

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

Saeedeh Rafiei^{*1}, Peiman Valipour², Omid Alaie², Zinatossadat Hossaini³

1- Carpet Department, Faculty of Applied Arts, Shiraz University of Art, P.O. Code: 7146696989, Shiraz, Iran.

2- Department of Textile, Apparel and Fashion, Qaemshahr Branch, Islamic Azad University, P.O. Box:163, Qaemshahr, Iran

3- Department of Chemistry, Qaemshahr Branch, Islamic Azad University, P.O. Box:163, Qaemshahr, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 09-03-2025

Accepted: 30-06-2025

Available online: 01-10-2025

Print ISSN: 1735-8779

Online ISSN: 2383-2169

DOI: 10.30509/jcst.2025.167490.1254

Keywords:

Natural dyeing

Opuntia

wool fibers

RSM optimization

color fastness

handwoven carpet

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 the capacity of Opuntia extract 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 a 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.*

*Corresponding author: * s_rafiei@shirazartu.ac.ir



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

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

۱- استادیار، گروه فرش، دانشکده هنرهای صناعی، دانشگاه هنر شیراز، شیراز، ایران، کدپستی: ۷۱۴۶۶۹۶۹۸۹

۲- دانشیار، گروه مهندسی نساجی و پوشاک، واحد قائم‌شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، قائم‌شهر، ایران، صندوق پستی: ۱۶۳

۳- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی نساجی و پوشاک، واحد قائم‌شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، قائم‌شهر، ایران، صندوق پستی: ۱۶۳

۴- دانشیار، گروه شیمی، واحد قائم‌شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، قائم‌شهر، ایران، صندوق پستی: ۱۶۳

چکیده

این پژوهش به بررسی قابلیت استفاده از عصاره میوه اوپنتیا به عنوان یک رنگزای طبیعی در رنگریزی نخ‌های پشمی فرش دستباف می‌پردازد. در این مطالعه با هدف ارائه رویکردی پایدار و زیست‌محیطی برای رنگریزی منسوجات، تأثیر عوامل مهم شامل غلظت رنگزا (۳۰-۱۰۰ درصد)، غلظت دندان (۱۰۰-۱ درصد)، دما (۱۰۰-۳۰ °C)، زمان (۲۰-۱۰۰ دقیقه) و pH (۱-۳) بر ویژگی‌های رنگی و پایداری رنگ ارزیابی شد. عصاره‌گیری به روش خیساندن انجام گرفت و حضور ترکیبات موثره بتالائین (Betain) 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 0.5 ± 0.5 pH 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 فرایند 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 عامل 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 رنگریزی 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 سایه‌های رنگی متنوع با ثبات مطلوب دارد و استفاده از آن می‌تواند رویکردی کارآمد برای توسعه فرایندهای رنگریزی پایدار و کاهش اثرات زیست‌محیطی باشد.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۰۹

در دسترس به صورت الکترونیکی: ۱۴۰۴/۰۷/۰۹

شاپا چاپی: ۱۷۳۵-۸۷۷۹

شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۲۱۶۹

DOI: 10.30509/jcst.2025.167490.1254

واژه‌های کلیدی:

رنگریزی طبیعی

اوپنتیا

الیاف پشمی

بهینه‌سازی RSM

ثبات رنگی

فرش دستباف

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر، توجه چشم‌گیری به استفاده از منابع طبیعی در فرایندهای 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 رنگرهای مصنوعی ایجاد شده‌اند (۲). رنگرهای 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، رنگرهای طبیعی به دلیل ویژگی‌هایی نظیر زیست‌تخریب‌پذیری بالا، عدم سمیت و سازگاری با محیط‌زیست، به عنوان جایگزین‌های مناسبی برای رنگرهای شیمیایی مطرح شده‌اند (۵). منابع اصلی تولید رنگرهای طبیعی شامل گیاهان، ریزاندامگان، مواد معدنی و در برخی موارد، ترکیبات جانوری است (۶). گیاهان، به دلیل داشتن ذخایر غنی از رنگدانه‌هایی همچون فلاونوئیدها، بتالاین‌ها و آنتوسیانین‌ها، یکی از متداول‌ترین منابع رنگرهای 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 میوه 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 رنگرهای طبیعی مانند بتالاین و آنتوسیانین، می‌تواند منبعی ارزشمند برای تولید رنگرهای طبیعی باشد (۱۰). این رنگرها قادر به ایجاد طیف‌های مختلفی از فام‌های قرمز تا بنفش هستند که در رنگرزی الیاف پشمی، می‌توانند سایه‌های 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 رنگرها نیاز دارد. شرایط حمام رنگرزی از جمله دما، pH، زمان و غلظت دندانه‌ها به عنوان عوامل متغیر، تأثیر به‌سزایی در کیفیت، فام رنگ و پایداری رنگرهای طبیعی

دارند (۱۲). استفاده از دندانه‌های مختلف به عنوان یک عامل کلیدی برای بهبود پیوندهای شیمیایی بین رنگر 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 سایه‌های رنگی متنوع نیز نقش‌آفرینی کند. از این‌رو، استفاده از دندانه‌های طبیعی (مانند اسید اسکوربیک) و معدنی (مانند سولفات آلومینیم) در ترکیب با رنگرهای 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، زیستی، کاربردهای پزشکی و گیاه‌شناسی متمرکز بوده‌اند (۱۷-۱۵). پژوهش‌های متعددی به بررسی ترکیبات گیاه‌مایه^۲ این گیاه پرداخته و حضور رنگرهای ارزشمندی همچون بتالاین‌ها، فلاونوئیدها و کاروتنوئیدها را در آن تأیید کرده‌اند (۲۲، ۲۱). این رنگرها علاوه بر خواص آنتی‌اکسیدانی و ضدالتهابی، پتانسیل بالایی برای استفاده در صنایع رنگرزی دارند (۲۴، ۲۳).

مطالعات اخیر در زمینه استخراج و کاربرد رنگرهای طبیعی نشان داده‌اند که بتانین‌های موجود در میوه‌ها می‌توانند به عنوان منابع رنگرای پایدار در صنعت نساجی مورد استفاده قرار گیرند (۲۶، ۲۵). خصوصیات منحصر به فرد این رنگرها از جمله پایداری نسبی در برابر نور، حرارت و pH، آن‌ها را برای رنگرزی الیاف طبیعی مناسب ساخته است (۲۸، ۲۷). در مطالعه دیگری، به استخراج رنگرهای طبیعی از چغندر^۳ و ارزیابی عملکرد آن در رنگرزی ابریشم پرداخته شده است. نتایج نشان داد که این رنگ‌دهنده طبیعی قادر به رنگ کردن یکنواخت منسوج با قدرت رنگی مناسب و مقاومت در برابر شستشو است (۲۹).

علاوه بر این، مطالعات نشان داده‌اند که بتانین‌های استخراج‌شده از اوپنتیا قابلیت ایجاد پیوندهای قوی با الیاف پروتئینی مانند پشم را دارند که منجر به ثبات رنگی قابل‌قبولی 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 رنگرای استخراج‌شده 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 علی و ای‌آی محمدی^۴ کارایی رنگرای طبیعی استخراج‌شده از گلای^۵ 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

2. Phytochemical

3. Beta vulgaris

4. El-Mohamedy and Ali

5. Opuntia lasiacantha

1. Opuntia

به طور انحصاری در گیاهان راسته میخک‌سانان^۱ و برخی قارچ‌ها یافت می‌شوند (۱۸). این ترکیبات به دو زیرگروه اصلی تقسیم می‌شوند:

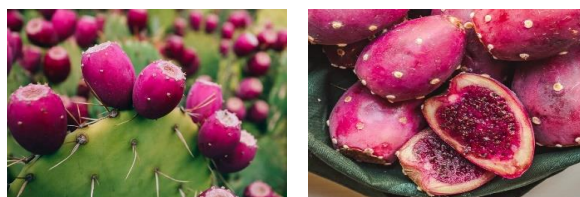
بتاسیانین‌ها: رنگ‌هایی که مسئول ایجاد رنگ‌های قرمز و بنفش هستند و از نظر ساختاری مشتقات گلیکوزیدی بتانیدین به شمار می‌روند (۱۹).

بتازانتین‌ها: رنگ‌هایی که طیف رنگی زرد و نارنجی را ایجاد می‌کنند و مشتقات آمینی بتالامیک اسید هستند (۲۰).

بتالاین‌ها 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 بتالاین‌ها می‌شود (۲۱). به عنوان مثال، بتانین، که یک بتاسیانین غالب در *Opuntia ficus-indica* است، فام قرمز-بنفش میوه را ایجاد می‌کند. ساختار آن شامل یک گروه گلوکز متصل به اسکلت بتالامیکی است (۲۲). حلالیت در آب و وجود گروه‌های نیتروژنی در ساختار بتالاین‌ها، آن‌ها را به طور طبیعی برای جذب مؤثر بر روی الیاف پروتئینی مانند پشم مناسب می‌سازد (۱).

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

آنتوسیانین‌ها بر پایه ساختار فلاویلیوم یا ۲-فنیل بنزپایرلیوم بنا شده‌اند. تنوع در نوع قندها و گروه‌های جانبی متصل به این ساختار پایه، منجر به تولید انواع مختلفی از آنتوسیانین‌ها مانند سیانیدین، دلفینیدین و پتونیدین می‌شود (۲۵). آنتوسیانین‌ها در محیط‌های اسیدی پایدارتر بوده و فام‌های قرمز را بیشتر نمایان می‌سازند (۲۶).



شکل ۱: میوه گیاه آپونتیا.

Figure 1: Fruit of the Opuntia plant.

روش‌های پیشرفته طراحی آزمایش مانند سطح پاسخ (RSM) برای بهینه‌سازی عوامل رنگریزی (دما، pH، زمان)، عدم ارزیابی تأثیر فرایند 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، رنگریزی الیاف پشمی نقشی حیاتی در کیفیت، جذابیت و ارزش نهایی محصول دارد. استفاده از رنگ‌های طبیعی در این صنعت، علاوه بر حفظ میراث سنتی رنگریزی ایرانی، می‌تواند منجر به تولید محصولاتی با ارزش افزوده بالاتر و سازگاری بیشتر با محیط‌زیست شود. پژوهش‌های متعددی نشان داده‌اند که فرش‌های رنگریزی 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 رنگ‌های طبیعی در فرش دستباف، به دلیل عدم سمیت و سازگاری با سلامت انسان، پاسخگوی تقاضای روزافزون بازارهای جهانی برای محصولات طبیعی و زیستی است. این امر می‌تواند به افزایش صادرات و ارزآوری در صنعت فرش دستباف ایران کمک شایانی نماید.

با وجود این پتانسیل‌های ارزشمند، تاکنون به طور جامع از این گیاه به عنوان یک منبع رنگریزی طبیعی در فرایند رنگریزی منسوجات، به ویژه الیاف پشم مورد استفاده در فرش دستباف، استفاده نشده است. پژوهش‌های موجود در این زمینه محدود بوده و بهینه‌سازی سامان‌مند عوامل رنگریزی با این رنگ‌ها 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 رنگریزی طبیعی و پایدار مورد استفاده قرار گیرد.

میوه گیاه *Opuntia ficus-indica* (شکل ۱) که به طور معمول به نام انجیر هندی یا کاکتوس گلابی شناخته می‌شود، منبع غنی از ترکیبات رنگی طبیعی با ویژگی‌های منحصر به فرد 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.

ترکیبات رنگی موجود در این گیاه عمدتاً شامل بتالاین‌ها، 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 رنگریزی و تولید مواد غذایی تبدیل کرده است (۱۷). بتانین‌ها دسته‌ای از رنگ‌های نیتروژنی محلول در آب هستند که

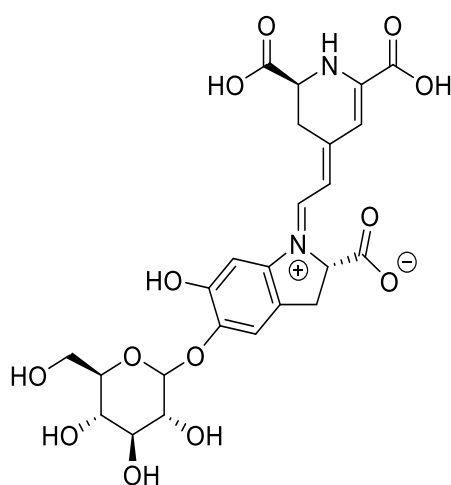
1. Caryophyllales
2. Betacyanins
3. Betaxanthins

پژوهش حاضر با هدف پرکردن این خلأ علمی، به بررسی قابلیت استفاده از عصاره میوه اوپنتیا به عنوان یک رنگ‌زای طبیعی در فرایند 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 فرایند رنگ‌رزی، تأثیر عوامل 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.

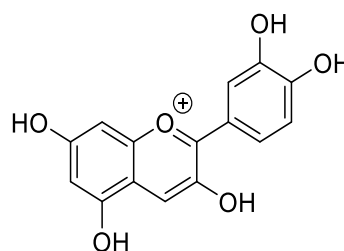
1. Synergic

علاوه بر بتالاین‌ها و آنتوسیانین‌ها، میوه *Opuntia ficus-indica* حاوی مقادیر قابل توجهی از فلاونوئیدها و سایر ترکیبات فنلی است (۲۷). این ترکیبات اگرچه نقش مستقیمی در ایجاد رنگ ندارند، اما به دلیل اثرات هم‌افزایی^۱ می‌توانند پایداری و شدت رنگ بتالاین‌ها را بهبود بخشند (۲۸). همچنین، فلاونوئیدها به افزایش خواص آنتی‌اکسیدانی رنگ‌زاهای استخراج شده از اوپنتیا کمک می‌کنند (۲۹).

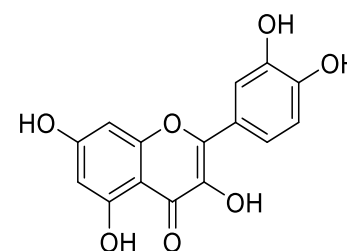
رنگ‌زای اصلی مستخرج از اوپنتیا بر اساس طبقه‌بندی شیمیایی در گروه رنگ‌زاهای بتالاینی قرار می‌گیرد (۳۰). علاوه بر این، اوپنتیا حاوی ترکیبات فلاونوئیدی مانند پیسی‌دیک اسید و کوئرستین نیز هست که اگرچه مسئول ایجاد رنگ غالب نیستند، ولی می‌توانند در افزایش پایداری و خواص آنتی‌اکسیدانی عصاره نقش داشته باشند. فلاونوئیدها دارای اسکلت ۱۵ کربنی متشکل از دو حلقه فنیل و یک حلقه هتروسیکل بوده و اغلب به صورت گلیکوزیدی در گیاهان آوندی وجود دارند. مهم‌ترین ترکیبات فلاونوئیدی موجود در این گیاه شامل پیسی‌دیک اسید و کوئرستین است (۳۱-۳۲). ساختار شیمیایی مهم‌ترین ترکیبات رنگی موجود در میوه اوپنتیا در شکل ۲ به تصویر کشیده شده است.



Betanin



Anthocyanin



Quercetin

شکل ۲: ساختار شیمیایی ترکیبات رنگی موجود در میوه اوپنتیا.

Figure 2: Chemical structure of coloring compounds presents in *Opuntia* fruit: betanin, anthocyanin, and quercetin.

۲- بخش تجربي

۱-۲ مواد

ميوه اوبنتيا مورد استفاده در اين پژوهش از شهرستان قائم‌شهر، استان مازندران، در فصل ارديبهشت ماه برداشت شد. ميوه خشک و آسياب شده اين گياه به عنوان منبع رنگزاي طبيعي مورد استفاده قرار گرفت. نخ پشمي مريئوس ۴ لا با نمره ۳۳۰ تکس از شرکت مريئوس ايران تهيه شد. محلول‌هاي آمونياک (۲۵ درصد)، استيک اسيد (۹۹ درصد) و سولفوریک اسيد (۹۸ درصد) براي تنظيم pH حمام رنگريزي، از شرکت ChemLab کشور بلژيک خريداري شد. دنداندهاي فلزي مختلف شامل سولفات آلومينيوم پتاسيم $(KAl(SO_4)_2)$ ، سولفات آهن $(FeSO_4)$ ، سولفات مس $(CuSO_4)$ ، کلريد قلع $(SnCl_2)$ و دي‌کرومات پتاسيم از شرکت کيمياگران جوان ايران، تأمين شد. همچنين، مرک Triton X100 به عنوان يک سطح فعال غير يوني به منظور شستشوي کلاف نخ پشمي مورد استفاده قرار گرفت.

۲-۲ روش‌ها

۱-۲-۲ طراحی آزمایشات به روش سطح پاسخ

بهينه‌سازي فرايند رنگريزي، با هدف دستيابي به بهترين ويژگي‌هاي رنگي ممکن، نقشي کليدي در صنعت نساجي ايفا مي‌کند. اين امر مستلزم توجه به عوامل متعدد و تأثيرگذار بر فرايند است تا نتايج مورد نظر با دقت بالا و تکرارپذيري تضمين شود. در اين مطالعه، براي بهينه‌سازي شرايط رنگريزي، از نرم‌افزار Design Expert 11.1.2.0 شرکت (Stat-Ease آمريکا) استفاده گرديد و روش سطح پاسخ (RSM) براي بررسي جامع و سامانمند اين عوامل به کار گرفته شد.

در مرحله ابتدائي تحقيق، آزمايشات مقدماتي براي شناسايي متغيرهاي حياتي و دامنه‌هاي تجربي مؤثر آنان انجام شد. اين مرحله شامل بررسي اوليه تأثير متغيرها بر ويژگي‌هاي رنگي کالاي رنگريزي شده شامل قدرت رنگي، زاويه رنگ، و خلوص رنگي است. در مرحله نخست نياز به حضور دندانده با بررسي نتايج اثبات گرديد. تفاوت کيفي واضح بين نمونه‌هاي با/بدون دندانده قابل مشاهده است. سپس محدوده متغيرهاي تأثيرگذار بر کيفيت رنگريزي تايد گرديد به اين صورت که محدوده غلظت ماده رنگزا براساس مطالعات حلاليت رنگدانه‌هاي بتاليني و ظرفيت جذب الياف پشم، ۵۰-۱۰۰ درصد وزني در نظر گرفته شد. از طرفي ديگر، محدوده غلظت دندانده، بر طبق ارزيابي نحوه تشکيل کمپلکس پايدار دندانده با رنگزاهاي بتاليني، ۱۰-۰ درصد وزني تعيين شد. محدوده دماي رنگريزي $30-100^{\circ}C$ به گونه‌اي انتخاب شد که ضمن فعال‌سازي جاگاه‌هاي جذب رنگ، از گسيختگي يا بي‌ريختي ساختار پروتئيني پشم در

دماهاي بالاتر از $90^{\circ}C$ جلوگیری شود. محدوده‌ي زمان رنگريزي بر اساس سينتتيک جذب شبه‌مرتبه دوم (رابطه ۱)، ۲۰ تا ۱۰۰ دقيقه تعيين گرديد، به طوري که فرايند رنگريزي پس از حدود ۹۰ دقيقه به تعادل مي‌رسد.

$$t/qt = 1/(k_2 qe_2) + t/qe \quad (1)$$

محدوده pH حمام رنگريزي با توجه به پايداري رنگزاهاي بتاليني (واکنش ۲)، ۱۱-۳ انتخاب شد.



تمامي محدوده‌ها با انجام آزمايشات تک‌عواملی و تحليل نتايج توسط نرم‌افزار Design Expert 11.1.2.0 تايد شدند.

در مرحله ابتدائي تحقيق، آزمايشات مقدماتي براي شناسايي متغيرهاي حياتي و دامنه‌هاي تجربي مؤثر آنان انجام شد. اين مرحله شامل بررسي اوليه تأثير متغيرهاي زير بر ويژگي‌هاي رنگي کالاي رنگريزي شده است (قدرت رنگي، زاويه رنگ، و خلوص رنگ):

غلظت ماده رنگزا: به منظور اطمينان از يکنواختي و شدت رنگ.

غلظت دندانده: مؤثر در تثبيت و پايداري رنگ.

دما و زمان رنگريزي: از عوامل مؤثر در زمان انجام واکنش‌هاي ميان رنگزا و الياف.

pH حمام رنگريزي: تأثير مستقيم بر واکنش‌پذيري و ترکيب مولکولي رنگزاها با الياف.

پس از شناسايي متغيرهاي کليدي، طراحي آزمايش‌هاي مرکب مرکزي (CCD) براي تعيين اثرات متقابل اين متغيرها بر ويژگي‌هاي رنگي مانند قدرت رنگي، زاويه رنگ و خلوص رنگ مورد استفاده قرار گرفت. طی این مرحله، ۵۰ نسخه رنگريزي مختلف با تغييرات مختلف در هر يک از عوامل آزمون شد.

با اجراي روش CCD و جمع‌آوری داده‌ها از هر نسخه آزمايشي، تحليل‌هاي آماري دقيق به منظور بررسي تأثيرات مستقل و متقابل ميان متغيرها انجام شد. نتايج به‌دست‌آمده با بهره‌گيري از روش سطح پاسخ تحليل گرديد. سپس با توجه به نتايج کسب‌شده و تحليل‌هاي آماري، شرايط رنگريزي با هدف کسب بيشتري قدرت رنگي با استفاده از روش سطح پاسخ بهينه‌سازي شد. هدف از اين بهينه‌سازي، دستيابي به حداکثر قدرت رنگي و ارتقا ساير ويژگي‌هاي رنگي با کمترین هزينه و زمان ممکن بوده است.

اگرچه در فرايندهاي سينتتيکي (فيزيکي و شيميايي)، دما و زمان به يکديگر وابستگي دارند و افزايش دما معمولاً منجر به تسريع فرايندهاي واکنش مي‌شود، در اين پژوهش اين دو متغير به عنوان متغيرهاي "مستقل" در طراحي آزمايش در نظر گرفته شدند تا تأثير

2. Central composite design

1. Denaturation

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 فرایند استخراج عصاره میوه اوپنتیا 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 در دمای 25°C در آون تحت خلأ قرار داده 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 بتالاین‌ها ضروری است، زیرا این ترکیبات در دماهای بالا تخریب شده یا رفتار طیفی آن‌ها تغییر می‌کند.

روش سوکسله به عنوان یک روش کارآمد در استخراج عصاره‌های الکلی (اتانلی و متانلی) 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 استفاده می‌شود. عصاره‌های آبی و الکلی تغلیظ شده، به صورت لایه‌ای نازک روی صفحه‌های شیشه‌ای پخش شده و سپس به منظور حذف باقیمانده حلال، به آون تحت خلأ با دمای 25°C منتقل می‌گردند. این فرایند، 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 صفحه‌های شیشه‌ای جدا شده و تا رسیدن به وزن ثابت، در خشکانه نگهداری می‌شوند. برای تعیین میزان ماده استخراجی و محاسبه بازده استخراج، ابتدا وزن صفحه خالی اندازه‌گیری شده و سپس یک میلی‌لیتر از عصاره آبی یا الکلی به آن اضافه می‌شود. پس از خشک شدن در دمای اتاق، وزن صفحه حاوی عصاره اندازه‌گیری شده و اختلاف آن با وزن اولیه به عنوان بازده حلال گزارش می‌گردد. حلال‌هایی که در فرایند 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. شایان ذکر است که ذکر این نتایج در بخش مواد و روش‌ها با هدف مستندسازی فرایند انتخاب حلال بهینه و شفاف‌سازی مبنای مراحل بعدی رنگرزی انجام شده است

نتایج جدول ۱ نشان می‌دهد که نوع حلال تأثیر قابل توجهی بر

مجزای هر یک بر ویژگی‌های رنگی و قدرت رنگی بررسی گردد. این مدل‌سازی امکان ارائه یک دیدگاه جامع و سامان‌مند از اثرات مستقل و متقابل دما و زمان بر کیفیت فرایند رنگرزی را فراهم می‌سازد. علاوه بر این، تأثیرات متقابل دما و زمان در تحلیل‌های آماری از طریق روش سطح پاسخ مورد بررسی قرار گرفت.

۲-۲-۲- فرایند شستشو

برای آماده‌سازی نمونه‌های پشمی ابتدا اقدام به حذف آلودگی‌ها، خاک و چربی‌های طبیعی از الیاف پشم می‌شود. در این مطالعه، Triton X-100، به عنوان یک مواد شوینده غیریونی 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. نمونه‌های نخ پشم برای مدت زمان ۳۰ دقیقه در این محلول غوطه‌ور شده و سپس با آب مقطر شسته شد و آبکشی شد. الیاف شسته‌شده در دمای اتاق خشک شدند و برای مرحله رنگرزی آماده شدند.

در مرحله عصاره‌گیری از سه حلال آب، اتانول و متانول برای استخراج رنگزا استفاده گردید. برای این هدف ابتدا میوه تازه این گیاه با احتیاط بریده شده در شرایط مناسبی از نظر رطوبت و دما خشک شد. برای حصول نتیجه بهتر میوه‌های برش خورده بایستی در سایه و در دمای استاندارد 25°C خشک شوند. سپس مواد خشک شده به وسیله آسیاب آزمایشگاهی کاملاً پودر شدند. برای یکنواختی بهتر این پودر از الک با مش ۴ عبور داده شد. سپس به منظور استخراج عصاره آبی اوپنتیا روش خیساندن^۱ مورد استفاده قرار گرفت.

در این فرایند 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 لرزاننده^۲ 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 سرریزکنی^۳ تحت نیروی جاذبه یا گریزان^۴ اولیه از ناخالصی‌های درشت پالایش می‌شود. برای دستیابی به خلوص بیشتر، 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، حلال عصاره از طریق حرارت‌دهی ملایم و کنترل‌شده تبخیر می‌شود تا به غلظت مطلوب برسد. این روش تغلیظ با حفظ

1. Percolation
2. Shaker
3. Decantation
4. Centrifuge

5. Rotary
6. Desiccator

و در دمای اتاق خشک شد. به منظور کسب سایه‌های رنگی متنوع، فرایند دندانه‌دار کردن با روش مشابهی برای سولفات آهن (II)، سولفات مس، دی‌کرومات پتاسیم و کلرید قلع با غلظت ۳ درصد وزنی انجام شد.

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

جدول ۱: بازده استخراج با حلال‌های مختلف.

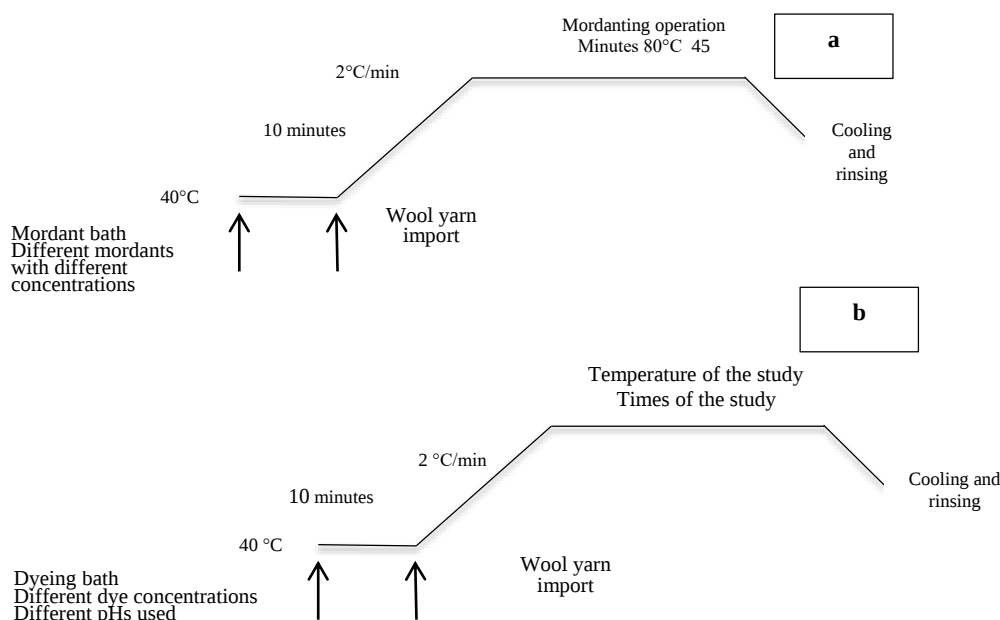
Table 1: Extraction efficiency with different solvents.

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

میزان بازده استخراج دارد. مطابق با داده‌های حاصل، متانل با بازده استخراج ۶/۲ گرم در لیتر، کارآمدترین حلال برای استخراج رنگزاهای بتالائین از میوه اوپنتیا است. اتانل با بازده ۵/۸ گرم در لیتر در رتبه دوم قرار گرفت، در حالی که آب مقطر با ۳/۵ 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. متانل به دلیل اندازه کوچک‌تر مولکولی و قطبیت مناسب، توانایی بیشتری در نفوذ به بافت میوه و استخراج رنگزها دارد. اگرچه متانل بیشترین بازده را نشان می‌دهد، اما با توجه به ملاحظات زیست‌محیطی و سمیت، استفاده از اتانل با بازده قابل قبول می‌تواند گزینه مناسب‌تری در مقیاس صنعتی برای استخراج رنگزا و کاربرد در صنعت فرش ایران باشد.

۴-۲-۲- فرایند دندانه‌دار کردن

با توجه به نتایج آزمایشات اولیه در این پژوهش از روش پیش‌دندانه برای فرایند دندانه‌دار کردن استفاده شد. ابتدا محلول با غلظت‌های مختلف سولفات مضاعف پتاسیم آلومینیم (۰ تا ۱۰ درصد وزنی) با نسبت حجم حمام به وزن کالا (L:R) ۴۰:۱ آماده شد و سپس روی گرمکن قرار گرفت تا دمای حمام به ۴۰°C برسد. سپس کلاف‌های نخ پشمی شسته شده در این دما وارد حمام شد و دما به آرامی با نرخ ۲ °C/min تا ۸۰ °C افزایش یافت (شکل ۳). نمونه‌ها به مدت ۴۵ دقیقه در این دمای ثابت نگه‌داشته و سپس به آرامی سرد شد و در نهایت به منظور جداسازی دندانه‌های سطحی از روی سطح کلاف با آب مقطر آب‌کشی



شکل ۳: نمودار (a) فرایند دندانه‌دار کردن نخ پشمی و (b) فرایند رنگرزی با استفاده از رنگزای طبیعی میوه گیاه اوپنتیا.

Figure 3: Diagram of (a) the wool yarn denting process and (b) dyeing process using natural dye extracted from the fruit of the Opuntia plant.

۲-۵- فرایند رنگ‌گری

حمام‌های رنگ‌گری با استفاده از محلول‌های رنگ‌زای آماده شده با نسبت حجم حمام به وزن کالا (L:R) ۴۰:۱ تهیه شد. در مرحله رنگ‌گری، نخ‌های پشمی (حاوی/ بدون دندانه) در دمای ۵۰°C در حمام رنگ‌گری 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 رنگ‌گری شده با آب مقطر شسته و در دمای اتاق خشک شدند. نسخه‌های رنگ‌گری طبیعی الیاف پشم در شرایط مختلف رنگ‌گری از جمله غلظت‌های مختلف از مواد رنگ‌زا (۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ درصد)، غلظت‌های مختلف دندانه سولفات مضاعف پتاسیم آلومینیم (۵۰، ۵، ۱۰ درصد نسبت به وزن الیاف)، دمای رنگ‌گری (۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ °C)، مدت زمان رنگ‌گری (۳۰، ۶۰ و ۹۰ دقیقه) و pH حمام رنگ‌گری (۳، ۵/۵ و ۸) با استفاده از روش RSM طراحی شد.

۲-۶- ارزیابی قدرت و ویژگی‌های رنگی

ویژگی‌های رنگی نخ‌های پشم رنگ‌گری شده با استفاده از دستگاه طیف‌سنج انعکاسی (X-Rite) در بازه ۳۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر ارزیابی شدند. مؤلفه‌های رنگی CIE، شامل L^* ، a^* ، b^* تحت منبع نوری استاندارد D65 و مشاهده‌کننده استاندارد با زاویه ۱۰ درجه اندازه‌گیری شدند. مؤلفه L^* روشنایی را نشان می‌دهد، به‌طوری‌که 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، به‌گونه‌ای که مقادیر مثبت نشان‌دهنده فام‌های قرمز و زرد و مقادیر منفی نشان‌دهنده فام‌های سبز و آبی هستند. قدرت رنگی (K/S) نمونه‌ها با استفاده از رابطه Kubelka-Munk (معادله ۳) محاسبه شدند:

$$\frac{K}{S} = \frac{(1-R)^2}{2R} \quad (3)$$

در رابطه ۳، K/S یک تابع از عمق رنگ است و براساس ضریب جذب (K)، ضریب انتشار (S) و مقدار بازتاب (R) نمونه رنگ‌گری شده در طول موج بیشینه جذب محاسبه می‌گردد. این طول موج، براساس طیف جذب UV-Vis مشخص شده گردید.

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

ارزیابی ویژگی‌های ثبات رنگ نمونه‌های رنگ‌گری شده براساس استاندارد ایزو انجام شد. ثبات رنگ در برابر شستشو با استفاده از روش (ISO, 2006) ISO 105-C10:2006 ارزیابی شد (۳۳)، در حالی که ثبات رنگ در برابر نور با استفاده از استاندارد ISO 105- (ISO, 2014) B02:2014 بررسی شد (۳۴). علاوه بر این، ویژگی‌های رنگی نخ پشم رنگ‌گری 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 رنگ‌گری شده در شرایط بهینه از میوه گیاه آپونتیا و در حضور دندانه‌های مختلف برای این آزمون استفاده شد.

۲-۸- ویژگی‌های مکانیکی

خصوصیات مکانیکی نمونه‌های نخ پشم رنگ‌گری شده با استفاده از دستگاه استحکام‌سنج 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 برحسب نمره تکس (tex) محاسبه شد. سپس، آزمون به طول ۲۵۰ میلی‌متر با سرعت ثابت ۲۵۰ میلی‌متر در دقیقه تا حد پارگی تحت کشش قرار گرفت. متغیرهای حداکثر تنش (Max. Stress) و مدول یانگ (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 به‌دست‌آمده میانگین گرفته شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- طیف‌سنجی 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 نشان‌دهنده قدرت آن‌ها در جذب نور در طول موج‌های مختلف است. عصاره میوه اوپنتیا حاوی ترکیبات فلاونوئیدی و بتالایینی با خصوصیات طیفی متمایز است. فلاونوئیدها بیشینه جذب در حدود ۴۰۰ نانومتر (ناحیه بنفش-آبی) و بتالایین‌ها در محدوده ۵۴۰-۵۴۰ نانومتر (ناحیه قرمز-سبز) را نشان می‌دهند. خصوصیات طیفی این رنگ‌زها به شدت وابسته به pH محیط است، به طوری که در محیط اسیدی pH ۱ تا ۴، فلاونوئیدها بالاترین شدت جذب را نشان می‌دهند و بتالایین‌ها در این شرایط، قله جذبی در محدوده ۵۳۵-۵۴۰ نانومتر (رنگ قرمز-ارغوانی) دارند. شکل ۴ طیف جذبی عصاره آبی رنگ‌زای مستخرج از اوپنتیا را در pH‌های مختلف نشان می‌دهد. برای این سنجش به لحاظ سادگی از آب مقطر و روش استخراج خیساندن (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= ۶-۷)، یک انتقال به سرخ^۱ در بتالایین‌ها رخ می‌دهد که نوار جذبی به ۵۴۵-۵۴۰ نانومتر منتقل می‌شود. در این شرایط، اگرچه جذب رنگ توسط الیاف پروتئینی (مانند پشم) بهبود می‌یابد، اما

1. Bathochromic shift

اين منظور، دو نمونه نخ پشمي شسته شده با استفاده از ۵۰ درصد وزني از رنگزا به همراه دندانه آلومينيوم و يا بدون دندانه بر اساس فرايند ارائه شده در شكل ۳ به روش پيش دندانه رنگريزي شدند. تصاوير نمونه هاي رنگريزي شده در شكل ۵ ارائه شده است. آزمايشات اوليه نشان دادند كه ميوه گياه آپونتيا به عنوان منبعي از ماده رنگزا، قابليت مطلوب براي كسب سايه رنگي قرمز- نارنجي را دارد. بر اساس مشاهدۀها، ميزان جذب رنگ در نمونه هاي رنگريزي شده بدون دندانه نسبت به نمونه هاي دندانه دار بسيار كمتر بود، كه نشان مي دهد اين گياه براي بهبود جذب رنگ به حضور دندانه نياز دارد.

علاوه بر اين، در آزمايشات مقدماتي، عوامل تأثيرگذار فرايند رنگريزي مورد بررسي قرار گرفت و در نهايت محدوده موثر اين متغيرها تعيين گرديد. اين اطلاعات مي تواند به دستيابي به هدف مهم اين پژوهش در بهينه سازي فرايند رنگريزي و ارائه يك نسخه رنگريزي بهينه كمك كند. بر اساس نتايج اين بخش، پنج متغير شامل غلظت ماده رنگزا، غلظت دندانه، دماي رنگريزي، مدت زمان رنگريزي، و pH حمام رنگريزي در نظر گرفته شد و محدوده موثر اين متغيرها براساس اطلاعات ارائه شده در جدول ۲ تعيين گرديد.

۳-۲- ويژگي هاي رنگي نخ هاي پشمي رنگريزي شده

ويژگي هاي رنگي نخ هاي پشم رنگريزي شده با استفاده از دستگاه طيف سنج انعكاسي در بازه ۳۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر ارزيابي شدند. شكل ۶ موقعيت فضاي رنگي نمونه هاي رنگريزي شده با آپونتيا را در فضاي رنگي Lab را نشان مي دهد. مؤلفه هاي a^* و b^* با محورهاي قرمز- سبز و زرد-آبي متناظرند. همان طور كه در جدول ۳ نشان داده شده است، نمونه هاي رنگريزي شده داراي فام قرمز، نارنجي ته قرمز و قهوه اي هستند. همچنين ميزان خلوص نمونه هاي رنگريزي شده وابسته به شرايط رنگريزي نمونه ها مي باشد.

۳-۴- تأثير عوامل رنگريزي بر ويژگي هاي رنگي

ويژگي هاي رنگي نمونه هاي رنگريزي شده با عصاره ميوه گياه آپونتيا، با توجه به متغيرهاي مختلف فرايند رنگريزي مورد ارزيابي قرار گرفت. در شكل هاي ۶ تا ۹، اثر عوامل هم چون زمان و دماي رنگريزي، غلظت دندانه و pH حمام رنگريزي بر شاخص هاي رنگي شامل زاويه رنگ، قدرت رنگ و خلوص رنگ ارائه شده است.

خطر تخريب بتالايين ها نيز افزايش مي يابد. در محيط قليايي ($pH > 8$)، بتالايين ها بالاترين شدت جذب را در pH حدود ۸ نشان مي دهند، اما در pH هاي بالاتر، يك انتقال به آبي همراه با كاهش شدت جذب مشاهده مي شود كه نشان دهنده شروع تخريب ساختاري رنگزا است. آنتوسيانين ها نيز در محيط اسيدى عملکرد بهتري داشته و رنگ هاي قرمز و بنفش قوي تري توليد مي كنند، در حالي كه در محيط قليايي به رنگ هاي آبي يا سبز متمايل مي شوند.

تأثير pH بر خصوصيات طيفي بتالايين ها به تغيير در پروتون دار شدن گروه هاي عاملی هيدروكسيل و كربوكسيل مربوط مي شود. اين فرايند باعث تغيير در ساختار الكتروني و سيستم مزدوج مولكول مي شود كه مستقيماً بر ويژگي هاي جذب نوري تأثير مي گذارد. در pH بهينه $(5/5 \pm 0/5)$ ، كمپلكس هاي تشكيل شده بين يون هاي هيدروژني و گروه هاي عاملی تركيبات فعال به حداكثر مي رسد، كه اين امر مي تواند منجر به افزايش شدت جذب نور شود. مطالعات گسترده نشان داده اند كه pH محيط تأثير قابل توجهي بر خصوصيات طيفي بتالايين هاي استخراج شده از اوپنتيا دارد و اين تغييرات طيفي، شاخص هاي مهمي براي بررسي پايداري و فعاليت اين تركيبات هستند.

از ديدگاه تعامل رنگزاها با الياف، pH بهينه براي رنگريزي با عصاره اوپنتيا در محدوده ۴ تا ۷ قرار دارد. در اين شرايط، بتالايين ها از پايداري بالاتري در برابر تغييرات شيميايي و نوري برخوردارند و گروه هاي فعال موجود در ساختار پروتئيني الياف (آمين ها و كربوكسيل ها) قابليت بيشتري براي واكنش با رنگزاها نشان مي دهند. همچنين، استفاده از دندانه هاي طبيعي يا معدني (مانند اسيد اسكوربيك يا سولفات آلومينيوم) در اين بازه pH مي تواند به تثبيت رنگزاها روي الياف و افزايش شدت رنگ كمك كند.

پايداري حرارتي و نوري بتالايين هاي اوپنتيا در محدوده pH بين ۴ تا ۶ به حداكثر مي رسد. اين يافته براي بهينه سازي شرايط استخراج، فرمولبندی و نگهداري محصولات حاوي اين رنگزاها طبعي حائز اهميت است. کاربرد اين دانش در صنايع غذايي، دارويي و آرايشي- بهداشتي مي تواند منجر به بهبود پايداري رنگ و افزايش ماندگاري محصولات طبيعي شود. همچنين، درك ساز و كارهاي مولكولي تأثير pH بر خصوصيات طيفي اين رنگزاها مي تواند به طراحي روش هاي استخراج و شرايط نگهداري مؤثرتر كمك كند.

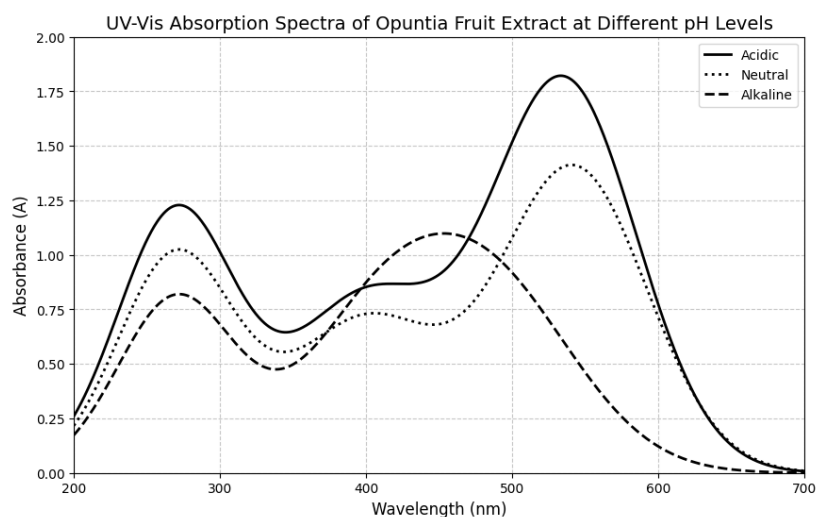
۳-۲- تعيين محدوده متغيرها

در طول آزمايشات مقدماتي، هدف اصلي تعيين فام و قدرت رنگي ماده رنگزاي ميوه آپونتيا و بررسي نياز به دندانه دار كردن آن بود. براي

جدول ۲: محدوده متغیرهای رنگرزی نخ پشمی با عصاره میوه آپونتیا.

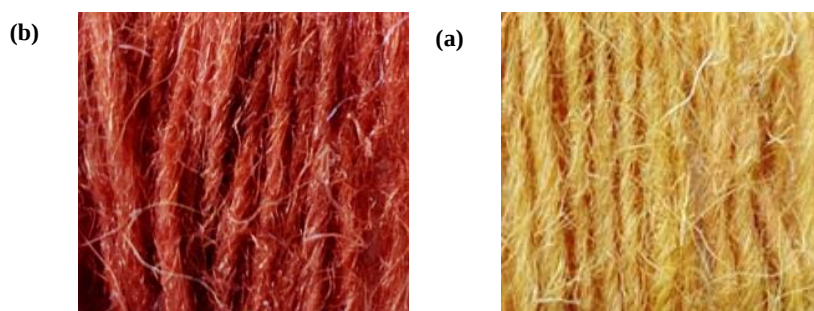
Table 2: Range of dyeing variables for wool yarn with Opuntia fruit extract.

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



شکل ۴: طیف‌های جذبی محلول استخراج آبی میوه اوپنتیا در pHهای مختلف.

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

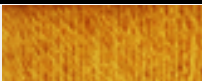


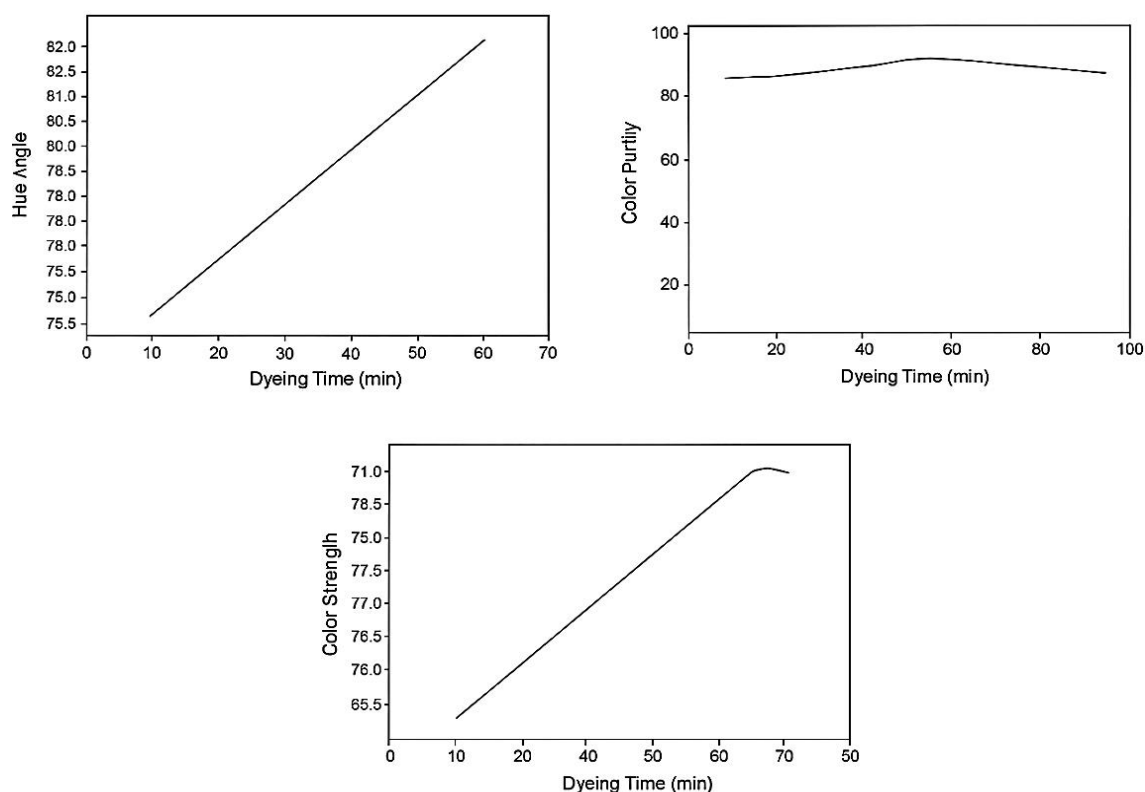
شکل ۵: نمونه‌های رنگرزی شده در طی آزمایشات مقدماتی برای بررسی فام و قدرت رنگی (a) نمونه رنگرزی شده بدون دندانه و (b) نمونه رنگرزی شده با ۱۰ درصد وزنی دندانه سولفات پتاسیم آلومینیم.

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.

جدول ۳: ویژگی‌های رنگی نخ‌های پشمی رنگ‌رزی شده با ۱۰۰ درصد وزنی از میوه آپونتیا در حضور دندانه‌های فلزی مختلف.

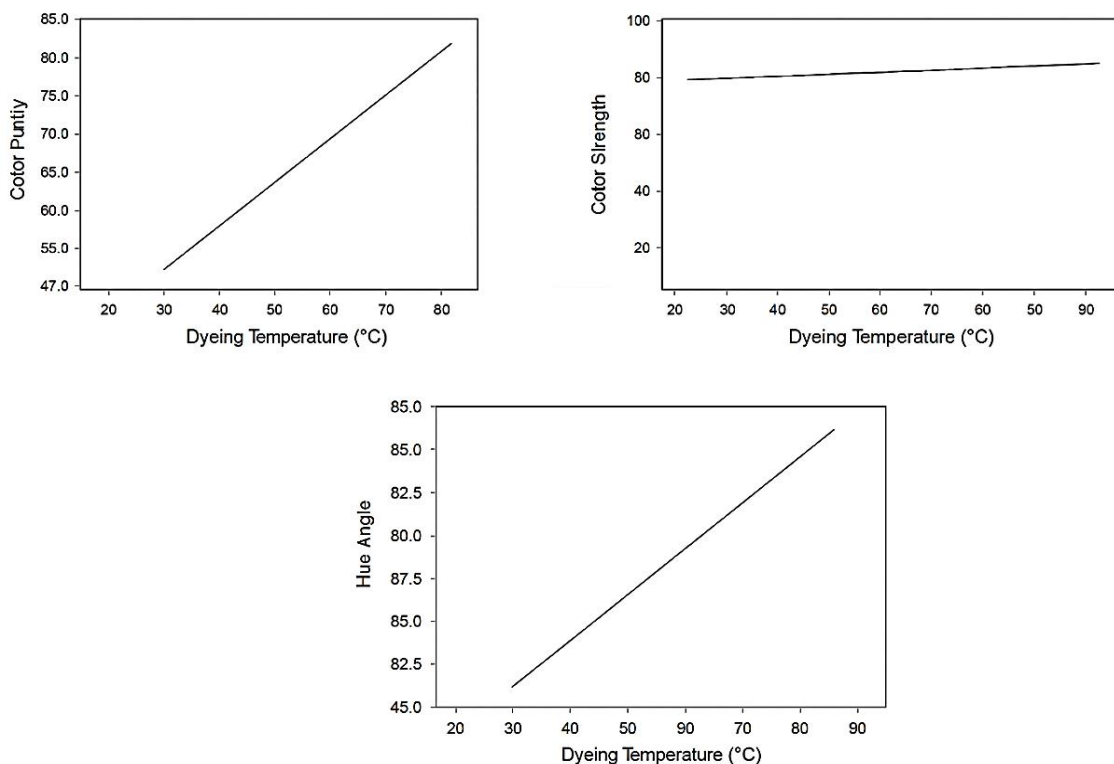
Table 3: Color characteristics of wool yarns dyed with 100 % weight of Opuntia fruit in the presence of different metallic mordants.

(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	$K_2Cr_2O_7$	
73.33	49.66	38.14	$CuSO_4$	
56.11	37.11	29.18	$FeSO_4$	
84.43	68.42	17.18	$SnCl_2$	



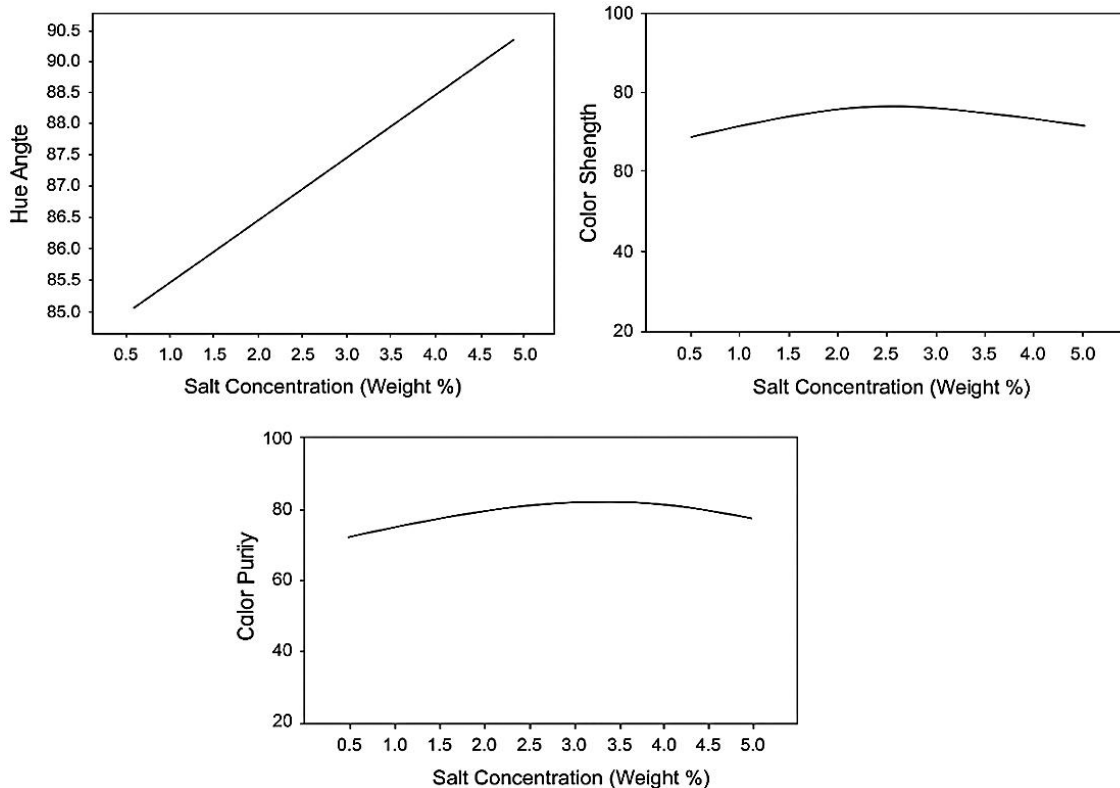
شکل ۶: تأثیر مدت زمان رنگ‌رزی (دقیقه) بر خلوص رنگی، قدرت رنگی و زاویه فام نخ پشمی رنگ‌رزی شده با میوه گیاه آپونتیا.

Figure 6: Effect of dyeing time (minutes) on color purity, color strength, and hue angle of wool yarn dyed with Opuntia fruit.



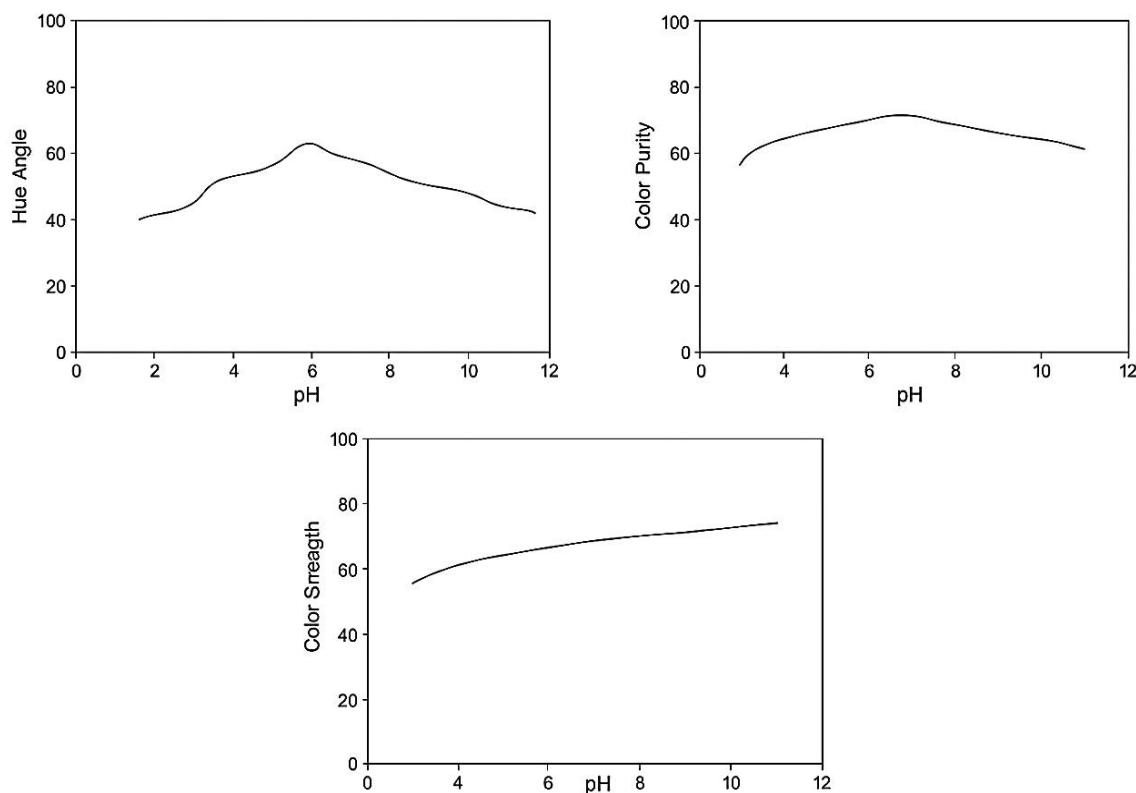
شکل ۷: تأثیر دمای رنگرزی (°C) بر خلوص رنگی، قدرت رنگی و زاویه فام نخ پشمی رنگرزی شده با میوه گیاه آپونتیا.

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. Effect of mordant concentration (% w/w) on the colour purity, colour strength, and hue angle of wool yarn dyed with Opuntia fruit.



شکل ۹: تأثیر pH حمام رنگری بر خلوص رنگی، قدرت رنگی و زاویه فام نخ پشمی رنگری شده با میوه گیاه آپونتیا

Figure 9: Effect of dye bath pH on the colour purity, colour strength, and hue angle of wool yarn dyed with Opuntia fruit.

و همکارانش همسو است که نشان دادند عصاره‌های گیاهی حاوی آنتوسیانین (وزن مولکولی ۴۰۰~ دالتون) در مراحل اولیه رنگری پشم جذب می‌شوند، در حالی که ترکیبات سنگین‌تر (مانند تانن‌ها در اوپنتیا) حاوی ۲۰-۳۰ درصد تانن نیاز به زمان طولانی‌تری دارند. این امر می‌تواند توجیه‌کننده نیاز به زمان بهینه ۹۰ دقیقه در مطالعه حاضر باشد (۳۲). عادل و همکارانش نیز در بررسی سینتیک رنگری پشم با عصاره پوست انار، زمان بهینه رنگری را بین ۶۰ تا ۹۰ دقیقه گزارش کردند که پس از آن، افزایش قابل توجهی در قدرت رنگی مشاهده نشد (۳۵).

مطالعات سینتیکی انجام شده توسط هو و همکارانش نشان می‌دهد که انتقال مولکول‌های رنگزا از محلول به سطح الیاف و سپس نفوذ به داخل ساختار الیاف، دو مرحله اصلی در فرایند رنگری 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 الیاف) پس از ۶۰ دقیقه به تعادل می‌رسد. (۳۶). در مورد رنگری پشم با عصاره میوه اوپنتیا، مرحله اول (انتقال به سطح) نسبتاً سریع بوده و در ۳۰-۴۵ دقیقه اول رنگری اتفاق می‌افتد، در حالی که مرحله دوم (نفوذ به داخل الیاف) زمان بیشتری نیاز دارد و تا حدود ۹۰ دقیقه ادامه می‌یابد

۳-۴-۱- تأثیر مدت زمان رنگری

مدت زمان رنگری به عنوان یکی از مشخصه‌های کلیدی در فرایند رنگری الیاف پشمی با رنگزاهای طبیعی، تأثیر قابل توجهی بر ویژگی‌های رنگی محصول نهایی دارد. بررسی تأثیر این متغیر بر سه شاخص رنگ سنجی خلوص رنگی (C^*)، قدرت رنگی (K/S) و زاویه فام (h°) در رنگری نخ پشمی با عصاره میوه اوپنتیا، نتایج قابل تأملی را نشان می‌دهد که با اصول سینتیک جذب و سازوکارهای انتقال جرم در فرایندهای رنگری قابل تفسیر است.

در خصوص تأثیر زمان رنگری بر قدرت رنگی (K/S)، نتایج نشان می‌دهد که با افزایش زمان رنگری از ۳۰ 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 راتر و همکارانش در مطالعه خود بر روی سینتیک رنگری پشم با رنگزاهای طبیعی نشان دادند، فرایند 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 راتر

۳-۴-۲- تأثیر دمای رنگرزی

دمای حمام رنگرزی به عنوان یکی از مشخصه‌های کلیدی در فرایند رنگرزی با رنگزاهای طبیعی، تأثیر قابل توجهی بر خصوصیات رنگ‌سنجی 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 ۷۰-۹۰ °C) منجر به افزایش قدرت رنگی (K/S) می‌شود که این پدیده را می‌توان به افزایش ضریب نفوذ مولکول‌های رنگزا به داخل بستر لیف و تسهیل برهم‌کنش بین رنگزا و گروه‌های عاملی پروتئینی الیاف پشم نسبت داد. مطالعات ترمودینامیکی ادیل و همکارانش نشان داده است که فرایند جذب رنگزاهای طبیعی بر روی الیاف پشمی اغلب یک فرایند گرماگیر است که با افزایش آنتروپی همراه می‌باشد، بنابراین افزایش دما می‌تواند با غلبه بر سد انرژی لازم برای تشکیل پیوند، بازده جذب را افزایش دهد. (۳۵) با این حال، یافته‌های راتر^۲ حاکی از آن است که افزایش دما فراتر از حد بهینه (معمولاً بالاتر از ۹۵ °C) می‌تواند منجر به کاهش قدرت رنگی شود که این امر به دلیل تخریب ساختار شیمیایی مواد رنگزای موجود در عصاره میوه آپونتیا، واجذب رنگزا از سطح الیاف و آسیب به ساختار و ریخت الیاف پشمی است (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 می‌یابد که این امر می‌تواند به دلیل استخراج بیشتر ترکیبات رنگ‌ساز (مانند بتالاین‌ها) در دماهای بالاتر و جذب انتخابی این ترکیبات بر روی الیاف باشد. بررسی تأثیر دما بر زاویه فام (h°) نشان می‌دهد که این متغیر به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر تغییرات دما قرار می‌گیرد. مطالعات شاهمرادی قهه و همکاران نشان داده‌اند که افزایش دما تا محدوده بهینه (۸۰ °C) برای عصاره اوپنتیا باعث تغییرات ساختاری در مولکول‌های بتالاین می‌شود که این امر منجر به تغییر زاویه فام از محدوده قرمز (۲۵ °) به نارنجی-قرمز (۴۰ °) می‌گردد (۳۷). مقایسه با نتایج به‌دست آمده در مورد رنگرزی پشم با رنگزای طبیعی روناس نشان می‌دهد 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 تفاوت‌ها را می‌توان به تنوع ساختار شیمیایی ترکیبات رنگ‌ساز موجود در منابع مختلف رنگزای طبیعی نسبت داد (۳۸).

این تغییرات عمدتاً ناشی از سه مکانیسم کلیدی است: نخست، تغییرات ساختاری در رنگ‌سازها که بر اثر افزایش دما باعث تغییر در آرایش الکترونی و پیوندهای دوگانه در مولکول‌های بتالاین می‌شود (۳۹). دوم، انتخاب‌پذیری در استخراج ترکیبات که در دماهای

(۳۷). 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 (۳۸).

از آنجا که ترکیبات بتالاین موجود در میوه اوپنتیا دارای وزن مولکولی و قطبیت متفاوتی هستند، جذب انتخابی آن‌ها در زمان‌های مختلف می‌تواند بر خلوص رنگی تأثیرگذار باشد (۳۹).

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. کاردوسواگارت و همکارانش در مطالعه خود بر روی پایداری بتالاین‌ها در شرایط مختلف نشان دادند که بتاسیانین‌ها (رنگزاهای قرمز- بنفش) و بتازانتین‌ها (رنگزاهای زرد- نارنجی) موجود در میوه اوپنتیا، پایداری حرارتی متفاوتی دارند و در طول فرایند رنگرزی، ممکن است با سرعت‌های متفاوتی تخریب شوند (۹). این تخریب انتخابی می‌تواند منجر به تغییر در نسبت رنگزاهای جذب شده و در نتیجه تغییر در زاویه فام شود.

مطالعات طیف‌سنجی UV-Vis انجام شده توسط گلشچینسکا و همکارانش نیز نشان داده است که در طول فرایند رنگرزی با عصاره میوه اوپنتیا، تغییرات قابل توجهی در طیف جذبی محلول رنگرزی رخ می‌دهد که نشان‌دهنده تغییر در ترکیب شیمیایی و نسبت رنگزاهای موجود در محلول است. این تغییرات می‌تواند بر زاویه فام نخ رنگرزی شده تأثیرگذار باشد (۱۷).

تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از روش آنوا^۱، تأثیر معنادار زمان رنگرزی بر هر سه عامل رنگی را تأیید می‌کند (p < ۰/۰۰۱) که نشان‌دهنده اهمیت بهینه‌سازی این عامل در فرایند 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 بتالاین، مانند چغندر قرمز (۲۹) و میوه‌های کاکتوس (۳۹)، 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.

2. Rather
3. Chromophore

1. ANOVA

ترکیبات پلی‌فنلی موجود در میوه اوپنتیا و گروه‌های کربوکسیل و آمین موجود در زنجیره‌های پپتیدی پشم، بازده جذب را افزایش می‌دهند (۳۰). با این حال، افزایش غلظت دندان به بیش از مقدار بهینه (معمولاً بیشتر از ۴-۵ درصد وزنی) اغلب منجر به کاهش قدرت رنگی می‌شود که این پدیده را می‌توان به رقابت یون‌های فلزی اضافی برای اشغال مکان‌های فعال جذب بر روی سطح الیاف و نیز تخریب رنگ‌های طبیعی در حضور غلظت بالای یون‌های فلزی نسبت داد (۴۰). شایان ذکر است که در این پژوهش، مقادیر K/S مستقیماً از خروجی دستگاه طیف‌سنج انعکاسی X-Rite (منبع نوری D65، زاویه مشاهده ۱۰°) و در طول موج بیشینه جذب (۵۳۵ نانومتر) محاسبه گردید. در برخی شرایط بهینه، اعداد بالاتر از ۶۰ مشاهده شد که با توجه به معادله Kubelka-Munk، این امر ناشی از کاهش بازتاب نمونه به مقادیر نزدیک به صفر است. چنین کاهش شدیدی در بازتاب، نتیجه استفاده از غلظت بسیار بالای رنگزا (تا ۱۵۰٪ owf) همراه با حضور دندان‌های فلزی پایدارکننده بوده که سبب تشکیل کمپلکس‌های پایدار رنگ-دندان و افزایش چشمگیر توان جذب نور شده است. پدیده مذکور پیش‌تر نیز در رنگ‌گری الیاف پروتئینی با رنگزای طبیعی در شرایط فوق‌اشباع گزارش شده و بیانگر ایجاد لایه‌های رنگی متراکم و یکنواخت بر سطح الیاف است.

خلوص رنگی (C*) به طور قابل ملاحظه‌ای تحت تأثیر غلظت دندان قرار می‌گیرد. مشابه با یافته‌های خان و همکارانش در مورد رنگ‌گری پشم با رنگزای طبیعی پوست انار، افزایش غلظت دندان تا مقدار بهینه منجر به افزایش خلوص رنگی می‌شود (۳۰). این افزایش خلوص رنگی را می‌توان به تشکیل کمپلکس‌های پایدار بین یون‌های فلزی دندان و گروه‌های عاملی مولکول‌های رنگزا نسبت داد که منجر به جذب انتخابی در محدوده‌های طیفی خاص می‌شود. مطالعات ادیل و همکارانش نشان داده‌اند که رنگزای استخراج شده از میوه *Opuntia ficus-indica* در pH اسیدی (۴-۵) بیشترین جذب را روی الیاف پروتئینی داشته و می‌تواند منجر به تولید رنگ‌هایی با ثبات قابل قبول شود (۳۱). نتایج این پژوهش تأیید می‌کند که آلومینیم سولفات با تشکیل کمپلکس‌های پایدار با مولکول‌های بتالاین، باعث افزایش قابل توجه خلوص رنگ (C*) می‌گردد. یافته‌های حاصل از رنگ‌گری پشم با عصاره میوه اوپنتیا در این مطالعه نیز همسو با پژوهش علی و ای محمد است که کارایی رنگزای طبیعی استخراج شده از *Opuntia lasiacantha* را بر روی پارچه بررسی کردند (۶). این محققان نشان دادند که این گیاه می‌تواند به مقادیر مطلوب قدرت رنگی دست یابد، هرچند روش‌های پیشرفته طراحی آزمایش در آن مطالعه به کار گرفته نشده بود. همچنین یوسف و همکاران در پژوهشی بر روی *Opuntia stricta* نشان دادند که با استفاده از روش

مختلف باعث تغییر نسبت بتانین به ایزوبتانین شده و بر طیف رنگ نهایی تأثیر می‌گذارد (۹). سوم، تغییر در برهم‌کنش‌های رنگزا-الیاف که دما بر تشکیل پیوندهای هیدروژنی و کمپلکس‌های فلزی با دندان‌ها تأثیر مستقیم دارد (۶). مطالعه ادیل و همکاران بر روی رنگ‌گری پشم با روناس نیز نشان داد که دمای بهینه (۸۵ °C) باعث تغییر زاویه فام از ۳۸ به ۵۲ °C می‌شود که این تغییرات ناشی از تغییر در نسبت جذب آنتراکینون‌های مختلف در دماهای متفاوت است (۳۸). یافته‌های پژوهش حاضر که دمای بهینه ۸۰ °C را برای عصاره اوپنتیا پیشنهاد می‌کند، با مطالعات پیشین همخوانی دارد و نشان‌دهنده اهمیت کنترل دمای فرایند در دستیابی به رنگ مطلوب است. این نتایج به ویژه در کاربردهای صنعتی مانند رنگ‌گری الیاف پشمی مورد استفاده در فرش دستباف حائز اهمیت است، زیرا که تغییرات جزئی دما می‌تواند تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر کیفیت رنگ نهایی داشته باشد.

مقایسه جامع داده‌های حاصل از اثر دما بر خصوصیات رنگی نخ پشمی رنگ‌گری شده با میوه گیاه آپونتیا با مطالعات مشابه نشان می‌دهد که رفتار این رنگزای طبیعی در برابر تغییرات دما، الگویی مشابه با سایر رنگ‌های طبیعی غنی از ترکیبات پلی‌فنلی دارد، اما با توجه به ترکیب شیمیایی منحصر به فرد میوه آپونتیا، نقاط بهینه دما برای دستیابی به حداکثر قدرت رنگی، خلوص رنگی و زاویه فام مطلوب می‌تواند متفاوت باشد. این تفاوت‌ها اهمیت بهینه‌سازی دمای رنگ‌گری برای هر منبع رنگزای طبیعی را نشان می‌دهد.

۳-۴-۳- تأثیر غلظت دندان

غلظت دندان به‌عنوان یکی از مهم‌ترین متغیر رنگ‌گری الیاف پشمی با رنگ‌های طبیعی، نقش کلیدی در ویژگی‌های رنگی محصول نهایی ایفا می‌کند. اثر غلظت دندان بر سه عامل رنگ‌سنجی شامل خلوص رنگی (C*)، قدرت رنگی (K/S) و زاویه فام (h°) نخ پشمی رنگ‌گری شده با عصاره میوه اوپنتیا قابل توجه و مطابق با اصول علمی تشریح شده در مطالعات مشابه است.

در خصوص قدرت رنگی، افزایش غلظت دندان (عموماً زاج سفید یا آلومینیم سولفات) تا میزان مشخصی (حدود ۴ درصد وزنی نسبت به وزن کالا) منجر به افزایش قابل توجه مقادیر K/S می‌شود. این افزایش را می‌توان به تشکیل کمپلکس‌های فلزی-رنگزا با ثبات بیشتر نسبت داد که پیوندهای قوی‌تری با گروه‌های عاملی پروتئین پشم برقرار می‌کنند. آنالیز طیف‌سنجی فروسرخ در پژوهش خان و همکارانش نشان داده است که یون‌های فلزی دندان به عنوان واسطه عمل کرده و با ایجاد پیوند کئوردیناسیون بین گروه‌های هیدروکسیل

1. FTIR
2. Khan

سطح پاسخ (RSM) می‌توان به قدرت رنگی $15/2^1$ در شرایط بهینه دست یافت. این نتایج بیانگر پتانسیل بالای گیاه اوپنتیا در رنگ‌گری الیاف طبیعی است (۳۲).

در مورد تأثیر غلظت دندان به زاویه فام (h°)، مطالعات نشان می‌دهد که این عامل به طور قابل توجهی تحت تأثیر نوع و غلظت دندان قرار می‌گیرد. مطالعات بر روی طیف رنگی رنگ‌زاهای طبیعی نشان دادند که دندان‌های فلزی مختلف می‌توانند منجر به تغییرات قابل توجهی در زاویه فام شوند. این تغییرات به تشکیل کمپلکس‌های فلزی-رنگزا با جذب انتخابی طول موج‌های متفاوت نسبت داده می‌شود. از سویی دیگر، تغییر در زاویه فام با افزایش غلظت دندان را می‌توان به بهم‌کنش یون‌های فلزی با گروه‌های عاملی رنگ‌زاهای طبیعی نسبت داد. به عنوان مثال، در رنگ‌ری با عصاره میوه اوپنتیا، افزایش غلظت زاج سفید تا ۳ درصد وزنی منجر به افزایش زاویه فام می‌شود که نشان‌دهنده حرکت رنگ به سمت ته‌رنگ‌های زردتر-قرمزتر است. این تغییر به اثر یون‌های آلومینیم بر مولکول‌های بتالائین و تغییر در ساختار جذبی آن‌ها مربوط می‌شود.

مقایسه نتایج حاصل از این مطالعه با پژوهش‌های مشابه نشان می‌دهد که رفتار رنگ‌زای مستخرج از میوه اوپنتیا در برابر تغییرات غلظت دندان، مشابه با سایر رنگ‌زاهای طبیعی حاوی ترکیبات پلی‌فنلی و بتالائین است. به عنوان مثال، شهید و همکارانش در مطالعه خود بر روی استخراج و کاربرد بتالائین‌ها از چغندر قرمز در رنگ‌ری 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 رنگ‌ری با میوه اوپنتیا، منحصربه‌فرد و متناسب با ترکیب شیمیایی خاص این رنگ‌زای طبیعی است.

۳-۴-۴- تأثیر pH حمام رنگ‌ری

pH حمام رنگ‌ری یکی از متغیرها حیاتی و تأثیرگذار در فرایند رنگ‌ری الیاف پشمی با رنگ‌زاهای طبیعی است که بر هر سه عامل رنگ‌سنجی خلوص رنگی (C^*)، قدرت رنگی (K/S) و زاویه فام (h°) اثرات قابل توجهی اعمال می‌کند. در رنگ‌ری نخ پشمی با عصاره میوه اوپنتیا، تأثیر pH بر این عوامل با اصول شیمی فیزیک رنگ‌ری و سازوکارهای جذب الکتروستاتیک و کوالانسی توجیه‌پذیر است.

در خصوص تأثیر pH بر قدرت رنگی، نتایج نشان می‌دهد که افزایش قدرت رنگی در محیط اسیدی (pH حدود ۴-۵) به حداکثر می‌رسد و با افزایش pH به سمت محیط خنثی و قلیایی، کاهش قابل توجهی در مقادیر K/S مشاهده می‌شود. راتر و همکارانش در مطالعه خود بر روی رنگ‌ری الیاف پشمی با عصاره پوست بلوط نشان دادند

که این پدیده با سازوکار جذب الکتروستاتیک قابل توجیه است. در محیط اسیدی، گروه‌های آمین موجود در زنجیره پپتیدی پشم پروتون‌دار شده (NH_3^+) و بار مثبت پیدا می‌کنند، در حالی که گروه‌های هیدروکسیل فنولیک موجود در ترکیبات بتالائین عصاره میوه اوپنتیا، بار منفی نسبی دارند. این اختلاف بار منجر به جاذبه الکترواستاتیک قوی و افزایش بازده جذب می‌شود (۴۱).

هادر و همکارانش در پژوهش خود بر روی رنگ‌ری پشم با عصاره روناس گزارش کردند که نقطه ایزوالکتریک پشم در pH حدود ۵/۴-۴/۸ قرار دارد. در این محدوده pH، تعادل مناسبی بین گروه‌های با ۵/۴ بار مثبت و منفی بر روی سطح الیاف وجود دارد که برای جذب بهینه رنگ‌زاهای طبیعی حاوی ترکیبات فنلی 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 پروتون زدایی گروه‌های آمین و کاهش جاذبه الکترواستاتیک است (۴۲).

مطالعات بن تیچا و همکارانش 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 (۴۳).

خلوص رنگی (C^*) نیز به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر pH حمام رنگ‌ری 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 راتر و همکارانش 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 رنگ‌زاهای 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 متغیرهای 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. خان و همکارانش 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

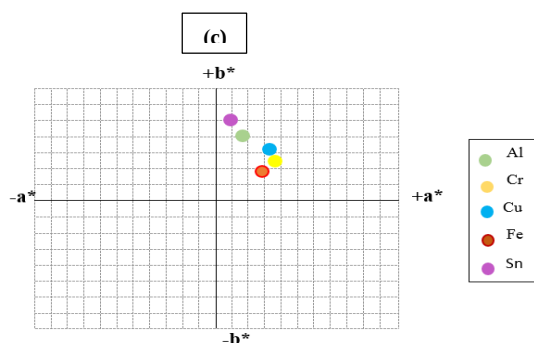
1. K/S

خلوص رنگی، قدرت رنگی و زاویه فام تأیید کرد ($p < 0/001$). بر اساس نتایج، مدت زمان بهینه رنگرزی ۹۰ دقیقه تعیین شد که در آن فرایند 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 دندانه و pH حمام رنگرزی نشان داد که غلظت بهینه دندانه ۵ درصد وزنی نسبت به وزن کالا (owf) و pH بهینه در محدوده ۴/۵ تا ۵/۵ است. در این شرایط، حداکثر قدرت رنگی و خلوص رنگی مطلوب حاصل می‌شود، در حالی که افزایش بیشتر غلظت دندانه منجر به کاهش خلوص رنگی و تغییر ناخواسته در زاویه فام می‌گردد. همچنین، مشخص شد که با تنظیم دقیق عوامل رنگرزی می‌توان به طیف متنوعی از تهرنگ‌ها، از قرمز-بنفش (زاویه فام ۳۶۰-۳۵۰ درجه) تا قرمز-نارنجی (زاویه فام ۲۰-۱۰ درجه) دست یافت. این یافته‌ها نشان می‌دهد که کنترل دقیق متغیرهای رنگرزی می‌تواند ضمن بهینه‌سازی مصرف انرژی و مواد شیمیایی، به ویژگی‌های رنگی مطلوب در نخ پشمی رنگرزی شده با عصاره میوه اوپنتیا منجر شود.

۳-۶- کسب سایه رنگی متنوع در شرایط بهینه

برای بررسی کسب فام‌های رنگی متنوع، نمونه‌های نخ پشمی با این میوه در حضور دندانه‌های فلزی مختلف سولفات پتاسیم آلومینیم، دی‌کرومات سدیم، سولفات مس، سولفات آهن و کلرید قلع به روش پیش‌دندانه رنگرزی شد. شکل ۱۰ تصاویر مربوط به میوه گیاه، نمونه‌های نخ پشمی رنگرزی شده، و نمودار فضای رنگی را برای نخ پشمی رنگرزی شده با این ماده رنگزا در حضور دندانه‌های مختلف فلزی نشان می‌دهد. ویژگی‌های رنگی به وسیله عامل‌های a^* و b^* اندازه‌گیری شدند.



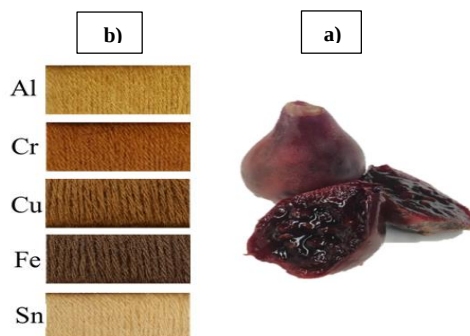
طیف‌سنجی UV-Vis توسط گلیشچینسکا و همکارانش بر روی استخراج و کاربرد بتالائین‌ها نیز این تغییرات طیفی را تأیید کرده است (۱۷).

تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از روش آنوا، تأثیر معنادار pH بر هر سه عامل رنگی را تأیید می‌کند ($p < 0/001$)، که نشان‌دهنده اهمیت این متغیر در فرایند 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.

۳-۵- بهینه‌سازی فرایند رنگرزی

بهینه‌سازی فرایند 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 دندانه و pH حمام رنگرزی دارد. با تنظیم دقیق این عوامل، هدف دستیابی به تعادلی بین جذب موثر رنگزا، اتصال قوی به الیاف و قدرت رنگی بالا است. پس از مطالعه اثر این عوامل بر خلوص، زاویه رنگ و قدرت رنگی، فرایند رنگرزی به‌گونه‌ای بهبود یافت که بیشترین مقادیر این ویژگی‌ها به‌دست آمد.

مطالعه تأثیر متغیرهای رنگرزی بر ویژگی‌های رنگی نخ پشمی رنگرزی شده با عصاره میوه اوپنتیا، نشان می‌دهد که این ویژگی‌ها تحت تأثیر معناداری از متغیرهای فرایند قرار می‌گیرند. تحلیل واریانس آنوا تأثیر معنادار متغیرهای رنگرزی شامل مدت زمان، دما، غلظت دندانه و pH حمام رنگرزی را بر شاخص‌های رنگی شامل



شکل ۱۰: (a) تصویر گیاه خشک‌شده مورد استفاده در فرایند رنگرزی، (b) نمونه‌های نخ پشمی رنگرزی‌شده با عصاره آبی گیاه در شرایط بهینه پیشنهادشده و در حضور دندانه‌های فلزی مختلف، و (d) 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.

شستشو مربوط به نمونه رنگرزی شده با دندان آهن بوده، در حالی که بیشترین تغییر رنگ ($\Delta E = 2/11$) در نمونه‌های رنگرزی شده با دندان مس مشاهده شده است. لکه‌گذاری روی پارچه پشمی برای تمامی نمونه‌ها ناچیز بوده (ΔE بین ۰/۷۴ تا ۱/۲۴)، در حالی که لکه‌گذاری روی پارچه پنبه‌ای قابل توجه‌تر (ΔE بین ۴/۲۰ تا ۵/۰۶) بوده است.

ثبات نوری نمونه‌های رنگرزی شده با عصاره اوپنتیا برجسته‌ترین ویژگی این رنگزای طبیعی محسوب می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که تمامی نمونه‌ها ثبات نوری فوق‌العاده‌ای (درجه ۷-۸ تا ۸ در مقیاس آبی) از خود نشان داده‌اند. بهترین ثبات نوری در نمونه‌های رنگرزی شده با دندان‌های آلومینیم، کروم و مس (درجه ۸) مشاهده شده، در حالی که نمونه‌های رنگرزی شده با دندان‌های آهن و قلع درجه نسبتاً پایین‌تری (۷-۸) را نشان داده‌اند. کمترین تغییر رنگ ($\Delta E = 0/30$) در آزمون نوری مربوط به نمونه رنگرزی شده با دندان کروم بوده که نشان‌دهنده پایداری فوق‌العاده این کمپلکس در برابر تابش نور است. این ثبات نوری استثنایی قابل مقایسه با بسیاری از رنگزاهای شیمیایی جدید است و کاربرد بالقوه این رنگزای طبیعی را در منسوجات بیرونی و تزئینی افزایش می‌دهد. با توجه به نتایج به دست آمده، می‌توان استنباط کرد که انتخاب نوع دندان باید بر اساس کاربرد نهایی محصول رنگرزی شده با اوپنتیا صورت گیرد. برای کاربردهایی که در معرض نور شدید قرار دارند (مانند پرده، رومیزی و فرش)، دندان‌های آلومینیم، کروم و مس به دلیل ثبات نوری برتر، گزینه‌های مناسب‌تری هستند. در حالی که برای منسوجاتی که بیشتر در معرض شستشو قرار می‌گیرند یا احتمال انتقال رنگزا به سایر منسوجات در آنها وجود دارد، دندان‌های 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 فرایندهای رنگرزی پایدار با بهره‌گیری از رنگزاهای طبیعی و دوست‌دار محیط‌زیست ایفا می‌کند.

عامل a^* به اندازه قرمز یا سبز بودن نمونه رنگرزی شده اشاره دارد، در حالی که عامل b^* به اندازه زرد یا آبی بودن نمونه رنگرزی شده اشاره دارد. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، نمونه‌های رنگرزی شده در حضور دندان آهن و کروم مقادیر بیشتری از عامل a^* را نشان می‌دهند که به معنای وجود فام قرمز بیشتر در این نمونه‌ها است. هرچند نمونه رنگرزی شده با دندان آهن نیز دارای زاویه رنگی در حدود دندان مس و کروم می‌باشد ولی با توجه به ماهیت این دندان و تأثیر آن بر فام (۳)، سبب ایجاد یک فام قهوه‌ای و با خلوص کمتر شده است. نمونه‌های رنگرزی شده با کلرید قلع و زاج سفید مقادیر بیشتری از b^* را دارند که به معنای وجود آبی بیشتر در این نمونه‌ها است. این نتایج نشان می‌دهند که نوع دندان مورد استفاده در رنگرزی می‌تواند تأثیر معناداری بر ویژگی‌های رنگی نهایی داشته باشد.

۳-۷- ثبات رنگی کلاف‌های رنگرزی شده

ثبات رنگی در نخ‌های استفاده شده در بافت فرش دستباف بسیار حائز اهمیت است. این ویژگی نه تنها زیبایی و ظاهر فرش را تضمین می‌کند، بلکه مقاومت آن در برابر شستشو و تابش نور را نیز افزایش می‌دهد. نخ‌های با ثبات رنگی مناسب باعث می‌شوند که فرش به مدت طولانی‌تری استفاده شده و ارزش آنها حفظ شود، که این امر برای ارزش و پایداری سرمایه‌گذاری در این حوزه بسیار ضروری است. بررسی خصوصیات ثبات رنگی نخ پشمی رنگرزی شده با رنگزای مستخرج از میوه اوپنتیا در حضور دندان‌های فلزی مختلف نشان می‌دهد که این رنگزای طبیعی عملکرد قابل توجهی از نظر ثبات رنگی ارائه می‌دهد. تحلیل داده‌های جدول ۴ نشان می‌دهد که تمامی نمونه‌ها ثبات شستشویی بسیار مطلوبی (درجه ۴ تا ۵-۴ در مقیاس خاکستری) نشان داده‌اند، که این امر می‌تواند به دلیل تشکیل کمپلکس‌های پایدار بین بتالانین‌های موجود در عصاره اوپنتیا و یون‌های فلزی دندان باشد. کمترین تغییر رنگ ($\Delta E = 0/43$) در آزمون

جدول ۴: نتایج حاصل ارزیابی ثبات شستشویی، لکه‌گذاری و ثبات نوری کلاف نخ پشمی رنگرزی شده با رنگزای مستخرج از آپونتیا در حضور دندان‌های 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 mordants.

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 رنگ‌ری ضروری است. در این بخش از پژوهش، تأثیر متغیرهای فرایند رنگ‌ری، شامل غلظت رنگزا، غلظت دندان، دما و مدت زمان رنگ‌ری و pH حمام رنگ‌ری بر روی ویژگی‌های مکانیکی نخ‌های رنگ‌ری شده در شرایط مشخص مورد بررسی قرار گرفت. مقادیر حداکثر تنش (cN/tex)، مدول ینگ (cN/tex)، و ازدیاد طول تا حد پارگی (درصد) نمونه‌های نخ‌های رنگ‌ری شده 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 رنگ‌ری شده میوه گیاه آپونتیا در شرایط مختلف رنگ‌ری، تغییرات کمی از خود نشان دادند.

بررسی داده‌های جدول ارزیابی ویژگی‌های مکانیکی نخ پشمی رنگ‌ری شده با عصاره میوه اوپنتیا در شرایط مختلف رنگ‌ری نشان می‌دهد که فرایند رنگ‌ری تأثیر قابل توجهی بر خصوصیات مکانیکی الیاف پشم نداشته است. مقایسه نمونه خام 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 فرایند رنگ‌ری با عصاره اوپنتیا در شرایط بهینه، آسیب قابل توجهی به ساختار پروتئینی الیاف پشم وارد نمی‌کند.

تحلیل مدول ینگ نمونه‌های رنگ‌ری شده نشان می‌دهد که این عامل تحت تأثیر شرایط رنگ‌ری قرار می‌گیرد. مدول ینگ 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 ینگ ۴۱/۰۳ (cN/tex) در نمونه شماره ۲ با دمای رنگ‌ری پایین‌تر (۶۰ °C) مشاهده می‌شود، در حالی که بیشترین مدول ینگ ۷۶/۲۳ (cN/tex) در نمونه شماره ۶ با غلظت رنگزای بالاتر (۱۵۰ درصد) دیده می‌شود. این تغییرات نشان می‌دهد که افزایش غلظت رنگزا می‌تواند منجر به

افزایش سختی و کاهش انعطاف‌پذیری نخ شود، احتمالاً به دلیل پر شدن فضاها بین مولکولی الیاف با مولکول‌های رنگزا و ایجاد اتصالات عرضی بیشتر بین زنجیره‌های پروتئینی پشم است (۸). ازدیاد طول تا حد پارگی نمونه‌های رنگ‌ری شده (۱۱ تا ۱۴/۰۹ درصد) نیز تغییرات نسبتاً کمی را نسبت به نمونه خام (۱۱/۷۳ درصد) نشان می‌دهد. بیشترین ازدیاد طول (۱۴/۰۹ درصد) 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 درصد) در نمونه شماره ۶ با غلظت رنگزای بالاتر (۱۵۰ درصد) دیده می‌شود که با افزایش مدول ینگ این نمونه هم‌خوانی دارد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که انتخاب شرایط بهینه رنگ‌ری (دمای ۹۰-۸۰ °C، pH حدود ۵/۵، غلظت رنگزای ۱۰۰ درصد و غلظت دندان ۵ درصد) می‌تواند ضمن دستیابی به خواص رنگی مطلوب، ویژگی‌های مکانیکی مناسب نخ پشمی را نیز حفظ کند.

در جدول ۶، جمع‌بندی 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 ۸-۷) 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 ۵-۴) 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.

1. Raw

جدول ۵: ارزیابی تغییرات ویژگی‌های مکانیکی نخ پشمی رنگ شده با اوپنتیا

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

Sample						Maximum tension (cN/tex)	Young's modulus (cN/tex)	Elongation at break (%)
n	Dye concentration (%)	Mordant concentration (%)	Dyeing temperature (°C)	Dyeing time (min)	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

جدول ۵ : ادامه.

Table 5: Continue.

n	Sample					Maximum tension (cN/tex)	Young's modulus (cN/tex)	Elongation at break (%)
	Dye concentration (%)	Mordant concentration (%)	Dyeing temperature (°C)	Dyeing time (min)	Dyeing bath pH			
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

جدول ۶: مقایسه نتایج بهینه سازی رنگرزی، ویژگی‌های رنگی و ثبات رنگی اوپنتیا با سایر رنگزاهای طبیعی مطالعه شده.

Table 6: 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	5.5 ± 0.5	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- نتیجه‌گیری

این پژوهش به بررسی امکان استفاده از عصاره میوه اوپنتیا به عنوان یک منبع رنگزای طبیعی برای رنگرزی الیاف پشم و بهینه‌سازی شرایط فرایند 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، به‌ویژه در حوزه رنگرزی الیاف پروتئینی مانند پشم، آشکار می‌سازد. عصاره میوه اوپنتیا، سرشار از رنگزاهای 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 نشان‌دهنده 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 فرایند رنگرزی با بهره‌گیری از روش سطح پاسخ و تحلیل واریانس، شرایط بهینه برای

دستیابی به حداکثر خلوص و قدرت رنگی را در متغیرهای دما (۹۰ درجه سانتی‌گراد)، زمان (۹۰ دقیقه)، غلظت رنگزا (۵۰ درصد)، غلظت دندان (۵ درصد وزنی) و pH حمام رنگرزی (۸) شناسایی کرد. یافته‌ها حاکی از تأثیر معنادار این متغیرها بر ویژگی‌های رنگی نهایی بوده و نشان داد که افزایش مقادیر مذکور منجر به افزایش قابل توجه قدرت رنگی می‌شود. همچنین، غلظت رنگزا، غلظت دندان و pH حمام تأثیر به‌سزایی بر خلوص رنگ داشتند. استفاده از دندانه‌های فلزی مختلف (Sn, Fe, Cu, Cr, Al) به روش پیش‌دندان، 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. دندان آهن با ایجاد فام قهوه‌ای با خلوص کمتر، نقش به‌سزایی در تعیین ویژگی‌های رنگی نهایی را نمایان ساخت. یکی از برجسته‌ترین یافته‌های این پژوهش، ثبات رنگی استثنایی نمونه‌های رنگرزی شده با عصاره اوپنتیا است. تمامی نمونه‌ها ثبات شستشویی بسیار مطلوبی (درجه ۴ تا ۵-۴) و ثبات نوری فوق‌العاده‌ای (درجه ۷-۸)

جایگزینی پایدار و مقرون‌به‌صرفه برای رنگزاهای شیمیایی در رنگرزی الیاف پشمی، به ویژه برای تولیدکنندگان کوچک و متوسط فرش دستباف و منسوجات سنتی، مورد استفاده قرار گیرد. با این حال، برای افزایش مقیاس تولید و کاربرد صنعتی گسترده‌تر، نیاز به توسعه روش‌های استخراج کارآمدتر، بررسی امکان کشت انبوه و استانداردسازی فرایند رنگرزی 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.

تا ۸) از خود نشان دادند که با بسیاری از رنگزاهای شیمیایی قابل رقابت است. بهترین ثبات نوری در نمونه‌های رنگرزی شده با دندان‌های آلومینیم، کروم و مس مشاهده شد. بررسی خواص مکانیکی الیاف پشم پس از رنگرزی نشان دهنده تغییرات جزئی در حداکثر تنش، مدول یانگ 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 فراوری‌های صنعتی بر رنگرزی وجود دارد. همچنین، تأثیر تغییرات فصلی در ترکیبات رنگی میوه اوپنتیا و روش‌های مختلف استخراج رنگزا بر کیفیت رنگرزی 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. بومی‌بودن 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 به‌عنوان

۵- مراجع

- Hosseinneshad M, Gharanjig K, Rouhani S, Imani H, Razani N. Environmentally dyeing using dried walnut husk as bio-mordant: investigation of creating new red and yellow shades on wool. *J Nat Fibers*. 2022;23(15):10953-63. <https://doi.org/10.1080/15440478.2021.2002783>.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2008.05.008>.
- Arifeen A, Wu J, Rehman FU, Adeel S, Qureshi AS, Zulfikar S, Zuber M. Environmentally friendly extraction of walnut bark-based juglone natural colorant for dyeing studies of wool fabric. *Environ Sci Pollut Res Int*. 2021;28(39):49958-49966. doi:10.1007/s11356-021-14277-8.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.08.029>.
- Yusuf M, Shabbir M, Mohammad F. Natural colorants: Historical, processing and sustainable prospects. *Nat Prod Bio-prospect*. 2017;7(1):123-145. <https://doi.org/10.1007/s13659-017-0119-9>.
- 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):257-261. <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2010.10.001>.
- Bechtold T, Mahmud-Ali A, Mussak R. Anthocyanin dyes extracted from grape pomace for the purpose of textile dyeing. *J Sci Food Agric*. 2007;87(14):2589-95. <https://doi.org/10.1002/jsfa.3013>.
- Shahid M, Shahid-ul-Islam S, Mohammad F Recent advancements in natural dye applications: a review. *J Clean Product*. 2013;53:310-331. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.03.031>.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.05.025>.
- Haji A., Qavamnia S.S. Response surface optimization of wool dyeing with three natural dyes. *J Nat Fibers* <https://doi.org/10.1007/s12221-015-0046-5>.
- Khan MI, Ahmad A, Khan SA, Yusuf M, Shahid M, Manzoor N, Mohammad F. Assessment of antimicrobial activity of catechu and its dyed substrate. *J Clean Prod*. 2011;19(12):1385-1394. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.03.013>.
- Baliarsingh S, Behera PC, Jena J, Das T, Das NB. UV reflectance attributed direct correlation to colour strength and absorbance of natural dyed yarn with respect to mordant use and their potential antimicrobial efficacy. *J Clean Prod*. 2015;102:485-92. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.112>.
- Montazer M, Parvinzadeh M, Kiumarsi A. Colorimetric properties of wool dyed with natural dyes after treatment with ammonia. *Color Technol*. 2006;122(3):135-141. <https://doi.org/10.1111/j.1478-4408.2004.tb00223.x>.
- Shams-Nateri A. Reusing wastewater of madder natural dye for wool dyeing. *J. Clean. Prod*. 2011;19(6):775-81. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.12.018>.
- Adeel S, Ali S, Bhatti IA, Zsila F, Zuber M, Rehman F. Dyeing of cotton fabric using pomegranate (*Punica granatum*) and turmeric (*Curcuma longa*) aqueous extracts: A comparative study. *Asian J Chem*. 2013;25(13):7346-7352.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.01.005>.
17. Gliszczynska-Swiglo A, Szymusiak H, Malinowska P. Betanin, the main pigment of red beet—molecular origin of its exceptionally high free radical scavenging activity. *Food Addit Contam.* 2006;23(11):1079-1087. <https://doi.org/10.1080/02652030600986032>.
 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. Application of Iranian madder on wool using tannic acid as a biomordant. *Iran J Chem Chem Eng*, 2013;32(4):1-8.
 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 hymenosepalus* root as biomordant. *Iran. J Chem Chem Eng* 2010;29(3):55-60. <https://doi.org/10.30492/IJCCE.2010.6513> [In Persian].
 22. Mirjalili M, Nazarpour K, Karimi L. Eco-friendly dyeing of wool using natural dye from weld (*Reseda luteola* L.) assisted by ultrasound. *J Clean Prod.* 2015;106:686-693 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.02.001>
 23. Hosseini M, Montazer M, Damerchely R. Enhancing dyeability and antibacterial features of silk through pre-treatment with chitosan. *J. Eng. Fibers Fabr.* 2013;8(3):102-11. <https://doi.org/10.1177/155892501300800313>.
 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. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2011.03.029>.
 25. Montazer M, Parvinzadeh M. Effect of ammonia on madder-dyed natural protein fiber. *J Appl Polym Sci.* 2004;93(6): 2704-10. <https://doi.org/10.1002/app.20880>
 26. Shakyawar DB, Sharma KK, Pareek PK, Raja ASM, Temani P, Kumar A, Sharma MC. Extraction of natural dye from *Kigelia pinnata* and its application on pashmina (cashmere) fabric. *Res J Text Apparel.* 2013;17(2):28-32. <https://doi.org/10.1108/RJTA-17-02-2013-B005>.
 27. Yi E, Cho JY. Color analysis of natural colorant-dyed fabrics. *Color Res. Appl.* 2008;33(2):148-57. <https://doi.org/10.1002/col.20390>.
 28. Ahmadi Z, gholami Houjaghan, F. A Review on Antibacterial, Antifungal and Microbial Properties of Natural Herbs and Their Application on the Textiles. *J Stud Color World.* 2019; 9(1): 41-58. 20.1001.1.22517278.1398.9.1.5.9.
 29. Adeel S, Rehman FU, Hameed A, Habib N, Kiran S, Zia KM, Zuber M. Sustainable extraction and dyeing of microwave-treated silk fabric using arjun bark colorant. *J Nat Fibers.* 2018;17(5):745-758. <https://doi.org/10.1080/15440478.2018.1534182>.
 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* 2017;31(14): 1655-1662. <https://doi.org/10.1080/14786419.2017.1285303>.
 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.* 2017;2(1). <https://doi.org/10.1186/s40689-016-0011-8>.
 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):840-853. <https://doi.org/10.1080/15440478.2017.1367705>.
 33. International Organization for Standardization. Textiles—Tests for colour fastness—Part C10: Colour fastness to washing with soap or soap and soda. Geneva: ISO; 2006. ISO standard 105-C10:2006.
 34. International Organization for Standardization. Textiles—Tests for colour fastness—Part B02: Colour fastness to artificial light: Xenon arc fading lamp test. Geneva: ISO; 2014. ISO standard 105-B02:2014.
 35. 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. <https://doi.org/10.1080/15440478.2018.1448317>.
 36. Hou X, Yang R, Xu H, Yang Y. Adsorption kinetic and thermodynamic studies of silk dyed with sodium copper chlorophyllin. *Indust Engin Chem Res.* 2012;51(25):8341-7. <https://doi.org/10.1021/ie300201j>.
 37. Shahmoradi Ghaheh F, Moghaddam MK, Tehrani M. Eco-Friendly dyeing of viscose rayon fabrics using anthocyanin from *hibiscus sabdariffa* linn. *J Nat Fibers* 2021;18(12): 13052-13062 <https://doi.org/10.1080/15440478.2022.2084659>
 38. Adeel S, Rehman FU, Shaikat SF, Kiran S, Iqbal F, Zia KM. Comparative study of microwave, UV and ultrasonic radiations assisted extraction of indigo natural dye from *Indigofera tinctoria*. *J Nat Fibers.* 2018;15(4):555-568. <https://doi.org/10.1080/15440478.2017.1348781>.
 39. Otálora MC, Barbosa HJ, Perilla JE, Osorio C, Nazareno MA. Encapsulated betalains (*Opuntia ficus-indica*) as natural colorants. Case study: Gummy candies. *LWT.* 2019;103:222-227. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.12.074>.
 40. Shahid M, Shahid-ul-Islam, Mohammad F. Recent advancements in natural dye applications: a review. *J Clean Prod.* 2013;53:310-331. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.03.031>.
 41. Rather LJ, Zhou Q, Ali A, Haque QMR, Li Q. Valorization of agro-industrial waste from peanuts for sustainable natural dye production: focus on adsorption mechanisms, ultraviolet protection, and antimicrobial properties of dyed wool fabric. *ACS Food Sci Technol.* 2021;1(3):427-442. <https://doi.org/10.1021/acsfoodscitech.1c00005>
 42. Haddar W, Ben Ticha M, Meksi N, Guesmi A. Application of anthocyanins as natural dye extracted from *Brassica oleracea* L. var. capitata f. rubra: dyeing studies of wool and silk fibres. *Nat Prod Res.* 2018;32(2):141-148. <https://doi.org/10.1080/14786419.2017.1342080>.
 43. Ben Ticha M, Meksi N, Attia HE, Haddar W, Guesmi A, Ben Jannet H, Mhenni MF. Ultrasonic extraction of *Parthenocissus quinquefolia* colorants: Extract identification by HPLC-MS analysis and cleaner application on the phytodyeing of natural fibres. *Dyes Pigm* 2017;141:103-111. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2017.02.002>.

How to cite this article:

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;19(1):1-23. <https://doi.org/10.30509/jcst.2025.167490.1254> [In Persian]