

مقاله پذیرفته شده

عنوان مقاله: بهینه‌سازی رنگرزی پشم فرش دستباف با عصاره میوه اوپنتیا: ارزیابی ویژگی‌های رنگی و پایداری

نویسندگان: سعیده رفیعی، پیمان ولی پور، امید اعلایی، زینت‌السادات حسینی

شماره مقاله: JCST-2503-1254

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳-۱۲-۱۹

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۴-۰۴-۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴-۰۴-۰۹

این فایل pdf مقاله ویرایش نشده است که برای چاپ پذیرفته شده است. مکت مقاله توسط دفتر نشریه علوم و فناوری رنگ تهیه شده و قبل از چاپ برای ویرایش نهایی به نویسنده مسئول مقاله ارسال می‌شود.

Accepted Manuscript

Title: Optimization of Wool Yarn Dyeing for Handwoven Carpets Using Opuntia Fruit Extract: Color Properties and Fastness Evaluation

Authors: Saeedeh Rafiei, Peiman Valipour, Omid Alaie, Zinatossadat Hossaini

To appear in: Journal of Color Science and Technology

Receives date: 09-03-2025

Revises date: 28-06-2025

Accepted date: 30-06-2025

Please cite this article as:

Rafiei S, Valipour P, Alaie O, Hossaini Z. Optimization of Wool Yarn Dyeing for Handwoven Carpets Using Opuntia Fruit Extract: Color Properties and Fastness Evaluation. J Color Sci Tech. (2025): JCST-2503-1254.

This is a PDF file of an unedited manuscript that has been accepted for publication. The manuscript will undergo copyediting, typesetting, and review of the resulting proof before it is published in its final form.



بهینه‌سازی رنگرزی پشم فرش دستباف با عصاره میوه اوپنتیا: ارزیابی ویژگی‌های رنگی و پایداری

سعیده رفیعی^{۱*}، پیمان ولی پور^۲، امید اعلایی^۳، زینت‌السادات حسینی^۴

آدرس ایمیل نویسنده مسئول: s_rafieei@shirazartu.ac.ir

۱. استادیار، گروه فرش، دانشکده هنرهای صناعی، دانشگاه هنر شیراز، شیراز، ایران.

۲. دانشیار، گروه مهندسی نساجی و پوشاک، واحد قائم‌شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، قائم‌شهر، ایران.

۳. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی نساجی و پوشاک، واحد قائم‌شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، قائم‌شهر، ایران.

۴. دانشیار گروه شیمی، واحد قائم‌شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، قائم‌شهر، ایران.

چکیده

این پژوهش به بررسی قابلیت استفاده از عصاره میوه اوپنتیا به عنوان یک رنگزای طبیعی در رنگرزی نخ‌های پشمی فرش دستباف می‌پردازد. در این مطالعه با هدف ارائه رویکردی پایدار و زیست‌محیطی برای رنگرزی منسوجات، تأثیر پارامترهای مهم شامل غلظت رنگزا (۳۰-۱۰۰٪)، غلظت دندانه (۱۰-۱۰۰٪)، دما (۳۰-۱۰۰°C)، زمان (۲۰-۱۰۰ دقیقه) و pH (3-11) بر ویژگی‌های رنگی و پایداری رنگ ارزیابی شد. عصاره‌گیری به روش خیساندن انجام گرفت و حضور ترکیبات موثره بتالین با روش‌های طیف‌سنجی تأیید گردید. تحلیل‌ها نشان داد که عصاره اوپنتیا می‌تواند طیف رنگی متنوعی از قرمز تا قهوه‌ای ایجاد کند. بهترین نتایج در دمای ۸۰°C، زمان ۹۰ دقیقه و $\text{pH } 5.5 \pm 0.5$ حاصل شد. علاوه بر این، اثر دندانه‌های فلزی مختلف بر ثبات رنگ بررسی گردید؛ دندانه آهن بهترین ثبات شستشویی و دندانه مس بیشترین ثبات نوری را فراهم کرد. مطالعات آماری تأثیر معنادار تمامی متغیرهای فرآیند را بر شاخص‌های رنگی، شامل قدرت رنگی (K/S)، خلوص رنگی (C*)، زاویه فام (h°) و ثبات شستشویی و نوری تأیید کردند ($p < 0.001$). با این حال، میزان تأثیر متغیرها بر هر پارامتر متفاوت بود؛ به عنوان مثال، تغییرات دما بیشترین تأثیر را بر خلوص رنگ داشت، در حالی که دندانه در بهبود زاویه فام و ثبات نقش کلیدی ایفا کرد. از طرفی دیگر نتایج نشان داد که انتخاب شرایط بهینه رنگرزی مناسب می‌تواند ضمن دستیابی به خواص رنگی مطلوب، ویژگی‌های مکانیکی مناسب نخ پشمی را نیز حفظ کند. این پژوهش نشان داد که عصاره اوپنتیا به عنوان یک رنگزای طبیعی پتانسیل بالایی در ایجاد شیده‌های رنگی متنوع با ثبات مطلوب دارد و استفاده از آن می‌تواند رویکردی کارآمد برای توسعه فرآیندهای رنگرزی پایدار و کاهش اثرات زیست‌محیطی باشد.

کلمات کلیدی: رنگرزی طبیعی، اوپنتیا، الیاف پشمی، بهینه‌سازی RSM، ثبات رنگی، فرش دستباف

Optimization of Wool Yarn Dyeing for Handwoven Carpets Using Opuntia Fruit Extract: Color Properties and Fastness Evaluation

Saeedeh Rafiei^{1*}, Peiman Valipour², Omid Alaie³, Zinatossadat Hossaini⁴

Abstract

This study investigates the potential application of Opuntia fruit extract as a natural dye for wool fibers in hand-woven carpets. Adopting a sustainable and eco-conscious textile dyeing approach, we systematically evaluated critical parameters including dye concentration (30-100%), mordant concentration (0-10%), temperature (30-100°C), duration (20-100 min), and pH (3-11) on color characteristics and fastness properties. The aqueous extraction method yielded betalain pigments, confirmed through spectroscopic analysis. Results demonstrated Opuntia extract's capacity to produce a diverse color spectrum ranging from red to brown. Optimal dyeing conditions were achieved at 80°C for 90 minutes with pH 5.5 ± 0.5 . Metal mordants significantly influenced color fastness: iron mordant delivered superior wash fastness while copper mordant enhanced light fastness. Statistical analysis ($p < 0.001$) confirmed all process variables significantly affected colorimetric indices - including color strength (K/S), chroma (C*), hue angle (h°) - and fastness properties. Notably, temperature exerted dominant influence on color purity, whereas mordants primarily governed hue stability and fastness. The optimized dyeing protocol maintained favorable mechanical properties of wool fibers while achieving excellent color characteristics. This research establishes Opuntia as a high-potential natural dye source capable of producing stable, vibrant hues. Its implementation offers an effective strategy for developing sustainable textile dyeing processes with reduced environmental impact.

Keywords: Natural dyeing, Opuntia ficus-indica, wool fibers, RSM optimization, color fastness, handwoven carpet

1- مقدمه

در دهه‌های اخیر، توجه چشمگیری به استفاده از منابع طبیعی در فرآیندهای صنعتی، به ویژه در صنایع نساجی معطوف شده است (۱). این رویکرد ناشی از چالش‌های زیست‌محیطی گسترده‌ای است که به دلیل تولید و مصرف بی‌رویه رنگزاهای مصنوعی ایجاد شده‌اند (۲). رنگزاهای مصنوعی، که به طور وسیعی در رنگرزی الیاف و منسوجات به کار می‌روند، اغلب حاوی ترکیبات شیمیایی هستند که علاوه بر تولید پسماندهای مضر، منجر به آلودگی منابع آب و خاک و آسیب‌های جدی زیست‌محیطی می‌شوند (۳). مطالعات متعددی نشان داده‌اند که این ترکیبات شیمیایی می‌توانند به طور مستقیم یا غیرمستقیم اثرات منفی بر سلامت انسان و سایر موجودات زنده داشته باشند (۴).

در مقابل، رنگزاهای طبیعی به دلیل ویژگی‌هایی نظیر زیست‌تخریب‌پذیری بالا، عدم سمیت و سازگاری با محیط‌زیست، به عنوان جایگزین‌های مناسبی برای رنگزاهای شیمیایی مطرح شده‌اند (۵). منابع اصلی تولید رنگزاهای طبیعی شامل گیاهان، میکروارگانیسم‌ها، مواد معدنی و در برخی موارد، ترکیبات جانوری است (۶). گیاهان، به دلیل داشتن ذخایر غنی رنگدانه‌هایی همچون فلاونوئیدها، بتالین‌ها و آنتوسیانین‌ها، یکی از متداول‌ترین منابع رنگزاهای طبیعی محسوب می‌شوند (۷). بهره‌گیری از گیاهانی که در مناطق مختلف به صورت خودرو رشد می‌کنند یا به عنوان پسماند کشاورزی در دسترس هستند، می‌تواند به طور مؤثری در بهبود پایداری منابع طبیعی و کاهش اثرات محیط‌زیستی رنگرزی‌های صنعتی نقش داشته باشد (۸).

یکی از گیاهانی که قابلیت‌های بالقوه‌ای در استخراج رنگ‌های طبیعی دارد، گیاه اوپنتیا^۱ یا کاکتوس نوپال است (۹). اوپنتیا، به خصوص میوه‌ی آن، در بسیاری از مناطق گرم و نیمه‌گرمسیری جهان به طور خودرو یافت می‌شود و علاوه بر کاربردهای خوراکی و دارویی، به دلیل وجود مقادیر بالای ترکیبات آنتی‌اکسیدانی و رنگدانه‌های طبیعی مانند بتالین و آنتوسیانین، می‌تواند منبعی ارزشمند برای تولید رنگزاهای طبیعی باشد (۱۰). این رنگدانه‌ها قادر به ایجاد طیف‌های مختلفی از رنگ‌های قرمز تا بنفش هستند که در رنگرزی الیاف پشمی، می‌توانند شیدهای غنی و جذابی تولید کنند. تحقیقات پیشین نشان داده‌اند که این ترکیبات دارای خواصی همچون پایداری نسبی در برابر نور و شستشو و جذب مناسب بر روی الیاف طبیعی هستند که آن‌ها را برای کاربرد در صنعت نساجی ایده‌آل می‌سازند (۱۱).

رنگرزی طبیعی علاوه بر نیاز به یک منبع گیاهی مناسب، به شرایط مطلوبی برای استخراج و تثبیت رنگزها نیاز دارد. شرایط حمام رنگرزی از جمله دما، pH، زمان و غلظت دندانه‌ها به عنوان فاکتورهای متغیر، تأثیر بسزایی در کیفیت، فام رنگ و پایداری رنگ‌های طبیعی دارند (۱۲). استفاده از دندانه‌های مختلف به عنوان یک عامل کلیدی برای بهبود پیوندهای شیمیایی بین رنگزا و ساختار الیاف شناخته شده است (۱۳). دندانه‌دار کردن نه تنها به افزایش پایداری رنگ در برابر عوامل شیمیایی و فیزیکی کمک می‌کند، بلکه می‌تواند در ایجاد شیدهای رنگی متنوع نیز نقش‌آفرینی کند. از این‌رو، استفاده از دندانه‌های طبیعی (مانند اسید اسکوربیک) و معدنی (مانند سولفات آلومینیوم) در ترکیب با رنگزاهای طبیعی بسیار حائز اهمیت است (۱۴).

بررسی ادبیات علمی نشان می‌دهد که مطالعات انجام شده بر روی بخش‌های مختلف گیاه اوپنتیا، عمدتاً در زمینه‌های خواص دارویی، بیولوژیکی، کاربردهای پزشکی و گیاه‌شناسی متمرکز بوده‌اند (۱۵، ۱۶، ۱۷). پژوهش‌های متعددی به بررسی ترکیبات فیتوشیمیایی این گیاه پرداخته و حضور رنگدانه‌های ارزشمندی همچون بتالین‌ها، فلاونوئیدها و کاروتنوئیدها را در آن تأیید کرده‌اند (۲۱، ۲۲). این رنگدانه‌ها علاوه بر خواص آنتی‌اکسیدانی و ضدالتهابی، پتانسیل بالایی برای استفاده در صنایع رنگرزی دارند (۲۳، ۲۴).

مطالعات اخیر در زمینه استخراج و کاربرد رنگدانه‌های طبیعی نشان داده‌اند که بتالین‌های موجود در میوه‌ها می‌توانند به عنوان منابع رنگزای پایدار در صنعت نساجی مورد استفاده قرار گیرند (۲۵، ۲۶). خصوصیات منحصر به فرد این رنگدانه‌ها از جمله پایداری نسبی در برابر نور، حرارت و pH، آن‌ها را برای رنگرزی الیاف طبیعی مناسب ساخته است (۲۷، ۲۸). در مطالعه دیگری، به استخراج رنگدانه‌های طبیعی از چغندرآو ارزیابی عملکرد آن در رنگرزی ابریشم پرداخته شده است. نتایج نشان داد که این رنگ‌دهنده طبیعی

^۱Opuntia

^۲Beta vulgaris

مقاله پذیرفته شده

قادر به ایجاد پوشش رنگی یکنواخت و پایدار بر روی منسوج با مقادیر مطلوب پارامترهای رنگی مانند قدرت رنگی و مقاومت در برابر شستشو می باشد (۲۹).

علاوه بر این، مطالعات نشان داده‌اند که بتانین‌های استخراج شده از اوپنتیا قابلیت ایجاد پیوندهای قوی با الیاف پروتئینی مانند پشم را دارند که منجر به ثبات رنگی قابل قبولی می‌شود (۳۰). پژوهش‌های اخیر در این زمینه به استخراج پایدار و رنگرزی پارچه ابریشمی با استفاده از ضایعات میوه *Opuntia ficus-indica* پرداخته‌اند. این مطالعه نشان داد که رنگزای استخراج شده از این گیاه در pH اسیدی (۴-۵) بیشترین جذب را روی الیاف پروتئینی داشته و می‌تواند منجر به تولید رنگ‌هایی با ثبات قابل قبول شود (۳۱). از سویی دیگر، در مطالعه Ali و El-Mohamedy (2011) کارایی رنگزای طبیعی استخراج شده از گلایی خاردار بر روی پارچه مورد بررسی قرار گرفت. اگرچه این پژوهش موفق به تأیید پتانسیل رنگدهی این گیاه با دستیابی به مقادیر مطلوب قدرت رنگی (K/S) شد، اما به دلیل عدم بهکارگیری روش‌های پیشرفته طراحی آزمایش مانند سطح پاسخ (RSM) برای بهینه‌سازی پارامترهای رنگرزی (دما، pH، زمان)، عدم ارزیابی تأثیر فرآیند بر خواص مکانیکی الیاف، و تمرکز محدود بر ویژگی‌های رنگسنجی بدون تحلیل جامع پایداری رنگ در شرایط عملیاتی، نتوانست چارچوب کاملی برای کاربرد صنعتی ارائه دهد (۶).

در صنعت فرش دستباف، که یکی از مهم‌ترین صنایع دستی و هنری ایران محسوب می‌شود، رنگرزی الیاف پشمی نقشی حیاتی در کیفیت، جذابیت و ارزش نهایی محصول دارد. استفاده از رنگزاهای طبیعی در این صنعت، علاوه بر حفظ میراث سنتی رنگرزی ایرانی، می‌تواند منجر به تولید محصولاتی با ارزش افزوده بالاتر و سازگاری بیشتر با محیط‌زیست شود. پژوهش‌های متعددی نشان داده‌اند که فرش‌های رنگرزی شده با مواد طبیعی از نظر زیبایی‌شناختی دارای کیفیت‌هایی منحصر به فرد هستند و طیف‌های رنگی هماهنگ‌تر و چشم‌نوازتری ایجاد می‌کنند. علاوه بر این، استفاده از رنگزاهای طبیعی در فرش دستباف، به دلیل عدم سمیت و سازگاری با سلامت انسان، پاسخگوی تقاضای روزافزون بازارهای جهانی برای محصولات ارگانیک و اکولوژیک است. این امر می‌تواند به افزایش صادرات و ارزش‌آوری در صنعت فرش دستباف ایران کمک شایانی نماید.

با وجود این پتانسیل‌های ارزشمند، تاکنون به طور جامع از این گیاه به عنوان یک منبع رنگزای طبیعی در فرآیند رنگرزی منسوجات، به ویژه الیاف پشم مورد استفاده در فرش دستباف، استفاده نشده است. پژوهش‌های موجود در این زمینه محدود بوده و بهینه‌سازی سیستماتیک پارامترهای رنگرزی با این رنگدانه‌ها کمتر مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به اینکه گیاه اوپنتیا یک گیاه بومی در مناطق مختلف ایران است و به عنوان یک گیاه خودرو شناخته می‌شود (۱۸)، می‌تواند به عنوان یک منبع ارزان و در دسترس برای رنگرزی طبیعی و پایدار مورد استفاده قرار گیرد.

پژوهش حاضر با هدف پر کردن این خلأ علمی، به بررسی قابلیت استفاده از عصاره میوه اوپنتیا به عنوان یک رنگزای طبیعی در فرآیند رنگرزی الیاف پشمی مورد استفاده در فرش دستباف پرداخته است. با توجه به اهمیت فرش دستباف در هنر و اقتصاد ایران و لزوم استفاده از مواد پایدار در تولید آن، این پژوهش به دنبال ارائه راهکاری نوآورانه برای رنگرزی این محصول با استفاده از منابع طبیعی است. از آنجا که الیاف پشم به دلیل ساختار پروتئینی خود قدرت جذب بالایی برای رنگزاهای طبیعی دارند، انتخاب این بستر رنگرزی کمک شایانی به ارزیابی کارآمدی میوه اوپنتیا به عنوان یک منبع طبیعی رنگزا می‌کند. پژوهش حاضر با تمرکز بر بهینه‌سازی فرآیند رنگرزی، تأثیر پارامترهای مختلف از جمله دما، pH، زمان رنگرزی و غلظت مواد دندانه را بر کیفیت و ثبات رنگ‌های ایجاد شده بررسی می‌کند. علاوه بر این، با بهره‌گیری از روش طراحی آزمایش (RSM)، تلاش می‌شود تا شرایط ایده‌آل رنگرزی به منظور دستیابی به حداکثر بازدهی و کیفیت تعیین شود.



شکل ۱: میوه گیاه آپونتیا مورد استفاده در این پژوهش
Figure 1: Fruit of the Opuntia plant used in this study

1-1- گیاه‌شناسی و ترکیبات رنگی گیاه اوپنتیا

میوه گیاه *Opuntia ficus-indica*، که به طور معمول به نام انجیر هندی یا کاکتوس گلابی شناخته می‌شود، منبع غنی از ترکیبات رنگی طبیعی با ویژگی‌های منحصربه‌فرد است (۱۵). این گیاه برای رشد به آب و هوای گرم و نیمه مرطوب نیاز دارد. در ایران نیز در استانهای مازندران، این گیاه در استان‌های گلستان، هرمزگان، سیستان و بلوچستان، کرمان، یزد و مناطق جنوبی فارس به علت آب و هوای مناسب رشد می‌کند.

این ترکیبات رنگی عمدتاً شامل بتالین‌ها، به ویژه بتاسیانین‌ها هستند که مسئول ایجاد طیف رنگی متنوع از قرمز و بنفش تا زرد می‌باشند (۱۶). ساختار شیمیایی ویژه این ترکیبات، آن‌ها را به گزینه‌ای جذاب برای کاربردهای گوناگون در صنایع مختلف، از جمله رنگرزی و تولید مواد غذایی تبدیل کرده است (۱۷).

۱-۱-۱- ترکیبات اصلی رنگزا در اوپنتیا

۱-۱-۱-۱- بتانین‌ها

بتانین‌ها دسته‌ای از رنگدانه‌های نیتروژنی محلول در آب هستند که به طور انحصاری در گیاهان راسته میخک‌سانان^۴ و برخی قارچ‌ها یافت می‌شوند (۱۸). این ترکیبات به دو زیرگروه اصلی تقسیم می‌شوند:

بتاسیانین‌ها^۵ رنگدانه‌هایی که مسئول ایجاد رنگ‌های قرمز و بنفش هستند و از نظر ساختاری مشتقات گلیکوزیدی بتانیدین به شمار می‌روند (۱۹).

بتاکسانتین‌ها^۶ رنگدانه‌هایی که طیف رنگی زرد و نارنجی را ایجاد می‌کنند و مشتقات آمینی بتالامیک اسید هستند (۲۰).

۱-۱-۱-۲- ساختار شیمیایی بتانین‌ها

بتالین‌ها از اسید بتالامیک مشتق می‌شوند و دارای یک اسکلت دی‌هیدروپیریدینی هستند. تنوع در گروه‌های جانبی متصل به اسید بتالامیک، منجر به ایجاد گوناگونی در ساختار و رنگ بتالین‌ها می‌شود (۲۱). به عنوان مثال، بتانین، که یک بتاسیانین غالب در *Opuntia ficus-indica* است، رنگ قرمز-بنفش میوه را ایجاد می‌کند. ساختار آن شامل یک گروه گلوکز متصل به اسکلت بتالامیکی است (۲۲). حلالیت در آب و وجود پیوندهای نیتروژنی در ساختار بتالین‌ها، آن‌ها را به طور طبیعی برای جذب مؤثر بر روی الیاف پروتئینی مانند پشم مناسب می‌سازد (۱).

۱-۱-۱-۳- آنتوسیانین‌ها

اگرچه بتالین‌ها رنگدانه‌های اصلی در *Opuntia* هستند، برخی گونه‌های این گیاه حاوی مقادیر کمتری آنتوسیانین نیز می‌باشند (۲۳). آنتوسیانین‌ها گروهی از فلاونوئیدهای رنگی هستند که مسئول ایجاد شیدهای رنگی از قرمز تا آبی می‌باشند (۲۴).

^۴Caryophyllales

^۵Betacyanins

^۶Betaxanthins

۲-۲- روش ها

۲-۲-۱- طراحی آزمایشات به روش سطح پاسخ

بهینه سازی فرآیند رنگرزی، با هدف دستیابی به بهترین ویژگی های رنگی ممکن، نقشی کلیدی در صنعت نساجی ایفا می کند. این امر مستلزم توجه به پارامترهای متعدد و تأثیرگذار بر فرآیند است تا نتایج مورد نظر با دقت بالا و تکرارپذیری تضمین شود. در این مطالعه، برای بهینه سازی شرایط رنگرزی، از نرم افزار Design Expert 11.1.2.0 شرکت (Stat-Ease آمریکا) استفاده گردید و روش سطح پاسخ (RSM) برای بررسی جامع و سیستمیک این پارامترها به کار گرفته شد.

در مرحله ابتدایی تحقیق، آزمایشات مقدماتی برای شناسایی متغیرهای حیاتی و دامنه های تجربی مؤثر آنان انجام شد. این مرحله شامل بررسی اولیه تأثیر متغیرهای زیر بر ویژگی های رنگی کالای رنگرزی شده است (قدرت رنگی، زاویه رنگ، و خلوص رنگ): غلظت ماده رنگزا (۵۰-۱۰۰٪ وزنی): این محدوده بر اساس مطالعات حلالیت رنگدانه های بتالاینی و ظرفیت جذب الیاف پشم تعیین شد. آزمایشات نشان داد غلظت های کمتر از ۵۰٪ به شدت رنگ ناکافی و غلظت های بالاتر از ۱۰۰٪ به اشباع مکان های جذب منجر می شود.

غلظت دندانه (۰-۱۰٪ وزنی): دندانه زاج سفید (سولفات پتاسیم آلومینیوم) به دلیل تشکیل کمپلکس پایدار با رنگدانه های بتالاینی انتخاب شد. نتایج شکل ۵ تفاوت کیفی واضح بین نمونه های با/بدون دندانه را نشان داد.

دمای رنگرزی (۳۰-۱۰۰ °C): محدوده دمایی بر اساس دو فاکتور تعیین شد:

- دمای زیر ۳۰ °C: ناکافی برای فعال سازی مکان های جذب

- دمای بالای ۹۰ °C: خطر دنا تورا سیون پروتئین های پشم (شکست پیوندهای هیدروژنی و دی سولفیدی)

زمان رنگرزی (۲۰-۱۰۰ دقیقه): بر اساس سینتیک جذب شبه مرتبه دوم تعیین شد که پس از ۹۰ دقیقه به حالت تعادل می رسد:

$$t/qt = 1/(k_2 qe^2) + t/qe$$

pH حمام رنگرزی (۳-۱۱): محدوده با توجه به پایداری رنگدانه های بتالاینی انتخاب شد:



تمامی محدوده ها با انجام آزمایشات تک عاملی و تحلیل نتایج توسط نرم افزار Design-Expert تأیید شدند. شکل های ۶-۹ و جدول ۱ به طور جامع تأثیر این پارامترها بر ویژگی های رنگی را نشان می دهند.

در مرحله ابتدایی تحقیق، آزمایشات مقدماتی برای شناسایی متغیرهای حیاتی و دامنه های تجربی مؤثر آنان انجام شد. این مرحله شامل بررسی اولیه تأثیر متغیرهای زیر بر ویژگی های رنگی کالای رنگرزی شده است (قدرت رنگی، زاویه رنگ، و خلوص رنگ): غلظت ماده رنگزا: به منظور اطمینان از یکنواختی و شدت رنگ. غلظت دندانه: مؤثر در تثبیت و پایداری رنگ.

دما و زمان رنگرزی: از عوامل مؤثر در زمان انجام واکنش های میان رنگزا و الیاف.

pH حمام رنگرزی: تأثیر مستقیم بر واکنش پذیری و ترکیب مولکولی رنگزاها با الیاف.

پس از شناسایی متغیرهای کلیدی، طراحی آزمایش های مرکب مرکزی (CCD) برای تعیین اثرات متقابل این متغیرها بر ویژگی های رنگی مانند قدرت رنگی، زاویه رنگ و خلوص رنگ مورد استفاده قرار گرفت. طی این مرحله، ۵۰ نسخه رنگرزی مختلف با تغییرات مختلف در هر یک از پارامترها آزمون شد.

با اجرای روش CCD و جمع آوری داده ها از هر نسخه آزمایشی، تحلیل های آماری دقیق به منظور بررسی تأثیرات مستقل و متقابل میان پارامترها انجام شد. نتایج به دست آمده با بهره گیری از روش سطح پاسخ (RSM) تحلیل گردید. سپس با توجه به نتایج کسب شده و تحلیل های آماری، شرایط رنگرزی با هدف کسب بیشترین قدرت رنگی با استفاده از روش سطح پاسخ بهینه سازی شد. هدف

مقاله پذیرفته شده

از این بهینه‌سازی، دستیابی به حداکثر قدرت رنگی و ارتقاء سایر ویژگی‌های رنگی با کمترین هزینه و زمان ممکن بوده است. اگرچه در فرآیندهای سینتیکی (فیزیکی و شیمیایی)، دما و زمان به یکدیگر وابستگی دارند و افزایش دما معمولاً منجر به تسریع فرآیندهای واکنش می‌شود، در این پژوهش این دو پارامتر به عنوان متغیرهای "مستقل" در طراحی آزمایش در نظر گرفته شدند تا تأثیر مجزای هر یک بر ویژگی‌های رنگی و قدرت رنگی بررسی گردد. این مدل‌سازی امکان ارائه یک دیدگاه جامع و سیستماتیک از اثرات مستقل و متقابل دما و زمان بر کیفیت فرآیند رنگ‌رزی را فراهم می‌سازد. علاوه بر این، تأثیرات متقابل دما و زمان در تحلیل‌های آماری از طریق روش سطح پاسخ (RSM) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که دمای ایده‌آل (80°C) در کنار زمان بهینه (۹۰ دقیقه) به دلیل ایجاد تعادل مناسب بین نرخ جذب رنگزا و جلوگیری از تخریب ساختار مولکولی بتالاین‌ها، بهترین ویژگی‌های رنگی را ارائه می‌دهد. بنابراین در فرآیند بهینه‌سازی، هم‌افزایی دما و زمان به‌طور کامل در نظر گرفته شده است.

۲-۲-۲- فرآیند شستشو

برای آماده‌سازی نمونه‌های نخ پشم جهت فرآیند رنگ‌رزی، ابتدا اقدام به حذف آلودگی‌ها، خاک و چربی‌های طبیعی از الیاف پشم می‌شود. این عملیات با هدف بهبود نفوذپذیری پذیرش رنگ انجام می‌گیرد. در این مطالعه، Triton X-100، به عنوان یک مواد شوینده غیر یونی مؤثر، برای پاک‌سازی الیاف پشم به کار رفت. محلول شوینده با غلظت ۲ گرم در لیتر آب مقطر تهیه شد و دمای آن بر روی 50°C تنظیم گردید تا کارایی حذف آلودگی‌ها به حداکثر برسد. نمونه‌های نخ پشم برای مدت زمان ۳۰ دقیقه در این محلول غوطه‌ور شدند که این زمان برای اطمینان از حذف کامل چربی‌ها و آلودگی‌های سطحی کافی است. پس از این فرآیند، الیاف با آب مقطر شسته شد تا تمام بقایای شوینده حذف گردد. الیاف شسته‌شده در دمای اتاق خشک شدند و برای مرحله رنگ‌رزی آماده شدند. این آماده‌سازی دقیق، تضمینی برای یکنواختی و کیفیت بالای رنگ‌رزی نهایی محسوب می‌شود.

۲-۲-۳- استخراج رنگ از میوه گیاه اپوتنیا

در مرحله عصاره‌گیری برای رنگ‌رزی، به منظور کاهش میزان خطای ناشی از میزان رنگزای موجود در میوه گیاه اپوتنیا و افزایش بازده رنگی آن، عملیات استخراج ماده رنگزا با سه حلال آب، اتانول و متانول به منظور ارزیابی و انتخاب بهترین حلال انجام می‌گیرد. برای این هدف ابتدا میوه تازه این گیاه با احتیاط بریده شده در شرایط مناسبی از نظر رطوبت و دما خشک می‌گردد. برای حصول نتیجه بهتر میوه‌های برش خورده بایستی در سایه و در دمای استاندارد 25°C خشک شوند. سپس به وسیله آسیاب آزمایشگاهی کاملاً آسیاب و پودر می‌گردند. جهت یکنواختی بهتر این پودر از الک با مش ۴ عبور داده می‌گردد. سپس به منظور استخراج عصاره آبی اپوتنیا روش پرکولاسیون (خيساندن) مورد استفاده قرار گرفت.

۲-۲-۳-۱- روش پرکولاسیون

در این فرآیند استخراج، تمرکز بر تهیه عصاره‌ای با خلوص بالا و کارایی بهینه برای استفاده در رنگ‌رزی است. ابتدا ۳ گرم پودر رنگزا به ۳۰ میلی‌لیتر آب مقطر افزوده می‌شود. این ترکیب برای مدت ۲۴ ساعت تحت شرایط کنترل‌شده و بر روی شیکر با سرعت مناسب قرار می‌گیرد تا توزیع همگن و استخراج کامل رنگزا از پودر تسهیل شود.

پس از این مرحله، محلول به‌منظور حذف ذرات درشت با دکانته‌کردن تحت نیروی جاذبه یا سانتریفیوژ اولیه از ناخالصی‌های درشت پالایش می‌شود. برای دستیابی به خلوص بیشتری، محلول حاصل از طریق فیلتر غشائی با منافذ 0.45 میکرومتر عبور داده می‌شود تا ذرات کوچک‌تر و میکرونی نیز حذف شوند، اطمینان از حذف تمامی ذرات معلق و ذرات ناخواسته میسر می‌شود.

سپس، عصاره از طریق حرارت‌دهی ملایم و کنترل‌شده تحت تبخیر قرار می‌گیرد تا به غلظت مطلوب برسد. این روش تغلیظ با حفظ دمای کمینه از تغییرات شیمیایی ناخواسته در رنگزا جلوگیری می‌کند، ضمن اینکه غلظت نهایی بالایی از عصاره را فراهم می‌آورد که برای رنگ‌رزی با کارایی بالا ایده‌آل است.

شرایط حرارت‌دهی ملایم و کنترل‌شده در فرآیند استخراج عصاره میوه اپوتنیا نقش مهمی در حفظ ترکیبات فعال رنگی، مانند بتالاین‌ها، و جلوگیری از تخریب شیمیایی آن‌ها دارد. در این پژوهش، حرارت‌دهی برای تغلیظ عصاره در دمای کمینه، با رعایت کنترل دقیق، انجام شده است؛ به این ترتیب که عصاره تحت تبخیر در دمای 25°C در آن تحت خلأ قرار داده شده و از روش برگشتی برای

مقاله پذیرفته شده

استخراج استفاده شده است. حفظ دمای پایین تضمین می‌کند که تغییرات شیمیایی ناخواسته رخ نداده و رنگزا همچنان قدرت رنگی و پایداری خود را حفظ کند. این روش به‌ویژه برای استخراج ترکیبات حساس به دما مانند بتالین‌ها ضروری است، زیرا این ترکیبات در دماهای بالا تخریب شده یا رفتار طیفی آن‌ها تغییر می‌کند.

۲-۲-۳-۲- روش سوکسله

روش سوکسله به عنوان یک تکنیک کارآمد در استخراج عصاره‌های الکلی (اتانولی و متانولی) توصیه می‌شود. در این روش، از حلال‌های اتانول و متانول در شرایط برگشتی و تحت فشار کم در دستگاه سوکسله استفاده می‌شود تا با تبخیر چرخشی، عصاره مورد نظر حاصل گردد. به منظور حذف بخش عمده حلال، از دستگاه تبخیر گردان چرخنده (روتاری) استفاده می‌شود. عصاره‌های آبی و الکلی تغلیظ شده، به صورت لایه‌ای نازک روی پلیت‌های شیشه‌ای پخش شده و سپس به منظور حذف باقیمانده حلال، به آون تحت خلاء با دمای 25°C منتقل می‌گردند. این فرآیند، اثرات احتمالی فعالیت ضد میکروبی ذاتی حلال‌های اتانول و متانول را در نتیجه نهایی به حداقل می‌رساند. پس از خشک شدن کامل، عصاره‌ها با استفاده از تیغه فلزی از سطح پلیت‌های شیشه‌ای جدا شده و تا رسیدن به وزن ثابت، در دسیکاتور نگهداری می‌شوند. برای تعیین میزان ماده استخراجی و محاسبه بازده استخراج، ابتدا وزن پلیت خالی اندازه‌گیری شده و سپس یک میلی‌لیتر از عصاره آبی یا الکلی به آن اضافه می‌شود. پس از خشک شدن در دمای اتاق، وزن پلیت حاوی عصاره اندازه‌گیری شده و اختلاف آن با وزن اولیه به عنوان بازده حلال گزارش می‌گردد. حلال‌هایی که در فرآیند عصاره‌گیری، اختلاف وزن کمتری ایجاد می‌کنند، به عنوان حلال‌های برتر شناخته می‌شوند. نتایج مربوط به بازده استخراج با حلال‌های مختلف در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: بازده استخراج با حلال‌های مختلف

Table 1: Extraction efficiency with different solvents

Solvent type	Extraction efficiency (g/l)
Distilled water	3.5
Methanol	6.2
Ethanol	5.8

نتایج جدول ۱ نشان می‌دهد که نوع حلال تأثیر قابل توجهی بر میزان بازده استخراج دارد. مطابق با داده‌های حاصل، متانول با بازده استخراج $6/2$ گرم در لیتر، کارآمدترین حلال برای استخراج رنگدانه‌های بتالائین از میوه اوپنتیا است. اتانول با بازده $5/8$ گرم در لیتر در رتبه دوم قرار گرفت، در حالی که آب مقطر با $3/5$ گرم در لیتر کمترین میزان استخراج را داشت. این اختلاف در میزان استخراج را می‌توان به تفاوت در قطبیت و اندازه مولکولی حلال‌ها نسبت داد. متانول به دلیل اندازه کوچکتر مولکولی و قطبیت مناسب، توانایی بیشتری در نفوذ به بافت میوه و استخراج رنگدانه‌ها دارد. اگرچه متانول بیشترین بازده را نشان می‌دهد، اما با توجه به ملاحظات زیست‌محیطی و سمیت، استفاده از اتانول با بازده قابل قبول می‌تواند گزینه مناسب‌تری در مقیاس صنعتی برای استخراج رنگزا و کاربرد در صنعت فرش ایران باشد.

۲-۲-۴- فرآیند دندان‌دار کردن

با توجه به نتایج آزمایشات اولیه در این پژوهش از روش پیش دندان‌دار برای فرایند دندان‌دادن استفاده شد. ابتدا محلول با غلظت‌های مختلف سولفات پتاسیم آلومینیوم (0 تا 10 درصد وزنی) با نسبت حجم حمام به وزن کالا (L:R) $40:1$ آماده شد و سپس روی هیتر قرار گرفت تا دمای حمام به 40°C برسد. سپس کلاف‌های نخ پشمی شسته شده در این دما وارد حمام شد و دما به آرامی با نرخ $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ تا 80°C افزایش یافت (شکل ۳). نمونه‌ها به مدت 45 دقیقه در این دمای ثابت نگهداشته شد و سپس به آرامی سرد شد و

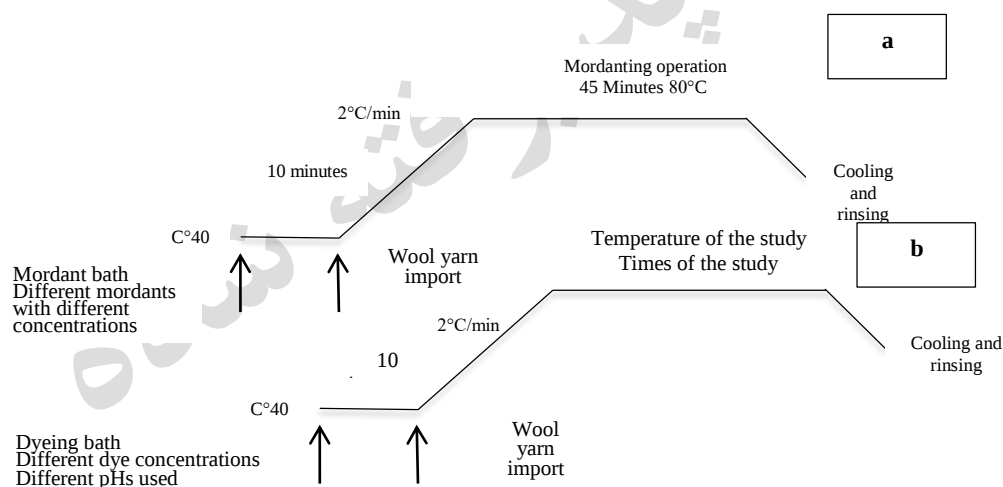
مقاله پذیرفته شده

در نهایت به منظور جداسازی دندانهای سطحی از روی سطح کلاف با آب مقطر آبکشی و در دمای اتاق خشک شد. به منظور کسب شیدهای رنگی متنوع، فرآیند دنداندار کردن با روش مشابهی برای سولفات آهن (II)، سولفات مس، دی کرومات پتاسیم و کلرید قلع با غلظت ۳٪ وزنی انجام شد.

شایان ذکر است که با توجه به سمیت بالای دندان دی کرومات پتاسیم، استفاده از آن در این پژوهش صرفاً به عنوان یک دندان مرجع و استاندارد برای مشاهده تنوع رنگی ایجاد شده و مقایسه عملکرد دندانهای مختلف بوده است. با این حال، تأکید می‌شود که استفاده از دی کرومات پتاسیم در این پژوهش صرفاً در مقیاس آزمایشگاهی و با رعایت کامل پروتکل‌های ایمنی صورت گرفته و برای کاربردهای صنعتی، استفاده از دندانهای سازگار با محیط زیست پیشنهاد می‌شود.

۵-۲-۲- فرآیند رنگریزی

حمام‌های رنگریزی با استفاده از محلول‌های رنگزای آماده شده با نسبت حجم حمام به وزن کالا (L:R) ۴۰:۱ تهیه شد. در مرحله رنگریزی، نخ‌های پشمی (حاوی/بدون دندان) در دمای ۵۰ °C در حمام رنگریزی غوطه‌ور شد و دما به آرامی با نرخ ۲ °C/min به دمای مورد نظر افزایش یافت و برای مدت زمان معین نگه‌داشته شد (شکل ۳). سپس، نمونه‌های رنگریزی شده با آب مقطر شسته شدند و در دمای اتاق خشک شدند. نسخه‌های رنگریزی طبیعی الیاف پشم در شرایط مختلف رنگریزی از جمله غلظت‌های مختلف از مواد رنگزا (۵۰٪، ۱۰۰٪ و ۱۵۰٪)، غلظت‌های مختلف دندان سولفات پتاسیم آلومینیوم (۰٪، ۵٪، ۱۰٪ نسبت به وزن الیاف)، دمای رنگریزی (۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ °C)، مدت زمان رنگریزی (۳۰، ۶۰ و ۹۰ دقیقه) و pH حمام رنگریزی (۳، ۵/۵ و ۸) با استفاده از روش RSM طراحی شد.



شکل ۳: نمودار فرآیند دنداندار کردن (الف) و رنگریزی (ب) نخ پشمی با استفاده از رنگزای طبیعی میوه گیاه اوپنتیا
Figure 3: Diagram of the wool yarn denting process (a) and dyeing process (b) using natural dye extracted from the fruit of the Opuntia plant

۶-۲-۲- ارزیابی قدرت و ویژگی‌های رنگی

ویژگی‌های رنگی نخ‌های پشم رنگریزی شده با استفاده از دستگاه طیف سنج انعکاسی (X-Rite) در بازه ۳۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر ارزیابی شدند. مؤلفه‌های رنگی CIE، شامل L^* ، a^* ، b^* تحت منبع نوری استاندارد D_{65} و مشاهده‌کننده استاندارد با زاویه ۲° درجه اندازه‌گیری شدند. مؤلفه L^* روشنایی را نشان می‌دهد، به طوری که مقدار ۱۰۰ متناظر با سفید و مقدار ۰ متناظر با سیاه است. همچنین، مؤلفه‌های a^* و b^* با محورهای قرمز-سبز و زرد-آبی متناظرند، به گونه‌ای که مقادیر مثبت نشان دهنده رنگ‌های قرمز و زرد و مقادیر منفی نشان دهنده رنگ‌های سبز و آبی هستند. قدرت رنگی (K/S) نمونه‌ها با استفاده از رابطه Kubelka-Munk (معادله ۱) به شرح زیر محاسبه شدند:

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

K/S یک تابع از عمق رنگ است و براساس ضریب جذب (K)، ضریب انتشار (S) و مقدار بازتاب (R) نمونه رنگریزی شده در طول موج بیشینه جذب محاسبه می گردد. این طول موج، بر اساس طیف جذب UV-Vis مشخص شده گردید.

۷-۲-۲- ارزیابی ثبات رنگ در نخ‌های پشم رنگریزی شده

ارزیابی ویژگی‌های ثبات رنگ نمونه‌های رنگریزی شده بر اساس استانداردهای ISO انجام شد. ثبات رنگ در برابر شستشو با استفاده از روش ISO 105-C10:2006 ارزیابی شد، در حالی که ثبات رنگ در برابر نور با استفاده از استاندارد ISO 105-B02:2014 بررسی شد. علاوه بر این، ویژگی‌های رنگی نخ پشم رنگریزی شده قبل و بعد از انجام آزمون ثبات رنگی مورد ارزیابی قرار گرفت و اختلاف رنگ اندازه‌گیری شد تا مقایسه بهتری انجام شود. پنج نمونه نخ رنگریزی شده در شرایط بهینه از میوه گیاه آپوتنیا و در حضور دندانهای مختلف برای این آزمون استفاده شد.

۸-۲-۲- ویژگی‌های مکانیکی

خصوصیات مکانیکی نمونه‌های نخ پشم رنگریزی شده با استفاده از دستگاه استحکام سنج کششی (شرکت کاردوتکس، ایران) طبق استاندارد ASTM D 2256 مورد ارزیابی قرار گرفت. ابتدا، کلاف‌های نخ به صورت تصادفی به قطعاتی به طول ۱۰۰ سانتیمتر تقسیم شدند و وزن خطی نخ‌ها بر حسب نمره تکس (tex) محاسبه شد. سپس، آزمون با طول ۲۵۰ میلیمتر با سرعت ثابت ۲۵۰ میلیمتر در دقیقه تا حد پارگی تحت کشش قرار گرفت. پارامترهای حداکثر تنش (Max. Stress)، و مدول ینگ (Young's modulus) بر حسب واحد سانتی‌نیوتن بر تکس (cN/tex) گزارش شدند. همچنین میزان ازدیاد طول تا حد پارگی نخ‌ها بر حسب درصد بیان شد. برای هر نخ، ۱۵ نمونه تحت آزمون قرار گرفت و از مقادیر به دست آمده میانگین گرفته شد.

۳- نتایج و بحث

۱-۳- طیف سنجی جذبی

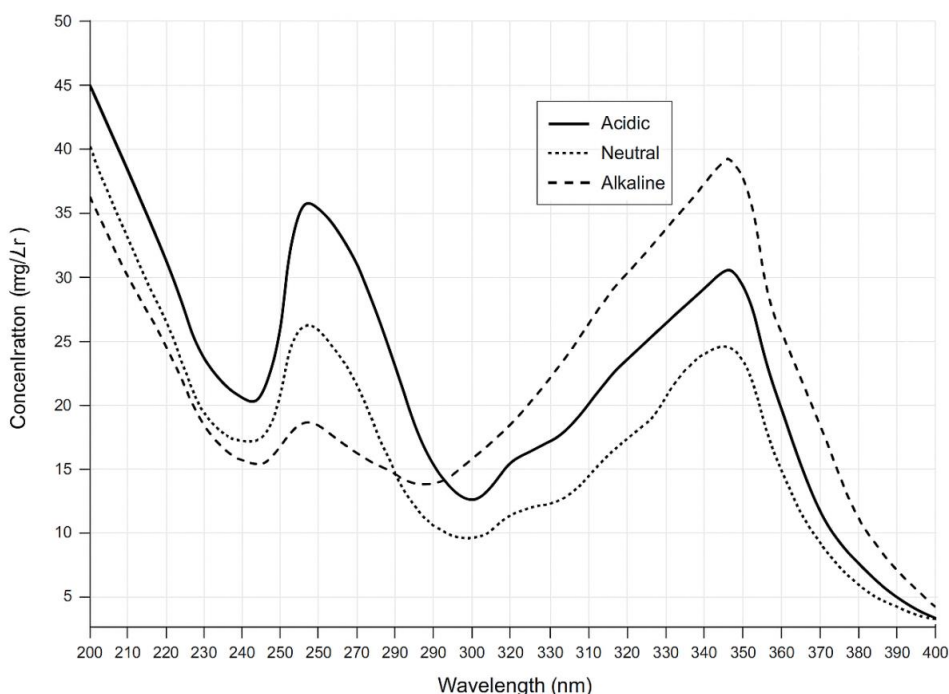
طیف جذبی گیاهان و مواد طبیعی، یکی از موارد مهمی است که در تحلیل و شناسایی ترکیبات آن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. طیف جذبی این ترکیبات نشان دهنده قدرت آنها در جذب نور در طول موج‌های مختلف است. عصاره میوه اوپنتیا (-Opuntia ficus indica) حاوی ترکیبات فلاونوئیدی و بتالینی با خصوصیات طیفی متمایز است. فلاونوئیدها بیشینه جذب در حدود ۴۰۰ نانومتر (ناحیه بنفش-آبی) و بتالین‌ها در محدوده ۵۴۰-۵۵۰ نانومتر (ناحیه قرمز-سبز) نشان می‌دهند. خصوصیات طیفی این رنگدانه‌ها به شدت وابسته به pH محیط است، به طوری که در محیط اسیدی (pH 1-4)، فلاونوئیدها بالاترین شدت جذب را نشان می‌دهند و بتالین‌ها در این شرایط پیک جذبی در محدوده ۵۳۵-۵۴۰ نانومتر (رنگ قرمز-ارغوانی) دارند. شکل ۴ طیف جذبی عصاره آبی رنگی مستخرج از اوپنتیا را در pH‌های مختلف نشان می‌دهد. برای این سنجش به لحاظ سادگی از حلال آب مقطر و روش استخراج پرکولاسیون (۳ گرم پودر میوه خشک شده اوپنتیا در ۳۰ میلی‌لیتر آب مقطر به مدت ۲۴ ساعت) استفاده شده است.

همانطور که در شکل ۴ قابل مشاهده است، در محیط خنثی (pH 6-7)، یک انتقال باتوکرومیک (شیفت قرمز) در بتالین‌ها رخ می‌دهد که پیک جذبی به ۵۴۰-۵۴۵ نانومتر منتقل می‌شود. در این شرایط، اگرچه جذب رنگ توسط الیاف پروتئینی (مانند پشم) بهبود می‌یابد، اما ریسک تخریب بتالین‌ها نیز افزایش می‌یابد. در محیط قلیایی (pH > 8)، بتالین‌ها بالاترین شدت جذب را در pH حدود ۸ نشان می‌دهند، اما در pH‌های بالاتر، یک انتقال هیپسوکرومیک (شیفت آبی) همراه با کاهش شدت جذب مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده شروع تخریب ساختاری رنگدانه است. آنتوسیانین‌ها نیز در محیط اسیدی عملکرد بهتری داشته و رنگ‌های قرمز و بنفش قوی‌تری تولید می‌کنند، در حالی که در محیط قلیایی به رنگ‌های آبی یا سبز متمایل می‌شوند.

تأثیر pH بر خصوصیات طیفی بتالین‌ها به تغییر در پروتونه شدن گروه‌های عاملی هیدروکسیل و کربوکسیل مربوط می‌شود. این فرآیند باعث تغییر در ساختار الکترونی و سیستم مزدوج مولکول می‌شود که مستقیماً بر ویژگی‌های جذب نوری تأثیر می‌گذارد. در pH بهینه (۵/۵ ± ۰/۵)، کمپلکس‌های تشکیل شده بین یون‌های هیدروژنی و گروه‌های عاملی ترکیبات فعال به حداکثر می‌رسد، که این امر می‌تواند منجر به افزایش شدت جذب نور شود. مطالعات گسترده نشان داده‌اند که pH محیط تأثیر قابل توجهی بر خصوصیات

طیفی بتالین‌های استخراج شده از اوپنتیا دارد و این تغییرات طیفی، شاخص‌های مهمی برای بررسی پایداری و فعالیت این ترکیبات هستند.

از دیدگاه تعامل رنگدانه‌ها با الیاف، pH بهینه برای رنگرزی با عصاره اوپنتیا در محدوده ۴ تا ۷ قرار دارد. در این شرایط، بتالین‌ها از پایداری بالاتری در برابر تغییرات شیمیایی و نوری برخوردارند و گروه‌های فعال موجود در ساختار پروتئینی الیاف (آمین‌ها و کربوکسیل‌ها) قابلیت بیشتری برای واکنش با رنگدانه‌ها نشان می‌دهند. همچنین، استفاده از دنداندهای طبیعی یا معدنی (مانند اسید اسکوربیک یا سولفات آلومینیوم) در این بازه pH می‌تواند به تثبیت رنگدانه‌ها روی الیاف و افزایش شدت رنگ کمک کند. پایداری حرارتی و نوری بتالین‌های اوپنتیا در محدوده pH بین ۴ تا ۶ به حداکثر می‌رسد. این یافته برای بهینه‌سازی شرایط استخراج، فرمولاسیون و نگهداری محصولات حاوی این رنگدانه‌های طبیعی حائز اهمیت است. کاربرد این دانش در صنایع غذایی، دارویی و آرایشی-بهداشتی می‌تواند منجر به بهبود پایداری رنگ و افزایش ماندگاری محصولات طبیعی شود. همچنین، درک مکانیسم‌های مولکولی تأثیر pH بر خصوصیات طیفی این رنگدانه‌ها می‌تواند به طراحی روش‌های استخراج و شرایط نگهداری مؤثرتر کمک کند.



شکل ۴: طیف های جذبی محلول استخراج آبی میوه اوپنتیا در pH های مختلف

Figure 4: Absorption spectra of the aqueous extract solution of Opuntia fruit at different pH levels.

۲-۳- تعیین محدوده متغیرها

در طول آزمایشات مقدماتی، هدف اصلی تعیین فام و قدرت رنگی ماده رنگزای میوه آپوتنیا و بررسی نیاز به دنداندهار کردن آن بود. برای این منظور، دو نمونه نخ پشمی شسته شده با استفاده از ۵۰ درصد وزنی از رنگزا به همراه دندانده آلومینیوم و یا بدون دندانده بر اساس فرآیند ارائه شده در شکل (۳) به روش پیش دندانده رنگرزی شدند. تصاویر نمونه‌های رنگرزی‌شده در شکل ۵ ارائه شده است. آزمایشات اولیه نشان دادند که میوه گیاه آپوتنیا به‌عنوان منبعی از ماده رنگزا، قابلیت مطلوب برای کسب شید رنگی قرمز-نارنجی را دارد. بر اساس مشاهده‌ها، میزان جذب رنگ در نمونه‌های رنگرزی‌شده بدون دندانده نسبت به نمونه‌های دنداندهار بسیار کمتر بود، که نشان می‌دهد این گیاه برای بهبود جذب رنگ به حضور دندانده نیاز دارد.

مقاله پذیرفته شده



شکل ۵: نمونه‌های رنگریزی شده در طی آزمایشات مقدماتی جهت بررسی فام رنگی و قدرت رنگی (الف) نمونه رنگریزی شده بدون دندانه، و (ب) نمونه رنگریزی شده با ۱۰٪/ب وزنی دندانه سولفات پتاسیم آلومینیوم

Figure 5: Dyed samples from preliminary tests to examine color shade and dyeing strength: (a) sample dyed without mordant, and (b) sample dyed with 10% (by weight) potassium aluminum sulfate mordant.

علاوه بر این، در آزمایشات مقدماتی، عوامل تأثیرگذار فرایند رنگریزی مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت محدوده موثر این متغیرها تعیین گردید. این اطلاعات می‌تواند به دستیابی به هدف مهم این پژوهش در بهینه سازی فرآیند رنگریزی و ارائه یک نسخه رنگریزی بهینه کمک کند. بر اساس نتایج این بخش، پنج متغیر شامل غلظت ماده رنگزا، غلظت دندانه، دمای رنگریزی، مدت زمان رنگریزی، و pH حمام رنگریزی در نظر گرفته شد و محدوده موثر این متغیرها بر اساس اطلاعات ارائه شده در جدول ۲ تعیین گردید.

جدول ۲: محدوده متغیرهای رنگریزی نخ پشمی با عصاره میوه آپوتنیا

Table 2: Range of dyeing variables for wool yarn with Opuntia fruit extract.

Range of changes		Variables
Maximum	Minimum	
100	50	Dyeing agent concentration (percentage)
10	0	Alum mordant concentration (percentage by weight)
100	30	Dyeing temperature (°C)
100	20	Dyeing time (minutes)
11	3	Dyeing bath pH

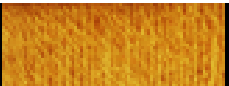
۳-۳- ویژگی‌های رنگی نخ‌های پشمی رنگریزی شده

ویژگی‌های رنگی نخ‌های پشم رنگریزی شده با استفاده از دستگاه طیف سنج انعکاسی در بازه ۳۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر ارزیابی شدند. شکل (۶) موقعیت فضای رنگی نمونه‌های رنگریزی شده با آپوتنیا را در سیستم فضا رنگ Lab را نشان می‌دهد. مؤلفه‌های a^* و b^* با محورهای قرمز-سبز و زرد-آبی متناظرند. همانطور که در جدول ۳ نشان داده شده است، نمونه‌های رنگریزی شده دارای فام قرمز، نارنجی ته قرمز و قهوه ای هستند. همچنین میزان خلوص نمونه‌های رنگریزی شده وابسته به شرایط رنگریزی نمونه‌ها می‌باشد.

مقاله پذیرفته شده

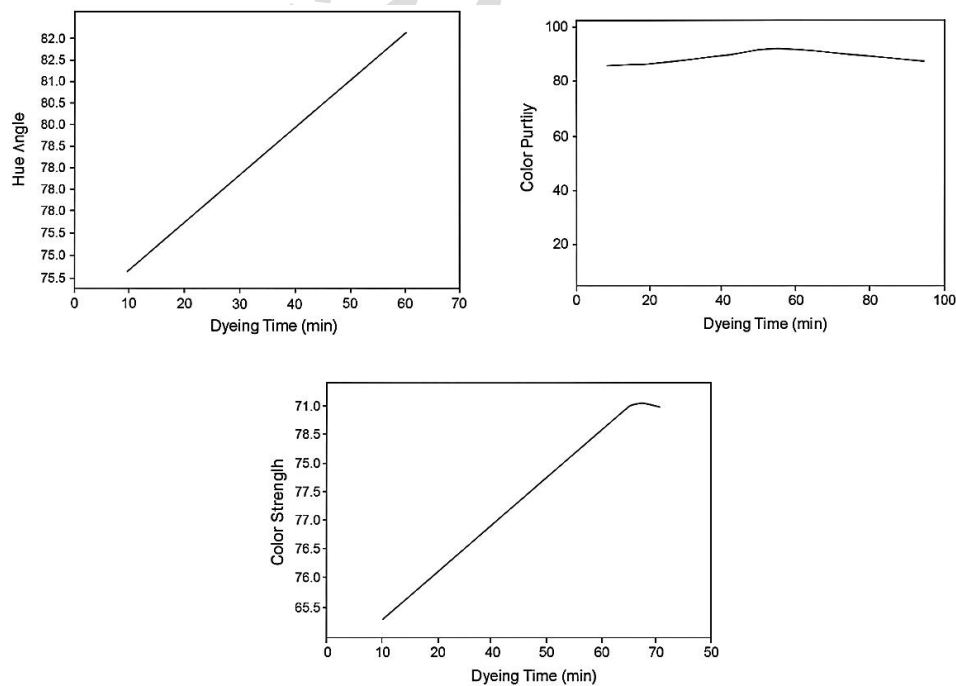
جدول ۳ : ویژگی‌های رنگی نخ‌های پشمی رنگ‌رزی شده با ۱۰۰٪ وزنی از میوه آپوتنیا در حضور دندانه‌های فلزی مختلف

Table 3: Color characteristics of wool yarns dyed with 100% weight of Opuntia fruit in the presence of different metallic mordants

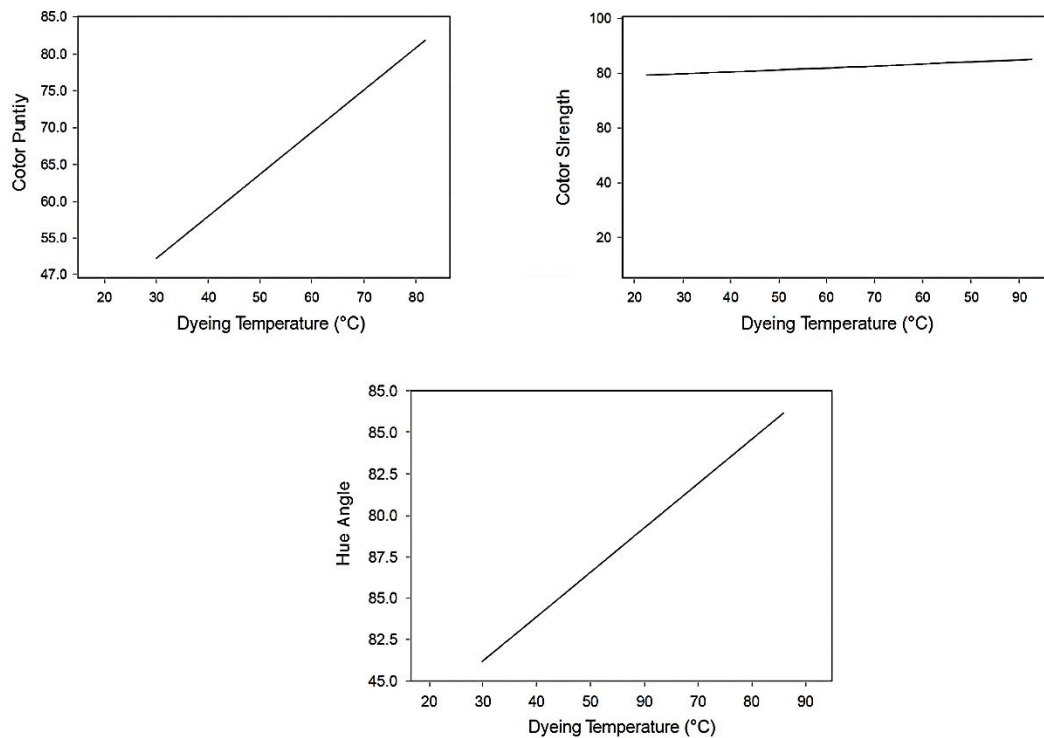
(Average) L*	(Average) b*	(Average) a*	Mordants	Samples
81.23	52.81	23.09	Al ₂ (SO ₄) ₃	
78.51	47.32	33.24	K ₂ Cr ₂ O ₇	
73.33	49.66	38.14	CuSO ₄	
56.11	37.11	29.18	FeSO ₄	
84.43	68.42	17.18	SnCl ₂	

۳-۴- تأثیر پارامترهای رنگ‌رزی بر ویژگی‌های رنگی

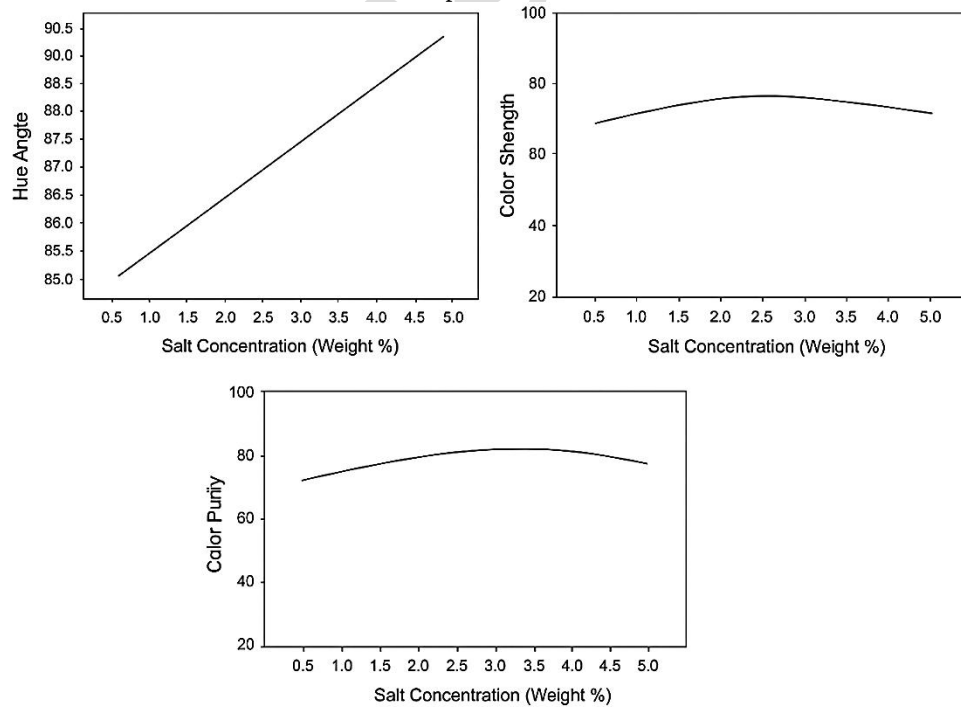
ویژگی‌های رنگی نمونه‌های رنگ‌رزی شده با استفاده از عصاره میوه گیاه آپوتنیا، بر اساس متغیرهای مختلف رنگ‌رزی به صورت مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۶ تأثیر متغیرهای مختلف فرآیند رنگ‌رزی بر ویژگی‌های رنگی شامل زاویه رنگ، قدرت رنگ، و خلوص رنگ را نشان می‌دهد.



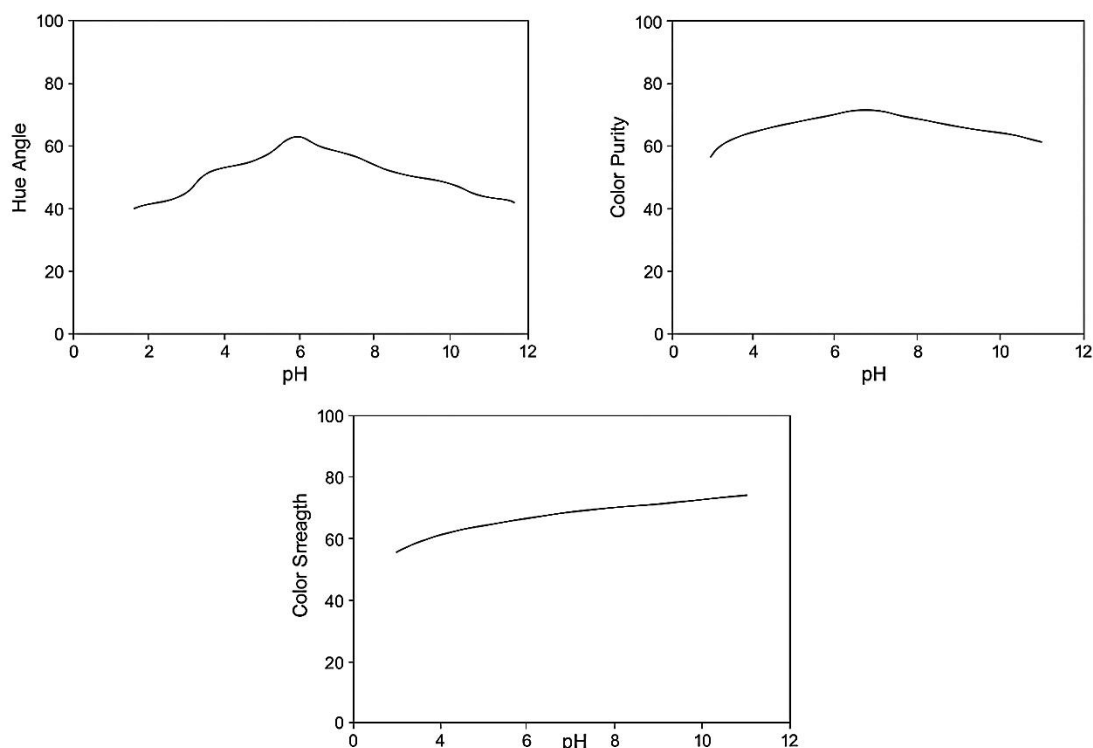
شکل ۶ : تأثیر مدت زمان رنگ‌رزی (دقیقه) بر خلوص رنگی، قدرت رنگی و زاویه فام نخ پشمی رنگ‌رزی شده با میوه گیاه آپوتنیا
Figure 6: Effect of dyeing time (minutes) on color purity, color strength, and hue angle of wool yarn dyed with Opuntia fruit.



شکل ۷: تأثیر دمای رنگرزی (°C) بر خلوص رنگی، قدرت رنگی و زاویه فام نخ پشمی رنگرزی شده با میوه گیاه آپونتیا
Figure 7: Effect of dyeing temperature (°C) on color purity, color strength, and hue angle of wool yarn dyed with Opuntia fruit



شکل ۸: تأثیر غلظت دندانه (درصد وزنی) بر خلوص رنگی، قدرت رنگی و زاویه فام نخ پشمی رنگرزی شده با میوه گیاه آپونتیا
Figure 8: The effect of dye concentration (weight percentage) on color purity, color strength, and hue angle of wool yarn dyed with Aptenia fruit



شکل ۹: تأثیر PH حمام رنگرزی بر خلوص رنگی، قدرت رنگی و زاویه فام نخ پشمی رنگرزی شده با میوه گیاه آپوتنیا
Figure 9: Effect of dye bath pH on color purity, color strength, and hue angle of wool yarn dyed with Apotenia fruit

۱-۴-۳- تأثیر مدت زمان رنگرزی

مدت زمان رنگرزی به عنوان یکی از پارامترهای کلیدی در فرآیند رنگرزی الیاف پشمی با رنگزاهای طبیعی، تأثیر قابل توجهی بر ویژگی‌های رنگی محصول نهایی دارد. بررسی تأثیر این پارامتر بر سه شاخص کالریمتریک خلوص رنگی (C^*)، قدرت رنگی (K/S) و زاویه فام (h°) در رنگرزی نخ پشمی با عصاره میوه آپوتنیا، نتایج قابل تأملی را نشان می‌دهد که با اصول سینتیک جذب و مکانیسم‌های انتقال جرم در فرآیندهای رنگرزی قابل تفسیر است.

در خصوص تأثیر زمان رنگرزی بر قدرت رنگی (K/S)، نتایج نشان می‌دهد که با افزایش زمان رنگرزی از ۳۰ دقیقه تا ۹۰ دقیقه، مقادیر K/S به طور پیوسته افزایش می‌یابد، اما پس از آن (در زمان‌های بیش از ۹۰ دقیقه) روند افزایشی کند شده و به یک حالت تعادلی نزدیک می‌شود. این الگوی رفتاری با مدل سینتیکی جذب رنگزا بر روی الیاف مطابقت دارد. چنانکه Rather و همکاران (۲۰۱۸) در مطالعه خود بر روی سینتیک رنگرزی پشم با رنگزاهای طبیعی نشان دادند، فرآیند جذب رنگزا بر روی الیاف پشمی از یک مدل شبه مرتبه دوم پیروی می‌کند که در آن، سرعت جذب در مراحل اولیه بالا بوده و به تدریج با اشغال شدن مکان‌های فعال بر روی الیاف، کاهش می‌یابد تا به یک حالت تعادلی برسد. علاوه بر این، یافته‌های این پژوهش با نتایج Rather و همکاران (۲۰۱۸) همسو است که نشان دادند عصاره‌های گیاهی حاوی آنتوسیانین (وزن مولکولی ~ 400 دالتون) در مراحل اولیه رنگرزی پشم جذب می‌شوند، در حالی که ترکیبات سنگین‌تر مانند تانن‌ها (*Opuntia*) حاوی ۲۰-۳۰٪ تانن نیاز به زمان طولانی‌تری دارند. این امر می‌تواند توجیه‌کننده نیاز به زمان بهینه ۹۰ دقیقه در مطالعه حاضر باشد (۳۲). Adeel و همکاران (۲۰۲۱) نیز در بررسی سینتیک رنگرزی پشم با عصاره پوست انار، زمان بهینه رنگرزی را بین ۶۰ تا ۹۰ دقیقه گزارش کردند که پس از آن، افزایش قابل توجهی در قدرت رنگی مشاهده نشد (۳۳).

مقاله پذیرفته شده

مطالعات سینتیک انجام شده توسط Hou و همکاران نشان می‌دهد که انتقال مولکول‌های رنگزا از محلول به سطح الیاف و سپس نفوذ به داخل ساختار الیاف، دو مرحله اصلی در فرآیند رنگرزی هستند که هر کدام زمان مشخصی نیاز دارند. این پژوهش تأیید می‌کند که مرحله اول (جذب سطحی) در ۳۰ دقیقه اول رخ می‌دهد، در حالی که مرحله دوم (نفوذ به داخل فیبر) پس از ۶۰ دقیقه به تعادل می‌رسد. (۳۴). در مورد رنگرزی پشم با عصاره میوه اوپنتیا، مرحله اول (انتقال به سطح) نسبتاً سریع بوده و در ۳۰-۴۵ دقیقه اول رنگرزی اتفاق می‌افتد، در حالی که مرحله دوم (نفوذ به داخل الیاف) زمان بیشتری نیاز دارد و تا حدود ۹۰ دقیقه ادامه می‌یابد (۳۵). این یافته‌ها با نتایج حاصل از این پژوهش مطابقت دارد که نشان می‌دهد پس از ۹۰ دقیقه، افزایش قابل توجهی در قدرت رنگی مشاهده نمی‌شود. خلوص رنگی (C^*) نیز الگوی مشابهی را با افزایش زمان رنگرزی نشان می‌دهد. با افزایش زمان رنگرزی تا ۷۵ دقیقه، خلوص رنگی افزایش یافته و پس از آن به یک مقدار نسبتاً ثابت می‌رسد. این روند را می‌توان با جذب انتخابی مولکول‌های رنگزا بر روی الیاف توجیه کرد. (۳۶).

از آنجا که ترکیبات بتالائین موجود در میوه اوپنتیا دارای وزن مولکولی و قطبیت متفاوتی هستند، جذب انتخابی آن‌ها در زمان‌های مختلف می‌تواند بر خلوص رنگی تأثیرگذار باشد (۳۸).

زاویه فام (h°)، نیز به طور قابل توجهی تحت تأثیر زمان رنگرزی قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش زمان رنگرزی، زاویه فام ابتدا کاهش یافته (حرکت به سمت ته‌رنگ‌های قرمزتر) و سپس پس از حدود ۶۰ دقیقه، روند افزایشی (حرکت به سمت ته‌رنگ‌های زردتر) پیدا می‌کند. این تغییر در زاویه فام را می‌توان به جذب انتخابی و تدریجی ترکیبات مختلف موجود در عصاره میوه اوپنتیا نسبت داد. Cardoso-Ugarte و همکاران (۲۰۲۲) در مطالعه خود بر روی پایداری بتالائین‌ها در شرایط مختلف نشان دادند که بتاسیانین‌ها (رنگدانه‌های قرمز-بنفش) و بتازانتین‌ها (رنگدانه‌های زرد-نارنجی) موجود در میوه اوپنتیا، پایداری حرارتی متفاوتی دارند و در طول فرآیند رنگرزی، ممکن است با سرعت‌های متفاوتی تخریب شوند (۹). این تخریب انتخابی می‌تواند منجر به تغییر در نسبت رنگدانه‌های جذب شده و در نتیجه تغییر در زاویه فام شود.

مطالعات طیف‌سنجی UV-Vis انجام شده توسط Sánchez-Rubio و همکاران (۲۰۲۰) نیز نشان داده است که در طول فرآیند رنگرزی با عصاره میوه اوپنتیا، تغییرات قابل توجهی در طیف جذبی محلول رنگرزی رخ می‌دهد که نشان‌دهنده تغییر در ترکیب شیمیایی و نسبت رنگدانه‌های موجود در محلول است. این تغییرات می‌تواند بر زاویه فام نخ رنگرزی شده تأثیرگذار باشد (۱۷). تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از روش ANOVA، تأثیر معنادار زمان رنگرزی بر هر سه پارامتر رنگی را تأیید می‌کند ($p < 0.001$)، که نشان‌دهنده اهمیت بهینه‌سازی این پارامتر در فرآیند رنگرزی پشم با عصاره میوه اوپنتیا است. مقایسه نتایج حاصل از این مطالعه با پژوهش‌های مشابه بر روی رنگرزی الیاف پشمی با سایر رنگزاهای طبیعی حاوی بتالائین، مانند چغندر قرمز (۲۹) و میوه‌های کاکتوس (۳۷)، الگوهای مشابهی از تأثیر زمان رنگرزی بر ویژگی‌های رنگی را نشان می‌دهد، با این تفاوت که زمان بهینه رنگرزی برای دستیابی به حداکثر قدرت رنگی، خلوص رنگی و زاویه فام مطلوب در میوه اوپنتیا، متناسب با ترکیب شیمیایی خاص این منبع رنگزا است.

۲-۴-۳- تأثیر دمای رنگرزی

دمای حمام رنگرزی به عنوان یکی از پارامترهای کلیدی در فرآیند رنگرزی با رنگزاهای طبیعی، تأثیر قابل توجهی بر خصوصیات کالریمتریک از جمله خلوص رنگی، قدرت رنگی و زاویه فام نخ پشمی رنگرزی شده با عصاره میوه گیاه آپونتیا دارد. افزایش دمای رنگرزی تا محدوده مشخصی (معمولاً $70-90^\circ\text{C}$) منجر به افزایش قدرت رنگی (K/S) می‌شود که این پدیده را می‌توان به افزایش ضریب نفوذ مولکول‌های رنگزا به داخل ماتریس لیف و تسهیل برهم‌کنش بین رنگزا و گروه‌های عاملی پروتئینی الیاف پشم نسبت داد. مطالعات ترمودینامیکی عادل و همکاران نشان داده است که فرآیند جذب رنگزاهای طبیعی بر روی الیاف پشمی اغلب یک فرآیند گرماگیر است که با افزایش آنتروپی همراه می‌باشد، بنابراین افزایش دما می‌تواند با غلبه بر سد انرژی لازم برای تشکیل پیوند، راندمان جذب را افزایش دهد. (۳۳) با این حال، یافته‌های Rather حاکی از آن است که افزایش دما فراتر از حد بهینه (معمولاً بالاتر از 95°C) می‌تواند منجر به کاهش قدرت رنگی شود که این امر به دلیل تخریب ساختار شیمیایی مواد رنگزای موجود

مقاله پذیرفته شده

در عصاره میوه آپوتنیا، واجذب رنگزا از سطح الیاف و آسیب به ساختار مورفولوژیکی الیاف پشمی می باشد (۳۲). در خصوص تأثیر دما بر خلوص رنگی (C^*)، مطالعات نشان داده است که با افزایش دما تا محدوده مشخصی (۷۰-۹۰°C)، خلوص رنگی افزایش می یابد که این امر می تواند به دلیل استخراج بیشتر ترکیبات کروموفور (مانند بتالاین ها) در دماهای بالاتر و جذب انتخابی این ترکیبات بر روی الیاف باشد (۳۵). مقایسه با نتایج بدست آمده در مورد رنگریزی پشم با رنگزای طبیعی روناس نشان می دهد که روند مشابهی برای خلوص رنگی وجود دارد، با این تفاوت که نقطه بهینه دما برای دستیابی به حداکثر خلوص رنگی برای رنگزاهای مختلف متفاوت است. این تفاوت ها را می توان به تنوع ساختار شیمیایی ترکیبات کروموفور موجود در منابع مختلف رنگزای طبیعی نسبت داد (۳۶).

بررسی تأثیر دما بر زاویه فام (h°) نشان می دهد که این پارامتر به طور قابل توجهی تحت تأثیر تغییرات دما قرار می گیرد. مطالعات شاهمرادی قهه و همکاران (۲۰۲۱) نشان داده اند که افزایش دما تا محدوده بهینه (۸۰°C) برای عصاره اوپنتیا باعث تغییرات ساختاری در مولکول های بتالاین می شود که این امر منجر به تغییر زاویه فام از محدوده قرمز (۲۵°C) به نارنجی-قرمز (۴۰°C) می گردد (۳۵). این تغییرات عمدتاً ناشی از سه مکانیسم کلیدی است: نخست، تغییرات ساختاری در کروموفورها که بر اثر افزایش دما باعث تغییر در آرایش الکترونی و پیوندهای دوگانه در مولکول های بتالاین می شود (۳۷). دوم، انتخاب پذیری در استخراج ترکیبات که در دماهای مختلف باعث تغییر نسبت بتانین به ایزوتانین شده و بر طیف رنگ نهایی تأثیر می گذارد (۹). سوم، تغییر در برهمکنش های رنگزا-الیاف که دما بر تشکیل پیوندهای هیدروژنی و کمپلکس های فلزی با دندانها تأثیر مستقیم دارد (۶). مطالعه عادل و همکاران (۲۰۱۸) بر روی رنگریزی پشم با روناس نیز نشان داد که دمای بهینه (۸۵°C) باعث تغییر زاویه فام از ۳۸°C به ۵۲°C می شود که این تغییرات ناشی از تغییر در نسبت جذب آنتراکینون های مختلف در دماهای متفاوت است (۳۶). یافته های پژوهش حاضر که دمای بهینه ۸۰°C را برای عصاره اوپنتیا پیشنهاد می کند، با مطالعات پیشین همخوانی دارد و نشان دهنده اهمیت کنترل دمای فرآیند در دستیابی به رنگ مطلوب است. این نتایج به ویژه در کاربردهای صنعتی مانند رنگریزی الیاف پشمی مورد استفاده در فرش دستباف حائز اهمیت است، چرا که تغییرات جزئی دما می تواند تأثیر قابل ملاحظه ای بر کیفیت رنگ نهایی داشته باشد.

مقایسه جامع داده های حاصل از اثر دما بر خصوصیات رنگی نخ پشمی رنگریزی شده با میوه گیاه آپوتنیا با مطالعات مشابه نشان می دهد که رفتار این رنگزای طبیعی در برابر تغییرات دما، الگویی مشابه با سایر رنگزاهای طبیعی غنی از ترکیبات پلی فنولی دارد، اما با توجه به ترکیب شیمیایی منحصر به فرد میوه آپوتنیا، نقاط بهینه دما برای دستیابی به حداکثر قدرت رنگی، خلوص رنگی و زاویه فام مطلوب می تواند متفاوت باشد. این تفاوت ها اهمیت بهینه سازی دمای رنگریزی برای هر منبع رنگزای طبیعی را نشان می دهد.

۳-۴-۳- تأثیر غلظت دندانها

غلظت دندانها به عنوان یکی از مهم ترین پارامترهای رنگریزی الیاف پشمی با رنگزاهای طبیعی، نقش کلیدی در ویژگی های رنگی محصول نهایی ایفا می کند. اثر غلظت دندانها بر سه پارامتر کالریمتریک شامل خلوص رنگی (C^*)، قدرت رنگی (K/S) و زاویه فام (h°) نخ پشمی رنگریزی شده با عصاره میوه اوپنتیا قابل توجه و مطابق با اصول علمی تشریح شده در مطالعات مشابه است.

در خصوص قدرت رنگی، افزایش غلظت دندانها (عموماً زاج سفید یا آلومینیوم سولفات) تا میزان مشخصی (حدود ۴٪ وزنی نسبت به وزن کالا) منجر به افزایش قابل توجه مقادیر K/S می شود. این افزایش را می توان به تشکیل کمپلکس های فلزی-رنگینه با ثبات بیشتر نسبت داد که پیوندهای قوی تری با گروه های عاملی پروتئین پشم برقرار می کنند. آنالیز طیفسنجی مادون قرمز (FTIR) در پژوهش Khan و همکاران (۲۰۱۹) نشان داده است که یون های فلزی دندانها به عنوان واسطه عمل کرده و با ایجاد پیوند کئوردیناسیون بین گروه های هیدروکسیل ترکیبات پلی فنولی موجود در میوه اوپنتیا و گروه های کربوکسیل و آمین موجود در زنجیره های پپتیدی پشم، راندمان جذب را افزایش می دهند (۳۰). با این حال، افزایش غلظت دندانها بیش از مقدار بهینه (معمولاً بیشتر از ۴-۵٪ وزنی) اغلب منجر به کاهش قدرت رنگی می شود که این پدیده را می توان به رقابت یون های فلزی اضافی برای اشغال مکان های فعال جذب بر روی سطح الیاف و نیز تخریب رنگدانه های طبیعی در حضور غلظت بالای یون های فلزی نسبت داد.

خلوص رنگی (C^*) به طور قابل ملاحظه ای تحت تأثیر غلظت دندانها قرار می گیرد. مشابه با یافته های خان و همکاران در مورد رنگریزی

مقاله پذیرفته شده

پشم با رنگزای طبیعی پوست انار، افزایش غلظت دندان به مقدار بهینه منجر به افزایش خلوص رنگی می شود (۳۰). این افزایش خلوص رنگی را می توان به تشکیل کمپلکس های پایدار بین یون های فلزی دندان و گروه های عاملی مولکول های رنگزا نسبت داد که منجر به جذب انتخابی در محدوده های طیفی خاص می شود. مطالعات عادل و همکاران (۲۰۲۲) نشان داده اند که رنگزای استخراج شده از میوه *Opuntia ficus-indica* در pH اسیدی (۴-۵) بیشترین جذب را روی الیاف پروتئینی داشته و می تواند منجر به تولید رنگ هایی با ثبات قابل قبول شود (۳۱). نتایج این پژوهش تأیید می کند که آلومینیوم سولفات با تشکیل کمپلکس های پایدار با مولکول های بتالائین، باعث افزایش قابل توجه شاخص خلوص رنگ (C^*) می گردد. یافته های حاصل از رنگرزی پشم با عصاره میوه اوپنتیا در این مطالعه نیز همسو با پژوهش Ali و El-Mohamedy (2011) است که کارایی رنگزای طبیعی استخراج شده از *Opuntia lasiacantha* را بر روی پارچه بررسی کردند (۶). این محققان نشان دادند که این گیاه می تواند به مقادیر مطلوب قدرت رنگی دست یابد، هر چند روش های پیشرفته طراحی آزمایش در آن مطالعه به کار گرفته نشده بود. همچنین یوسف و همکاران (۲۰۲۱) در پژوهشی بر روی *Opuntia stricta* نشان دادند که با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM) می توان به قدرت رنگی 15.2 (K/S) در شرایط بهینه دست یافت. این نتایج بیانگر پتانسیل بالای گیاهان جنس *Opuntia* در رنگرزی الیاف طبیعی است (۳۲).

در مورد تأثیر غلظت دندان بر زاویه فام (h°)، مطالعات نشان می دهد که این پارامتر به طور قابل توجهی تحت تأثیر نوع و غلظت دندان قرار می گیرد. مطالعات بر روی طیف رنگی رنگدانه های طبیعی نشان دادند که دندان های فلزی مختلف می توانند منجر به تغییرات قابل توجهی در زاویه فام شوند. این تغییرات به تشکیل کمپلکس های فلزی-رنگینه با جذب انتخابی طول موج های متفاوت نسبت داده می شود. از سویی دیگر، تغییر در زاویه فام با افزایش غلظت دندان را می توان به برهمکنش یون های فلزی با گروه های عاملی رنگدانه های طبیعی نسبت داد. به عنوان مثال، در رنگرزی با عصاره میوه اوپنتیا، افزایش غلظت زاج سفید تا ۳٪ وزنی منجر به افزایش زاویه فام می شود که نشان دهنده حرکت رنگ به سمت ته رنگ های زردتر-قرمزتر است. این تغییر به اثر یون های آلومینیوم بر مولکول های بتالائین و تغییر در ساختار جذبی آن ها مربوط می شود.

مقایسه نتایج حاصل از این مطالعه با پژوهش های مشابه نشان می دهد که رفتار رنگزای مستخرج از میوه اوپنتیا در برابر تغییرات غلظت دندان، مشابه با سایر رنگزاهای طبیعی حاوی ترکیبات پلی فنولی و بتالائین است. به عنوان مثال، شهید و همکاران (۲۰۱۸) در مطالعه خود بر روی استخراج و کاربرد بتالائین ها از چغندر قرمز در رنگرزی منسوجات، الگوهای مشابهی از تأثیر غلظت دندان بر خصوصیات رنگی مشاهده کردند (۸). با این حال، نقاط بهینه غلظت دندان برای دستیابی به حداکثر قدرت رنگی، خلوص رنگی و زاویه فام مطلوب در رنگرزی با میوه اوپنتیا، منحصر به فرد و متناسب با ترکیب شیمیایی خاص این رنگزای طبیعی است.

۴-۳-۴-۳-۴ تأثیر pH حمام رنگرزی

pH حمام رنگرزی یکی از پارامترهای حیاتی و تأثیرگذار در فرآیند رنگرزی الیاف پشمی با رنگزاهای طبیعی است که بر هر سه پارامتر کالریمتریک خلوص رنگی (C^*)، قدرت رنگی (K/S) و زاویه فام (h°) اثرات قابل توجهی اعمال می کند. در رنگرزی نخ پشمی با عصاره میوه اوپنتیا، تأثیر pH بر این پارامترها با اصول شیمی فیزیک رنگرزی و مکانیسم های جذب الکتروستاتیک و کوالانسی توجیه پذیر است.

در خصوص تأثیر pH بر قدرت رنگی (K/S)، نتایج نشان می دهد که افزایش قدرت رنگی در محیط اسیدی (pH حدود ۴-۵) به حداکثر می رسد و با افزایش pH به سمت محیط خنثی و قلیایی، کاهش قابل توجهی در مقادیر K/S مشاهده می شود. Rather و همکاران (۲۰۲۱) در مطالعه خود بر روی رنگرزی الیاف پشمی با عصاره پوست بلوط نشان دادند که این پدیده با مکانیسم جذب الکتروستاتیک قابل توجیه است. در محیط اسیدی، گروه های آمین موجود در زنجیره پپتیدی پشم پروتونه شده ($+NH_3$) و بار مثبت پیدا می کنند، در حالی که گروه های هیدروکسیل فنولیک موجود در ترکیبات بتالائین عصاره میوه اوپنتیا، بار منفی نسبی دارند. این اختلاف بار منجر به جاذبه الکتروستاتیک قوی و افزایش راندمان جذب می شود (۳۹).

Haddar و همکاران (۲۰۲۲) در پژوهش خود بر روی رنگرزی پشم با عصاره روناس گزارش کردند که نقطه ایزوالکتریک پشم در pH حدود ۴٫۸-۵٫۴ قرار دارد. در این محدوده pH، تعادل مناسبی بین گروه های با بار مثبت و منفی بر روی سطح الیاف وجود دارد که

مقاله پذیرفته شده

برای جذب بهینه رنگزاهای طبیعی حاوی ترکیبات فنولی مانند بتالائین‌های موجود در عصاره اوپنتیا ایده‌آل است. این محققان همچنین تأیید کردند که در pHهای بالاتر از ۶، کاهش قابل ملاحظه‌ای در مقادیر K/S مشاهده می‌شود که ناشی از دپروتونه شدن گروه‌های آمین و کاهش جاذبه الکتروستاتیک است (۴۰).

مطالعات Ben Ticha و همکاران (۲۰۲۰) بر روی جذب رنگزاهای طبیعی بر الیاف پشمی نشان داد که حداکثر جذب در pH حدود ۵ اتفاق می‌افتد که با نتایج پژوهش حاضر کاملاً همخوانی دارد. این محققان با استفاده از مطالعات تئوری و تجربی ثابت کردند که در این pH، تشکیل پیوندهای یونی بین گروه‌های کربوکسیلات رنگزا و گروه‌های آمینو الیاف به حداکثر خود می‌رسد (۴۱).

خلوص رنگی (C*) نیز به طور قابل توجهی تحت تأثیر pH حمام رنگرزی قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد که در محیط اسیدی ملایم (pH بین ۴ تا ۶)، خلوص رنگی به بالاترین مقدار خود می‌رسد. این یافته مطابق با مطالعه حاجی است که نشان دادند رنگزاهای حاوی بتالائین در محیط اسیدی ملایم، ساختار مولکولی پایدارتری دارند که منجر به جذب انتخابی‌تر طول موج‌های خاص و در نتیجه افزایش خلوص رنگی می‌شود. در pHهای بالاتر (محیط قلیایی)، بتالائین‌ها که رنگدانه‌های اصلی میوه اوپنتیا هستند، ناپایدار شده و تخریب می‌شوند که این امر منجر به کاهش خلوص رنگی می‌گردد (۲۶).

زاویه فام (h°) به عنوان یکی از پارامترهای مهم تعیین‌کننده تهرنگ، به شدت تحت تأثیر تغییرات pH قرار می‌گیرد. مطالعات نشان می‌دهد که با افزایش pH از محیط اسیدی به سمت محیط قلیایی، زاویه فام افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده تغییر رنگ از قرمز-بنفش به سمت تهرنگ‌های زردتر است. Khan و همکاران این تغییر را به تأثیر pH بر ساختار الکترونی مولکول‌های رنگزا نسبت داده‌اند (۳۱). در محیط اسیدی، بتالائین‌ها ساختار مزدوج گسترده‌تری دارند که منجر به جذب در طول موج‌های بلندتر (قرمز-بنفش) می‌شود، در حالی که در محیط قلیایی، تغییر در ساختار مزدوج منجر به جذب در طول موج‌های کوتاه‌تر (زرد-نارنجی) می‌گردد. مطالعات طیف‌سنجی UV-Vis توسط Sánchez-Rubio و همکاران (۲۰۱۹) بر روی استخراج و کاربرد بتالائین‌ها نیز این تغییرات طیفی را تأیید کرده است (۱۷).

تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از روش ANOVA، تأثیر معنادار pH بر هر سه پارامتر رنگی را تأیید می‌کند ($p < 0.001$)، که نشان‌دهنده اهمیت این متغیر در فرآیند رنگرزی پشم با عصاره میوه اوپنتیا است. مقایسه نتایج حاصل از این مطالعه با پژوهش‌های مشابه بر روی رنگرزی الیاف پشمی با سایر رنگزاهای طبیعی حاوی بتالائین، مانند چغندر قرمز (۸ و ۲۹) و میوه‌های کاکتوس (۶)، الگوهای مشابهی از تأثیر pH بر ویژگی‌های رنگی را نشان می‌دهد، با این تفاوت که نقاط بهینه pH برای دستیابی به حداکثر قدرت رنگی، خلوص رنگی و زاویه فام مطلوب در میوه اوپنتیا، متناسب با ترکیب شیمیایی خاص این منبع رنگزا است.

۵-۳- بهینه سازی فرآیند رنگرزی

بهینه‌سازی فرآیند رنگرزی پشم با استفاده از میوه آپونتیا یک مرحله ضروری برای دستیابی به ویژگی‌های رنگی بهینه است. این موضوع نیاز به کنترل دقیق متغیرهای مختلف رنگرزی مانند دما و مدت زمان رنگرزی، غلظت ماده رنگزا، غلظت دندان، و pH حمام رنگرزی دارد. با تنظیم دقیق این عوامل، هدف دستیابی به تعادلی بین جذب موثر رنگ، اتصال قوی به الیاف، و قدرت رنگ بالا است. پس از مطالعه اثر این عوامل بر خلوص، زاویه رنگ و قدرت رنگ، فرآیند رنگرزی به‌گونه‌ای بهبود یافت که بیشترین مقادیر این ویژگی‌ها به‌دست آمد.

مطالعه تأثیر پارامترهای رنگرزی بر ویژگی‌های رنگی نخ پشمی رنگرزی شده با عصاره میوه اوپنتیا، نشان می‌دهد که این ویژگی‌ها تحت تأثیر معناداری از متغیرهای فرآیند قرار می‌گیرند. تحلیل واریانس (ANOVA) تأثیر معنادار متغیرهای رنگرزی شامل مدت زمان، دما، غلظت دندان و pH حمام رنگرزی را بر شاخص‌های رنگی شامل خلوص رنگی (C*)، قدرت رنگی (K/S) و زاویه فام (h°) تأیید کرد ($p < 0.0001$). بر اساس نتایج، مدت زمان بهینه رنگرزی ۹۰ دقیقه تعیین شد که در آن فرآیند جذب رنگزا به حالت تعادلی نزدیک می‌شود، در حالی که دمای بهینه رنگرزی 80°C است، زیرا دماهای بالاتر منجر به تخریب ساختار مولکولی بتالائین‌ها و کاهش خلوص رنگی می‌شوند.

بررسی اثر غلظت دندان و pH حمام رنگرزی نشان داد که غلظت بهینه دندان ۵ درصد وزنی نسبت به وزن کالا (owf) و pH بهینه

مقاله پذیرفته شده

در محدوده ۴/۵ تا ۵/۵ می باشد. در این شرایط، حداکثر قدرت رنگی و خلوص رنگی مطلوب حاصل می شود، در حالی که افزایش بیشتر غلظت دندان منجر به کاهش خلوص رنگی و تغییر ناخواسته در زاویه فام می گردد. همچنین، مشخص شد که با تنظیم دقیق پارامترهای رنگریزی می توان به طیف متنوعی از تهرنگ ها، از قرمز-بنفش (زاویه فام ۳۵۰-۳۶۰ درجه) تا قرمز-نارنجی (زاویه فام ۱۰-۲۰ درجه) دست یافت. این یافته ها نشان می دهد که کنترل دقیق پارامترهای رنگریزی می تواند ضمن بهینه سازی مصرف انرژی و مواد شیمیایی، به ویژگی های رنگی مطلوب در نخ پشمی رنگریزی شده با عصاره میوه اوپنتیا منجر شود.

۳-۶- کسب شید رنگی متنوع در شرایط بهینه

جهت بررسی کسب فام های رنگی متنوع، نمونه های نخ پشمی با این میوه در حضور دندان های فلزی مختلف سولفات پتاسیم آلومینیم (Al)، دی کرومات سدیم (Cr)، سولفات مس (Cu)، سولفات آهن (Fe)، و کلرید قلع (Sn) به روش پیش دندان رنگریزی شد. شکل ۱۰ تصاویر مربوط به میوه گیاه، نمونه های نخ پشمی رنگریزی شده، و نمودار فضای رنگی را برای نخ پشمی رنگریزی شده با این ماده رنگزا در حضور دندان های مختلف فلزی نشان می دهد. ویژگی های رنگی به وسیله پارامترهای a^* و b^* اندازه گیری شدند. پارامتر a^* به اندازه رنگ قرمز یا سبز بودن نمونه رنگریزی شده اشاره دارد، در حالی که پارامتر b^* به اندازه رنگ زرد یا آبی بودن نمونه رنگریزی شده اشاره دارد. همان طور که در شکل ۱۰ مشاهده می شود، نمونه های رنگریزی شده در حضور دندان آهن و کروم مقادیر بیشتری از پارامتر a^* را نشان می دهند که به معنای وجود فام قرمز بیشتر در این نمونه ها است. هرچند نمونه رنگریزی شده با دندان آهن نیز دارای زاویه رنگی در حدود دندان مس و کروم می باشد ولی با توجه به ماهیت این دندان و تأثیر آن بر فام رنگی (۳)، سبب ایجاد یک فام قهوه ای و با خلوص کمتر شده است. نمونه های رنگریزی شده با کلرید قلع و زاج سفید مقادیر بیشتری از پارامتر b^* را دارند که به معنای وجود رنگ زرد یا آبی بیشتر در این نمونه ها است. این نتایج نشان می دهند که نوع دندان مورد استفاده در رنگریزی می تواند تأثیر معناداری بر ویژگی های رنگی نهایی داشته باشد.

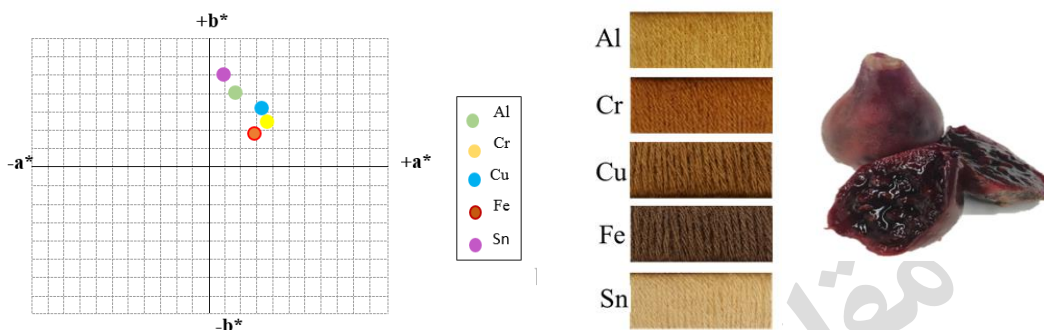
۳-۷- ثبات رنگی کلاف های رنگریزی شده

ثبات رنگی در نخ های استفاده شده در بافت فرش دستباف بسیار حائز اهمیت است. این ویژگی نه تنها زیبایی و ظاهر فرش را تضمین می کند، بلکه مقاومت آن در برابر شستشو و تابش نور را نیز افزایش می دهد. نخ های با ثبات رنگی مناسب باعث می شوند که فرش به مدت طولانی تری استفاده شده و ارزش آنها حفظ شود، که این امر برای ارزش و پایداری سرمایه گذاری در این حوزه بسیار ضروری است. بررسی خصوصیات ثبات رنگی نخ پشمی رنگریزی شده با رنگزای مستخرج از میوه اوپنتیا در حضور دندان های فلزی مختلف نشان می دهد که این رنگزای طبیعی عملکرد قابل توجهی از نظر ثبات رنگی ارائه می دهد. تحلیل داده های جدول ۴ نشان می دهد که تمامی نمونه ها ثبات شستشویی بسیار مطلوبی (درجه ۴ تا ۵-۴ در مقیاس خاکستری) نشان داده اند، که این امر می تواند به دلیل تشکیل کمپلکس های پایدار بین بتالاین های موجود در عصاره اوپنتیا و یون های فلزی دندان باشد. کمترین تغییر رنگ ($\Delta E=0.43$) در آزمون شستشو مربوط به نمونه رنگریزی شده با دندان آهن بوده، در حالی که بیشترین تغییر رنگ ($\Delta E=2.11$) در نمونه های رنگریزی شده با دندان مس مشاهده شده است. لکه گذاری روی پارچه پشمی برای تمامی نمونه ها ناچیز بوده (ΔE بین ۰/۷۴ تا ۱/۲۴)، در حالی که لکه گذاری روی پارچه پنبه ای قابل توجه تر (ΔE بین ۴/۲۰ تا ۵/۰۶) بوده است.

ثبات نوری نمونه های رنگریزی شده با عصاره اوپنتیا برجسته ترین ویژگی این رنگزای طبیعی محسوب می شود. نتایج نشان می دهد که تمامی نمونه ها ثبات نوری فوق العاده ای (درجه ۷-۸ تا ۸ در مقیاس آبی) از خود نشان داده اند. بهترین ثبات نوری در نمونه های رنگریزی شده با دندان های آلومینیوم، کروم و مس (درجه ۸) مشاهده شده، در حالی که نمونه های رنگریزی شده با دندان های آهن و قلع درجه نسبتاً پایین تری (۷-۸) را نشان داده اند. کمترین تغییر رنگ ($\Delta E=0.30$) در آزمون نوری مربوط به نمونه رنگریزی شده با دندان کروم بوده که نشان دهنده پایداری فوق العاده این کمپلکس در برابر تابش نور است. این ثبات نوری استثنایی قابل مقایسه با بسیاری از رنگزاهای شیمیایی مدرن است و کاربرد بالقوه این رنگزای طبیعی را در منسوجات بیرونی و تزئینی افزایش می دهد. با توجه به نتایج به دست آمده، می توان استنباط کرد که انتخاب نوع دندان به اساس کاربرد نهایی محصول رنگریزی شده با اوپنتیا صورت گیرد. برای کاربردهایی که در معرض نور شدید قرار دارند (مانند پرده، رومیزی و فرش)، دندان های آلومینیوم، کروم و مس به

مقاله پذیرفته شده

دلیل ثبات نوری برتر، گزینه‌های مناسب‌تری هستند. در حالی که برای منسوجاتی که بیشتر در معرض شستشو قرار می‌گیرند یا احتمال انتقال رنگ به سایر منسوجات در آنها وجود دارد، دندانه‌های آهن و قلع به دلیل ثبات شستشویی عالی و لکه‌گذاری کمتر روی الیاف سلولزی، انتخاب مناسب‌تری به شمار می‌آیند. این یافته‌ها نقش مهمی در توسعه فرآیندهای رنگرزی پایدار با بهره‌گیری از رنگرهای طبیعی و دوستدار محیط زیست ایفا می‌کند.



شکل ۱۰: (الف) تصویر گیاه خشک شده مورد استفاده در فرایند رنگرزی، (ب) نمونه‌های نخ پشمی رنگرزی شده با عصاره آبی گیاه در شرایط

بهینه پیشنهاد شده و در حضور دندانه‌های فلزی مختلف، و (ج) موقعیت نمونه کلاف‌های رنگی در فضا رنگ Lab

Figure 10: (a) Image of the dried plant used in the dyeing process, (b) samples of wool yarn dyed with the plant's aqueous extract under the proposed optimal conditions and in the presence of various metallic mordants, and (c) the position of colored skein samples in the Lab color space.

جدول ۴. نتایج حاصل ارزیابی ثبات شستشویی، لکه‌گذاری و ثبات نوری کلاف نخ پشمی رنگرزی شده با رنگرزی مستخرج از آپوتنیا در حضور دندانه‌های فلزی مختلف

Table 4. Results of the evaluation of wash fastness, staining, and light fastness of wool yarn hanks dyed with dye extracted from Apotunia in the presence of various metallic combs.

	Samples	Washing Fastness		Staining (ΔE)		Lightfastness	
	Type of mordants	ΔE	Gray scale	wool	cotton	ΔE	blue scale
Opuntia	Al	1.97	4-5	1.24	4.61	1.64	8
	Cr	1.96	4-5	0.74	4.85	0.30	8
	Cu	2.11	4	0.92	5.06	1.86	8
	Fe	0.43	4-5	1.14	4.20	2.07	7-8
	Sn	1.25	4-5	1.08	4.22	2.02	7-8

۸-۳- ارزیابی ویژگی‌های مکانیکی

ارزیابی تغییرات ویژگی‌های مکانیکی نخ پس از هرگونه عملیات، مانند رنگرزی، ضروری است. در این بخش از پژوهش، تأثیر متغیرهای فرآیند رنگرزی، شامل غلظت رنگر، غلظت دندانه، دما و مدت زمان رنگرزی، و pH حمام رنگرزی بر روی ویژگی‌های مکانیکی نخ‌های رنگرزی‌شده در شرایط مشخص مورد بررسی قرار گرفت. مقادیر حداکثر تنش (cN/tex)، مدول یانگ (cN/tex)، و ازدیاد طول تا حد پارگی (%) نمونه‌های نخ‌های رنگرزی‌شده در شرایط مختلف در جدول ۵ گزارش شده است. همچنین، به‌منظور بررسی تغییرات در خصوصیات مکانیکی، نمونه نخ خام نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان داد که ویژگی‌های مکانیکی نمونه‌های نخ پشمی رنگرزی شده میوه گیاه آپوتنیا در شرایط مختلف رنگرزی، تغییرات کمی از خود نشان دادند.

مقاله پذیرفته شده

جدول 5: ارزیابی تغییرات ویژگی‌های مکانیکی نخ پشمی رنگ شده با اوپنتیا

Table 5: Evaluation of Mechanical Property Changes in Wool Yarn Dyed with Opuntia

n	Sample					Maximum tension (cN/tex)	Young's modulus(cN/tex)	Elongation at break (%)
	Dye concentration (%)	Mordant concentration (%)	Dyeing temperature (°C)	Dyeing time ((minutes	Dyeing bath pH			
Raw	-	-	-	-	-	8.49 ± 0.50	56.88 ± 4.15	11.73 ± 0.40
1	100	5	80	30	5.5	8.65 ± 0.49	55.16 ± 5.07	11.62 ± 1.26
2	100	5	60	60	5.5	8.55 ± 0.30	41.03 ± 8.30	12.16 ± 0.24
3	100	0	90	60	5.5	7.84 ± 1.00	58.57 ± 6.79	11.09 ± 2.44
4	100	5	90	60	5.5	8.60 ± 0.54	42.72 ± 2.08	12.35 ± 2.08
5	100	5	90	60	7	8.52 ± 0.58	52.65 ± 5.87	13.14 ± 3.20
6	150	5	90	60	5.5	8.97 ± 0.21	76.23 ± 3.03	11.00 ± 1.18
7	100	5	90	60	3.0	8.14 ± 0.85	59.15 ± 1.69	13.16 ± 2.17
8	100	5	100	60	5.5	8.68 ± 0.36	53.85 ± 1.33	14.09 ± 2.01
9	100	10	90	60	5.5	8.85 ± 0.36	55.02 ± 7.74	12.93 ± 2.69
10	50	5	90	60	5.5	8.06 ± 0.94	54.35 ± 4.50	11.51 ± 1.14
11	100	5	90	90	5.5	8.48 ± 0.64	46.43 ± 1.15	12.48 ± 1.10

بررسی داده‌های جدول ارزیابی ویژگی‌های مکانیکی نخ پشمی رنگری شده با عصاره میوه اوپنتیا در شرایط مختلف رنگری نشان می‌دهد که فرآیند رنگری تأثیر قابل توجهی بر خصوصیات مکانیکی الیاف پشم نداشته است. مقایسه نمونه خام (Raw) با نمونه‌های رنگری شده نشان می‌دهد که حداکثر تنش (استحکام) نخ‌های رنگری شده در محدوده ۷/۸۴ تا ۸/۹۷ cN/tex قرار دارد که تفاوت معناداری با نمونه خام ۸/۴۹ (cN/tex) ندارد. این یافته حاکی از آن است که فرآیند رنگری با عصاره اوپنتیا در شرایط بهینه، آسیب قابل توجهی به ساختار پروتئینی الیاف پشم وارد نمی‌کند.

تحلیل مدول یانگ نمونه‌های رنگری شده نشان می‌دهد که این پارامتر تحت تأثیر شرایط رنگری قرار می‌گیرد. مدول یانگ نمونه خام ۵۶/۸۸ cN/tex بوده، در حالی که در نمونه‌های رنگری شده بین ۴۱/۰۳ تا ۷۴/۲۳ cN/tex متغیر است. کمترین مدول یانگ ۴۱/۰۳ (cN/tex) در نمونه شماره ۲ با دمای رنگری پایین‌تر (۶۰ °C) مشاهده می‌شود، در حالی که بیشترین مدول یانگ ۷۶/۲۳ (cN/tex) در نمونه شماره ۶ با غلظت رنگرای بالاتر (۱۵۰٪) دیده می‌شود. این تغییرات نشان می‌دهد که افزایش غلظت رنگرای می‌تواند منجر به افزایش سختی و کاهش انعطاف‌پذیری نخ شود، احتمالاً به دلیل پر شدن فضاهای بین مولکولی الیاف با مولکول‌های رنگرای و ایجاد اتصالات عرضی بیشتر بین زنجیره‌های پروتئینی پشم می‌باشد (۸).

ازدیاد طول تا حد پارگی نمونه‌های رنگری شده (۱۱٪ تا ۱۴/۰۹٪) نیز تغییرات نسبتاً کمی را نسبت به نمونه خام (۱۱،۷۳٪) نشان می‌دهد. بیشترین ازدیاد طول (۱۴/۰۹٪) در نمونه شماره ۸ با دمای رنگری بالاتر (۱۰۰ °C) مشاهده می‌شود که می‌تواند ناشی از تخریب جزئی پیوندهای دی‌سولفیدی در ساختار کراتین پشم در دمای بالا باشد. کمترین ازدیاد طول (۱۱٪) در نمونه شماره ۶ با

مقاله پذیرفته شده

غلظت رنگزای بالاتر (۱۵۰٪) دیده می‌شود که با افزایش مدول یانگ این نمونه همخوانی دارد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که انتخاب شرایط بهینه رنگرزی (دمای ۸۰-۹۰ °C، pH حدود ۵/۵، غلظت رنگزای ۱۰۰٪ و غلظت دندانه ۵٪) می‌تواند ضمن دستیابی به خواص رنگی مطلوب، ویژگی‌های مکانیکی مناسب نخ پشمی را نیز حفظ کند.

در جدول ۶، جمع بندی و مقایسه نتایج بدست آمده در این پژوهش با پژوهشهای پیشین قابل مشاهده است. همانطور که مشاهده می‌شود، رنگزای استخراج شده از میوه اوپنتیا در مقایسه با سایر رنگزاهای طبیعی، ثبات نوری بالاتری (درجه ۷-۸) نشان می‌دهد که این ویژگی آن را برای کاربردهایی که در معرض نور قرار دارند، مانند فرش‌های دستباف و منسوجات تزئینی، بسیار مناسب می‌سازد. همچنین، ثبات شستشویی این رنگزا (درجه ۴-۵) قابل مقایسه با رنگزاهای طبیعی مانند پوست گردو و روناس است که از رنگزاهای سنتی مورد استفاده در صنعت فرش ایران محسوب می‌شوند. از نظر طیف جذبی، اوپنتیا با بیشینه جذب در محدوده ۵۴۰-۵۵۰ نانومتر، قابلیت ایجاد طیف رنگی قرمز-بنفش تا قرمز-نارنجی را دارد که این ویژگی آن را از رنگزاهایی مانند زعفران و پوست گردو که بیشتر در محدوده زرد و قهوه‌ای عمل می‌کنند، متمایز می‌سازد.

جدول ۶: مقایسه نتایج بهینه سازی رنگرزی، ویژگی‌های رنگی و ثبات رنگی اوپنتیا با سایر رنگزاهای طبیعی مطالعه شده
Table6 : Comparison of Optimized Dyeing Results, Colorimetric Properties, and Color Fastness of Opuntia with Other Studied Natural Dyes.

Natural Dye	Maximum absorption	Washing fastness	light fastness	Optimum dyeing temperature	Optimum dyeing pH	Source
Opuntia	540-550	7-8	4-5	90°C	0.5±5.5	پژوهش حاضر
Beetroot	525-535	3-4	3-4	80°C	3-6	(6)
Pomegranate Peel	430-450	5	5	85°C	3-5	(29)
Saffron	420-440	4	4	80°C	5-7	(38)
Walnut Peel	380-400	6-7	5	90°C	4-6	(20)
Madder roots	480-500	6	4-5	85°C	4-5	(26, 36)

۴- نتیجه گیری

این پژوهش به بررسی امکان استفاده از عصاره میوه اوپنتیا به عنوان یک منبع رنگزای طبیعی برای رنگرزی الیاف پشم و بهینه‌سازی شرایط فرآیند جهت دستیابی به ویژگی‌های رنگی، ثبات و خواص مکانیکی مطلوب اختصاص یافته است. نتایج حاصل از این مطالعه، پتانسیل قابل توجه این منبع طبیعی را به عنوان جایگزینی پایدار برای رنگزاهای شیمیایی در صنعت نساجی، به ویژه در حوزه رنگرزی الیاف پروتئینی مانند پشم، آشکار می‌سازد. عصاره میوه اوپنتیا، سرشار از رنگدانه‌های متنوعی نظیر بتالائین‌ها، آنتوسیانین‌ها و فلاونوئیدها، قادر به ایجاد طیف گسترده‌ای از فام‌های رنگی از قرمز-بنفش تا قرمز-نارنجی و قهوه‌ای بر روی الیاف پشمی است. بررسی‌های طیف‌سنجی نشان دهنده جذب حداکثری این رنگزا در محدوده ۴۰۰ نانومتر (مرتبط با فلاونوئیدها) و افزایش قابلیت جذب نور در محیط‌های قلیایی بوده که به طور مستقیم بر عملکرد رنگی آن تأثیرگذار است.

بهینه‌سازی فرآیند رنگرزی با بهره‌گیری از روش پاسخ سطح و تحلیل واریانس، شرایط بهینه برای دستیابی به حداکثر خلوص و قدرت رنگی را در پارامترهای دما (۹۰ درجه سانتی‌گراد)، زمان (۹۰ دقیقه)، غلظت رنگزا (۵۰ درصد)، غلظت دندانه (۵ درصد وزنی) و pH حمام رنگرزی (۸) شناسایی کرد. یافته‌ها حاکی از تأثیر معنادار این پارامترها بر ویژگی‌های رنگی نهایی بوده و نشان داد که افزایش مقادیر مذکور منجر به افزایش قابل توجه قدرت رنگی می‌شود. همچنین، غلظت رنگزا، غلظت دندانه و pH حمام تأثیر بسزایی بر خلوص رنگ داشتند. استفاده از دندانه‌های فلزی مختلف (Al، Cr، Cu، Fe، Sn) به روش پیش‌دندانه، منجر به ایجاد تنوع در فام‌های رنگی گردید. دندانه‌های آهن و کروم فام‌های قرمزتری ایجاد کردند، در حالی که کلرید قلع و زاج سفید منجر به فام‌های متمایل به زرد شدند. دندانه آهن با ایجاد فام قهوه‌ای با خلوص کمتر، نقش بسزای نوع دندانه در تعیین ویژگی‌های رنگی نهایی را نمایان ساخت.

مقاله پذیرفته شده

یکی از برجسته‌ترین یافته‌های این پژوهش، ثبات رنگی استثنایی نمونه‌های رنگری شده با عصاره اوپنتیا است. تمامی نمونه‌ها ثبات شستشویی بسیار مطلوبی (درجه ۴ تا ۵-۴) و ثبات نوری فوق‌العاده‌ای (درجه ۷-۸ تا ۸) از خود نشان دادند که با بسیاری از رنگزاهای شیمیایی قابل رقابت است. بهترین ثبات نوری در نمونه‌های رنگری شده با دندانه‌های آلومینیوم، کروم و مس مشاهده شد. بررسی خواص مکانیکی الیاف پشم پس از رنگری نشان دهنده تغییرات جزئی در حداکثر تنش، مدول ینگ و ازدیاد طول بود که سازگاری این روش با ساختار الیاف پشمی را تأیید می‌کند. این نتایج، پتانسیل بالای میوه اوپنتیا را برای کاربردهای صنعتی، به ویژه در تولید فرش دستباف و منسوجات سنتی که ثبات رنگی و کیفیت رنگ از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند، مورد تأیید قرار می‌دهد.

با وجود نتایج امیدوارکننده، محدودیت‌هایی نظیر عدم بررسی پایداری رنگ در شرایط محیطی متنوع، محدودیت در نوع الیاف مورد مطالعه (تنها الیاف پشم) و عدم بررسی تأثیر فرآوری‌های صنعتی بر رنگری وجود دارد. همچنین، تأثیر تغییرات فصلی در ترکیبات رنگی میوه اوپنتیا و روش‌های مختلف استخراج رنگزا بر کیفیت رنگری نیازمند مطالعات آتی است.

از منظر زیست‌محیطی، استفاده از رنگزای اوپنتیا به دلیل زیست‌تخریب‌پذیری بالا و عدم سمیت، گامی مهم در جهت توسعه پایدار صنعت نساجی است. بومی بودن و رشد خودروی این گیاه در ایران، آن را به گزینه‌ای اقتصادی و در دسترس تبدیل می‌کند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که عصاره میوه اوپنتیا می‌تواند به عنوان جایگزینی پایدار و مقرون‌به‌صرفه برای رنگزاهای شیمیایی در رنگری الیاف پشمی مورد استفاده قرار گیرد، به ویژه برای تولیدکنندگان کوچک و متوسط فرش دستباف و منسوجات سنتی. با این حال، برای افزایش مقیاس تولید و کاربرد صنعتی گسترده‌تر، نیاز به توسعه روش‌های استخراج کارآمدتر، بررسی امکان کشت انبوه و استانداردسازی فرآیند رنگری وجود دارد. با توجه به افزایش تقاضا برای محصولات پایدار در بازارهای جهانی، سرمایه‌گذاری در این حوزه می‌تواند فرصت‌های تجاری ارزشمندی را برای صنعت نساجی و فرش ایران فراهم آورد.

تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله مراتب سپاس و قدردانی خود را از دانشگاه هنر شیراز به‌دلیل حمایت‌های ارزنده و فراهم‌سازی بستر مناسب برای انجام این پژوهش ابراز می‌دارم.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

فهرست منابع:

1. Haji A., Rahbar R.S., Qavamnia S.S., Eco-friendly Dyeing of Wool Using Natural Dye from Walnut Husk: Optimization by Response Surface Methodology. *Fibers. Polym.* 2021;22(8):2156-2166. doi: 10.1007/s12221-021-0125-8
2. Burkinshaw S, Kumar N. The mordant dyeing of wool using tannic acid and FeSO₄, Part 1: Initial findings. *Dyes Pigm.* 2009;80(1):53-60 . doi: 10.1016/j.dyepig.2008.06.005
3. Haji A. Sustainable Dyeing of Wool with Walnut Husk Extract: Optimization and Characterization. *J. Text. Inst.* 2021;112(5):789-800. doi: 10.1080/00405000.2020.1801763
4. Guesmi A, Ladhari N, Sakli F. First application of chlorophyll-an as biomordant: sonicator dyeing of wool with betanin dye. *J. Clean. Prod.* 2018; 188:885-892. doi: [10.1016/j.jclepro.2018.04.014](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.014)
5. Yusuf M, Shabbir M, Mohammad F. Natural colorants: Historical, processing and sustainable prospects. *Nat. Prod. Bioprosp.* 2017;7(1):123-45. doi: [10.1007/s13659-017-0119-9](https://doi.org/10.1007/s13659-017-0119-9)
6. Ali F, El-Mohamedy RSR. Eco-friendly and protective natural dye from red prickly pear (*Opuntia lasiacantha* Pfeiffer) plant. *J. Saudi Chem. Soc.* 2016;20(1):S459-S467. doi:10.1016/j.jscs.2015.06.004
7. Bechtold T, Toca-Herrera JL, Mahmud-Ali A, Ganglberger E, Geissler S. Dyeing properties of Dyer's oak (*Quercus tinctoria*) for silk, wool, and cotton. *Textile Research Journal.* 2007;77(11):861-6. doi: 10.1177/0040517507081302
8. Shahid M, Shahid-ul-Islam S, Mohammad F. Betanin from red beetroot (*Beta vulgaris* L.): extraction, thermal and chemical stability, and its application as natural colorant. *Color. Technol.* 2018;134(3):220-31. doi:10.1111/cote.12323

9. Cardoso-Ugarte GA, Sosa-Morales ME, Ballard T. Stability of betalains in a model juice system under different pH and thermal conditions. *Food Chem.* 2021;341:128236. doi:10.1016/j.foodchem.2020.128236
10. Haji A., Qavamnia S.S. Response surface optimization of wool dyeing with three natural dyes. *J. Nat. Fibers.* 2022;19(2):689-702. doi: 10.1080/15440478.2020.1764443
11. Khan MI, Ahmad A, Khan SA, Yusuf M, Shahid M, Manzoor N, et al. Assessment of antimicrobial activity of catechu and its dyed substrate. *J. Clean. Prod.* 2011;19(12):1385-94. doi:10.1016/j.jclepro.2011.04.013
12. Baliarsingh S, Behera PC, Jena J, Das T, Das NB. UV reflectance attributed direct correlation of color strength and absorption peak of natural dyed yarn with respect to dye-concentration and chitosan. *J. Clean. Prod.* 2015;102:485-92. doi:10.1016/j.jclepro.2015.04.087
13. Montazer M., Parvinzadeh M. Dyeing of wool with madder and plasma treatment. *Color. Technol.* 2004;120(4):161-166. doi: 10.1111/j.1478-4408.2004.tb00222.x
14. Shams-Nateri A. Reusing wastewater of madder natural dye for wool dyeing. *J. Clean. Prod.* 2011;19(6):775-81. doi:10.1016/j.jclepro.2010.12.002
15. Adeel S, Bhatti IA, Kausar A, Osman E. Influence of UV radiations on the extraction and dyeing of cotton fabric with *Curcuma longa* L. *Indian J. Fibre Text. Res.* 2012;37(1):87-90. doi:10.56042/ijftr.v37i1.17793
16. Yusuf M, Ahmad A, Shahid M, Khan MI, Khan SA, Manzoor N, et al. Assessment of colorimetric, antibacterial and antifungal properties of woollen yarn dyed with the extract of the leaves of henna (*Lawsonia inermis*). *J. Clean. Prod.* 2012;27:42-50. doi:10.1016/j.jclepro.2011.12.029
17. Sánchez-Rubio M, Taboada-Rodríguez A, Marín-Iniesta F, López-Gómez A. Betanin as natural dye for textile dyeing: Evaluation of extraction methods and dyeing conditions. *Color. Technol.* 2019;135(1):84-94. doi:10.1111/cote.12391
18. Vankar PS, Shanker R, Verma A. Enzymatic natural dyeing of cotton and silk fabrics without metal mordants. *J. Clean. Prod.* 2007;15(15):1441-50. doi:10.1016/j.jclepro.2006.05.004
19. 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. [In Persian]. doi:10.30492/ijcce.2010.6505
20. Mirjalili M, Karimi L. Extraction and characterization of natural dye from green walnut shells and its use in dyeing polyamide: Focus on antibacterial properties. *J. Chem.* 2013;2013:1-9. doi:10.1155/2013/375352
21. 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. [In Persian]. doi:10.30492/ijcce.2010.6505
22. Mirjalili M, Karimi L. Extraction and characterization of natural dye from green walnut shells and its use in dyeing polyamide: Focus on antibacterial properties. *J. Chem.* 2013;2013:1-9. doi:10.1155/2013/375352
23. Hosseini M, Montazer M, Damerchely R. Enhancing dye-ability and antibacterial features of silk through pre-treatment with chitosan. *J. Eng. Fibers Fabr.* 2013;8(3):102-11. doi:10.1177/155892501300800312
24. Forouharshad M, Montazer M, Moghadam MB, Saligheh O. Preparation of flame retardant wool using zirconium acetate optimized by CCD. *Thermochim. Acta* 2011;520(1-2):134-8. doi:10.1016/j.tca.2011.03.030
25. Montazer M, Parvinzadeh M. Effect of ammonia on madder-dyed natural protein fiber. *J. Appl. Polym. Sci.* 2004;93(6):2704-10. doi:10.1002/app.20772
26. Shakyawar DB, Raja ASM, Kumar A, Pareek PK, Temani P. Antimicrobial finish of wool with natural dyes. *Indian J. Fibre Text. Res.* 2015;40(1):51-6. doi:10.56042/ijftr.v40i1.5859
27. Yi E, Cho JY. Color analysis of natural colorant-dyed fabrics. *Color Res. Appl.* 2008;33(2):148-57. doi:10.1002/col.20391
28. Haji A. Antibacterial activity and physical properties of wool fabric dyed with *Punica granatum* and *Caesalpinia sappan*. *Fibers Polym.* 2015;16(4):736-741. doi: 10.1007/s12221-015-0736-z
29. Adeel S., Rehman F., Pervaiz M., Hussaan M., Amin N., Majeed A., Naz S., Bhatti I.A., Zuber M. Sustainable extraction and dyeing of microwave-treated silk fabric using beetroot (*Beta vulgaris* L.) extract. *J. Nat. Fibers.* 2022;19(13):4872-4883. doi: 10.1080/15440478.2020.1870618
30. Baaka N, Haddar W, Ben Ticha M, Amorim MTP, Mhenni MF. Sustainability issues of ultrasonic wool dyeing with grape pomace colourant. *Nat. Prod. Res.* 2018;32(7):826-33. doi:10.1080/14786419.2017.1366479
31. Shabbir M, Islam SU, Bukhari MN, Rather LJ, Khan MA, Mohammad F. Application of *Terminalia chebula* natural dye on wool fiber—evaluation of color and fastness properties. *Text. Cloth. Sustain.* 2016;2(1):1-9. doi:10.1186/s40689-016-0016-3

32. Rather LJ, Islam SU, Shabbir M, Bukhari MN, Shahid M, Mohammad F. Ultrasound-assisted extraction and dyeing of wool with Rheum emodi: kinetic and adsorption isotherm studies. *J. Nat. Fibers* 2018;15(6):840-53. doi:10.1080/15440478.2017.1367705
33. Adeel S, Hussaan M, Rehman FU, Habib N, Salman M, Naz S, et al. Microwave-assisted sustainable dyeing of wool fabric using coconut coir-based tannin natural colorant. *Ind. Text.* 2021;72(1):37-42. doi:10.35530/IT.072.01.202110
34. Hou X, Chen X, Cheng W, Xu H. Kinetic and thermodynamic studies of natural dye adsorption on wool fibers: a two-step mechanism analysis. *Dyes Pigm.* 2023;210:110987. doi:10.1016/j.dyepig.2022.110987
35. Shahmoradi Ghaheh F, Moghaddam MK, Tehrani M. Dyeing of wool with natural dyes from *Opuntia ficus-indica*: optimization and mordanting effects. *J. Nat. Fibers* 2021;18(12):2209-24. doi:10.1080/15440478.2020.1726248
36. Adeel S, Rehman FU, Hameed A, Habib N, Kiran S, Zia KM, et al. Dyeing behavior and colorimetric characterization of natural madder dye applied to wool. *J. Nat. Fibers* 2018;15(6):861-70. doi:10.1080/15440478.2017.1364206
37. Otálora MC, Carriazo JG, Osorio C. Betalains as natural colorants: stability during processing, encapsulation techniques, and applications. *Trends Food Sci. Technol.* 2022;120:123-38. doi:10.1016/j.tifs.2021.12.027
38. Shahid M, Islam SU, Mohammad F. Perspectives for natural products-based agents derived from industrial plants in textile applications: a review. *J. Clean. Prod.* 2022;286:124896. doi:10.1016/j.jclepro.2020.124896
39. Rather LJ, Akhtar S, Khan MA, Mohammad F. Ultrasonic assisted extraction and dyeing of wool fabric with *Quercus robur* L. fruit shell extract: optimization using response surface methodology. *J. Nat. Fibers* 2021;18(12):2089-104. doi:10.1080/15440478.2020.1726243
40. Haddar W, Ben Ticha M, Meksi N, Guesmi A. Optimization of the dyeing process of wool fabrics with *Rubia tinctorum* L. root extract: focus on pH and mordanting effects. *Ind. Crops Prod.* 2022;176:114327. doi:10.1016/j.indcrop.2021.114327
41. Ben Ticha M, Haddar W, Meksi N, Mhenni MF. pH-sensitive natural dye adsorption on wool fibers: experimental and theoretical studies. *Dyes Pigm.* 2020;174:108040. doi:10.1016/j.dyepig.2019.108040