رنگی کم (10% درصد اسپرک) و زیاد (40% درصد اسپرک) براساس تغییر همزمان چهار متغیر در جدول ۵ نشان داده شده است. تعداد ترکیب چهار متغیره شامل ۱۵ حالت است. در تمامی ۱۵ حالت، میزان روشنایی نسبت به حالت استاندارد کاهش یافته است و کمترین روشنایی برای حالت تغییر همزمان در چهار متغیر رنگزا- اسید- دما- حجم با روشنایی $L^*=69.46$ است. بیشترین حساسیت واقعی در حالت چهار متغیر مربوط به تغییر همزمان رنگزا- اسید-

حجم با ضریب حساسیت $S_p = 0.98$ است. در عمق رنگی زیاد تمامی نمونه‌ها، میزان روشنایی افزایش یافته است و میزان روشنایی L^* بین ۶۳،۶۷ تا ۶۷،۷۶ است. بیشترین حساسیت واقعی مربوط به تغییر هم‌زمان دندانه-اسید-دما-زمان-حجم با ضریب حساسیت $S_A = 0.33$ و بیشترین حساسیت پیشگویی مربوط به تغییر هم‌زمان رنگزای-دندانه-اسید-دما-حجم با ضریب حساسیت $S_p = 0.89$ و کمترین میزان حساسیت واقعی و پیشگویی مربوط به تغییر هم‌زمان رنگزای-دندانه-اسید-زمان-حجم به ترتیب با ضریب حساسیت $S_A = 0.18$ و $S_p = 0.55$ است.

همان‌طور که در جدول ۷ مشخص شده است، حساسیت نسخه رنگرزی پشم با رنگزای اسپرک در دو عمق رنگی کم (۱۰ درصد اسپرک) و زیاد (۴۰ درصد اسپرک) بر اساس تغییر هم‌زمان شش متغیر در جدول ۷ نشان داده شده است. با توجه به این جدول برای عمق رنگی کم و زیاد، مقدار روشنایی افزایش و مقدار عمق رنگی (K/S) کاهش یافته است. برای عمق رنگی کم حساسیت واقعی و محاسباتی به ترتیب ۰،۳۵ و ۱،۳۲ است در حالی که در عمق رنگی زیاد حساسیت واقعی و محاسباتی به ترتیب ۰،۲۸ و ۰،۸۴ است.

مربوط به تغییر هم‌زمان چهار پارامتر رنگزای-اسید-زمان-حجم با ضریب حساسیت رنگی $S_A = 0.14$ و کمترین حساسیت پیشگویی مربوط به تغییر هم‌زمان چهار مشخصه رنگزای-دندانه-زمان-حجم با ضریب حساسیت رنگی $S_p = 0.36$ است.

حساسیت نسخه رنگرزی پشم با رنگزای اسپرک در دو عمق رنگی کم (۱۰ درصد اسپرک) و زیاد (۴۰ درصد اسپرک) بر اساس تغییر هم‌زمان پنج متغیر در جدول ۶ نشان داده شد. تعداد ترکیب پنج متغیره شامل ۶ حالت است.

در عمق کم در تمامی ۶ حالت میزان روشنایی نسبت به حالت استاندارد افزایش یافته است و کمترین روشنایی مربوط به تغییر هم‌زمان رنگزای-اسید-دما-زمان-حجم با روشنایی $L^* = 70.51$ و بیشترین روشنایی مربوط به تغییر هم‌زمان رنگزای-دندانه-اسید-دما-حجم با روشنایی $L^* = 74.16$ است. بیشترین حساسیت واقعی و پیشگویی مربوط به تغییر هم‌زمان رنگزای-دندانه-دما-زمان-حجم با ضریب حساسیت $S_A = 0.41$ و $S_p = 1.24$ است. کمترین میزان حساسیت واقعی به ترتیب مربوط به تغییر هم‌زمان رنگزای-دندانه-اسید-زمان-حجم با ضریب حساسیت $S_A = 0.24$ و کمترین میزان حساسیت پیشگویی مربوط به تغییر هم‌زمان رنگزای-اسید-دما-زمان-

جدول ۶: حساسیت رنگی نسخه رنگرزی پشم با رنگزای اسپرک براساس ۵ متغیر.

Table 6: Color sensitivity of wool dyeing recipe with Weld dye due to change in 5 parameters.

Changed Parameters	Low Color Depth (10 %)				High Color Depth (40 %)			
	L^*	Sum(K/S)	S_A	S_p	L^*	Sum(K/S)	S_A	S_p
Standard	67.73	93.76	0	0	63.67	222.88	0	0
Dye-Mordant-Acid-Temp.-L.R	74.16	61.21	0.35	1.05	67.42	181.12	0.31	0.89
Dye-Mordant- Temp.-Time-L.R	74.12	54.49	0.41	1.24	64.95	178.92	0.27	0.65
Dye -Acid-Temp.-Time-L.R	70.51	63.83	0.30	0.98	66.44	177.59	0.28	0.73
Dye-Mordant-Acid-Time-L.R	70.54	67.44	0.24	1.08	65.59	199.16	0.18	0.55
Mordant-Acid-Temp.-Time-L.R	70.52	63.36	0.27	1.15	67.76	183.62	0.33	0.74
Dye-Mordant-Acid-Temp.-Time	72.75	65.26	0.32	1.10	67.29	173.77	0.30	0.73

جدول ۷: حساسیت رنگی نسخه رنگرزی پشم با رنگزای اسپرک براساس ۶ متغیر.

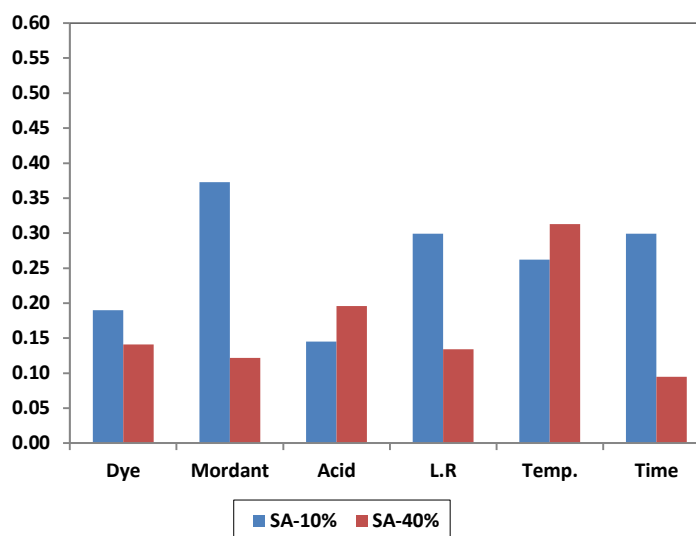
Table 7: Color sensitivity of wool dyeing recipe with Weld dye due to change in 6 parameters.

Changed Parameters	Low Color Depth (10 %)				High Color Depth (40 %)			
	L^*	Sum(K/S)	S_A	S_p	L^*	Sum(K/S)	S_A	S_p
Standard	67.73	93.76	0	0	63.67	222.88	0	0
Dye-Mordant-Acid-Temp.-Time-L.R	70.29	59.72	0.35	1.32	65.77	181.30	0.28	0.84

مثبت پشم زیاد شده که باعث افزایش رنگ پذیری الیاف و در نهایت افزایش قدرت رنگی می شود. در نتیجه نسخه رنگرزی نسبت تغییر pH یا غلظت اسید حساس است.

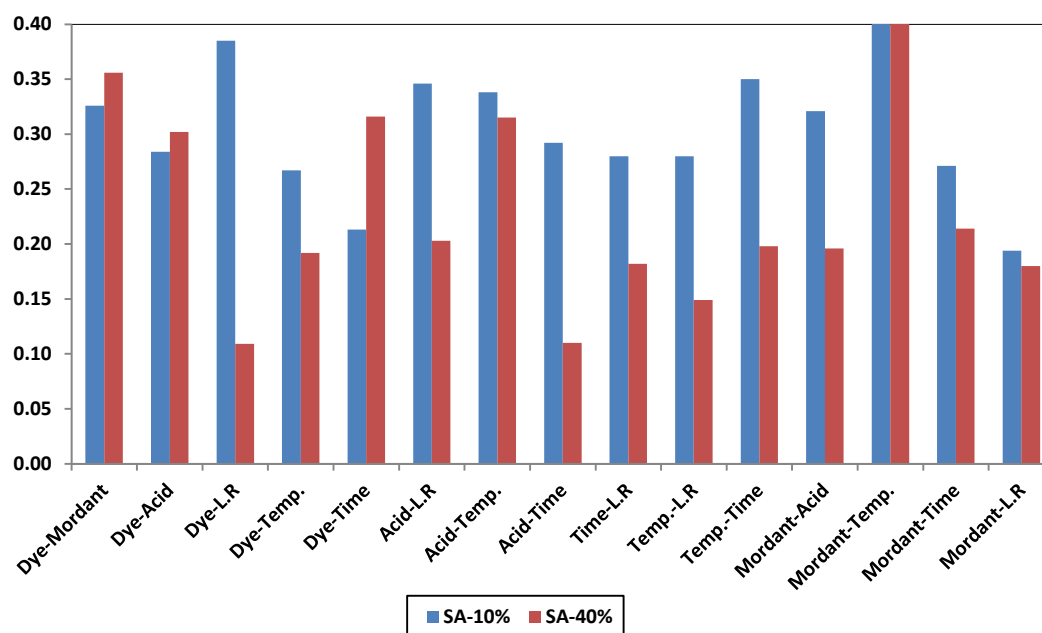
حساسیت رنگی نسخه رنگرزی پشم با رنگزای اسپرک در دو عمق رنگی کم (۱۰ درصد اسپرک) و زیاد (۴۰ درصد اسپرک) براساس تغییر هم زمان دو، سه، چهار، پنج و شش در شکل های ۷ تا ۱۲ نشان داده شد. حساسیت در عمق رنگی کم (۱۰ درصد اسپرک) بیشتر از عمق رنگی زیاد (۴۰ درصد اسپرک) است. در حالت یک متغیره، به غیر از اسید و دما، ضریب حساسیت در حالت عمق رنگی کم بیشتر از حالت عمق رنگی زیاد است. به عبارتی متغیرهای مرتبط به مقدار رنگزا (نسبت L.R، غلظت رنگزا و دندان) تاثیر قابل توجهی بر حساسیت رنگی دارند. در حالت دو متغیره به غیر از سه حالت از ۱۵ حالت حساسیت در حالت عمق رنگی کم بیشتر از حالت عمق رنگی زیاد است. در حالت سه متغیره از ۲۰ حالت مورد بررسی به غیر از هشت حالت حساسیت رنگی در حالت عمق رنگی کم بیشتر از حالت عمق رنگی زیاد است. در حالت چهار متغیره از ۱۵ حالت مورد بررسی به غیر از سه مورد حساسیت رنگی در حالت عمق رنگی کم بیشتر از حالت عمق رنگی زیاد است و در حالت پنج متغیره به غیر از یک حالت، حساسیت رنگی در حالت عمق رنگی کم بیشتر از حالت عمق رنگی زیاد است و در شش متغیره به طور کلی حساسیت رنگی در حالت عمق رنگی کم بیشتر از حالت عمق رنگی زیاد است.

در خصوص غلظت رنگزا براساس مطالعات انجام شده هرچه غلظت رنگزا بیشتر شود، رنگ پذیری الیاف نیز بیشتر می شود در نتیجه حساسیت رنگی نسبت به غلظت رنگزا افزایش می یابد البته در غلظت بالا حساسیت رنگی کاهش می یابد تا اینکه به نقطه اشباع برسد. بالاتر از نقطه اشباع حساسیت رنگی نسبت غلظت رنگزا تقریباً صفر می گردد. درخصوص اثر زمان نیز که از عوامل مهم و تاثیرگذار در فرایند رنگرزی است، هر چه زمان رنگرزی افزایش یابد یکنواختی رنگی کالا بیشتر می شود ولی اگر مدت زمان رنگرزی بسیار طولانی شود به خصوص در دمای جوش امکان تخریب الیاف و حتی رنگزا وجود دارد و ممکن است رنگزا از سطح لیف جدا شده و به حمام رنگرزی برگردد، نسبت حجم حمام به وزن کالا نیز در رنگرزی عامل مهمی است، در حجم حمام بالا، غلظت رنگزا کاهش یافته و رنگزای کمتری جذب الیاف می گردد. از آنجایی که دندانها، برای ایجاد اتصال و کمپلکس بین الیاف و مولکول رنگزا استفاده می شوند و در فرایند رنگرزی باعث افزایش جذب رنگزا می گردند. در نتیجه حساسیت رنگی ناشی از تغییر مقدار دندان قابل توجه است. البته دندانها باعث تغییر رنگ و بهبود خواص ثباتی نیز می گردد. همچنین با توجه به اینکه بار سطحی لیف پشم تابع pH می باشد به طوری که در pH اسیدی کمتر و بیشتر از نقطه ایزوالکتریک پشم (۴٫۸ تا ۵٫۶ pH) بار سطحی تغییر می کند در نتیجه خواص جذب رنگزای آن تابع pH است. در پایین تر از نقطه ایزوالکتریک پشم (۴٫۸ pH)، بارهای



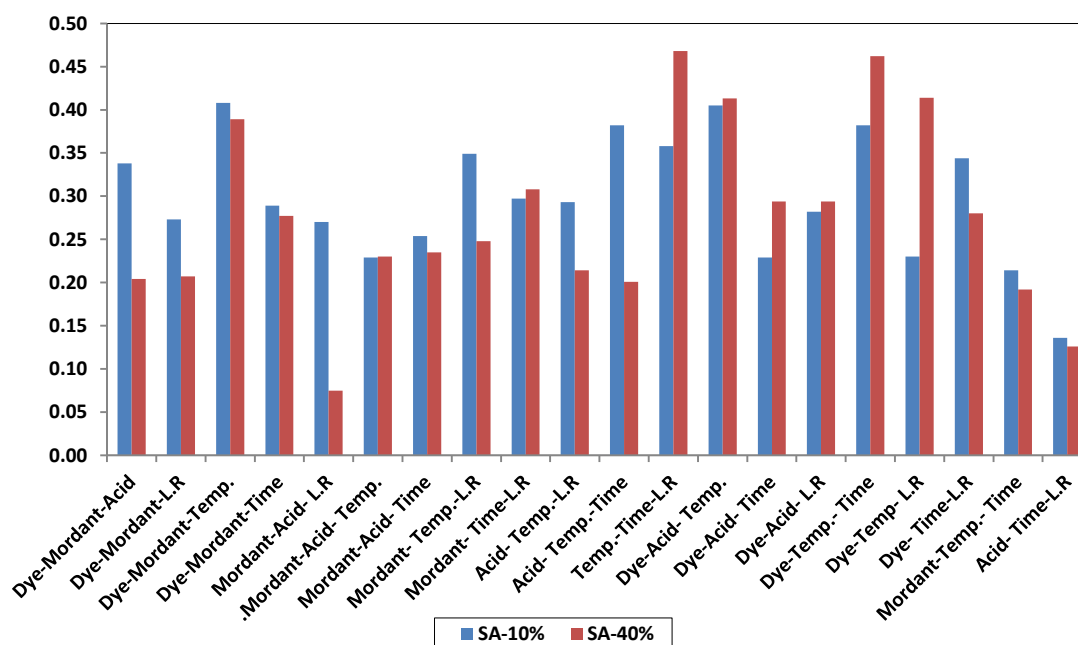
شکل ۷: حساسیت رنگی تک متغیره.

Figure 7: Color sensitivity of single variable.



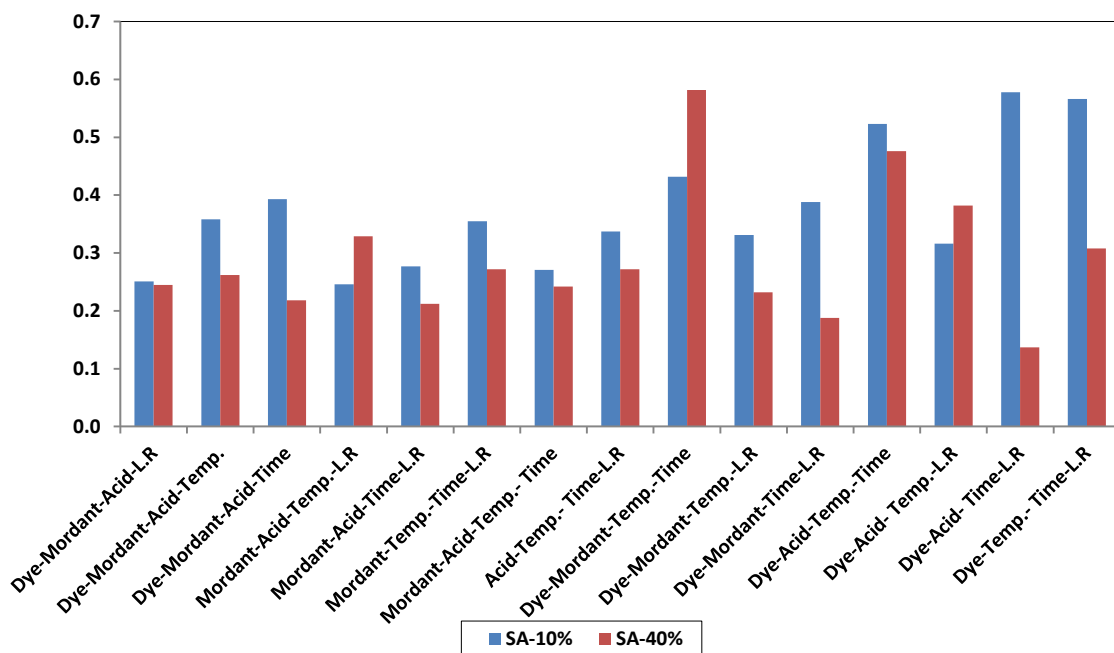
شکل ۸: حساسیت رنگی همزمان دو متغیره.

Figure 8: Simultaneous color sensitivity of two variables.



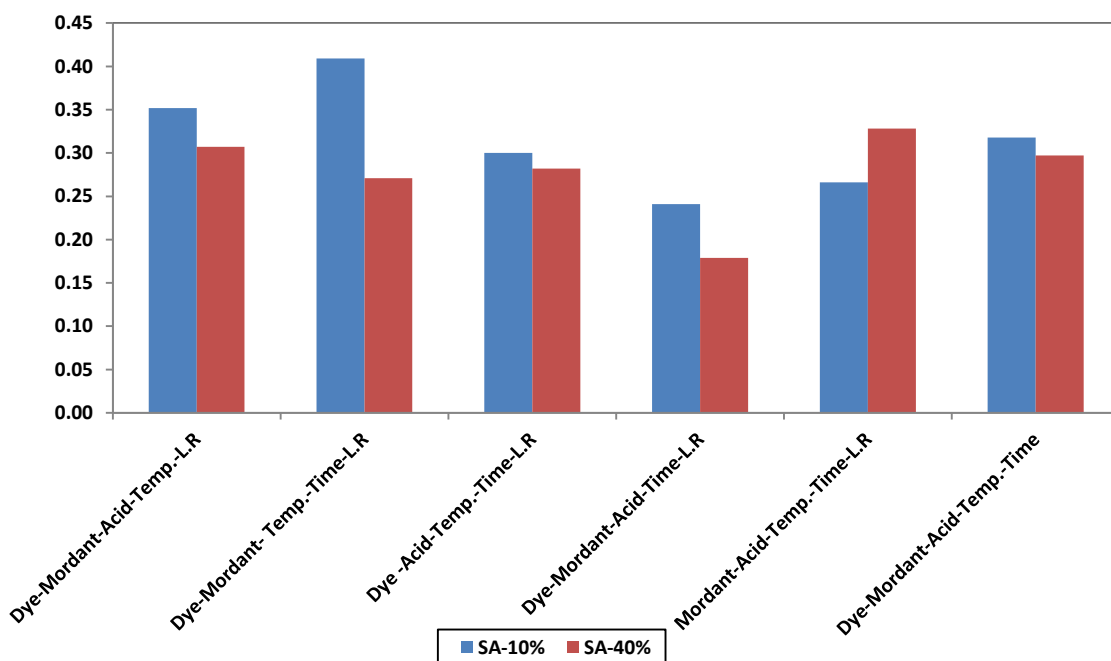
شکل ۹: حساسیت رنگی همزمان سه متغیره.

Figure 9: Simultaneous color sensitivity of three variables.



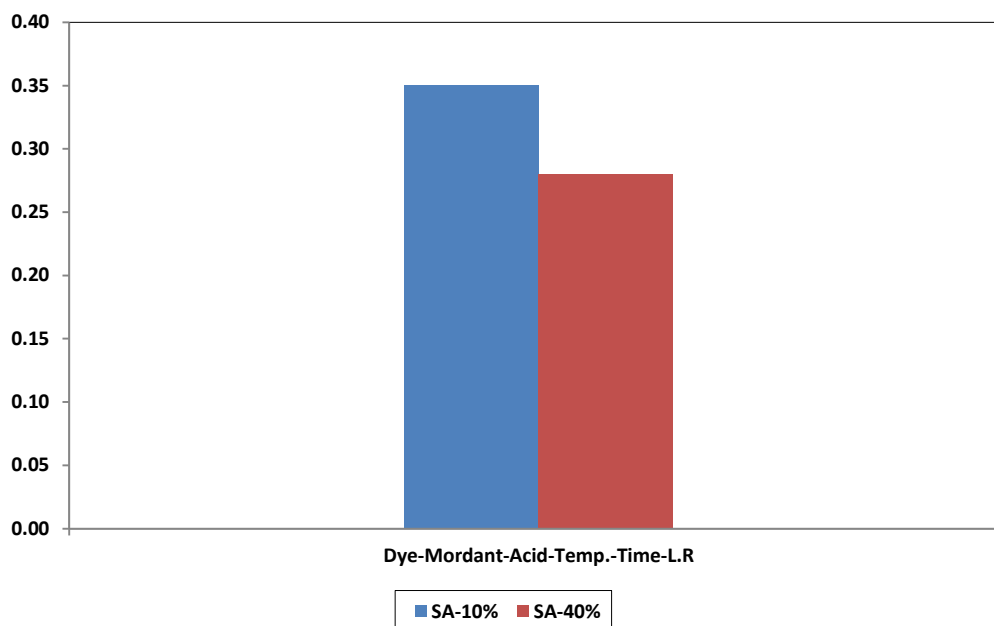
شکل ۱۰: حساسیت رنگی هم‌زمان چهار متغیره.

Figure 10: Simultaneous color sensitivity of four variables.



شکل ۱۱: حساسیت رنگی هم‌زمان پنج متغیره.

Figure 11: Simultaneous color sensitivity of five variables.



شکل ۱۲: حساسیت رنگی هم‌زمان رنگی شش متغیره.

Figure 12: Simultaneous color sensitivity of six variable.

رنگرزی پشم با رنگزای اسپرک در عمق رنگی کم بیشتر از عمق زیاد است. در ادامه برای بررسی و مقایسه بیشتر دو حالت عمق رنگی کم و زیاد از آزمون آماری T-test با سطح اطمینان ۹۵ درصد استفاده گردید. نتایج آزمون آماری T-test حساسیت رنگی آزمایشگاهی در جدول ۸ نشان داده شده است. با توجه به این جدول میانگین حساسیت رنگی برای حالت‌های یک متغیره و هم‌زمان برای دو متغیره، سه متغیره، چهار متغیره، پنج متغیره به ترتیب برای عمق رنگی کم ۰٫۲۶، ۰٫۳۱، ۰٫۳، ۰٫۳۷ و ۰٫۳۱ و برای عمق رنگی زیاد ۰٫۱۶، ۰٫۲۳، ۰٫۲۸، ۰٫۲۹ و ۰٫۲۸ است. نتایج فوق بیانگر این است که حساسیت در عمق رنگی کم بیشتر از عمق رنگی زیاد می‌باشد. در ارزیابی بر اساس آزمون آماری T-test، فقط در دو حالت دو متغیره و چهار متغیره مقدار p-value کمتر از ۰٫۰۵ است. با سطح اطمینان ۹۵ درصد می‌توان گفت که در این دو حالت حساسیت رنگی نسخه رنگرزی پشم با رنگزای اسپرک در عمق رنگی کم (۱۰ درصد اسپرک) بیشتر از زیاد (۴۰ درصد اسپرک) است.

حساسیت رنگی واقعی و پیشگویی شده برای عمق کم و عمق زیاد به ترتیب در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده است. در این شکل‌ها نمودار پراکنندگی برای حالت تکی، دوتایی، سه تایی، چهارتایی، پنج تایی و شش تایی مشخصه‌های نسخه رنگرزی نشان داده شد. با توجه به شکل‌های ذیل، با افزایش تغییر مشخصه‌ها افزایش حساسیت رنگی مشاهده می‌گردد. در شکل ۱۳ در عمق کم بیشترین میزان حساسیت رنگی واقعی با سه متغیره و کمترین با یک متغیره حاصل شده است. بالاترین میزان حساسیت رنگی پیشگویی با ۶ متغیره می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۱۴ برای عمق زیاد مشخص شده است، کمترین میزان حساسیت رنگی واقعی مربوط به نمونه‌ای با تغییر هم‌زمان سه متغیره است. بالاترین حساسیت واقعی با یکی از چهار مشخصه هم‌زمان صورت گرفت. همچنین کمترین حساسیت پیشگویی بر اساس حالت یک متغیره و بیشترین حساسیت پیشگویی بر اساس حالت پنج متغیره حاصل گردید. با توجه به نتایج حاصله از شکل‌های ۷ تا ۱۲، حساسیت نسخه

جدول ۸: میانگین حساسیت رنگی آزمایشگاهی و P-Value مربوط آزمون آماری T-test برای مقایسه حساسیت رنگی در عمق رنگی کم و زیاد.

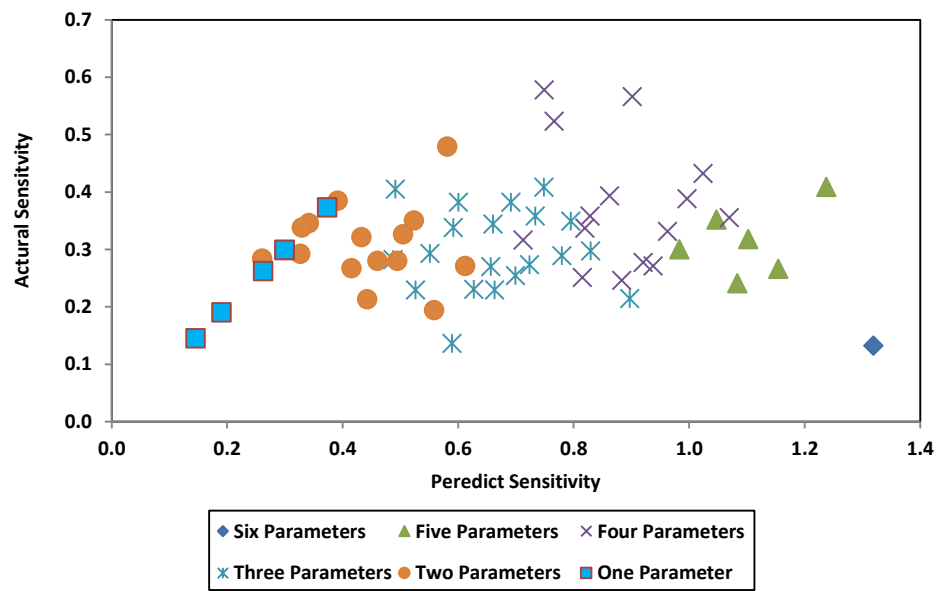
Table 8: The average of experimental color sensitivity and P-value of statistical T-test for comparison of the color sensitivity at low and high color depth.

The Number of Parameter	One Parameter	Two Parameters	Three Parameters	Four Parameters	Five Parameters
Low Color Depth (10 %)	0.26	0.31	0.30	0.37	0.31
High Color Depth (40 %)	0.16	0.23	0.28	0.29	0.28
P-Value	0.07	0.003	0.16	0.021	0.11

جدول ۹: میانگین حساسیت رنگی محاسباتی و P-Value مربوط آزمون آماری T-test برای مقایسه حساسیت رنگی در عمق رنگی کم و زیاد.

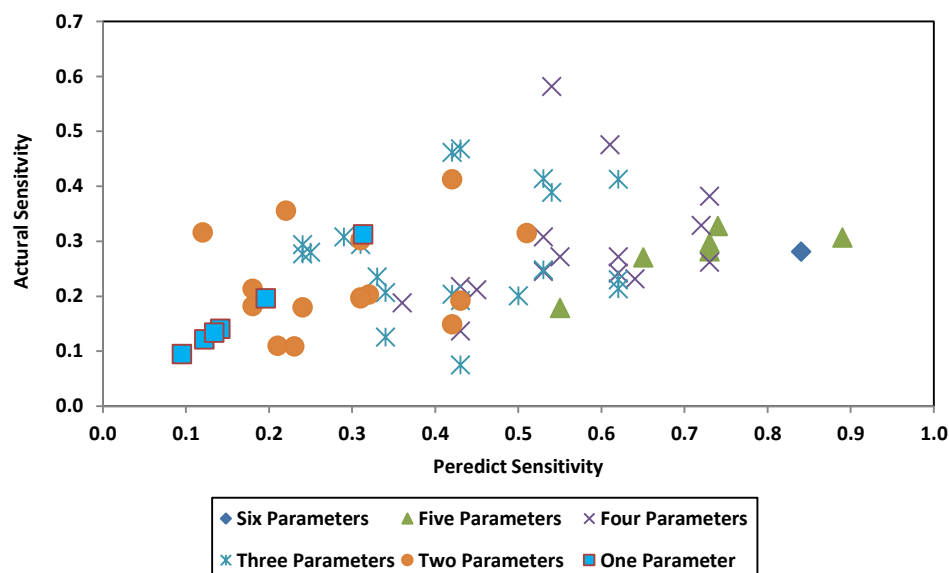
Table 9: The average of calculated color sensitivity and P-value of statistical T-test for comparison of the color sensitivity at low and high color depth.

The Number of Parameter	Two Parameters	Three Parameters	Four Parameters	Five Parameters
Low Color Depth (10 %)	0.44	0.67	0.88	1.10
High Color Depth (40 %)	0.29	0.42	0.57	0.72
P-Value	0.002	0	0	0.001



شکل ۱۳: نمودار پراکندگی حساسیت رنگی واقعی و پیشگویی شده در عمق کم (۱۰ درصد اسپرک).

Figure 13: Scatter graph of actual and predicted color sensitivity at low color depth (10 % Weld).



شکل ۱۴: نمودار پراکندگی حساسیت رنگی واقعی و پیشگویی شده در عمق زیاد (۴۰ درصد اسپرک).

Figure 14: Scatter graph of actual and predicted color sensitivity at high color depth (40 % Weld).

۰,۳۷ است. همچنین مقدار عمق رنگی تمام حالات نسبت به نمونه استاندارد کمتر است. در عمق رنگی زیاد کمترین و بیشترین میزان حساسیت به ترتیب مربوط به زمان با ضریب حساسیت ۰,۰۹ و دما با ضریب حساسیت ۰,۳۱ است. همچنین مقدار عمق رنگی تمام حالات بجز زمان نسبت به نمونه استاندارد کمتر است. برای ترکیب شش تایی مشخصه‌ها در عمق رنگی کم مقدار ضریب حساسیت ۰,۳۵ و در عمق رنگی زیاد مقدار ضریب حساسیت ۰,۲۸ است. مقدار ضریب حساسیت رنگی محاسبه شده به روش محاسباتی بیشتر از مقدار ضریب حساسیت رنگی اندازه‌گیری شده به روش آزمایشگاهی است. این اختلاف می‌تواند ناشی از عدم در نظر گرفتن اثر متقابل بین متغیرها در روش محاسباتی باشد. همچنین با توجه به نرم حساسیت رنگی ۰,۱ تعریف شده براساس نرم ۱ در اختلاف رنگ CMC، نتایج حاصله نشان می‌دهد که حساسیت‌های رنگی برای حالات مختلف قابل توجه و معنی‌دار است. به طور کلی حساسیت رنگی به نسخه رنگرزی در عمق رنگی کم بیشتر از عمق رنگی زیاد است که این پدیده می‌تواند به دلیل اشباع شدن لیف در غلظت بالا باشد. نتایج این تحقیق در توسعه دانش برای رنگرزان در رنگرزی خامه فرش دستیاف با ماده رنگزای اسپرک قابل استفاده و مفید است. در کنترل فرایند رنگرزی بایستی به عوامل با ضریب حساسیت رنگی بالا توجه بیشتری شود. نکته قابل توجه این است که حساسیت رنگی در عمق رنگی کم بیشتر از حالت عمق رنگی زیاد است. به عبارتی در صورت عدم کنترل پارامترهای رنگرزی احتمال نایکوناختی در رنگرزی با عمق رنگی کم نسبت به رنگرزی با عمق رنگی زیاد بیشتر است.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از آزمایشگاه گروه مهندسی نساجی دانشکده فنی دانشگاه گیلان جهت همکاری‌های لازم کمال تشکر را می‌نمایند.

تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

نتایج آزمون آماری T-test بر اساس حساسیت محاسباتی در جدول ۹ نشان داده شد. با توجه به جدول ۹ میانگین حساسیت رنگی برای حالت‌های یک متغیره و هم‌زمان برای دو متغیره، سه متغیره، چهار متغیره، پنج متغیره برای عمق رنگی کم بیشتر از برای عمق رنگی زیاد می‌باشد. برای تمامی حالات مقدار p-value کمتر از ۰,۰۵ است، به عبارتی با اطمینان ۹۵ درصد می‌توان گفت که حساسیت نسخه رنگرزی پشم با رنگزای اسپرک در عمق رنگی کم (۱۰ درصد اسپرک) بیشتر از زیاد (۴۰ درصد اسپرک) است.

در ارزیابی اختلاف رنگ CMC حد رواداری یک است. به طوری که اگر مقدار اختلاف رنگ محاسبه شده بیشتر از یک باشد اختلاف رنگ بین دو نمونه محسوس است. در صورتی که مقدار اختلاف رنگ محاسبه شده از یک کمتر باشد اختلاف رنگ نامحسوس است. با توجه به رابطه ۹ می‌توان نرم حساسیت را ۰,۱ در نظر گرفت. به عبارتی اگر مقدار حساسیت رنگی کمتر از ۰,۱ باشد حساسیت رنگی وجود ندارد و برعکس اگر حساسیت رنگی بیشتر از ۰,۱ باشد حساسیت رنگی قابل توجه و معنی‌دار می‌باشد. در عمق کم (۱۰ درصد) تمامی ضریب حساسیت‌ها بیشتر از ۰,۱ است و در عمق زیاد (۴۰ درصد اسپرک) فقط تنها یک مورد ضریب حساسیت کمتر از ۰,۱ است. در نتیجه می‌توان گفت که حساسیت رنگی‌ها معنی‌دار و قابل توجه هستند.

۴- نتیجه‌گیری

در رنگرزی با مواد رنگزای طبیعی عوامل زیادی می‌توانند موثر باشند در نتیجه ضرورت دارد که نقش این عوامل مورد ارزیابی قرار گیرد. در این مقاله حساسیت رنگی نسخه رنگرزی پشم با رنگزای طبیعی اسپرک در دو عمق رنگی کم (۱۰ درصد اسپرک) و عمق رنگی زیاد (۴۰ درصد اسپرک) مورد بررسی قرار گرفت، بررسی تصاویر SEM نشان داد که در نمونه دندانده داده شده و نمونه رنگرزی شده سطح الیاف تغییراتی قابل توجهی ندارد. اثرات این تغییرات بر خواص نوری نمونه‌ها قابل چشم‌پوشی است. در بررسی اثر تکی مشخصه‌ها، در عمق رنگی کم کمترین و بیشترین میزان حساسیت به ترتیب مربوط به اسید با ضریب حساسیت ۰,۱۴ و دندانده با ضریب حساسیت

۵- مراجع

- Bukhari MN, Ul-Islam S, Shabbir M, Jameel Rather L, Shahid M, Ali Khan M. Effect of Binary and Ternary Combination of Metal Salt Mordants on Dyeing and Fastness Properties of Natural Protein Fibre with Juglans regia L. Dye. J Nat Fibers. 2017;14(4):519-529. <https://doi.org/10.1080/15440478.2016.1212769>
- Dehnavi E, Shams-Nateri A, Khalili H. Wool dyeing with binary mixture of natural dyes. Pigm Resin Technol. 2016; 45(1):52-61. <https://doi.org/10.1108/PRT-06-2014-0045>
- Sinnur HD, Verma DK, Kar TR. Optimization of extraction and dyeing parameters for dyeing of khadi cotton fabric using waste/used marigold flower petals (Tagetes erecta). Indian J Fibre Text Res. 2022;47(4):450-463. <https://doi.org/10.56042/ijftr.v47i4.47319>
- Shams nateri A. Reusing wastewater of madder natural dye for wool dyeing. J Cleaner Prod. 2011;19(6-7):775-781. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.12.018>
- Ashrafi N, Gharanjig K, Hosseinneshad M, Khajeh Mehrizi M, Imani H, Razani N. Dyeing Properties and color fabrics using natural dye and mordant. Prog Color Colorants Coat.

- 2018;11(2):79-83. <https://doi.org/10.30509/pccc.2018.75742>.
6. Musinguzi A, Mwasiagi IJ, Ildphonse N, Charles N. Optimization of dyeing process parameters for bioactive cotton and silk fabrics with *Racinus communis* leaf extract. *Indian J Fibre Text Res.* 2022;47(2):232-239. <https://doi.org/10.56042/ijftr.v1i2.52647>
 7. Shahparvari MR Safapour S, Gharanjig K. Study of Compatibility of natural dyes in dyeing of woolen yarn without mordant and mordant with potassium alum sulphate. *Goljaam.* 2018;32(13):145-160. <https://dori.net/dor/20.1001.1.20082738.1396.13.32.5.5> [In persian].
 8. Shahparvari M. R. Safi M. Safapour S. Gharanjig K. Compatibility of Natural Dyes on Aluminum Pre-Mordanted Woolen Yarns by Determination of Diffusion Coefficient. *Fibers and Polymers.* 2018;19(8):1663-1669. <https://doi.org/10.1007/s12221-018-7777-z>
 9. Hosseinnazhad M, Gharanjig K, Belbasi S, Seied Saadati SH, Saeb M. The Use of Sumac as a Natural Mordant in Green Production of Iranian Carpet. *Fibers Polym.* 2018;19(9):1908-1912. <https://doi.org/10.1007/s12221-018-7961-1>
 10. Talebpour F. Veysian M. Malekan F. Evaluation of Dyeing Properties of Carpet Woolen Yarn with Natural and Wild Pomegranate Peel (*Punica granatum*). *J Natural Fibers.* 2018; 15(2):219-228. <https://doi.org/10.1080/15440478.2017.1325424>.
 11. Mirjalili M. Nazarpour K. Karimi L. Eco-friendly dyeing of wool using natural dye from weld as co-partner with synthetic dye. *Journal of Cleaner Production.* 2011.19(9-10):1045-1049. <https://doi.org/10.16/j.jclepro.2011.02.001>
 12. Montazer M. Zolfaghari A. Toliatand T. Bameni Moghadam M. Modification of wool surface by liposomes for dyeing with weld. *J Liposome Res.* 2009;19(3):173-179. <https://doi.org/10.1080/08982100802583487>
 13. Shams-Nateri A, Hajipour A, Dehnavi E, Ekrami E. Colorimetric Study on Polyamides Dyeing With Weld and Pomegranate Peel Natural Dye. *Clothing Text Res J.* 2014; 32(2):124-135. <https://doi.org/10.1177/0887302X14525658>
 14. Vankar PS, Shukla D. Spectrum of colors from reseda luteola and other natural yellow dyes. *J Text Eng Fashion Technol.* 2018;4(2):106-119 <https://doi.org/10.15406/jteft.2018.04.00127>.
 15. Mehrparvar L, Safapour S, Sadeghi-kiakhani M, Gharanjig K. Improvement of Dyeability of Woolen Pile Used in hand-knotted Carpet Through Biocompatible Chitosan Derivative: Study on Dyeing and Fastness Properties using Weld natural dye. *J Color Sci Tech.* 2016;10(2):89-96. <https://dori.net/dor/20.1001.1.17358779.1395.10.2.3.5> [In Persian].
 16. Hosseinnazhad M, Gharanjig K, Belbasi S, Seied Saadati SH. Green dyeing of silk fabrics in the presence of pomegranate extract as natural mordant. *Prog. Color Colorants Coat.* 2017; 10(2):129-133. <https://doi.org/10.30509/pccc.2017.75717>.
 17. Mathur JP, Gupta NP. Use of natural mordant in dyeing of wool. *Indian J Fibre Text Res.* 2003;28(1):90-93.
 18. Ahmadi Z. Effect of Herbal Mordants on Dyeing of Woolen Yarn with Madder & Weld. *Journal of colour science and Technology.* 2020.15(2):87-101. <https://dori.net/dor/20.1001.1.17358779.1400.15.2.2.9> [In Persian].
 19. kumar Samanta A, Konar A. Dyeing of Textiles with natural dyes. *Intechopen.* 2011:29-56.
 20. Nickson RA, Summwer HH. Random Errors in dyeingII - The Effect of Dye Selection on the Sensitivity of a Recipe to Weighing Errors. *JSDC.* 1978;493-495.
 21. Vik M. Colorimetry in textile industry. *VUTS.Librec:* 2017.
 22. Klein G.A. *Industrial color physics.* springer. New York: 2010.
 23. Sluban B. Sauperl O. A Sensitivity Model and Repeatability of Recipe Colour. *Croatia Chem Acta.* 2001;74(2):315-325.
 24. Chen PB, Yuen CWM, Yeung KW, Yeung CK. Limits of accuracy of dyeing process control and dyeing quality. *Color Technol.* 2004;1203(3):138-143. <https://doi.org/10.1111/j.1478-4408.2004.tb00220.x>
 25. Mughal J, Iqbal M, Naeem M. Technical Report On Textile Application Of The Color Sensitivity Of Dye Mixtures. 2009.
 26. Peyvandi S. Amirshahi S.H. Sensitivity of a Recipe Colour to the Tintorial Strength Error, The 6rd National Conference on Textile. 2007. [In Persian].
 27. Chen PB, C. Marcus Yuen W, Yeug K.W, Yeung C.K. Determination of colour sensitivity of dye mixtures for disperse dyes. *JSDC.* 1999;115(۱۲):387-382. <https://doi.org/10.1111/j.1478-4408.1999.tb00297.x>
 28. Ahmadi Z, Gholami Houjehgan F. Evaluation of Color Sensitivity to Dyeing Parameters in Natural Dyeing with Anthocyanin. *J Text Polym.* 2017;5(2):97-102.
 29. Ahmadi Z, Shayegh Broujeni N. Effectual Parameters in Natural Dyeing: Dyeing of Woolen Yarns by Madder. *J Text Polym.* 2013;1(2):65-69.

How to cite this article:

Veysian M, Shams-Nateri A. The Effect of Color Depth on Color Sensitivity in Wool Dyeing with Weld Natural Dye. *J Color Sci Tech.* 2024;17(4):267-285. <https://dori.net/dor/20.1001.1.17358779.1402.17.4.1.6> [In Persian]