Ministry of Science, Research and Technology
Institute for Color Science & Technology

available online @ www.jcst.icrc.ac.ir
Journal of Color Science and Technology, 20, 2(2026), 165-181
Article type: Research article
Open access

Journal of Color Science and Technology
www.jcst.icrc.ac.ir

Sustainable Wool Fabric Dyeing with Eremostachys sp. Extract: Comparison the Effects of Metallic and Plant-Based Mordants on Colorimetric, Fastness, and Antibacterial Properties

Majid Tehrani[*1], Mousa Sadeghi-Kiakhani[2], Nazanin Mohammadi[1]
1- Department of Art, Shahrekord University, P. O. Box: 5681188617, Shahrekord, Iran
2- Department of Organic Colorants, Institute for Color Science and Technology, P. O. Box: 16765-654, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 10-09-2026
Accepted: 26-10-2026
Available online: 07-11-2026
Print ISSN: 1735-8779
Online ISSN: 2383-2169

DOI: 10.30509/jcst.2026.167880.1292

Keywords:
Natural dye
Eremostachys sp.,
Wool fabric
Plant-based mordant
Color fastness
Antibacterial activity

ABSTRACT

In this study, the potential of Eremostachys sp. for wool fabric dyeing was evaluated. The effects of dye concentration, pH, temperature, and dyeing time were investigated, and the performance of metallic and plant-based mordants was compared in terms of colorimetric and fastness properties. A dye concentration of 80%, pH 3, a temperature of 80 °C, and a dyeing time of 75 min were selected as the optimum dyeing conditions. The type of mordant had a significant effect on the spectral behavior, colorimetric coordinates, and fastness properties of the dyed samples. Sn produced the highest $(K/S)_{\lambda max}$ (10.54), yielding a bright, highly saturated yellow hue, whereas Cr provided a deeper hue with a $(K/S)_{ave}$ of 2.60, along with wash and light fastness ratings of 5 and 6–7, respectively. Among the plant-based mordants, Carthamus tinctorius produced the highest $(K/S)_{\lambda max}$ (6.54), while Terminalia chebula exhibited wash and light fastness ratings of 4–5 and 6–7, respectively. The dyed wool samples exhibited a limited inhibitory effect against S. aureus and E. coli, with mean inhibition-zone diameters of 0.92 and 0.84 mm, respectively.

***Corresponding author: * mtehrani@sku.ac.ir**

This work is licensed **under a Creative Commons Attribution 4.0 International License**

نشریه علمی علوم و فناوری رنگ
Journal of Color Science and Technology
www.jcst.icrc.ac.ir

دسترسی آنلاین: www.jcst.icrc.ac.ir
نشریه علمی علوم و فناوری رنگ/ ۲۰، (۱۴۰۵)۲، ۱۸۱ـ۱۶۵
نوع مقاله: پژوهشی
دسترسی آزاد

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
پژوهشگاه رنگ

رنگرزی پایدار پارچه پشمی با عصاره گیاه گندل: مقایسه تأثیر دندانه‌های فلزی و زیست‌دندانه گیاهی بر ویژگی‌های رنگ‌سنجی، ثباتی و فعالیت ضدباکتری

مجید طهرانی[1*]، موسی صادقی‌کیاخانی[2]، نازنین محمدی[3]

۱ـ دانشیار، دانشکده هنر، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران، صندوق‌پستی: ۵۶۸۱۱۸۸۶۱۷

۲ـ دانشیار، گروه پژوهشی مواد رنگزای آلی، پژوهشکده مواد رنگزا، پژوهشگاه رنگ، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۷۶۵-۶۵۴

۳ـ کارشناس، دانشکده هنر، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران، صندوق‌پستی: ۵۶۸۱۱۸۸۶۱۷

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۶/۱۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۸/۰۴
در دسترس به صورت الکترونیکی: ۱۴۰۵/۰۸/۱۶
شاپا چاپی: ۸۷۷۹-۱۷۳۵
شاپا الکترونیکی: ۲۱۶۹-۲۳۸۳

DOI: 10.30509/jcst.2026.167880.1292

واژه‌های کلیدی:
رنگزای طبیعی
گندل
پارچه پشمی
دندانه گیاهی
ثبات رنگ
فعالیت ضدمیکروبی

چکیده

در پژوهش حاضر، ظرفیت گیاه گندل برای رنگرزی پارچه پشمی مورد ارزیابی قرار گرفت. ابتدا اثر مقدار رنگزا، pH، دما و زمان بررسی و سپس عملکرد دندانه‌های فلزی و گیاهی بر ویژگی‌های رنگی و ثباتی مقایسه شد. شرایط شامل ۸۰ درصد رنگزا، pH برابر ۳، دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۷۵ دقیقه به‌عنوان شرایط منتخب رنگرزی انتخاب شدند. نوع دندانه تأثیر قابل توجهی بر رفتار طیفی، مختصات رنگ‌سنجی و خواص ثباتی نمونه‌ها داشت. قلع با بیشترین قدرت رنگ (۱۰/۵۴)، فامی زرد، روشن و با اشباع بالا ایجاد کرد، در حالی که کروم با بیشترین قدرت رنگ متوسط (۲/۶۰)، فامی عمیق‌تر و ثبات شست‌شویی ۵ و ثبات نوری ۷-۶ را فراهم ساخت. در میان دندانه‌های گیاهی، گلرنگ بیشترین قدرت رنگ (۶/۵۴) را ایجاد کرد و هلیله زرد با ثبات شست‌شویی ۵-۴ و ثبات نوری ۷-۶، عملکرد ثباتی قابل رقابتی نشان داد. علاوه‌براین، نمونه‌های پشمی رنگرزی‌شده، فعالیت مهاری محدودی در برابر باکتری‌های استافیلوکوکوس اورئوس و اشرشیاکلی از خود نشان دادند و میانگین قطر هاله عدم‌رشد به‌ترتیب به ۰/۹۲ و ۰/۸۴ میلی‌متر رسید.

***Corresponding author: * mtehrani@sku.ac.ir**

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

۱ـ مقدمه

در سال‌های اخیر، توسعه فرایندهای کم‌آلاینده و مبتنی بر منابع تجدیدپذیر به یکی از جهت‌گیری‌های مهم پژوهش در صنعت نساجی تبدیل شده است. عملیات رنگرزی منسوجات از جمله مراحل اثرگذار بر پیامدهای زیست‌محیطی به شمار می‌رود؛ زیرا این فرایند معمولاً با مصرف مقادیر قابل توجهی آب، انرژی و مواد شیمیایی همراه است. اگرچه رنگزاهای سنتزی به دلیل برخورداری از تنوع فامی گسترده، تکرارپذیری مناسب، قدرت رنگی مطلوب و سهولت کاربرد جایگاه مهمی در صنعت نساجی دارند، اما ورود بخشی از رنگزاهای تثبیت‌نشده و مواد شیمیایی همراه آنها به جریان پساب کارخانه‌های رنگرزی می‌تواند پیامدهای نامطلوب زیست‌محیطی ایجاد کند. در این راستا، استفاده از رنگزاهای طبیعی استخراج‌شده از منابع گیاهی و محصولات جانبی کشاورزی به‌عنوان یکی از رویکردهای مورد توجه برای توسعه فرایندهای رنگرزی پایدار مطرح شده است. تجدیدپذیری منابع اولیه، زیست‌تخریب‌پذیری بسیاری از ترکیبات رنگزای طبیعی و امکان بهره‌برداری از منابع گیاهی بومی و مواد زیستی کم‌ارزش، از جمله مزایای این رویکرد محسوب می‌شوند (۲، ۱).

با وجود مزایای یادشده، استفاده گسترده از رنگزاهای طبیعی در صنعت نساجی همچنان با محدودیت‌هایی همراه است. تغییرپذیری ترکیب شیمیایی مواد گیاهی، دشواری استانداردسازی عصاره‌های رنگزا، محدودیت در بازتولید دقیق فام، میل جذبی نسبتاً پایین برخی رنگزاها نسبت به الیاف و نامطلوب بودن بعضی از خواص ثباتی، از جمله چالش‌های مطرح در این زمینه هستند (۳-۱). ترکیبات شیمیایی موجود در یک منبع گیاهی می‌توانند تحت تأثیر عواملی مانند گونه گیاهی، شرایط رشد، موقعیت جغرافیایی، مرحله برداشت، شیوه خشک‌کردن و روش استخراج قرار گیرند و در نتیجه رفتار رنگرزی آن نیز تغییر کند. ازاین‌رو، پژوهش‌های جدید در حوزه رنگزاهای طبیعی تنها بر شناسایی منابع رنگزا متمرکز نیستند و تعیین شرایط مناسب فرایند، انتخاب دندانه و ارزیابی هم‌زمان قدرت رنگی، ویژگی‌های فامی و خواص ثباتی نیز از اجزای اساسی این مطالعات به شمار می‌روند (۳، ۲).

لیف پشم به دلیل ماهیت پروتئینی و ساختار کراتینی خود، بستر مناسبی برای کاربرد بسیاری از رنگزاهای طبیعی محسوب می‌شود. وجود گروه‌های عاملی مختلف در ساختار کراتین، امکان ایجاد برهم‌کنش میان لیف و ترکیبات رنگزای گیاهی را فراهم می‌سازد. میزان جذب و تثبیت رنگزا بر روی الیاف پشم تنها به ماهیت شیمیایی رنگزا وابسته نیست و شرایط فرایند رنگرزی نیز نقش تعیین‌کننده‌ای در رفتار رنگزا-لیف دارد. مقدار رنگزا، pH حمام، دما و مدت زمان فرایند رنگرزی از جمله متغیرهایی هستند که می‌توانند بر انتقال جرم، نفوذ رنگزا به ساختار لیف، تعادل جذب و در نهایت قدرت رنگی نمونه اثرگذار باشند (۵، ۴).

pH حمام رنگرزی از طریق تغییر وضعیت یونش گروه‌های فعال موجود در لیف و ترکیبات رنگزا می‌تواند میل جذبی میان آنها را تحت تأثیر قرار دهد. دما نیز با تغییر تحرک مولکولی، تورم لیف و سرعت انتشار رنگزا در ساختار پشم، بر میزان جذب مؤثر است. از سوی دیگر، مدت زمان رنگرزی تعیین‌کننده میزان نزدیک‌شدن فرایند جذب رنگزا به شرایط تعادل است و مقدار رنگزا نیز بر نیروی محرکه انتقال جرم و میزان اشباع لیف تأثیر می‌گذارد. رابطه میان این متغیرها و قدرت رنگی الزاماً خطی نیست و شرایط مناسب هر فرایند رنگرزی باید به صورت تجربی تعیین شود. مطالعات انجام‌شده در زمینه رنگرزی پشم با منابع گیاهی مختلف نشان داده‌اند که تغییر غلظت رنگزا، pH، دما و زمان می‌تواند تغییرات قابل توجهی در قدرت رنگی و ویژگی‌های رنگ‌سنجی ایجاد کند؛ بنابراین، شرایط بهینه تعیین‌شده برای یک رنگزای طبیعی را نمی‌توان بدون بررسی تجربی به منبع گیاهی دیگری تعمیم داد (۵، ۴).

علاوه بر شرایط فرایند رنگرزی، دندانه‌دارکردن یکی از عوامل مؤثر بر رفتار رنگزاهای طبیعی روی الیاف است. یون‌های فلزی می‌توانند با گروه‌های عاملی موجود در ساختار برخی ترکیبات رنگزا برهم‌کنش کرده و کمپلکس‌هایی با ویژگی‌های متفاوت تشکیل دهند. در نتیجه، استفاده از دندانه ممکن است موجب تغییر در قدرت رنگی، روشنایی، خلوص رنگ، زاویه فام و سایر مؤلفه‌های رنگی شود و در برخی فرایندهای رنگرزی، ثبات رنگی در برابر عوامل خارجی را نیز تحت تأثیر قرار دهد (۷، ۶). نمک‌های آلومینیم، آهن، مس و قلع از جمله دندانه‌های متداول در رنگرزی طبیعی هستند. با این حال، ملاحظات زیست‌محیطی مرتبط با مصرف و دفع برخی یون‌های فلزی، ضرورت بررسی دندانه‌های کم‌خطرتر و زیست‌پایه را افزایش داده است (۷، ۶).

دندانه‌های گیاهی یا زیست‌دندانه‌ها به‌عنوان یکی از گزینه‌های مورد توجه در این زمینه مطرح شده‌اند. بسیاری از منابع گیاهی مورد استفاده برای دندانه‌دارکردن حاوی ترکیبات پلی‌فنلی، به‌ویژه تانن‌ها، فلاونوئیدها و اسیدهای فنلی هستند که می‌توانند از طریق برهم‌کنش‌های غیرکووالانسی و در برخی شرایط از طریق تشکیل ساختارهای کمپلکسی، بر جذب و تثبیت رنگزا تأثیر بگذارند (۹، ۸، ۶). با این حال، کارایی این مواد تابع ترکیب شیمیایی منبع گیاهی، ماهیت رنگزا، نوع لیف و شرایط دندانه‌دارکردن است. ازاین‌رو، دندانه‌های گیاهی را نمی‌توان در همه شرایط جایگزین کامل دندانه‌های فلزی دانست. برخی از آنها ممکن است تأثیر محدودی بر افزایش قدرت رنگی داشته باشند، اما فام متفاوتی ایجاد کرده یا موجب بهبود انتخابی برخی از خواص ثباتی شوند. بنابراین، ارزیابی عملکرد دندانه‌ها باید علاوه بر قدرت رنگی، بر تغییرات رنگ‌سنجی و خواص ثباتی نمونه‌های رنگرزی شده نیز استوار باشد (۹، ۸، ۶).

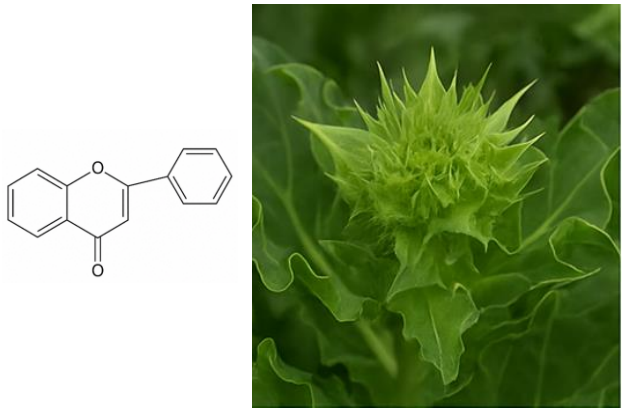
در میان گیاهان بومی مورد استفاده در رنگرزی سنتی ایران،

گندل (*Eremostachys sp*.) از خانواده *Lamiaceae*، یکی از منابع گیاهی مورد استفاده در منطقه بختیاری است (۱۳-۱۰). این گیاه از نظر ظاهری ساختاری خارمانند دارد و با برگ‌های لوب‌دار، حاشیه‌های خاردار و گل‌آذین‌های متراکم و تقریباً کروی مشخص می‌شود (شکل ۱). گندل در نواحی کوهستانی زاگرس، از جمله استان‌های چهارمحال‌وبختیاری، لرستان و نواحی اطراف اصفهان، به‌صورت خودرو یافت می‌شود و از دیرباز در رنگرزی سنتی این مناطق مورد استفاده قرار می‌گرفته است. کاربرد گندل در رنگرزی سنتی منطقه بختیاری دارای پیشینه مستند تاریخی است. در منابع مربوط به بافته‌های بختیاری از ماده رنگزایی با این نام یاد شده است که از گیاهی موسوم به gandalāš تهیه شده و برای ایجاد فام‌های زرد خردلی و زرد-نارنجی در برخی بافته‌های پرزدار و تخت‌بافت بختیاری به‌کار رفته است (۱۳، ۱۰).

با وجود پیشینه کاربرد گندل در رنگرزی، اطلاعات علمی درباره ماهیت دقیق ترکیبات مسئول ایجاد رنگ در این گیاه همچنان محدود است. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که رفتار رنگزایی گندل با حضور ترکیبات فنلی، به‌ویژه فلاونوئیدهای نوع فلاون، مرتبط است. در این پژوهش‌ها، هسته فلاون به‌عنوان یکی از رنگ‌سازهای احتمالی مسئول ایجاد رنگ در گندل معرفی شده است (۱۴، ۱۲، ۱۱). این ترکیبات دارای ساختاری آروماتیک با حلقه‌های حاوی اکسیژن هستند (شکل ۱).

قابلیت استفاده از گندل در رنگرزی منسوجات در پژوهش‌های پیشین نیز مورد بررسی قرار گرفته است. ویسیان و همکارانش کاربرد گندل را در رنگرزی نخ ابریشم بررسی کرده و نشان دادند که نوع دندانه و شرایط فرایند می‌تواند بر فام، ویژگی‌های رنگی و خواص ثباتی نمونه‌های رنگرزی‌شده تأثیرگذار باشد (۱۱). همچنین، ولی‌پور و همکارانش رنگرزی نخ پشمی مورد استفاده در فرش دستباف با گندل را در حضور دندانه‌های مختلف بررسی و ویژگی‌های رنگی، ثبات نوری و شست‌شویی آن را با نمونه‌های رنگرزی‌شده با رنگزای اسپرک مقایسه کردند (۱۲).

با وجود پیشینه استفاده از گندل در رنگرزی سنتی بختیاری و گزارش‌هایی درباره کاربرد آن در رنگرزی ابریشم و خامه قالی (۱۲، ۱۱)، بررسی جامع و هم‌زمان اثر شرایط فرایند و انواع دندانه‌ها بر رفتار رنگرزی پارچه پشمی با این گیاه کمتر مورد توجه قرار گرفته است. به‌ویژه، اطلاعات جامعی درباره اثر متغیرهای اصلی فرایند، شامل مقدار ماده رنگزا، pH حمام، دمای رنگرزی و مدت زمان فرایند رنگرزی و تاثیر دندانه‌های فلزی و گیاهی بر قدرت رنگی، مشخصه‌های رنگی و خواص ثباتی پارچه پشمی رنگرزی شده با عصاره گندل در دسترس نیست. از آنجا که شرایط فرایند رنگرزی می‌توانند بر میزان جذب و تثبیت ترکیبات رنگزا در لیف پشم اثرگذار باشند، ارزیابی عملکرد دندانه‌ها در شرایط کنترل‌شده و پس از تعیین شرایط مناسب رنگرزی می‌تواند امکان تفسیر دقیق‌تری از اثر هر یک از عوامل فراهم سازد. بر این اساس، در این پژوهش، ابتدا شرایط مناسب رنگرزی پشم با عصاره گندل از طریق بررسی چهار متغیر اصلی (غلظت رنگزا، pH، دما و زمان) تعیین شد. سپس، در شرایط منتخب، عملکرد پنج دندانه فلزی متداول با شش زیست‌دندانه گیاهی در روش پیش‌دندانه مقایسه گردید. این بررسی هم‌زمان قدرت رنگی، مشخصه‌های رنگی، ثبات‌های نوری و شست‌شویی را در بر گرفته و امکان ارزیابی جامع از قابلیت‌های گندل فراهم می‌سازد. به‌موازات آن، به دلیل حضور ترکیبات فنلی، فعالیت ضدمیکروبی نمونه‌ها نیز مورد سنجش قرار گرفت. در مجموع، این رویکرد می‌تواند به‌عنوان الگویی برای توسعه رنگرزی طبیعی و کاهش مصرف دندانه‌های فلزی خطرناک در صنعت پشم مطرح شود.



شکل ۱: نمای گیاه گندل و ساختار شیمیایی احتمالی ترکیبات رنگی آن.

Figure 1: Photograph of *Eremostachys sp*. and the proposed chemical structure of its possible colorant compounds.

۲ـ بخش تجربی

۲ـ۱ـ مواد اولیه

در این پژوهش، برای انجام فرایند رنگرزی از پارچه پشمی با بافت تافته و وزن سطحی ۲۸۰ گرم بر مترمربع، تهیه‌شده از شرکت هورنگ، ایران، استفاده شد. پیش از انجام آزمایش‌های رنگرزی، پارچه پشمی به‌منظور حذف ناخالصی‌های سطحی، مواد تکمیلی احتمالی و آماده‌سازی بهتر الیاف برای جذب رنگزا، در حمامی حاوی آب مقطر و ۲ درصد صابون نساجی غیریونی لیساپول (Lissapol NC)، شرکت ICI به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد شستشو داده شد. پس از پایان شستشو، نمونه‌ها چندین مرتبه با آب شسته شدند تا بقایای ماده شوینده به‌طور کامل از پارچه حذف شود.

گیاه گندل به‌عنوان منبع رنگزای طبیعی از رویشگاه‌های طبیعی استان چهارمحال‌وبختیاری در رشته‌کوه‌های زاگرس در ماه فروردین جمع‌آوری، شستشو و خشک شد. هویت این گیاه بر اساس ویژگی‌های ریخت‌شناسی، منابع موجود، دانش بومی منطقه و نظر متخصصان حوزه گیاه‌شناسی و منابع طبیعی تأیید شد. برای تهیه عصاره رنگزا، پودر گندل با نسبت ماده رنگزا به حلال ۱ به ۵۰ (گرم به میلی‌لیتر) در آب مقطر ریخته شد. فرایند استخراج در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۶۰ دقیقه و همراه با هم‌زدن مداوم انجام شد. پس از پایان استخراج، محلول حاصل تا دمای محیط سرد و به‌منظور جداسازی ذرات نامحلول و دستیابی به عصاره‌ای یکنواخت، محلول سرد شده حاصل از فیلتر شماره ۴۲ (شرکت واتمن کشور انگلیس) عبور داده شد. عصاره تهیه‌شده بلافاصله برای انجام فرایند رنگرزی مورد استفاده قرار گرفت.

برای انجام فرایند دندانه‌دار کردن، دندانه‌های فلزی شامل سولفات مضاعف آلومینیم پتاسیم ($KAl(SO_4)_2$)، سولفات مس ($CuSO_4$)، سولفات آهن ($FeSO_4$)، دی‌کرومات پتاسیم ($K_2Cr_2O_7$) و کلرید قلع ($SnCl_2$) تهیه شده از شرکت مرک (آلمان) مورد استفاده قرار گرفتند. همچنین، برای بررسی عملکرد دندانه‌های زیست‌پایه، مواد گیاهی شامل پوست پیاز سفید (*Allium cepa L.*)، هلیله زرد (*Terminalia chebula Retz.*)، مازو (*Quercus infectoria Olivier*)، گلرنگ (*Carthamus tinctorius L.*)، پوست انبه (*Mangifera indica L.*) و سماق (*Rhus coriaria L.*) انتخاب شدند. مواد گیاهی مورد استفاده به‌عنوان رنگزا و دندانه، ابتدا به‌طور کامل با آب شستشو و در شرایط محیطی و دور از تابش مستقیم نور خشک شدند. آنگاه با استفاده از آسیاب صنعتی ایمپکس مدل SX150 به پودر ریز تبدیل شد. برای تهیه پودر ریز با ذرات تقریباً یکسان، از مش نایلونی شماره ۴۰ استفاده شد. برای تنظیم pH حمام‌های رنگرزی و دندانه‌دادن نیز از اسید استیک با گرید آزمایشگاهی تهیه شده از شرکت مرک (آلمان) استفاده شد. لازم به ذکر است که در این پژوهش، دی‌کرومات پتاسیم و کلرید قلع به‌عنوان دندانه‌های فلزی صرفاً به‌منظور مقایسه با دندانه‌های طبیعی مورد استفاده قرار گرفتند و با توجه به مشکلات زیست‌محیطی، استفاده از این ترکیبات در فرایند رنگرزی توصیه نمی‌شود.

۲ـ۲ـ تعیین شرایط مناسب برای رنگرزی

به‌منظور تعیین شرایط مناسب برای رنگرزی پارچه پشمی با عصاره گندل، اثر چهار متغیر اصلی فرایند شامل مقدار ماده رنگزا، pH حمام، دمای رنگرزی و مدت زمان فرایند رنگرزی به‌صورت مرحله‌ای و با استفاده از روش تغییر تک‌متغیره در هر مرحله[1] بررسی شد. در این روش، در هر مرحله تنها یک متغیر تغییر داده شد و سایر شرایط ثابت نگه داشته شدند. مقدار منتخب هر متغیر بر اساس روند تغییرات قدرت رنگی نمونه‌ها و با درنظرگرفتن ملاحظات فرایندی تعیین و در مرحله بعد به عنوان یکی از شرایط ثابت فرایند مورد استفاده قرار گرفت. اگر چه این رویکرد امکان ارزیابی مستقیم اثرات متقابل بین متغیرهای فرایند را فراهم نمی‌کند، اما برای تعیین محدوده مناسب عملیاتی در یک فرایند رنگرزی با متغیرهای متعدد، اطلاعات اولیه مناسبی فراهم می‌نماید. بر این اساس، شرایط انتخاب‌شده در این پژوهش به عنوان شرایط مناسب و منتخب فرایند رنگرزی در محدوده عوامل بررسی‌شده در نظر گرفته شدند. برای بررسی دقیق‌تر اثرات متقابل عوامل و انجام بهینه‌سازی چندمتغیره فرایند، می‌توان در مطالعات آینده از روش‌های طراحی آزمایش پیشرفته استفاده نمود. سطوح متغیرهای مورد بررسی و شرایط اعمال‌شده در هر مرحله در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

1. One Factor at a Time

جدول ۱: متغیرهای فرایند رنگرزی و سطوح بررسی‌شده در مراحل تعیین شرایط مناسب.

Table 1: Dyeing process variables and levels investigated during the determination of suitable dyeing conditions.

	Variable parameter	Dye concentration (%, owf)	pH	Temperature (°C)	Time (min)
Step 1	Dye concentration	20, 40, 60, 80, 100	4	80	75
Step 2	pH	80	3, 4, 5, 6, 7	80	75
Step 3	Temperature	80	3	20, 40, 60, 80, 100	75
Step 4	Time	80	3	80	30, 45, 60, 75, 90

در مرحله نخست، اثر مقدار ماده رنگزا در سطوح ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد نسبت به وزن پارچه (owf) در شرایط ثابت pHبرابر ۴، دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد و زمان رنگرزی ۷۵ دقیقه بررسی شد. پس از تعیین مقدار مناسب ماده رنگزا، اثر pH حمام در محدوده ۷-۳ مورد ارزیابی قرار گرفت؛ در این مرحله، مقدار ماده رنگزا در سطح منتخب مرحله نخست (۸۰ درصد) ثابت نگه داشته شد و رنگرزی در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۷۵ دقیقه انجام گرفت. در مرحله سوم، پس از تعیین pH مناسب، تأثیر دمای رنگرزی در محدوده ۱۰۰-۲۰ درجه سانتی‌گراد بررسی شد. در این مرحله، مقدار ماده رنگزا و pH بر اساس مقادیر منتخب مراحل پیشین ثابت نگه داشته شدند و مدت زمان رنگرزی ۷۵ دقیقه در نظر گرفته شد. در مرحله پایانی، اثر مدت زمان رنگرزی در بازه ۹۰-۳۰ دقیقه تحت شرایط منتخب حاصل از سه مرحله قبل ارزیابی شد. در تمام مراحل، تغییرات قدرت رنگی نمونه‌های رنگرزی‌شده همراه با ملاحظات فرایندی به‌عنوان مبنای مقایسه و انتخاب شرایط مناسب رنگرزی مورد استفاده قرار گرفت. از آنجا که اندازه‌گیری‌های قدرت رنگی مربوط به قرائت‌های دستگاهی یک نمونه بوده و تکرار مستقل آزمایش محسوب نمی‌شوند، مرحله تعیین شرایط مناسب رنگرزی با هدف بررسی روند تغییرات قدرت رنگی و تعیین محدوده مناسب عملیاتی انجام شد و مقایسه آماری معناداری بین سطوح مختلف متغیرهای فرایند انجام نگرفت.

۲ـ۳ـ فرایند دندانه‌دادن و رنگرزی

پس از تعیین شرایط مناسب رنگرزی شامل مقدار ماده رنگزا، pH حمام، دما و زمان فرایند، اثر دندانه‌های فلزی و گیاهی بر رفتار رنگرزی پارچه پشمی با استفاده از روش پیش‌دندانه بررسی شد. در این روش، نمونه‌های ۵ گرمی پشمی پیش از ورود به حمام رنگرزی، ابتدا تحت عملیات دندانه‌دادن قرار گرفتند. فرایند پیش‌دندانه در حمامی با pH برابر ۳، دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۷۵ دقیقه انجام شد (۱۲). مقدار دندانه مصرفی بر حسب وزن پارچه برای سولفات مضاعف آلومینیم پتاسیم ۱۰ درصد، برای سایر نمک‌های فلزی ۵ درصد و برای دندانه‌های گیاهی ۱۰ درصد در نظر گرفته شد (۵). مقادیر دندانه‌ها بر اساس درصد وزنی نسبت به وزن پارچه و مطابق شرایط متداول استفاده از آن‌ها در فرایند رنگرزی طبیعی تعیین شدند. با توجه به تفاوت ماهیت شیمیایی دندانه‌های فلزی و گیاهی، مقایسه آن‌ها در این پژوهش بر مبنای عملکرد نهایی رنگرزی و ویژگی‌های حاصل از آن انجام شد.

پس از پایان مرحله دندانه‌دادن، نمونه‌ها از حمام خارج و با آب شستشو داده شدند تا مواد دندانه‌دهنده تثبیت‌نشده و باقی‌مانده از سطح پارچه حذف شوند. سپس نمونه‌های دندانه‌داده شده تحت فرایند رنگرزی به روش رمق‌کشی قرار گرفتند. بدین منظور، نمونه‌ها در حمام حاوی عصاره گندل و تحت شرایط مناسب منتخب برای مقدار رنگزا، pH، دما و زمان رنگرزی قرار داده شدند. نسبت حجم حمام به وزن کالا در تمام مراحل دندانه‌دادن و رنگرزی برابر ۵۰ به ۱ ثابت نگه داشته شد تا شرایط آزمایش برای تمامی نمونه‌ها یکسان باشد. در پایان فرایند رنگرزی، نمونه‌ها از حمام خارج شده، با آب شستشو داده شدند تا رنگزای جذب‌نشده و مواد باقی‌مانده از سطح پارچه حذف شود و سپس در شرایط محیطی خشک شدند. نمونه پشمی رنگرزی‌شده بدون استفاده از دندانه نیز تحت همان شرایط رنگرزی تهیه و به‌عنوان نمونه شاهد (نمونه کنترل) برای مقایسه اثر دندانه‌های مختلف در نظر گرفته شد.

۲ـ۴ـ آزمون‌های رنگ‌سنجی و ثبات رنگ

به‌منظور ارزیابی ویژگی‌های رنگی نمونه‌های رنگرزی‌شده، طیف بازتابی آنها در محدوده مرئی ۷۰۰-۴۰۰ نانومتر با استفاده از طیف‌سنج بازتابی مدل YS6010 ساخت کشور چین اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری‌ها تحت منبع نور استاندارد D65 و زاویه مشاهده‌گر استاندارد ۱۰ درجه انجام گرفت. بر اساس داده‌های طیفی حاصل، عوامل رنگی در فضای رنگی CIELAB تعیین شدند. قدرت رنگی نمونه‌های رنگرزی‌شده با استفاده از داده‌های بازتاب و بر اساس رابطه کوبلکا-مانک (رابطه ۱)، محاسبه شد.

$$\frac{K}{S}=\frac{(1-R)^2}{2R} \qquad (۱)$$

در این رابطه، K ضریب جذب، S ضریب پراکندگی و R بازتاب نمونه است. برای تعیین بیشینه قدرت رنگی، مقدار بازتاب در طول موج متناظر با بیشینه جذب رنگزا (λ_{max})، یعنی طول موجی که کمینه بازتاب نمونه در آن مشاهده می‌شود، مورد استفاده قرار گرفت. مقدار K/S به‌عنوان شاخص کمی قدرت رنگ در نظر گرفته شد؛ به‌طوری‌که افزایش این مقدار بیانگر افزایش جذب نور و در نتیجه افزایش عمق رنگ نمونه است.

به‌منظور افزایش دقت و اطمینان از نتایج اندازه‌گیری، طیف بازتابی هر نمونه سه مرتبه به‌صورت متوالی توسط دستگاه طیف‌سنج بازتابی اندازه‌گیری شد و مقادیر عوامل رنگ‌سنجی و قدرت رنگ بر اساس میانگین اندازه‌گیری‌ها گزارش گردید. لازم به ذکر است که این تکرارها مربوط به اندازه‌گیری دستگاهی یک نمونه بوده و به‌عنوان تکرار مستقل آزمایش در نظر گرفته نشدند.

به‌منظور ارزیابی پایداری رنگ نمونه‌های رنگرزی‌شده در برابر عوامل متداول مصرف، ثبات شست‌شویی و نوری مورد بررسی قرار گرفت. آزمون ثبات شست‌شویی مطابق استاندارد ISO 105-C06:2010 و با استفاده از دستگاه لندرومتر (Launder-O-meter) مدل Hi-D421235 انجام شد. پس از پایان آزمون، میزان تغییر رنگ نمونه‌ها بر اساس مقیاس خاکستری با درجات ۵-۱ و مطابق

استاندارد ISO 105-A02 ارزیابی شد؛ به‌گونه‌ای که درجه ۱ نشان‌دهنده بیشترین تغییر رنگ و درجه ۵ بیانگر کمترین تغییر رنگ و بالاترین ثبات شست‌شویی بود. ثبات نوری نمونه‌ها مطابق استاندارد ISO 105-B02:2014 و با استفاده از دستگاه سنجش ثبات نوری ساخت شرکت ریس‌سنج ایران، مجهز به لامپ زنون ۱۰۰۰ وات، تعیین شد. مقاومت نمونه‌ها در برابر نور بر اساس مقیاس استاندارد آبی با درجات ۸-۱ ارزیابی گردید؛ به‌طوری‌که افزایش درجه این مقیاس نشان‌دهنده مقاومت بیشتر رنگ در برابر تابش نور بود. این آزمون‌ها برای نمونه کنترل و نمونه‌های پیش‌دندانه‌شده با دندانه‌های فلزی و گیاهی انجام شدند تا اثر نوع دندانه بر پایداری رنگ حاصل از عصاره گندل مورد مقایسه قرار گیرد.

۲ـ۵ـ آزمون فعالیت ضدباکتری

به‌منظور بررسی فعالیت ضدباکتری پارچه‌های پشمی رنگرزی‌شده با عصاره گندل و مقایسه آن با پارچه پشمی رنگرزی‌نشده، آزمون انتشار در آگار انجام شد. فعالیت ضدباکتری نمونه‌ها در برابر دو باکتری *Staphylococcus aureus* و *Escherichia coli* ارزیابی شد. بدین منظور، نمونه‌های پارچه پشمی به ابعاد ۱ × ۱ سانتی‌متر برش داده شدند و پیش از انجام آزمون، به‌منظور جلوگیری از آلودگی میکروبی خارجی، استریل شدند. برای کشت باکتری‌ها از محیط کشت مولر-هینتون آگار (Mueller–Hinton Agar, MHA) استفاده شد. سوسپانسیون‌های تازه باکتریایی تهیه شدند و کدورت هر سوسپانسیون پیش از تلقیح با استفاده از استاندارد ۰/۵ مک‌فارلند تنظیم شد. سپس، ۱۰۰ میکرولیتر از هر سوسپانسیون استانداردشده، تحت شرایط آسپتیک، به‌طور یکنواخت بر سطح محیط کشت در بشقابک‌های ۸ سانتی‌متری پخش شد. سپس نمونه‌های پارچه‌ای مستقیماً بر سطح محیط کشت تلقیح‌شده قرار گرفتند، به‌گونه‌ای که تماس مناسبی بین نمونه و محیط کشت برقرار باشد. بشقابک‌های حاوی نمونه‌ها به مدت ۱۸ ساعت در دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد در گرمخانه[1] قرار داده شدند. پس از پایان این دوره، فعالیت ضدباکتری نمونه‌ها بر اساس تشکیل ناحیه عدم رشد در اطراف نمونه پارچه ارزیابی شد. از هر نمونه در شرایط یکسان تصویربرداری شد و ناحیه مهار رشد در چهار جهت پیرامون نمونه با استفاده از نرم‌افزار ImageJ اندازه‌گیری گردید. سپس میانگین اندازه ناحیه مهار رشد برای هر نمونه محاسبه و بر حسب میلی‌متر گزارش شد.

۳ـ بحث و نتایج

۳ـ۱ـ تعیین شرایط منتخب رنگرزی

در راستای تعیین شرایط مناسب عملیاتی جهت رنگرزی پارچه‌های پشمی با عصاره گیاه گندل، یک رویکرد مرحله‌ای برای تعیین شرایط منتخب رنگرزی به‌کار گرفته شد. در این روش، با پایش شاخص قدرت رنگی، تغییرات پاسخ رنگی نمونه‌ها در اثر تغییر چهار متغیر کلیدی شامل مقدار رنگزا، میزان اسیدی‌بودن حمام، دما و زمان رنگرزی مورد بررسی قرار گرفت. ارزیابی غلظت عصاره گندل (در محدوده ۲۰ تا ۱۰۰ درصد نسبت به وزن کالا) به‌عنوان نخستین متغیر، نشان داد که تغییر مقدار عصاره تأثیر محسوسی بر قدرت رنگی نمونه‌ها دارد. بر اساس داده‌های مندرج در جدول ۲، افزایش غلظت تا مقدار ۸۰ درصد با رشد محسوس مقادیر قدرت رنگی (از ۱/۷۴ به ۳/۸۷) همراه بود. این افزایش می‌تواند با افزایش گرادیان غلظت میان فاز محلول و لیف و در نتیجه افزایش نیروی محرکه انتقال ترکیبات رنگزا مرتبط باشد (۱۵). با وجود این، در غلظت ۱۰۰ درصد، شاخص قدرت رنگی با افت نسبی مواجه شده و به ۳/۶۰ تقلیل یافت. این کاهش احتمالا می‌تواند به نزدیک‌شدن جایگاه‌های قابل دسترس لیف به شرایط اشباع و نیز افزایش احتمال تجمع ترکیبات رنگزا در غلظت‌های بالاتر مرتبط باشد؛ پدیده‌هایی که در صورت وقوع، می‌توانند تحرک و انتشار مؤثر ترکیبات رنگزا به درون ساختار لیف را محدود کنند (۱۶). در نتیجه، مقدار ۸۰ درصد به‌عنوان مقدار مناسب رنگزا انتخاب شد.

در مرحله بعد، اثر pH حمام در محدوده ۷-۳ بررسی شد. بیشترین قدرت رنگی در pH برابر ۳ با مقدار ۴/۱۵ مشاهده شد و با افزایش pH، قدرت رنگی به‌تدریج کاهش یافت و در pH برابر ۷ به ۲/۶۱ رسید. کاهش pH می‌تواند از طریق تغییر وضعیت یونش گروه‌های عاملی پشم و ترکیبات موجود در عصاره، میل جذبی میان رنگزا و لیف را تحت تأثیر قرار دهد. در محیط اسیدی، پروتون‌دارشدن بخشی از گروه‌های آمینی کراتین می‌تواند شرایط مساعدتری برای برهم‌کنش با ترکیبات رنگزای موجود در عصاره فراهم کند (۱۷). علاوه بر برهم‌کنش‌های یونی، پیوندهای هیدروژنی و سایر نیروهای بین‌مولکولی نیز ممکن است در جذب رنگزا نقش داشته باشند. با توجه به اینکه ترکیبات مسئول رنگ و سازوکار اتصال آنها در پژوهش حاضر مستقیماً تعیین نشده‌اند، نمی‌توان افزایش قدرت رنگی را به یک سازوکار پیوندی مشخص نسبت داد. بر این اساس، pH برابر ۳ به‌عنوان مقدار مناسب انتخاب شد.

بررسی اثر دما در محدوده ۱۰۰-۲۰ درجه سانتی‌گراد نشان داد که افزایش دما تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد با افزایش محسوس قدرت رنگی از ۱/۰۸ به ۴/۱۵ همراه بود. افزایش دما می‌تواند با افزایش تحرک مولکولی، تورم لیف و تسهیل انتقال و نفوذ ترکیبات رنگزا در ساختار پشم، جذب رنگزا را افزایش دهد (۱۶، ۱۸). در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، قدرت رنگی تنها اندکی افزایش یافت و به ۴/۲۱ رسید. روند افزایش عمق رنگ با افزایش دما با مشاهدات ولی‌پور و همکارانش درباره رنگرزی خامه پشمی با گندل نیز هم‌سو است،

1. Incubator

هرچند شرایط آزمایش و شاخص‌های ارزیابی دو پژوهش یکسان نیستند (۱۲). بر این اساس، با توجه به افزایش محدود قدرت رنگی از ۸۰ به ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و ملاحظات مصرف انرژی، دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به‌عنوان دمای مناسب فرایند انتخاب شد.

در مرحله نهایی، اثر زمان رنگرزی در بازه ۹۰-۳۰ دقیقه بررسی شد. افزایش زمان از ۳۰ تا ۷۵ دقیقه موجب افزایش قدرت رنگی از ۲/۰۲ به ۴/۱۵ شد که نشان‌دهنده ادامه جذب و انتقال ترکیبات رنگزا در این بازه است. با افزایش زمان از ۷۵ به ۹۰ دقیقه، قدرت رنگی تنها از ۴/۱۵ به ۴/۳۰ افزایش یافت. بنابراین، با توجه به محدودبودن افزایش قدرت رنگی در این بازه و به‌منظور جلوگیری از طولانی‌شدن غیرضروری فرایند، زمان ۷۵ دقیقه به‌عنوان زمان مناسب انتخاب شد. از آنجا که متغیرهای تعادلی و ترمودینامیکی در این پژوهش اندازه‌گیری نشدند، این رفتار صرفاً بر اساس تغییرات قدرت رنگی تفسیر می‌شود.

برآیند نتایج نشان داد که مقدار رنگزای ۸۰ درصد نسبت به وزن کالا، pH برابر ۳، دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۷۵ دقیقه، با توجه به تغییرات قدرت رنگی و ملاحظات فرایندی، به‌عنوان شرایط مناسب و منتخب رنگرزی در نظر گرفته شدند. این شرایط در مراحل بعدی پژوهش برای ارزیابی عملکرد دندانه‌های فلزی و گیاهی ثابت نگه داشته شدند.

جدول ۲: قدرت رنگی پارچه پشمی رنگرزی‌شده با عصاره گندل در مراحل تعیین شرایط مناسب رنگرزی.

Table 2: Color strength of wool fabric dyed with Eremostachys sp. extract during the determination of suitable dyeing conditions.

	Dye concentration (%, owf)	pH	Temperature (°C)	Time (min)	K/S	Selected condition
Step 1	20	4	80	75	1.74	
	40	4	80	75	2.23	
	60	4	80	75	3.50	
	80	4	80	75	3.87	❋
	100	4	80	75	3.60	
Step 2	80	3	80	75	4.15	❋
	80	4	80	75	3.87	
	80	5	80	75	3.34	
	80	6	80	75	2.89	
	80	7	80	75	2.61	
Step 3	80	3	20	75	1.08	
	80	3	40	75	1.83	
	80	3	60	75	3.29	
	80	3	80	75	4.15	❋
	80	3	100	75	4.21	
Step 4	80	3	80	30	2.02	
	80	3	80	45	2.50	
	80	3	80	60	3.86	
	80	3	80	75	4.15	❋
	80	3	80	90	4.30	

۳-۲- ارزیابی ویژگی‌های رنگ‌سنجی و ثباتی نمونه‌های دندانه‌دار

نتایج حاصل از آزمون‌های طیفی و رنگ‌سنجی نشان دادند که نوع دندانه نقش مهمی در تعیین رفتار رنگی و خواص نهایی پارچه‌های پشمی رنگرزی‌شده با عصاره گندل دارد. این تأثیر تنها به تغییر قدرت رنگی محدود نبود، بلکه مؤلفه‌هایی نظیر روشنایی، اشباع رنگ، زاویه فام و خواص ثباتی نمونه‌ها را نیز تحت تأثیر قرار داد. این رفتار با نتایج مطالعات پیشین درباره رنگرزی با گندل هم‌خوانی دارد؛ به‌طوری‌که ویسیان و همکارانش در نخ ابریشم و ولی‌پور و همکارانش در خامه پشمی قالی، تغییر ویژگی‌های رنگی و ثباتی را در اثر تغییر نوع دندانه گزارش کرده‌اند (۱۲، ۱۱). نوع دندانه می‌تواند از طریق تغییر برهم‌کنش میان ترکیبات رنگزا و گروه‌های عاملی لیف و در مورد دندانه‌های فلزی، از طریق تشکیل گونه‌های کمپلکسی، ویژگی‌های طیفی و فام نهایی را تغییر دهد (۵، ۱۹، ۲۰).

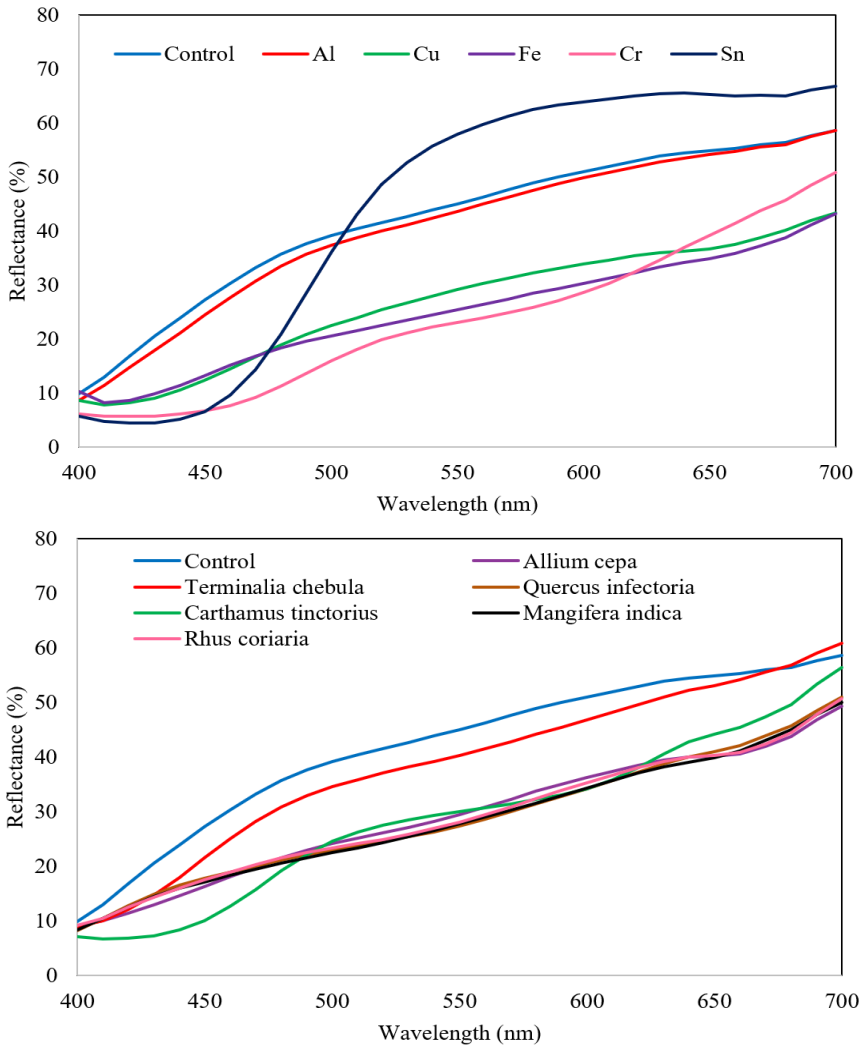
بررسی طیف‌های بازتابی نمونه‌ها در محدوده ۷۰۰-۴۰۰ نانومتر (شکل ۲) حاکی از آن است که نمونه شاهد و اغلب نمونه‌های دندانه‌دارشده، در طول موج‌های کوتاه‌تر ناحیه مرئی (به‌ویژه در محدوده ۵۰۰-۴۰۰ نانومتر)، بازتاب کمتری دارند و با افزایش طول موج، میزان بازتاب آنها افزایش می‌یابد. از آنجا که محدوده ۵۰۰-۴۰۰ نانومتر تقریباً متناظر با بخش بنفش تا آبی طیف مرئی است، کاهش بازتاب در این ناحیه بیانگر جذب بیشتر مؤلفه‌های آبی-بنفش است. در نتیجه این پدیده، سهم نسبی طول موج‌های بلندتر در نور بازتابی افزایش یافته و مشاهده فام‌های عمدتاً زرد، زرد-قهوه‌ای و قهوه‌ای در نمونه‌ها قابل توجیه است. مطالعات اخیر روی رنگرزی پشم با رنگزاهای طبیعی نیز تأیید کرده‌اند که نوع دندانه می‌تواند شکل منحنی بازتابی را در محدوده ۷۰۰-۴۰۰ نانومتر تغییر داده و در نتیجه قدرت و مختصات رنگی را به‌طور قابل توجهی دگرگون سازد (۲۱، ۵).

در میان دندانه‌های فلزی، نمونه دندانه‌دارشده با Sn متمایزترین رفتار طیفی را از خود نشان داد. بازتاب این نمونه در محدوده ۴۷۰-۴۰۰ نانومتر بسیار پایین بود، اما از طول موج ۵۰۰-۴۸۰ نانومتر به‌سرعت روند افزایشی به خود گرفت و در طول موج‌های بلندتر به مقادیر بالایی رسید. بنابراین، جذب بالا در ناحیه آبی-بنفش همراه با بازتاب زیاد طول موج‌های بلندتر، موجب غلبه مؤلفه زرد در رنگ نهایی گردید. تصویر این نمونه در شکل ۳ نیز فام زرد روشن و بسیار اشباع آن را به‌خوبی نشان می‌دهد. داده‌های جدول ۳ نیز این تفسیر را تأیید می‌کنند؛ به‌طوری‌که مقدار b* به ۶۷/۴۷ و C* به ۶۷/۵۱ افزایش یافت و زاویه فامی معادل ۹۱/۹۴ درجه ثبت گردید. هم‌زمان، مقدار بالای روشنایی (L* = ۷۷/۷۱) نشان داد که افزایش قدرت رنگ در طول موج بیشینه جذب در این نمونه، با تیره‌شدن کلی آن همراه نبوده است. در واقع، دندانه Sn با ثبت بیشترین شاخص ($K/S_{\lambda max}$ = ۱۰/۵۴)، بالاترین قدرت رنگی بیشینه را ایجاد نمود، اما توزیع جذب آن در سراسر ناحیه مرئی یکنواخت نبود.

جدول ۳: ویژگی‌های رنگ‌سنجی و ثباتی پارچه پشمی رنگرزی‌شده با عصاره گندل در حضور دندانه‌های فلزی و گیاهی

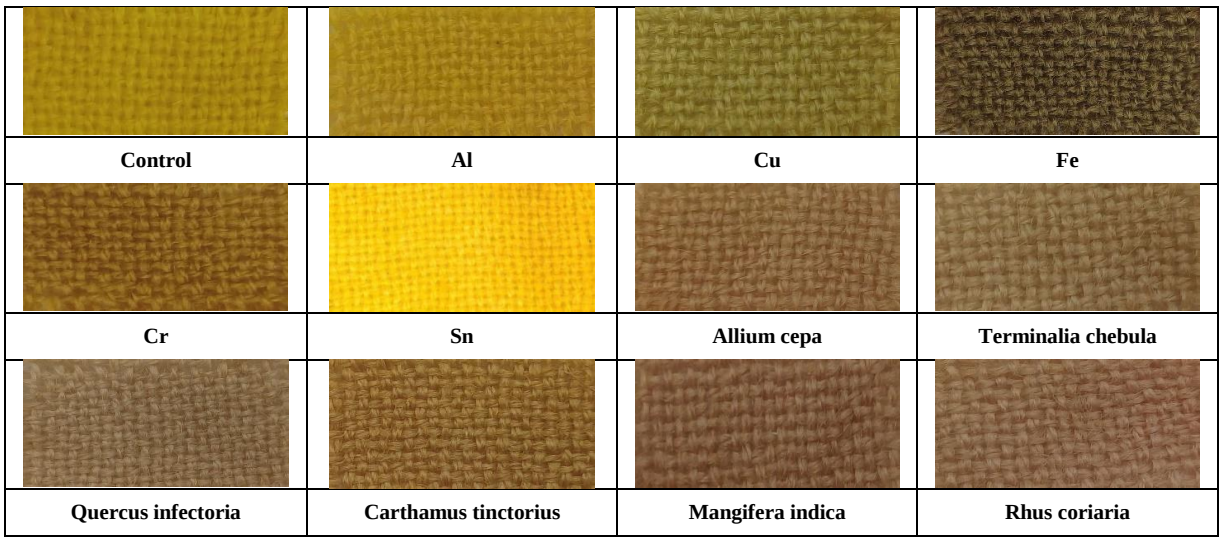
Table 3: Colorimetric and fastness properties of wool fabric dyed with Eremostachys sp. extract using metal and plant-based mordants

Sample	L*	a*	b*	ΔE*ab	C*	h°	$(K/S)_{\lambda max}$	$(K/S)_{ave}$	Wash fastness	Light fastness
Control	72.79	0.74	23.26	--	23.27	88.17	4.15	0.68	3	4
Al	71.80	0.80	25.65	2.58	25.66	88.21	4.84	0.78	4	5-6
Cu	60.24	1.74	29.40	14.00	29.45	86.62	5.54	1.62	4-5	5-6
Fe	57.45	3.40	23.59	15.57	23.83	81.79	5.17	1.63	3-4	6
Cr	54.88	6.11	36.69	23.02	37.19	80.55	7.85	2.60	5	6-7
Sn	77.71	-2.28	67.47	44.58	67.51	91.94	10.54	2.15	4-5	5-6
Allium cepa	61.52	4.60	23.61	11.91	24.05	78.98	4.61	1.27	4	6-7
Terminalia chebula	69.74	1.40	26.97	4.84	27.00	87.03	4.69	0.91	4-5	6-7
Quercus infectoria	60.11	6.59	18.98	14.60	20.09	70.85	5.21	1.27	4	5-6
Carthamus tinctorius	61.27	0.95	34.99	16.44	35.01	88.45	6.54	1.79	4	5-6
Mangifera indica	60.09	6.24	20.13	14.18	21.07	72.78	5.03	1.29	4	5
Rhus coriaria	60.68	6.18	20.29	13.60	21.21	73.05	4.51	1.24	4	6



شکل ۲: اثر دندانه‌های فلزی و گیاهی بر طیف بازتابی پارچه پشمی رنگرزی‌شده با عصاره گندل.

Figure 2: Effect of metal and plant-based mordants on the reflectance spectra of wool fabric dyed with Eremostachys sp. Extract.



شکل ۳: ظاهر نمونه‌های پارچه پشمی رنگرزی‌شده با عصاره گندل دندانه‌دارشده با دندانه‌های فلزی و گیاهی.

Figure 3: Appearance of wool fabric samples dyed with Eremostachys sp. extract after pre-mordanting with metal and plant-based mordants.

رفتار دندانه Cr تفاوت محسوسی با Sn داشت. منحنی بازتابی این نمونه در بخش وسیع‌تری از ناحیه مرئی در مقادیر پایین باقی ماند که نشان می‌دهد فرایند جذب نور، تنها به محدوده باریکی از طول موج‌ها محدود نبوده است. این رفتار با مقدار پایین روشنایی (L* = ۵۴/۸۸)، ظاهر تیره‌تر نمونه در شکل ۳ و همچنین بالاترین مقدار قدرت رنگ متوسط (K/S_{ave} = ۲/۶۰) کاملاً مطابقت دارد. نمونه دندانه‌شده با کروم بازتاب کمتری در بخش وسیع‌تری از ناحیه مرئی نشان داد که با جذب ظاهری گسترده‌تر و فام عمیق‌تر آن سازگار است. مقادیر a* = ۶/۱۱، b* = ۳۶/۶۹ و C* = ۳۷/۱۹ در جدول ۳ نیز نشان می‌دهند که این نمونه علاوه بر تیره‌تر شدن، دارای مؤلفه‌های زرد و قرمز قابل توجهی است. این تفاوتِ عملکردی میان Sn و Cr، اهمیت بررسی هم‌زمان قدرت رنگ بیشینه و متوسط را برجسته می‌سازد؛ زیرا $K/S_{\lambda max}$ شدت جذب را تنها در یک طول موج مشخص بیان می‌کند، درحالی‌که K/S_{ave} اطلاعات جامع‌تری از رفتار جذب در کل محدوده طیف مرئی ارائه می‌دهد.

دندانه‌های Cu و Fe نیز موجب کاهش محسوس بازتاب و روشنایی نسبت به نمونه شاهد شدند. مقدار L* برای Cu و Fe به‌ترتیب به ۶۰/۲۴ و ۵۷/۴۵ تقلیل یافت که این مقادیر با فام‌های تیره‌تر مشاهده‌شده در شکل ۳ هم‌خوانی دارند. در حضور دندانه Cu، افزایش b* به ۲۹/۴۰ و C* به ۲۹/۴۵، نشان‌دهنده تقویت مؤلفه زردی و افزایش اشباع رنگ بود. در مقابل، در نمونه Fe مقدار زردی (b* = 23.59) تقریباً مشابه شاهد باقی ماند، اما افزایش مؤلفه قرمزی (a*) به ۳/۴۰ و کاهش زاویه فام به ۸۱/۷۹ درجه، نشان‌دهنده تغییر فام از زرد تقریباً خالص به سمت ناحیه زرد-قرمز و تشکیل فامی قهوه‌ای‌تر است. دندانه Al رفتار بسیار ملایم‌تری از خود بروز داد؛ به‌نحوی‌که مقدار روشنایی (L* = 71.80) تقریباً مشابه نمونه شاهد بود و افزایش b* به ۲۵/۶۵ عمدتاً بیانگر تقویت زردی، بدون تیره‌شدن محسوس نمونه بود. ثبت مقدار پایین برای اختلاف رنگ کل (ΔE = ۲/۵۸) نیز محدود بودن تغییرات رنگی در حضور Al را تأیید کرد.

اختلاف رفتار یون‌های فلزی را می‌توان با تفاوت در نوع و پایداری برهم‌کنش‌های فلز- رنگزا مرتبط دانست. مطالعات نشان داده‌اند که کمپلکس‌شدن فلاونوئیدها با یون‌های فلزی می‌تواند موقعیت و شدت باندهای جذب را تغییر دهد و عواملی نظیر نوع یون فلزی، ساختار لیگاند، استوکیومتری کمپلکس و pH در تعیین این رفتار نقش دارند (۱۹). Corrente و همکارانش با استفاده از تیتراسیون پتانسیومتری، طیف‌سنجی UV–Vis و FTIR و محاسبات DFT نشان دادند که کوئرستین و لوتئولین قادر به تشکیل گونه‌های کمپلکسی با نسبت‌های مختلف فلز به لیگاند هستند و محل ترجیحی کئوردیناسیون نیز به ساختار فلاونوئید و ماهیت یون فلزی وابسته است (۱۹). بنابراین، تفاوت‌های طیفی مشاهده‌شده میان نمونه‌های دندانه‌دارشده با یون‌های فلزی مختلف می‌تواند با تغییر محیط الکترونی ترکیبات رنگزا در اثر برهم‌کنش فلز-لیگاند مرتبط باشد.

این تفسیر با ساختارهای احتمالی ترکیبات رنگزای گندل نیز سازگار است. در مطالعات پیشین، ساختار عمومی فلاون‌ها به‌عنوان یکی از ساختارهای احتمالی مرتبط با رفتار رنگزایی گندل مطرح شده است (۱۲، ۱۱). وجود گروه‌های عاملی اکسیژن‌دار در ساختار فلاونوئیدها می‌تواند امکان برهم‌کنش و کئوردیناسیون با برخی یون‌های فلزی را فراهم کند. با این حال، از آنجا که ترکیبات مسئول ایجاد رنگ در عصاره گندل و ساختار گونه‌های کمپلکسی تشکیل‌شده در پژوهش حاضر مستقیماً شناسایی نشده‌اند، نقش برهم‌کنش‌های رنگزا-فلز-لیف باید به‌عنوان یک سازوکار احتمالی برای تبیین تفاوت‌های رنگ‌سنجی مشاهده‌شده در نظر گرفته شود.

دندانه‌های گیاهی نیز تغییرات قابل توجهی در منحنی‌های طیف بازتابی ایجاد کردند، هرچند اثر آنها بر افزایش عمق رنگ عموماً کمتر از دندانه‌های فلزی نظیر Sn و Cr بود. در میان مواد گیاهی مورد استفاده به‌عنوان زیست‌دندانه، گلرنگ بیشترین قدرت رنگی را ایجاد کرد؛ به‌طوری‌که مقادیر $K/S_{\lambda max}$ و K/S_{ave} برای این نمونه به‌ترتیب ۶/۵۴ و ۱/۷۹ محاسبه شد. کاهش مقدار L* به ۶۱/۲۷ همراه با افزایش b* و C* به‌ترتیب تا ۳۴/۹۹ و ۳۵/۰۱، نشان‌دهنده ایجاد فامی عمیق‌تر، زردتر و اشباع‌تر نسبت به نمونه شاهد بود. منحنی بازتابی این نمونه نیز بازتاب کمتر در ناحیه طول‌موج‌های کوتاه و افزایش بازتاب در طول‌موج‌های بلندتر را نشان داد که با فام دیداری مشاهده‌شده سازگار است. با توجه به اینکه گلرنگ علاوه بر دارا بودن ترکیبات دارای نقش دندانه‌ای، حاوی ترکیبات رنگزای طبیعی نیز می‌باشد، اثر مشاهده‌شده این گیاه را نمی‌توان صرفاً به عملکرد دندانه‌ای آن نسبت داد. با این حال، با توجه به اینکه مقدار گلرنگ مصرفی به‌عنوان دندانه در مقایسه با مقدار عصاره گندل به‌عنوان رنگزای اصلی بسیار کمتر بوده است، اثر احتمالی ترکیبات رنگزای گلرنگ در رنگ نهایی محدودتر بوده و نتایج حاصل به‌عنوان اثر ترکیبی ویژگی‌های دندانه‌ای گلرنگ، برهم‌کنش آن با رنگزای گندل و سهم احتمالی ترکیبات رنگزای موجود در آن تفسیر می‌شود.

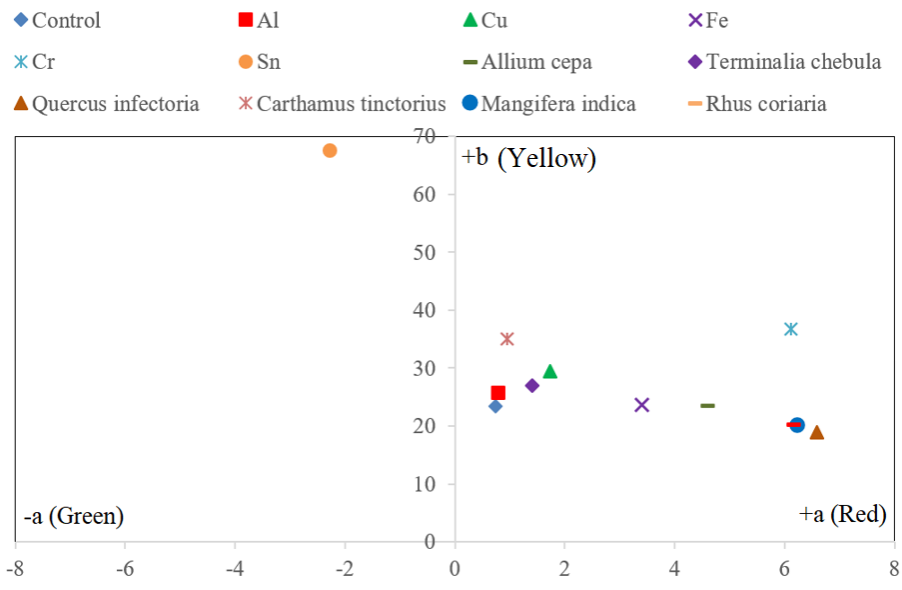
در مقابل، هلیله زرد رفتار طیفی نزدیک‌تری به نمونه شاهد نشان داد. مقدار روشنایی ۶۹/۷۴ و اختلاف رنگ کل ۴/۸۴ بیانگر تغییر نسبتاً محدود ویژگی‌های رنگی نسبت به نمونه شاهد بود، در حالی که مقدار $K/S_{\lambda max}$ از ۴/۱۵ در نمونه شاهد به ۴/۶۹ افزایش یافت. بنابراین، استفاده از هلیله زرد با افزایش ملایم قدرت رنگی و در عین حال تغییر نسبتاً محدود فام نسبت به نمونه شاهد همراه بود. قابلیت استفاده از مواد گیاهی غنی از تانن‌ها و سایر ترکیبات پلی‌فنلی به‌عنوان زیست‌دندانه در رنگرزی طبیعی پشم در مطالعات پیشین نیز مورد توجه قرار گرفته است و گزارش شده است که عملکرد این مواد، بسته به ترکیب شیمیایی، ماهیت رنگزا، نوع لیف و شرایط فرایند،

می‌تواند بر قدرت رنگی، مختصات رنگ‌سنجی و خواص ثباتی منسوجات اثرگذار باشد (۲۲، ۶).

استفاده از مازو، پوست انبه و سماق نیز با تغییر فام نمونه‌ها به سمت نواحی قرمزتر و قهوه‌ای‌تر همراه بود. مقادیر a* برای این سه نمونه به‌ترتیب ۶/۵۹، ۶/۲۴ و ۶/۱۸ و زاویه فام آنها به‌ترتیب ۷۰/۸۵، ۷۲/۷۸ و ۷۳/۰۵ درجه ثبت شد. کاهش زاویه فام در مقایسه با نمونه شاهد با مقدار ۸۸/۱۷ درجه، همراه با افزایش مؤلفه مثبت a*، نشان‌دهنده جابه‌جایی فام از ناحیه زرد به سمت ناحیه زرد-قرمز است. در مورد سماق، مطالعات پیشین حضور ترکیبات پلی‌فنلی، از جمله تانن‌ها و گالوتانن‌ها، را گزارش کرده‌اند و نشان داده‌اند که کاربرد عصاره آن در رنگرزی الیاف مختلف می‌تواند موجب تغییرات قابل اندازه‌گیری در مختصات فضای رنگی CIELAB شود (۲۳).

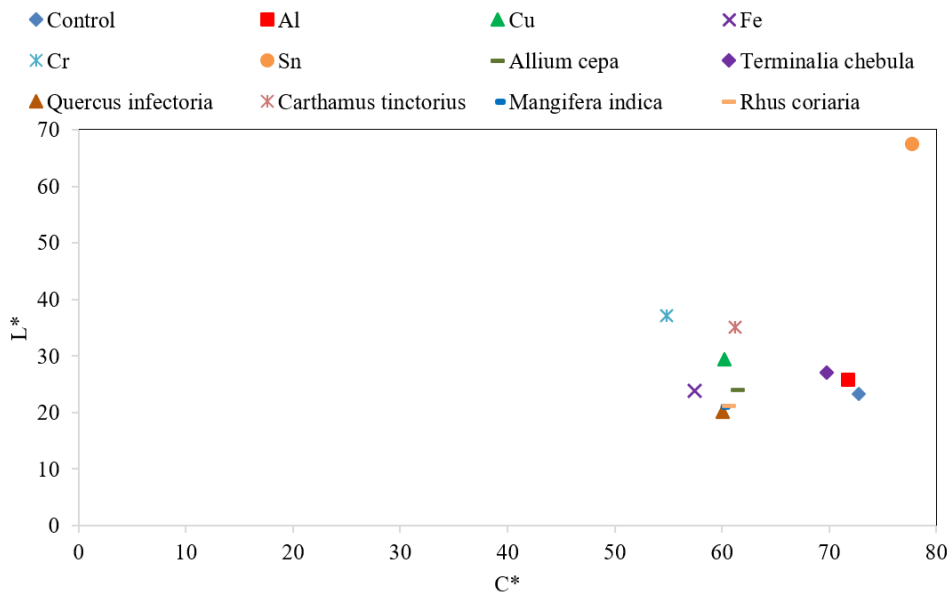
نحوه پراکنش نمونه‌ها در فضای دوگانه رنگی CIELAB (شکل ۴) نیز تفاوت اثر دندانه بر ماهیت فام را نشان می‌دهد. تقریباً تمامی نمونه‌ها دارای مقادیر مثبت a* و b* بودند و در نتیجه در ناحیه زرد-قرمز فضای رنگی قرار گرفتند. در این میان، تنها نمونه دندانه داده شده با Sn دارای مقدار منفی a* بود که همراه با مقدار بالای b*، قرارگیری آن در ناحیه زرد با گرایش جزئی به سمت سبز را نشان می‌دهد. بررسی هم‌زمان مقادیر L* و C* (شکل ۵) نشان داد که نمونه دندانه‌شده با Cr دارای کمترین مقادیر روشنایی و نمونه Sn دارای بیشترین اشباع رنگ بود. بنابراین، نوع دندانه علاوه بر قدرت رنگی، بر روشنایی، فام و اشباع رنگ نمونه‌ها نیز تأثیر گذاشت. این روند با نتایج مطالعات پیشین درباره رنگرزی گندل هم‌خوانی دارد؛ به‌طوری‌که در رنگرزی نخ ابریشم و خامه پشمی قالی نیز تغییر نوع دندانه موجب جابه‌جایی محسوس مختصات رنگی و تغییر روشنایی و فام نمونه‌ها شده است (۱۲، ۱۱). مطالعات دیگر درباره دندانه‌های فلزی و زیست‌پایه نیز تأثیر نوع دندانه بر مختصات CIELAB و ویژگی‌های رنگی منسوجات پشمی را گزارش کرده‌اند (۲۲، ۲۱).

مقایسه تطبیقی مقادیر قدرت رنگی در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داد که رتبه‌بندی عملکرد دندانه‌ها بر پایه شاخص $K/S_{\lambda max}$، لزوماً با رتبه‌بندی آنها بر اساس K/S_{ave} یکسان نیست. دندانه Sn با ثبت عدد ۱۰،۵۴ دارای بالاترین $K/S_{\lambda max}$ بود، درحالی‌که دندانه Cr با ثبت عدد ۲،۶۰ بیشترین میزان K/S_{ave} را به خود اختصاص داد. در گروه دندانه‌های گیاهی نیز، گلرنگ به‌طور هم‌زمان بیشترین مقادیر را در هر دو شاخص ($K/S_{\lambda max}$ = 6.54) و (K/S_{ave} = 1.79) ایجاد نمود. بروز این اختلاف میان دو شاخص یادشده، مستقیماً از شکل متفاوت منحنی‌های بازتابی نشأت می‌گیرد؛ بدین معنا که یک دندانه خاص ممکن است موجب کاهش شدید بازتاب و در نتیجه افزایش قدرت رنگی در محدوده‌ای محدود از طیف شود، درحالی‌که دندانه دیگر، کاهش بازتاب ملایم‌تر اما گسترده‌تری در محدوده مرئی نشان دهد. گزارش‌های علمی جدید در حوزه رنگرزی طبیعی الیاف پشم نیز بر اهمیت بررسی طیف بازتابی در کنار شاخص‌های قدرت رنگی و مختصات رنگ‌سنجی تأکید کرده‌اند (۲۱، ۵).



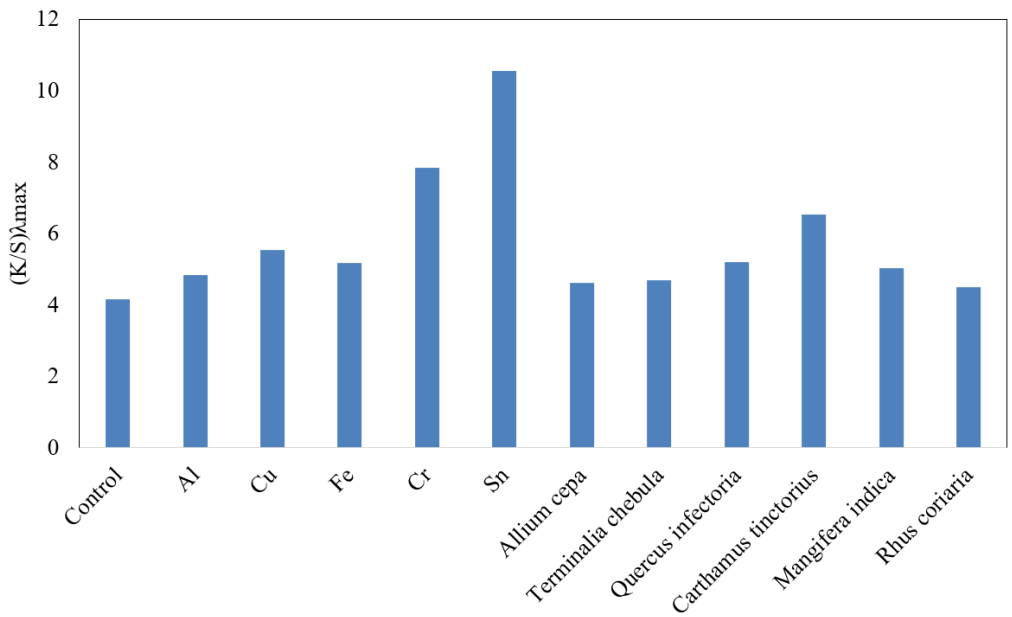
شکل ۴: پراکنش نمونه‌های پشمی دندانه‌دارشده در فضای رنگی a*–b* پس از رنگرزی با رنگزای طبیعی گندل.

Figure 4: Distribution of mordanted wool fabric samples in the a*-b* after dyeing with Eremostachys sp. Extract.



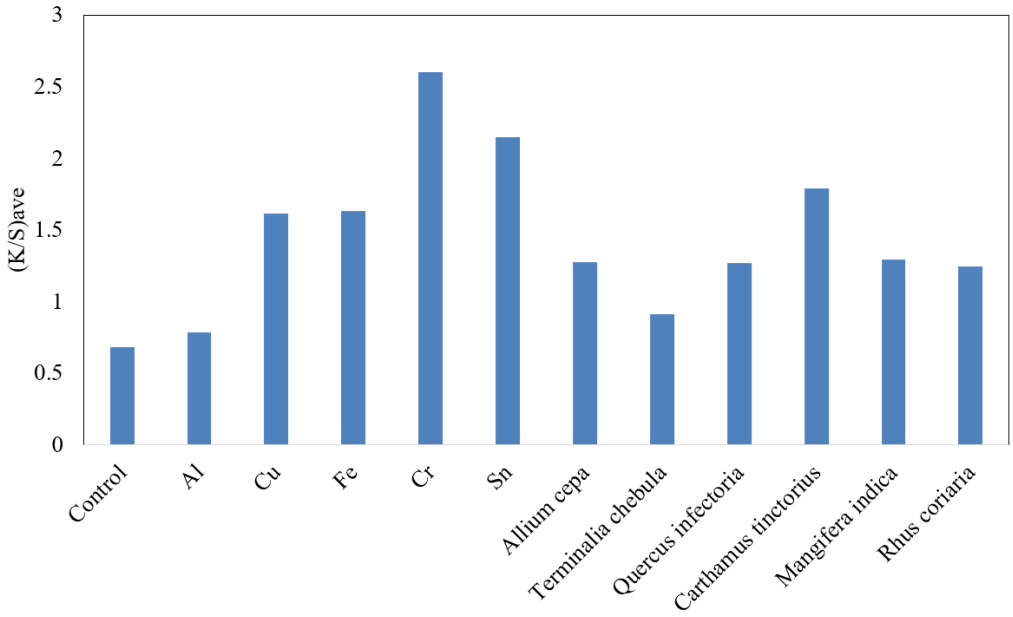
شکل ۵: پراکنش نمونه‌های پشمی دندانه‌دارشده در فضای رنگی C*–L* پس از رنگرزی با رنگزای طبیعی گندل.

Figure 5: Distribution of mordanted wool fabric samples in the C*-L* after dyeing with Eremostachys sp. Extract.



شکل ۶: قدرت رنگی بیشینه پارچه پشمی رنگرزی‌شده با عصاره گندل در حضور دندانه‌های فلزی و گیاهی.

Figure 6: Maximum color strength of wool fabric dyed with Eremostachys sp. extract using metal and plant-based mordants.

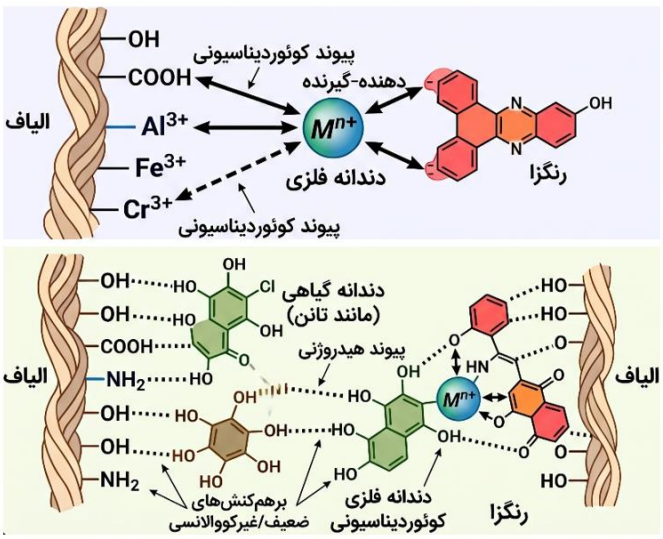


شکل ۷: قدرت رنگی متوسط پارچه پشمی رنگرزی‌شده با عصاره گندل در حضور دندانه‌های فلزی و گیاهی.

Figure 7: Average color strength of wool fabric dyed with Eremostachys sp. extract using metal and plant-based mordants.

سازوکار عملکرد زیست‌دندانه‌ها را نمی‌توان صرفاً به تشکیل یک نوع پیوند شیمیایی مشخص تقلیل داد. زیست‌دندانه‌های گیاهی در واقع ترکیب‌های پیچیده‌ای از تانن‌ها، فلاونوئیدها و سایر ماکرومولکول‌های پلی‌فنلی هستند که قابلیت آن را دارند تا از طریق تشکیل پیوندهای هیدروژنی، برهم‌کنش‌های الکترواستاتیک، نیروهای واندروالس و سایر برهم‌کنش‌های ضعیف غیرکووالانسی، با ترکیبات رنگزا و گروه‌های عاملی ساختار کراتین پشم وارد مشارکت شوند (۶، ۲۲). علاوه بر این، برخی از این زیست‌دندانه‌ها خود واجد ترکیبات رنگ‌ساز هستند؛ در نتیجه، بخشی از نوسانات مشاهده‌شده در مؤلفه‌های *L، *a، *b و *C می‌تواند مستقیماً ناشی از رسوب و مشارکت ترکیبات رنگی خود زیست‌دندانه در تشکیل فام نهایی باشد. این فرضیه به‌خوبی توضیح می‌دهد که برخی دندانه‌های گیاهی توانسته‌اند بدون افزایش چشمگیر در شاخص قدرت رنگی، تغییرات محسوسی در زاویه فام یا سطح روشنایی منسوج ایجاد نمایند. در نهایت، اثر نهایی یک زیست‌دندانه باید به‌عنوان برآیندی از برهم‌کنش‌های سه‌گانه رنگزا-لیف، زیست‌دندانه-لیف و رنگزا-زیست‌دندانه در نظر گرفته شود (شکل ۸) و تقلیل آن به یک سازوکار منفرد، بدون انجام آزمون‌های دقیق شیمیایی برای شناسایی ترکیبات فعال، رویکردی علمی نخواهد بود (۲۰، ۶).

نتایج ارزیابی ثبات رنگ (جدول ۳) نشان داد که نمونه شاهد به‌طور ذاتی از ثبات شست‌شویی درجه ۳ و ثبات نوری درجه ۴ برخوردار است و اعمال عملیات دندانه‌دادن در اکثر موارد منجر به بهبود یک یا هر دو ویژگی گردید. در گروه دندانه‌های فلزی، Cr با ارتقای ثبات شست‌شویی به سطح ۵ و ثبات نوری به سطح ۷-۶، بهترین عملکرد جامع را از خود نشان داد. دندانه‌های Cu و Sn نیز باعث ایجاد ثبات شست‌شویی در سطح ۴-۵ و ثبات نوری ۵-۶ شدند؛ این در حالی است که Fe با وجود ثبت ثبات شست‌شویی متوسط (۳-۴)، مقاومت نوری بسیار خوبی (درجه ۶) از خود بروز داد.



شکل ۸: مکانیزم های پیشنهادی برهمکنش رنگزا-دندانه-الیاف.

Figure 8: Proposed mechanisms for dye–mordant–fiber interaction.

بهبود ثبات شست‌شویی در نمونه‌های دندانه‌دارشده می‌تواند با تقویت برهم‌کنش‌های میان گونه‌های رنگی، دندانه و گروه‌های عاملی لیف و در نتیجه کاهش قابلیت واجذب رنگزا طی شستشو مرتبط باشد. در مورد دندانه‌های فلزی، تشکیل گونه‌های کمپلکسی نسبتاً پایدار میان یون فلزی و ترکیبات رنگزا نیز می‌تواند یکی از عوامل مؤثر بر افزایش تثبیت رنگ باشد (۲۰).

با این حال، روند تغییرات خواص ثباتی لزوماً تابعی خطی از روند تغییرات قدرت رنگی نبود. به‌عنوان مثال، Sn با وجود ایجاد بالاترین میزان $K/S_{\lambda max}$، نتوانست ثبات شست‌شویی و نوری خوبی را در مقایسه با Cr ایجاد کند. همچنین دندانه Fe با وجود ایجاد عمق رنگ کمتر نسبت به Cr و Sn، مقاومت نوری بسیار مطلوبی به ثبت رساند. این مشاهدات نشان می‌دهند که شاخص عمق رنگ به‌تنهایی نمی‌تواند عامل قابل اتکایی برای پیش‌بینی خواص ثباتی منسوج باشد؛ زیرا که پایداری رنگ، افزون بر غلظت رنگزای جذب‌شده، تابعی پیچیده از ماهیت شیمیایی گونه رنگی تشکیل‌شده، نوع دندانه، شدت و ماهیت برهم‌کنش‌های رنگزا-دندانه-لیف و همچنین میزان حساسیت سیستم رنگ‌ساز به عوامل تخریب‌کننده نورشیمیایی است (۲۲، ۲۰). مطالعات پیرامون عملکرد دندانه‌های فلزی و زیستی نیز با صراحت تأیید کرده‌اند که ارتقای شاخص قدرت رنگی، لزوماً تضمین‌کننده بهبود همگن و یکسان تمامی خواص ثباتی نیست (۲۲، ۶).

در ارزیابی گروه دندانه‌های گیاهی، هلیله زرد با ثبات شست‌شویی ۵-۴ و ثبات نوری بسیار عالی ۷-۶، عملکردی کاملاً مطلوب و قابل رقابت با دندانه‌های فلزی ارائه نمود. پوست پیاز سفید نیز مقاومت نوری ۷-۶ و سماق مقاومت نوری درجه ۶ را به ثبت رساندند؛ درحالی‌که سایر دندانه‌های گیاهی در حالت کلی ثبات شست‌شویی در سطح ۴ و ثبات نوری در بازه ۶-۵ را از خود نشان دادند. این نتایج به‌روشنی گویای آن است که انتخاب و ارزیابی زیست‌دندانه‌ها نباید صرفاً با هدف بیشینه‌سازی قدرت رنگی صورت پذیرد؛ زیرا برخی از این منابع گیاهی با وجود تأثیرگذاری متوسط بر شاخص قدرت رنگی، توانایی ایجاد پایداری رنگی بسیار بالایی را دارند. چنین یافته‌هایی با نتایج پژوهش‌های اخیر بر روی الیاف پشم زیست‌دندانه‌شده کاملاً هم‌راستا بوده و تأیید می‌کنند که نوع و ساختار شیمیایی زیست‌دندانه می‌تواند به‌طور مستقل و مجزا بر روی عوامل قدرت رنگ و ثبات رنگی تأثیر بگذارد (۲۲).

تفاوت مشاهده‌شده در رفتار ثباتی دندانه‌های فلزی و گیاهی می‌تواند با ماهیت متفاوت برهم‌کنش‌های ایجادشده در ساختار رنگزا-دندانه-لیف مرتبط باشد. در ساختارهای حاوی یون‌های فلزی، تشکیل گونه‌های کمپلکسی میان یون فلزی و ترکیبات رنگزا می‌تواند موجب تغییر ویژگی‌های الکترونی رنگ‌سازها و در برخی شرایط کاهش حساسیت آنها به تخریب نورشیمیایی شود (۲۰، ۲۲). بنابراین، عملکرد مطلوب کروم در آزمون ثبات نوری با چنین سازوکاری سازگار است. در مقابل، عملکرد مطلوب دندانه‌های گیاهی نظیر هلیله زرد و پوست پیاز، مستقیماً به اثرات هم‌افزایی[1] تانن‌ها و ماکرومولکول‌های پلی‌فنلی بازمی‌گردد (۶). این ماکرومولکول‌های زیستی، از طریق ایجاد یک شبکه متراکم فضایی با اتصال عرضی[2] متشکل از پیوندهای هیدروژنی و آب‌گریز میان رنگزا و آمینواسیدهای پشم، تحرک‌پذیری ترکیبات رنگی را محدود ساخته و سدی فیزیکی در برابر خروج رنگزا یا تخریب آن ایجاد می‌نمایند (۱، ۶).

۳-۳- ارزیابی فعالیت ضدباکتری

نتایج حاصل از آزمون انتشار در آگار نشان داد که فرایند رنگرزی پارچه پشمی با عصاره گیاه گندل با افزایش فعالیت مهاری در برابر هر دو سویه باکتریایی *S. aureus* و *E. coli* همراه بود. بر پایه داده‌های مندرج در جدول ۴، میانگین پهنای ناحیه عدم رشد در برابر باکتری *S. aureus* از ۰/۳۰ میلی‌متر در نمونه خام (رنگرزی‌نشده) به ۰/۹۲ میلی‌متر در نمونه رنگرزی‌شده ارتقا یافت. همچنین، درحالی‌که نمونه شاهد فاقد هرگونه هاله بازدارندگی در برابر باکتری *E. coli* بود، پس از انجام عملیات رنگرزی، ناحیه‌ای مهاری با پهنای متوسط ۰/۸۴ میلی‌متر در اطراف لیف تشکیل گردید. این مشاهدات نشان دادند که رنگرزی با عصاره گندل می‌تواند موجب ایجاد اثر مهاری محدود در شرایط آزمون انتشار در آگار شود که احتمالاً با حضور ترکیبات زیست‌فعال باقی‌مانده از عصاره گیاهی مرتبط است. در مطالعات پیشین درباره گندل، ساختارهای فلاونوئیدی، به‌ویژه ساختار عمومی فلاون‌ها، به‌عنوان ترکیبات احتمالی مرتبط با رفتار رنگزایی این گیاه مطرح شده‌اند (۱۲، ۱۱). به‌طور کلی، ترکیبات پلی‌فنلی گیاهی می‌توانند از طریق سازوکارهایی نظیر برهم‌کنش با غشای سلولی و پروتئین‌های غشایی و ایجاد تغییر در نفوذپذیری غشا، بر رشد برخی باکتری‌ها اثر بگذارند (۲۴).

جدول ۴: میانگین پهنای ناحیه مهار رشد باکتریایی برای پارچه پشمی رنگرزی‌نشده و رنگرزی‌شده با عصاره گندل.

Table 4: Mean bacterial inhibition-zone width of undyed and Eremostachys sp. extract-dyed wool fabrics.

Sample	Un-dyed (mm)	Dyed (mm)
S. aureus	0.30±0.005	0.92±0.005
E. coli	0±0.000	0.84±0.009

1. Synergistic
2. Cross-linking

در تفسیر دقیق این یافته‌ها، توجه به ماهیت روش ارزیابی (انتشار در آگار) حائز اهمیت فراوان است؛ زیرا ابعاد ناحیه عدم رشد نه‌تنها به پتانسیل ذاتی ترکیبات ضدباکتری وابسته است، بلکه مستقیماً تحت تأثیر سینتیک رهایش[1]این ترکیبات از سطح منسوج و ضریب نفوذپذیری آن‌ها در محیط آگار قرار دارد (۲۵). در منسوجات رنگرزی‌شده، تشکیل پیوندهای مستحکم میان ترکیبات گیاهی و ساختار کراتین پشم می‌تواند مهاجرت این عوامل فعال را به محیط کشت به‌شدت محدود سازد؛ ازاین‌رو، کوچک‌بودن عرض ناحیه مهار، الزاماً مترادف با ضعف فعالیت ضدباکتری در سطح فیزیکی لیف نیست. این محدودیت روش‌شناختی در مطالعات پیشین مرتبط با منسوجات رنگرزی‌شده با منابع گیاهی نیز مورد تأکید قرار گرفته است. بر این اساس، می‌توان نتیجه‌گیری نمود که پارچه پشمی رنگرزی‌شده با عصاره گندل در شرایط آزمون انتشار در آگار، اثر مهاری محدودی اما قابل مشاهده نشان داد.

بهره‌گیری از آزمون‌های کمی (نظیر ارزیابی درصد کاهش جمعیت باکتری) در مطالعات آتی می‌تواند تصویر جامع‌تر و دقیق‌تری از شدت، بازده و دوام خواص بهداشتی این الیاف ارائه نماید (۲۵).

۴ـ نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، ظرفیت گیاه گندل به‌عنوان منبعی طبیعی برای رنگرزی پارچه پشمی از نظر شرایط فرایندی، ویژگی‌های رنگ‌سنجی و ثباتی در حضور دندانه‌های فلزی و گیاهی و نیز عملکرد ضدباکتری ارزیابی شد. بررسی مرحله‌ای متغیرها نشان داد که مقدار رنگزای ۸۰ درصد نسبت به وزن کالا، pH برابر ۳، دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۷۵ دقیقه، شرایط عملیاتی مناسبی برای دستیابی به قدرت رنگی مطلوب فراهم می‌کنند. نتایج حاصل از طیف‌های بازتابی و عوامل CIELABنشان دادند که نوع دندانه علاوه بر میزان جذب رنگزا، بر روشنایی، خلوص و زاویه فام نیز اثرگذار است. در میان دندانه‌های فلزی، قلع با ایجاد بیشترین قدرت رنگ در طول موج بیشینه جذب (۱۰/۵۴)، فامی زرد، روشن و با اشباع بالا ایجاد کرد؛ در حالی که کروم با بیشترین قدرت رنگ متوسط (۲/۶۰)، روشنایی کمتر و جذب گسترده‌تر در ناحیه مرئی، فامی عمیق‌تر به وجود آورد. کروم همچنین با ثبات شست‌شویی درجه ۵ و ثبات نوری ۶-۷، مطلوب‌ترین عملکرد ثباتی را در میان دندانه‌های فلزی نشان داد. این تفاوت‌ها بیانگر آن است که ارزیابی یک سامانه رنگرزی نباید صرفاً بر شاخص قدرت رنگ متکی باشد و بررسی هم‌زمان ویژگی‌های طیفی، عوامل رنگ‌سنجی و خواص ثباتی برای انتخاب مناسب دندانه ضروری است.

دندانه‌های گیاهی نیز تغییرات قابل توجهی در ویژگی‌های رنگی و ثباتی نمونه‌ها ایجاد کردند. در این گروه، گلرنگ بیشترین قدرت رنگ را فراهم کرد، در حالی که هلیله زرد با ایجاد تغییر نسبتاً محدود در ماهیت فام، ثبات شست‌شویی ۵-۴ و ثبات نوری ۷-۶ را نشان داد. پوست پیاز نیز از نظر ثبات نوری عملکرد مطلوبی داشت. این یافته‌ها نشان می‌دهند که برخی دندانه‌های گیاهی می‌توانند در شاخص‌های مشخص رنگی یا ثباتی، قابلیت رقابت با دندانه‌های فلزی را نشان دهند و از این طریق زمینه کاهش وابستگی به برخی دندانه‌های فلزی را فراهم سازند. با این حال، نتایج حاضر جایگزینی کامل دندانه‌های گیاهی با تمام دندانه‌های فلزی را تأیید نمی‌کند و انتخاب آنها باید متناسب با فام، عمق رنگ و سطح ثبات مورد انتظار محصول نهایی صورت گیرد.

رنگرزی با عصاره گندل همچنین با ایجاد فعالیت ضدباکتری در برابر باکتری‌های S. aureus و E. coli همراه بود. پهنای متوسط ناحیه مهار برای پارچه رنگرزی‌شده به‌ترتیب ۰/۹۲ و ۰/۸۴ میلی‌متر در برابر این دو باکتری به دست آمد. با توجه به محدود بودن این مقادیر و وابستگی آزمون انتشار در آگار به میزان رهایش و انتشار ترکیبات فعال از سطح منسوج، نتایج مذکور باید به‌عنوان فعالیت ضدباکتری محدود اما قابل مشاهده تفسیر شوند.

از محدودیت‌های اصلی این پژوهش می‌توان به شناسایی‌نشدن مستقیم ترکیبات مسئول ایجاد رنگ و فعالیت زیستی و نیز تعیین‌نشدن ساختار گونه‌های احتمالی رنگزا-دندانه-لیف اشاره کرد؛ ازاین‌رو، تبیین‌های سازوکاری ارائه‌شده نیازمند تأیید با روش‌های تجزیه‌ای تکمیلی هستند. همچنین، تغییرپذیری طبیعی ترکیب شیمیایی مواد گیاهی می‌تواند بر تکرارپذیری عملکرد رنگرزی اثرگذار باشد. در پژوهش‌های آینده، شناسایی ترکیبات فعال عصاره با روش‌هایی نظیر LC–MS/MS، بررسی برهم‌کنش‌های ایجادشده روی لیف با روش‌های طیف‌سنجی مناسب، ارزیابی کمی فعالیت ضدباکتری و دوام آن پس از چرخه‌های شستشو و بررسی فرایند در مقیاس نیمه‌صنعتی می‌تواند ارزیابی دقیق‌تری از قابلیت کاربردی این پژوهش فراهم کند.

تشکر و قدردانی

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از حمایت‌ها و همکاری‌های ارزشمند دانشگاه شهرکرد در انجام این پژوهش صمیمانه قدردانی نمایند.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

1. Release

۵ـ مراجع

1. Repon MR, Dev B, Rahman MA, Jurkonienė S, Haji A, Alim MA, et al. Textile dyeing using natural mordants and dyes: a review. Environ Chem Lett. 2024;22(3):1473-520. https://doi.org/10.1007/s10311-024-01716-4.
2. Tehrani M, Sadeghi-Kiakhani M, Zarei F. Synergistic Effects of Natural Colorants Derived from Oak bark, Spent Coffee Grounds, Cinnamon, and Clove on the Colorimetric Properties and Fastness Performance of Dyed Wool Fabrics. J Color Sci Tech. 2026;20(1):1-15. https://doi.org/10.30509/jcst.2026.167781.1283 [In Persian]
3. Pizzicato B, Pacifico S, Cayuela D, Mijas G, Riba-Moliner M. Advancements in sustainable natural dyes for textile applications: a review. Molecules. 2023;28(16):5954. https://doi.org/10.3390/molecules28165954.
4. Safapour S, Rather LJ, Safapour R, Mir SS. Valorization of bio-colorants extracted from Hypercium scabrum L. plant for sustainable and ecological coloration of wool yarns. Heliyon. 2023;9(9):e19439. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19439.
5. Shokrzadeh S, Razbin M, Ghaheh FS, Tehrani M, Sadrjahani M. Optimizing the eco-friendly dyeing of wool and nylon fabrics with Prangos ferulacea (L.) Lindl using artificial intelligence. Sci Rep. 2025;15:13267. https://doi.org/10.1038/s41598-025-97551-w.
6. Benli H. Bio-mordants: a review. Environ Sci Pollut Res Int. 2024; 31(14):20714-71. https://doi.org/10.1007/s11356-024-32174-8.
7. Manian AP, Paul R, Bechtold T. Metal mordanting in dyeing with natural colourants. Color Technol. 2016;132(2):107-113. https://doi.org/10.1111/cote.12199.
8. Hosseinnezhad M, Gharanjig K, Adeel Sh, Mahmoudi Nahavandi AR. Extraction and Study of the Use of Oleaster Fruit Waste as Natural Mordant in Dyeing Wool Yarns. J Color Sci Tech. 2024;18(1):1-9. https://dorl.net/dor/20.1001.1.17358779.1402.18.1.1.3[In Persian].
9. Hosseinnezhad M, Gharanjig K, Imani H, Razani N. Green dyeing of wool yarns with yellow and black myrobalan extract as bio-mordant with natural dyes. J Nat Fibers. 2022;19(10):3893-915. https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1848735.
10. Ittig A. Baḵtīārī tribe iii. Baḵtīārī carpets. Encyclopaedia Iranica. 1988;3(5):561-2.
11. Veysian SM, Heidari Golfazani ME, Karimshahi K, Azizi Heris E, Parasteh Z. Dyeing of silk yarn with Eremostachys sp plant dye. In: Proceedings of the 2nd National Seminar on Handmade Carpet Research. Vol. 1. Tehran: Iran National Carpet Center; 2007. 11-19 [In Persian].
12. Valipour P, Heidari ME, Veysian SM, Sheikhi B. Comparison of physical and mechanical properties of carpet pile yarn dyed with weld and Eremostachys sp plant dyes. In: Proceedings of the 2nd National Seminar on Handmade Carpet Research. Vol. 1. Tehran: Iran National Carpet Center; 2007. 279-286. [In Persian].
13. Hayati M. Dyeing of fibers with natural dyes. 2005. [In Persian].
14. Tarhan A, Fırat M, Topal G. Comprehensive study of all Gundelia L. taxa exists in the globe: an insight on LC-MS/MS based phytochemical investigation and bioactivity potential of 22 species. Biochem Syst Ecol. 2023;109:104672. https://doi.org/10.1016/j.bse.2023.104672.
15. Samanta AK, Agarwal P. Application of natural dyes on textiles. Indian J Fibre Text Res. 2009;34(4):384-99.
16. Haji A. Functional dyeing of wool with natural dye extracted from Berberis vulgaris wood and Rumex hymenosepolus root as biomordant. Iran J Chem Chem Eng. 2010;29(3):55-60.
17. Sadeghi-Kiakhani M, Hashemi E, Gharanjig K. Inorganic nanoparticles and natural dyes for production of antimicrobial and antioxidant wool fiber. 3 Biotech. 2019;9(12):456. https://doi.org/10.1007/s13205-019-1974-3.
18. Ghaheh FS, Nateri AS, Mortazavi SM, Abedi D, Mokhtari J. The effect of mordant salts on antibacterial activity of wool fabric dyed with pomegranate and walnut shell extracts. Color Technol. 2012;128(6):473-8. https://doi.org/10.1111/j.1478-4408.2012.00402.x.
19. Corrente GA, Malacaria L, Beneduci A, Marino T, Furia E. Quercetin and luteolin complexation with first-row transition metals in purely aqueous solutions: stoichiometry and binding site selectivity. Dalton Trans. 2025;54(19):7828-37. https://doi.org/10.1039/D5DT00478K.
20. Islam S, Jalil MA, Belowar S, Saeed MA, Hossain S, Rahamatolla M, et al. Role of mordants in natural fabric dyeing and their environmental impacts. Environ Sci Pollut Res Int. 2025;32(2):452-68. https://doi.org/10.1007/s11356-024-35746-w.
21. Eyupoglu S, Eyupoglu C, Merdan N. Investigation of dyeing behaviors of bio-mordanted wool fabric dyed with natural dye. Fibers Polym. 2025;26(2):707-21. https://doi.org/10.1007/s12221-025-00858-8.
22. Scarano P, Prigioniero A, Tartaglia M, Zuzolo D, Maisto M, Ranauda MA, et al. Rhus coriaria L. in tradition and innovation like natural dye. Sci Rep. 2024;14:12068. https://doi.org/10.1038/s41598-024-62528-8.
23. Veysian M, Shams-Nateri A. The effects of bio-mordants and metal mordants on colour sensitivity in wool dyeing with natural dyes. Color Technol. 2026:1-15. https://doi.org/10.1111/cote.70054.
24. Davidova S, Galabov AS, Satchanska G. Antibacterial, antifungal, antiviral activity, and mechanisms of action of plant polyphenols. Microorganisms. 2024;12(12):2502. https://doi.org/10.3390/microorganisms12122502.
25. Hossain TJ. Methods for screening and evaluation of antimicrobial activity: a review of protocols, advantages, and limitations. Eur J Microbiol Immunol (Bp). 2024;14(2):97-115. https://doi.org/10.1556/1886.2024.00035.

How to cite this article:
Tehrani M, Sadeghi-Kiakhani M, Mohammadi N. Sustainable Wool Fabric Dyeing with Eremostachys sp. Extract: Comparison the Effects of Metallic and Plant-Based Mordants on Colorimetric, Fastness, and Antibacterial Properties. J Color Sci Tech. 2026;20(2):165-181. https://doi.org/10.30509/jcst.2026.167880.1292 [In Persian]