بهینه‌سازی فرآیند رنگرزی و ارزیابی ثبات رنگی الیاف پشمی رنگرزی شده با گیاه گل گندم طلایی

عالیه مهنیا[۱]، هما مالکی[۱*]، حسین بارانی[۱]، سمانه خالقی[۱]

[۱]دانشکده هنر، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

hmaleki@birjand.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۱۹

چکیده

استفاده از رنگزاهای طبیعی به‌عنوان روشی پایدار و دوستدار محیط‌زیست در صنعت نساجی به‌طور چشمگیری رشد یافته است. گل گندم طلایی در ایران به عنوان یک گیاه خودرو و بومی شناخته می‌شود. در این پژوهش، قابلیت استفاده از این گیاه برای رنگرزی طبیعی الیاف پشم مورد بررسی قرار گرفت و تأثیر شرایط مختلف رنگرزی بر ویژگی‌ها و ثبات رنگی آن ارزیابی شد. پس از انجام تحلیل‌های آماری، فرآیند رنگرزی بهینه‌سازی گردید. نتایج تحلیل واریانس تأثیر معناداری از متغیرهای مختلف رنگرزی شامل غلظت رنگزا، غلظت دندانه، دما، مدت زمان، و pH را بر قدرت رنگی نشان داد. بر این اساس، با استفاده از روش آماری سطح پاسخ، شرایط بهینه رنگرزی شامل دمای ۹۰°C، مدت زمان ۹۰ دقیقه، غلظت رنگزا ۱۵۰ درصد، غلظت دندانه ۵ درصد، و pH حمام ۸ تعیین شد. این شرایط بهبود چشم‌گیری در خلوص، و قدرت رنگ داشته و نتیجه نهایی آن، یک فام رنگی زرد بود. با استفاده از بخش های مختلف گیاه، و همچنین در حضور دندانه های فلزی مختلف، امکان کسب شیدهای رنگی متنوع فراهم شد. در ارزیابی ثبات رنگی، نمونه‌های رنگرزی شده با بخش برگ گیاه ثبات نوری و شستشویی بیشتری را نشان دادند. مطالعه ویژگی‌های مکانیکی نیز نشان داد که فرآیند رنگرزی تأثیر چندانی بر عملکرد مکانیکی نخ‌ها نداشته است.

کلمات کلیدی: رنگزای طبیعی، گل گندم طلایی، پشم، بهینه سازی، ثبات

Evaluation of dyeing process and colorfastness of wool fibers dyed with Centaurea behen L

Aliyeh Mahnia[1], Homa Maleki[1*], Hossein Barani[1], Samaneh Khaleghi[1]

[1]Faculty of Arts, University of Birjand, Birjand, Iran

hmaleki@birjand.ac.ir

Abstract

The use of natural dyes as a sustainable and environmentally friendly approach in the textile industry has significantly grown. In this study, the potential use of different parts of *Centaurea behen L.* as a natural dye for wool fiber dyeing was investigated, and the effect of various dyeing conditions on its color properties, lightfastness, and wash fastness was evaluated. Finally, after conducting statistical analyses, the wool dyeing process using the natural dye extracted from this plant was optimized. Analysis of variance (ANOVA) results demonstrated a significant effect of various dyeing variables, including dye concentration, mordant concentration, temperature, dyeing duration, and pH of the dye bath, on color strength. Consequently, using response surface methodology (RSM), optimal dyeing conditions were determined to be a temperature of 90°C, a dyeing duration of 90 minutes, a dye concentration of 150%, a mordant concentration of 5% (based on fiber weight), and a pH of 8 for the dye bath. These optimized conditions resulted in remarkable improvements in choroma, hue angle, and color strength, with the final outcome being a yellow color shade. By utilizing different parts of the plant, and in the presence of various metallic mordants, diverse color shades were achieved. In terms of color fastness evaluation, samples dyed with the leaf part of the plant exhibited higher lightfastness and wash fastness. Mechanical property analysis of the dyed yarns indicated that the dyeing process had little effect on the mechanical performance of the fibers.

Keywords: Natural dyes, *Centaurea behen L.*, Wool, Dyeing optimization, Fastness

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، استفاده از رنگزاهای طبیعی دوستدار محیط‌زیست و غیرسمی با قابلیت زیست تخریب پذیری در صنعت نساجی به یکی از موضوعات قابل‌توجه و با اهمیت تبدیل شده است. تاکنون استفاده از رنگزاهای طبیعی در صنعت نساجی بیشتر محدود به هنرمندان و تولیدکنندگان سنتی و افرادی بوده است که در تولید و صادرات منسوجات گران‌قیمت و دوستدار محیط‌زیست مشغول به کار هستند. این محدودیت پس از کشف رنگزاهای شیمیایی به وجود آمد. با این وجود، با افزایش آگاهی عمومی از تأثیرات منفی رنگ‌های شیمیایی بر محیط‌زیست و نیاز روزافزون به روش‌های پایدار، تقاضا برای استفاده از رنگزاهای طبیعی به صورت چشمگیری افزایش یافته است. این روند، با تمرکز بیشتر بر مدیریت محیط‌زیست و منابع طبیعی با رویکرد هوشمندانه‌تر و اتخاذ اقدامات محافظتی گسترده‌تر، به یک جریان جهانی برای دستیابی به اهداف توسعه پایدار منجر شده است [۱،۲]. رنگزاهای طبیعی که اغلب از مواد خام گیاهی به دست می‌آیند، امروزه به‌عنوان یک جایگزین پایدار و سازگار با محیط‌زیست برای رنگزاهای مصنوعی برشمرده می‌شوند. همچنین، این گذار صنعت نساجی به سوی استفاده از رنگزاهای طبیعی به توسعه صنایع محلی و اقتصادی نیز کمک می‌کند [۳،۴].

گل، ساقه، برگ، پوست و میوه بسیاری از گیاهان دارای ترکیبات رنگزای متنوعی می‌باشند و هنرمندان و صنعتگران ایرانی از دیرباز از آن برای رنگرزی منسوجات استفاده می‌کرده‌اند. با این حال، کشت گیاهان به منظور استخراج رنگ‌های طبیعی چالش‌هایی را به وجود می‌آورد که ممکن است منابع طبیعی خاک و آب را به خطر بیاندازد. همچنین، حفظ تنوع زیستی و حفاظت از گیاهان دارویی و گیاهان سنتی که منابع اصلی برای استخراج رنگ‌های طبیعی هستند، از اهمیت بالایی برخوردار است. این گیاهان علاوه بر ارزش‌های فرهنگی و تاریخی، از لحاظ بیولوژیکی و اقتصادی نیز حائز اهمیت هستند و حفظ آنها ضروری است. این چالش نیازمند بررسی منابع جایگزینی مانند گیاهان هرز، گیاهان خودرو، و پسماندها است [۲،۵]. این مقاله به این نیاز می‌پردازد و پتانسیل استفاده از گیاه گل گندم طلایی را به عنوان یک رنگزای طبیعی بررسی می‌کند.

رنگزای گیاه گل گندم طلایی در طبقه‌بندی رنگزاهای گیاهی بر اساس ساختار شیمیایی در گروه فلاونوئیدها قرار می‌گیرد (شکل ۲) و مهمترین ترکیبات فلاونوئیدی موجود در این گیاه شامل سکوتلارین[1]، آپیگنین[2] و کرکاتین[3] می‌باشد [۶]. از نظر شیمیایی، فلاونوئیدها ساختار کلی اسکلت ۱۵ کربنی دارند که از دو حلقه فنیل و یک حلقه هتروسیکل تشکیل شده است. فلاونوئیدها ترکیباتی محلول در آب هستند که بیشتر به‌صورت ترکیب با قندها در گیاهان آوندی وجود دارند.

[1] scutellarin
[2] apigenin
[3] quercetin

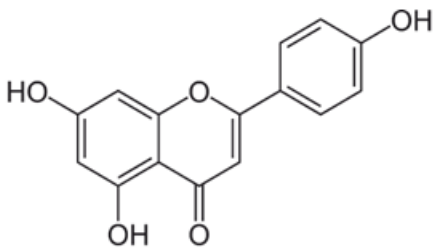
(الف)

(ب)

(ج)

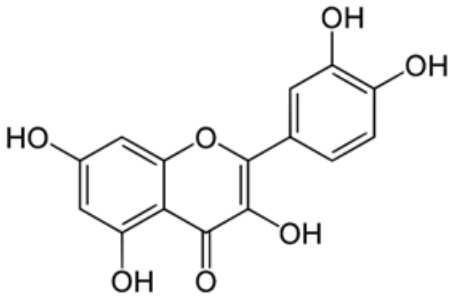
شکل (۱). گیاه گل گندم طلایی مورد استفاده در این پژوهش: (الف) گیاه رشد کرده در منطقه باقران بیرجند واقع در خراسان جنوبی، و همچنین بخش‌های مختلف گیاه شامل (ب) گل و (ج) برگ‌های خشک شده.

(الف)



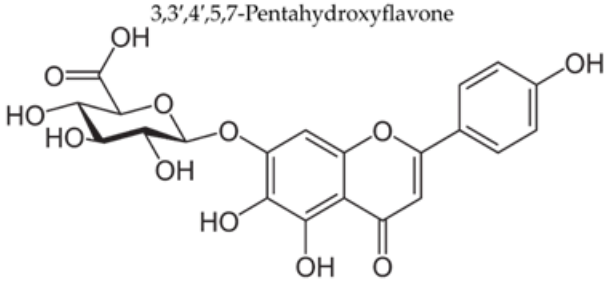
4′,5,7-Trihydroxyflavone

(ب)



3,3′,4′,5,7-Pentahydroxyflavone

(ج)



4′,5,6-Trihydroxy-4-oxoflav-2-en-7-yl β-D-glucopyranosiduronic acid

شکل (۲). ساختار شیمیایی ترکیبات رنگی موجود در گیاه گل گندم طلایی (الف) apigenin ، (ب) quercetin و (ج) scutellarin

بررسی پژوهش‌های پیشین نشان داده است که مطالعات انجام گرفته بر روی بخش‌های مختلف گیاه گل گندم طلایی بیشتر در زمینه‌های خواص دارویی و بیولوژیکی [۷،۹،۱۰]. کاربردهای پزشکی [۱۱،۱۴] و گیاه‌شناسی و ترکیبات شیمیایی [۱۰،۱۵،۱۶] آن متمرکز بوده است. با این حال تاکنون از این گیاه به عنوان یک منبع رنگزای طبیعی در فرآیند رنگرزی منسوجات استفاده نشده است. با توجه به این که گل گندم طلایی یک گیاه بومی در مناطق مختلف ایران است و به عنوان یک گیاه خودرو شناخته می‌شود [۱۷-۲۲، ۱۵، ۱۰]، می‌تواند به عنوان یک منبع ارزان و در دسترس برای رنگرزی طبیعی و پایدار مورد استفاده قرار گیرد. اما ارزیابی قدرت و ویژگی‌های رنگی این گیاه در رنگرزی منسوجات نیازمند پژوهش های دقیق‌تر است. بر این اساس، هدف اصلی این پژوهش، بررسی قابلیت استفاده از گیاه گندم طلایی به عنوان منبع رنگزای طبیعی در صنایع نساجی و فرش دستباف می‌باشد. این گیاه در این پژوهش به‌عنوان یک ماده رنگزای جدید در فرآیند رنگرزی الیاف پشم مورد مطالعه قرار گرفته و تأثیر شرایط مختلف رنگرزی بر ویژگی های رنگی و ثبات نوری و شستشویی آن ارزیابی شده است. در عین حال، تأثیر دندانه بر ویژگی‌های رنگی نیز بررسی گردیده است. همچنین، بخش‌های مختلف گیاه، شامل گل و برگ، از دیدگاه رنگرزی مطالعه شده است. در پایان، با انجام تحلیل‌های آماری، فرآیند رنگرزی کالای پشمی با استفاده از رنگزای طبیعی استخراج شده از گیاه گل گندم طلایی بهینه‌سازی شده است. برای این منظور از طراحی آزمایش به روش سطح پاسخ RSM[1] بهره گرفته شده است. روش سطح پاسخ مجموعه‌ای از تکنیک‌های ریاضی و آماری مفید برای مدل‌سازی و تحلیل مسائل است که در آن پاسخ مورد نظر تحت تأثیر چندین متغیر قرار می‌گیرد و هدف آن بهینه کردن آن پاسخ است. در حقیقت این روش یک ارتباط تجربی بین متغیرهای مستقل و یک یا چند متغیر پاسخ ارائه می‌دهد. طراحی مرکب مرکزی CCD[2]، متداول‌ترین روش طراحی رویه پاسخ می‌باشد. یک CCD دارای سه گروه از نقاط طراحی می‌باشد: نقاط طراحی جز به جز، نقاط محوری و نقاط مرکزی. روش CCD برای ارزیابی ضرایب مدل درجه دو طراحی شده است و یک روش مؤثر برای انطباق مدل درجه دو می‌باشد [۳،۴].

۲- مواد و روش ها

۲-۱- مواد

گل گندم طلایی مورد استفاده در این پژوهش از منطقه باقران در بیرجند، استان خراسان جنوبی، در فصل اردیبهشت ماه برداشت شد (شکل ۱). برگ و گل خشک شده این گیاه به عنوان منبع رنگزای طبیعی مورد استفاده قرار گرفت. نخ پشمی مرینوس ۴ لا با نمره ۳۳۰ تکس از شرکت مرینوس ایران تهیه شد. محلول های آمونیاک

[1] Response Surface Methodology
[2] Central Composite Design

(۲۵٪)، اسید استیک (۹۹٪)، و اسید سولفوریک (۹۸٪) برای تنظیم pH حمام رنگرزی، از شرکت ChemLab کشور بلژیک خریداری شد. دندانه‌های فلزی مختلف شامل سولفات آلومنیوم پتاسیم[1]، سولفات مضاعف آهن[2]، سولفات مس[3]، کلرید قلع[4] و دی کرومات سدیم از شرکت کیمیاگران جوان، ایران تأمین شد. همچنین، Triton X100 (Merck) به عنوان یک سطح فعال غیریونی به منظور شستشوی کلاف نخ پشمی مورد استفاده قرار گرفت.

۲-۲- روش ها

۲-۲-۱- طراحی آزمایشات به روش سطح پاسخ

انتخاب و تعیین شرایط بهینه فرایند رنگرزی با توجه به پارامترهای متعدد تاثیرگذار بر فرایند رنگرزی و ویژگی‌های رنگی ضروری به نظر می‌رسد. برای تعیین شرایط بهینه از نرم‌افزار آزمایشی Design Expert 11.1.2.0 (شرکت Stat-Ease، Inc. (آمریکا)) و نسخه‌های رنگرزی با استفاده از روش RSM تعیین شد. با انجام آزمایشات اولیه و مقدماتی، متغیرهای تأثیرگذار و محدوده‌های تجربی مؤثر آنها تعیین گردید. CCD برای بررسی اثر متغیرهای غلظت ماده رنگزا، غلظت دندانه، دما و مدت زمان رنگرزی، و pH حمام رنگرزی بر ویژگی های رنگی (قدرت رنگی، زاویه رنگ، و خلوص رنگ) اعمال گردید. با توجه به آزمایشات اولیه، ۵۰ نسخه رنگرزی با استفاده از روش CCD طراحی 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.

۲-۲-۲- فرآیند شستشو

برای آماده‌سازی نمونه‌های نخ پشم برای فرآیند رنگرزی، مرحله‌ی شستشو برای حذف هرگونه آلودگی، خاک، و چربی موجود در الیاف پشم انجام شد. استفاده از Triton X100، یک مواد شوینده غیریونی، به منظور حذف موثر این آلودگی‌ها کمک می‌کند. محلول آبی حاوی این مواد شوینده با حل کردن ۲ گرم در لیتر آب مقطر تهیه شد. دمای محلول بر روی $50^{\circ}c$ تنظیم شد و نمونه‌های نخ پشم برای مدت ۳۰ دقیقه در این محلول غوطه‌ور شدند. پس از مرحله‌ی شستشو، نمونه‌های پشم به‌طور کامل با آب مقطر آبکشی شد تا هرگونه مواد شوینده باقی‌مانده حذف شود و سپس در دمای اتاق خشک شدند.

۲-۲-۳- استخراج رنگ از گیاه گل گندم طلایی

در این پژوهش، گل و برگ گیاه گل گندم طلایی به عنوان منبع رنگزای طبیعی انتخاب شدند. پس از برداشت، ابتدا مواد گیاهی در سایه به خوبی خشک شده تا ساختار شیمیایی رنگزا حفظ شود. سپس، اجزای خشک شده در مقدار مناسبی از آب غوطه‌ور شده و به مدت یک ساعت

[1] $KAl(SO_4)_2$
[2] $FeSO_4$
[3] $CuSO_4$
[4] $SnCl_2$

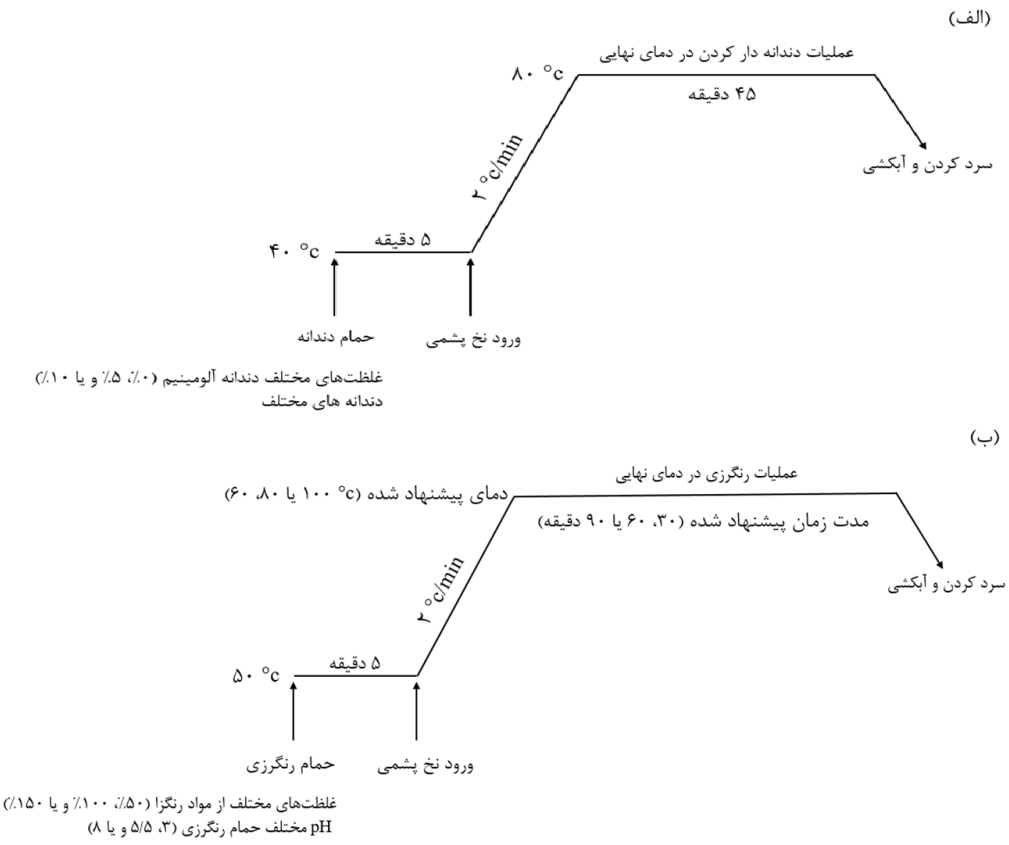
جوشانده شد تا رنگزای موجود در گیاه به نحو مطلوب استخراج شود. محلول حاصل پس از این عملیات از صافی عبور داده شد و غلظت آن به ۱۰ درصد وزنی تنظیم شد. این محلول رنگزا در فرآیند رنگرزی مورد استفاده قرار گرفت. طیف جذب UV-VIS حاصل از استخراج رنگ طبیعی گل گندم طلایی با استفاده از یک طیف سنج UV-Visible (شرکت UV-Bloorazma، ایران) در بازه ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر اندازه گیری شد.

۴-۲-۲- فرآیند دندانه دار کردن

با توجه به نتایج آزمایشات اولیه در این پژوهش از روش پیش دندانه برای فرایند دندانه‌دادن استفاده شد. ابتدا محلول با غلظت‌های مختلف سولفات پتاسیم آلومینیوم (۰ تا ۱۰ درصد وزنی) با نسبت حجم حمام به وزن کالا (L:G) ۴۰:۱ آماده شد و سپس روی هیتر 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 درجه سانتیگراد در دقیقه تا ۸۰°c افزایش یافت (شکل ۳). نمونه‌ها به مدت ۴۵ دقیقه در این دمای ثابت نگه‌داشته شد و سپس به آرامی سرد شد و در نهایت به منظور جداسازی دندانه‌های سطحی از روی سطح کلاف با آب مقطر آبکشی و در دمای اتاق خشک شد. به منظور کسب شیدهای رنگی متنوع، فرآیند دندانه‌دار کردن با روش مشابهی برای دی کرومات سدیم، سولفات آهن (II)، سولفات مس، و کلرید قلع با غلظت ۳٪ وزنی انجام شد.

۵-۲-۲- فرآیند رنگرزی

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



شکل (۳). نمودار فرآیند دندانه‌دار کردن (الف) و رنگرزی (ب) نخ پشمی با استفاده از رنگزای طبیعی گل گندم طلایی

۲-۲-۶- ارزیابی قدرت و ویژگی های رنگی

ویژگی‌های رنگی نخ‌های پشم رنگرزی شده با استفاده از دستگاه طیف سنج انعکاسی (X-Rite) در بازه ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر ارزیابی شدند. مؤلفه های رنگی CIE، شامل L^*، a^*، b^* تحت منبع نوری استاندارد D_{65} و مشاهده کننده استاندارد با زاویه ۱۰ درجه اندازه گیری شدند. مؤلفه L^* روشنایی را نشان می‌دهد، به طوری که مقدار ۱۰۰ متناظر با سفید و مقدار ۰ متناظر با سیاه است. همچنین، مؤلفه های 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) نمونه ها با استفاده از رابطه کیوبلکا مانک[1] (معادله ۱) به شرح زیر محاسبه شدند:

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

K/S یک تابع از عمق رنگ است و براساس ضریب جذب (K)، ضریب انتشار (S) و مقدار بازتاب (R) نمونه رنگرزی

[1] Kubelka-Munk

شده در طول موج بیشینه جذب محاسبه می‌گردد. این طول موج، بر اساس طیف جذب UV-Vis مشخص شد.

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

ارزیابی ویژگی‌های ثبات رنگ نمونه های رنگرزی 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 رنگرزی شده قبل و بعد از انجام آزمون ثبات رنگی مورد ارزیابی قرارگرفت و اختلاف رنگ اندازه‌گیری شد تا مقایسه بهتری انجام شود. پنج نمونه نخ رنگرزی شده در شرایط بهینه از قسمت‌های گل و برگ گیاه به‌طور مجزا و در حضور دندانه‌های مختلف برای این آزمون استفاده شد.

۲-۲-۸- ویژگی‌های مکانیکی

خصوصیات مکانیکی نمونه‌های نخ پشم رنگرزی 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، آزمونه با طول ۲۵۰ میلیمتر با سرعت ثابت ۲۵۰ میلیمتر در دقیقه تا حد پارگی تحت کشش قرار گرفت. پارامترهای حداکثر تنش[1]، و مدول یانگ[2] 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.

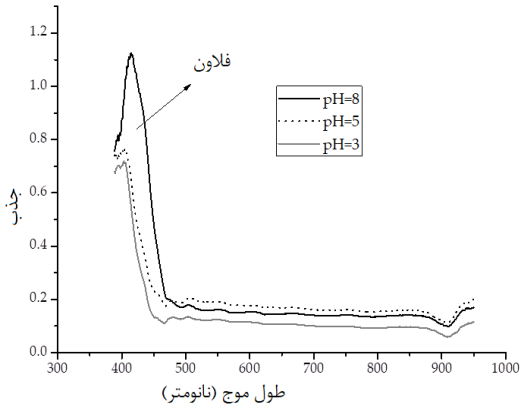
۳- نتایج و بحث

۳-۱- طیف سنجی جذبی

طیف جذبی گیاهان و مواد طبیعی، به خصوص فلاونوئیدها، 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. ترکیبات استخراج شده از گل گندم طلایی دارای pH~5.3 و بیشینه جذبی در محدوده ۴۰۰ نانومتر بود. این بیشینه جذبی (شکل ۴) معمولاً به ساختارهای فلاونوئیدی مربوط است [۱۶]. فلاونوئیدها یک گروه گسترده از ترکیبات فعال در گیاهان هستند که می‌توانند خصوصیات رنگی داشته باشند و در طیف جذب نور قرار گیرند. این ترکیبات معمولاً به عنوان رنگزاها یا پیگمنت‌ها در گیاهان شناخته می‌شوند. همانطور که در شکل (۴) مشاهده می

[1] Max. Stress
[2] Young's modulus

گردد، در تمامی pH ها، یک بیشینه جذب بزرگ در محدوده طول موج ۴۰۰ نانومتر ظاهر شده است. با تغییرات pH، شدت این پیک تغییر کرده، به طوری که بیشترین شدت پیک مربوط به محدوده قلیایی (pH ~ 8) بوده است. این نتایج نشان می‌دهند که ماده رنگزای استخراج شده از گل گندم طلایی در محیط‌های قلیایی از قابلیت جذب نور بیشتری برخوردار است. افزایش شدت پیک جذب در محدوده‌های قلیایی می‌تواند دلایل مختلفی داشته باشد. در محیط‌های قلیایی، مولکول‌های فلاونوئیدی ممکن است به شکل‌های متفاوتی بازدهی کنند که در آنها انتقال الکترون‌ها و حالت‌های تحریکی متفاوتی رخ می‌دهد. این تغییرات در ساختار مولکولی می‌تواند باعث افزایش شدت جذب شود. همچنین، در محیط‌های قلیایی، احتمال دارد کمپلکس‌های جدیدی بین یون‌های هیدروژنی موجود در pH بالا و گروه‌های عامل فلاونوئیدی تشکیل شود. این کمپلکس‌ها ممکن است باعث افزایش شدت جذب نور شوند. دلیل سوم این است که محیط‌های قلیایی می‌توانند این امکان را فراهم کنند که مولکول‌های فلاونوئیدی به راحتی الکترون‌ها را از دیگر مولکول‌ها به خود جذب کنند یا از دیگر مولکول‌ها به آنها الکترون‌ها منتقل کنند. این تغییرات می‌توانند باعث افزایش شدت جذب نور شوند. در نتیجه، تغییرات pH می‌تواند به تغییرات قابل توجهی در شدت و الگوی طیف جذبی فلاونوئیدها منجر شود [۲۳].



شکل (۴). طیف های جذبی محلول استخراج آبی گیاه گل گندم طلایی در pH های مختلف

۳-۲- تعیین محدوده متغیرها

در طول آزمایشات مقدماتی، هدف اصلی تعیین فام و قدرت رنگی ماده رنگزای گل گندم طلایی و بررسی نیاز به دندانه‌دار کردن آن بود. برای این منظور، دو نمونه نخ پشمی شسته شده با استفاده از بخش گل گیاه و در غلظت ۱۰۰ درصد وزنی به همراه دندانه آلومینیوم و یا بدون دندانه بر اساس فرآیند ارائه شده در شکل (۳) به روش پیش دندانه رنگرزی شدند. تصاویر نمونه‌های رنگرزی‌شده در شکل (۵) ارائه شده است. آزمایشات اولیه نشان دادند که گیاه گل گندم طلایی به‌عنوان منبعی از ماده رنگزا، قابلیت مطلوب برای کسب شید رنگی زرد دارد. بر اساس مشاهده‌ها، میزان جذب رنگ در نمونه‌های رنگرزی‌شده بدون دندانه نسبت به نمونه‌های دندانه‌دار بسیار کمتر بود، که نشان می‌دهد گیاه گندم طلایی جزو رنگزاهای طبیعی است که نیاز به دندانه‌دار کردن برای بهبود جذب رنگ دارد.

(الف)

(ب)

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

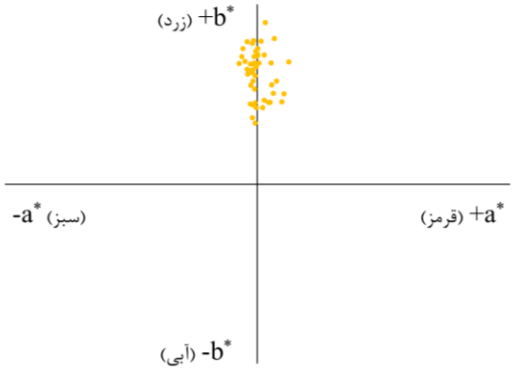
علاوه بر این، در آزمایشات مقدماتی، عوامل تأثیرگذار فرایند رنگرزی مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت محدوده موثر این متغیرها تعیین گردید. این اطلاعات می‌تواند به دستیابی به هدف مهم این پژوهش در بهینه سازی فرآیند رنگرزی و ارائه یک نسخه رنگرزی بهینه کمک کند. بر اساس نتایج این بخش، پنج متغیر شامل غلظت ماده رنگزا، غلظت دندانه، دمای رنگرزی، مدت زمان رنگرزی، و pH حمام رنگرزی در نظر گرفته شد و محدوده مؤثر این متغیرها بر اساس اطلاعات ارائه شده در جدول (۱) تعیین گردید.

جدول (۱). محدوده متغیرهای رنگرزی نخ پشمی با گیاه گل گندم طلایی

متغیرها	محدوده تغییرات	
	کمینه	بیشینه
غلظت ماده رنگزا (درصد)	50	150
غلظت دندانه زاج سفید (درصد وزنی)	0	10
دمای رنگرزی ($^{\circ}C$)	60	100
مدت‌زمان رنگرزی (دقیقه)	30	90
pH حمام رنگرزی	3	8

۳-۳- ویژگی‌های رنگی نخ‌های پشمی رنگرزی شده

ویژگی‌های رنگی نخ‌های پشم رنگرزی شده با استفاده از دستگاه طیف سنج انعکاسی در بازه ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر ارزیابی شدند. شکل (۶) موقعیت فضای رنگی نمونه‌های رنگرزی شده با گل گندم طلایی را در سیستم فضا رنگ Lab را نشان می‌دهد. مؤلفه‌های a^* و b^* با محورهای قرمز-سبز و زرد-آبی متناظرند. همانطور که در شکل (۶) نشان داده شده است، نمونه‌های رنگرزی‌شده دارای فام زرد، زرد ته قرمز و زرد متمایل به سبز هستند. همچنین میزان خلوص نمونه‌های رنگرزی شده وابسته به شرایط رنگرزی نمونه‌ها می‌باشد.



شکل (۶). نمودار موقعیت فضای رنگی نمونه‌های رنگرزی شده با گل گندم طلایی در سیستم فضارنگ Lab

۳-۴- تأثیر پارامترهای رنگرزی بر ویژگی‌های رنگی

ویژگی‌های رنگی نمونه‌های رنگرزی‌شده با استفاده از عصاره بخش گل گیاه گل گندم طلایی، بر اساس متغیرهای مختلف رنگرزی به صورت آماری مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۷) تأثیر متغیرهای مختلف فرآیند رنگرزی بر ویژگی‌های رنگی شامل زاویه رنگ، قدرت رنگ، و خلوص رنگ را نشان می‌دهد. نتایج تحلیل واریانس (ANOVA) نشان داد که قدرت رنگی به خوبی توسط مدل تعامل دوعاملی (2FI) توصیف می‌شود. مقدار معناداری ($p<$ 0.0001) بسیار کمتر از ۰/۰۵ بوده و مقادیر رگرسیون R^2 نزدیک به یک بود (جدول ۲). همچنین، با توجه به نتایج تحلیل واریانس گزارش داده شده در جدول (۳)، متغیرهای رنگرزی تأثیر معناداری بر قدرت رنگی داشتند (۰/۰۰۰۱> p).

جدول (۲). نتایج تحلیل واریانس حاصل از برازش مدل‌های مختلف بر قدرت رنگی

مدل برازش شده	Sequential p-value	Lack of Fit p-value	Adjusted R^2	Predicted R^2	توضیحات
خطی	0.0005	0.0047	0.7479	0.6904	
2FI	< 0.0001	0. 2560	0.8995	0.8667	پیشنهادشده
درجه‌دو	0.5406	0.0223	0.8558	0.6937	
مکعبی	0.0059	0.2111	0.9046	0.7689	Aliasid

جدول (۳). نتایج تحلیل واریانس حاصل از برازش داده‌های متغیرهای پژوهش و مدل 2FI بر قدرت رنگی نخ پشمی رنگرزی‌شده

متغیر	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	توضیحات
مدل برازش شده	152.90	15	10.19	20.98	< 0.0001	معنادار
دمای رنگرزی	35.68	1	35.68	73.44	< 0.0001	معنادار
غلظت دندانه،	49.18	1	49.18	101.21	< 0.0001	معنادار
مدت‌زمان رنگرزی	12.01	1	12.01	24.72	< 0.0001	معنادار
pH	19.70	1	19.70	40.55	< 0.0001	معنادار
غلظت ماده رنگزا	14.50	1	14.50	29.84	< 0.0001	معنادار
Residual	16.52	34	0.4859			
Lack of Fit	15.59	27	0.5774	4.35	0.2560	عدم برازش
Pure Error	0.9300	7	0.1329			

همانطور که در شکل (۷) مشخص است، با افزایش غلظت ماده رنگزا، غلظت دندانه، دما، مدت زمان رنگرزی، و pH حمام رنگرزی، قدرت رنگی افزایش یافته است. افزایش دما و مدت زمان رنگرزی به دلیل واکنش‌پذیری بیشتر ماده رنگزا و ماده پذیرنده می‌تواند به افزایش قدرت رنگی منجر شود. با افزایش دما، سرعت واکنش‌های شیمیایی بین ماده رنگزا و الیاف افزایش می‌یابد که باعث افزایش غلظت رنگ در الیاف و در نتیجه افزایش قدرت رنگی می‌شود [۲۴،۲۵]. همچنین، با افزایش مدت زمان رنگرزی، زمان بیشتری برای ورود و جذب ماده رنگزا در الیاف فراهم می‌شود. افزایش غلظت رنگزا و دندانه نیز به دلیل افزایش میزان این مواد موجود در حمام، در نهایت باعث افزایش قدرت رنگی می‌شود. اگرچه در برخی از پژوهش‌های پیشین [۶] گزارش شده است که تانن یکی از ترکیبات موجود در این گیاه می‌باشد، اما به نظر می‌رسد که مقدار تانن موجود در گیاه برای جذب حداکثری مقدار رنگزا کافی نمی‌باشد و به همین دلیل افزایش غلظت دندانه (تا ۱۰ درصد وزنی)، محل‌های بیشتری را برای اتصال رنگزا به لیف ایجاد نموده است. استفاده از این عصاره استخراج شده از گل گندم طلایی برای رنگرزی کلاف نخ پشمی در شرایط قلیایی می‌تواند به دلایل مشابهی که قبلاً برای افزایش شدت پیک جذب در محدوده‌های قلیایی بیان شده است، منجر به افزایش قدرت رنگی شود [۲۳].

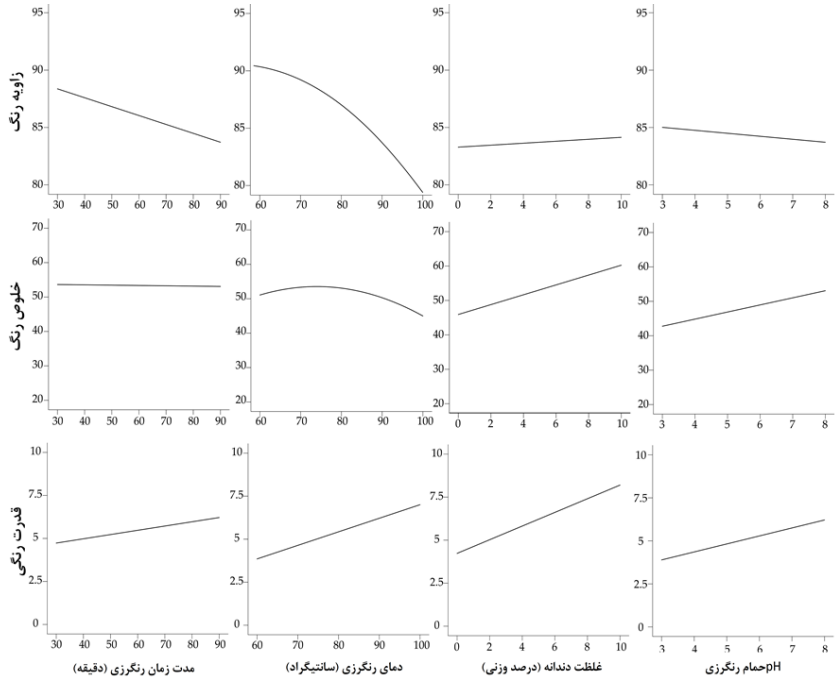
نتایج تحلیل واریانس نشان داد که غلظت رنگزا، غلظت دندانه، و pH حمام رنگرزی تأثیر معناداری بر خلوص رنگ دارند ($p < ۰/۰۰۰۱$)، در حالی که تأثیر متغیرهای دما و مدت زمان از نظر آماری معنادار نبوده است. البته دما و مدت زمان تأثیر قابل توجهی بر تغییرات فام رنگی کلاف نخ رنگرزی شده داشته‌اند. تغییرات در فام رنگی ممکن است به عنوان نتیجه‌ای از تخریب ساختارهای فلاونوئیدی در فرآیند حرارتی رخ دهد. مطالعه‌های پیشین [۲۶-۲۸] نشان داده است که برخی از ترکیبات فلاونوئیدی، مانند کوئرستین، در شرایط حرارتی و با اکسیژن ممکن است تحت تأثیر قرار گرفته و تخریب شوند. بوشنر و همکاران [۲۶] در مطالعه‌ای که در سال ۲۰۰۶ انجام دادند، پیشنهاد کردند که کوئرستین در یک فرآیند حرارتی در دمای $۱۰۰^{\circ}c$ تحت شرایط اکسیژن تخریب می‌شود. بنابراین، اگر ساختارهای فلاونوئیدی موجود در گیاهان، از جمله کوئرستین، در فرآیند رنگرزی تحت شرایط حرارتی و با حضور اکسیژن تخریب شوند، می‌تواند به تغییرات در رنگ و زاویه رنگ محصول نهایی منجر شود. این نوع تغییرات ممکن است به دلیل تشکیل ترکیبات جدید، تغییرات ساختاری در مولکول‌ها، یا تجزیه مولکولی باشد که همگی می‌توانند به تغییر در فام رنگی منجر شود.

۳-۵- بهینه سازی فرآیند رنگرزی

بهینه‌سازی فرآیند رنگرزی پشم با استفاده از برگ‌های گیاه گل گندم طلایی 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 مؤثر 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.

نتیجه نهایی آن یک فام رنگی زرد بود. با توجه به محدوده مؤثر مورد بررسی (جدول ۱)، شرایط بهینه رنگرزی شامل دمای رنگرزی ۹۰°c، مدت زمان رنگرزی ۹۰ دقیقه، غلظت رنگزا ۱۵۰ درصد، غلظت دندانه ۵ درصد وزنی، و pH حمام ۸، تعیین و پیشنهاد شد.



شکل (۷). تأثیر شرایط مختلف رنگرزی بر قدرت رنگی، خلوص رنگ، و زاویه رنگ کلاف نخ پشمی رنگرزی شده با از عصاره بخش گل گیاه گل گندم طلایی

۳-۶- کسب شید رنگی متنوع در شرایط بهینه

جهت بررسی کسب فام‌های رنگی متنوع، نمونه‌های نخ پشمی با اجزای مختلف برگ و گل گیاه، و در حضور دندانه‌های فلزی مختلف سولفات پتاسیم آلومینیم (Al)، دی کرومات سدیم (Cr)، سولفات مس (Cu)، سولفات آهن (Fe)، و کلرید قلع (Sn) به روش پیش دندانه رنگرزی شد. اگرچه برخی از دندانه‌های مورد استفاده مانند دی کرومات سدیم و کلرید قلع ممکن است دارای خطرات برای محیط زیست

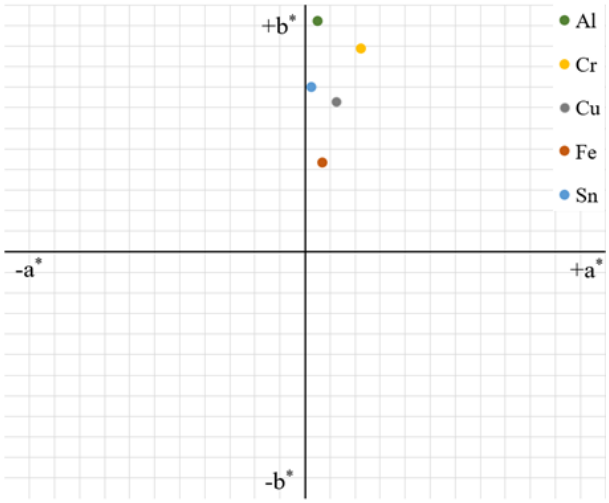
باشند، اما به دلیل دستیابی به هدف این پژوهش در ایجاد تنوع رنگی، این موضوع در مقاله مورد مطالعه قرار گرفته است. شکل (۸) تصاویر مربوط به بخش خشک شده گیاه، نمونه‌های نخ پشمی رنگرزی شده، و نمودار فضای رنگی را به ترتیب برای گل و برگ گیاه به عنوان ماده رنگزا نشان می‌دهد. ویژگی‌های رنگی به وسیله پارامترهای a^* و b^* اندازه‌گیری شدند. پارامتر a^* به اندازه رنگ قرمز یا سبز بودن نمونه رنگرزی‌شده اشاره دارد، در حالی که پارامتر b^* به اندازه رنگ زرد یا آبی بودن نمونه رنگرزی‌شده اشاره دارد. همان طور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود، نمونه‌های رنگرزی‌شده با بخش گل گیاه در حضور دندانه مس و کروم مقادیر بیشتری از پارامتر a^* را نشان می‌دهند که به معنای وجود فام قرمز بیشتر در این نمونه‌ها است. هرچند نمونه رنگرزی شده با دندانه آهن نیز دارای زاویه رنگی در حدود دندانه مس و کروم می‌باشد ولی با توجه به ماهیت این دندانه و تأثیر آن بر فام رنگی [۳]، سبب ایجاد یک فام قهوه‌ای و با خلوص کمتر شده است. نمونه‌های رنگرزی‌شده با کلرید قلع و زاج سفید مقادیر بیشتری از پارامتر b^* را دارند که به معنای وجود رنگ زرد یا آبی بیشتر در این نمونه‌ها است. این نتایج نشان می‌دهند که نوع دندانه مورد استفاده در رنگرزی می‌تواند تأثیر معناداری بر ویژگی‌های رنگی نهایی داشته باشد. در خصوص نمونه‌های رنگرزی شده با عصاره آبی بخش برگ، مشاهده می‌شود که تمامی نمونه‌های دارای فام قرمزتری نسبت به نمونه‌های رنگرزی شده با گل گیاه می‌باشند و این می‌تواند ناشی از تفاوت ترکیبات موجود در برگ و گل گیاه ناشی شده باشد. همچنین مشابه قبل دندانه آهن دارای کمترین خلوص می‌باشد (شکل ۸).

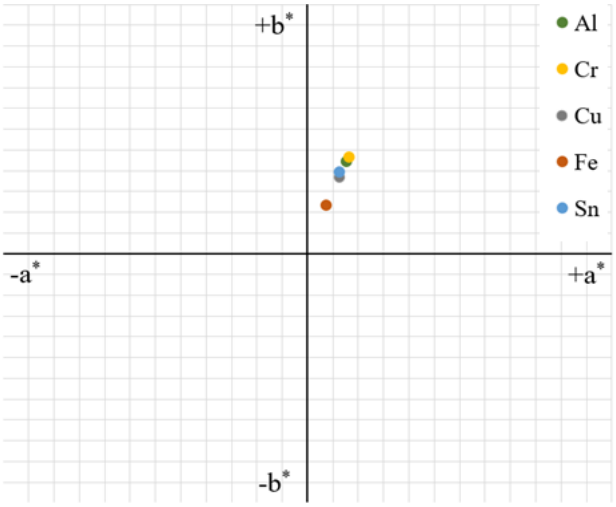
۷-۳- ثبات رنگی کلاف‌های رنگرزی شده

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.

براساس اطلاعات گزارش داده شده در جدول (۴)، می‌توان مقایسه‌ای بین ثبات نوری و شستشویی کلاف های نخ پشمی رنگرزی شده با برگ و گل گیاه ارائه نمود. در مورد ثبات نوری، مقادیر ΔE برای نمونه‌های رنگرزی شده با برگ و گل بین ۰/۴ تا ۳/۴۹ بوده است. بیشترین ثبات نوری در نمونه‌هایی مشاهده شده که با استفاده از برگ گیاه رنگرزی شده‌اند (ΔE =۰/۴). نمونه‌های رنگرزی شده با برگ از ثبات نوری بهتری برخوردار بوده‌اند. این امر می‌تواند به دلیل وجود ترکیبات آنتی‌اکسیدانی [۹،۱۲،۱۳] در برگ‌های گیاه گل گندم طلایی باشد که از اثرات ضد اکسیداسیون بر روی

رنگ‌های موجود در نخ‌ها می‌توانند استفاده کنند و ثبات نوری را افزایش دهند.





(ج) (ب) (الف)

شکل (۸). (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

در مقابل، در مورد ثبات شستشویی، مقادیر ΔE برای نمونه‌های رنگرزی شده با برگ و گل گندم طلایی بین ۳/۵۹ تا ۶/۲۱ متغیر بوده است. بیشترین ثبات شستشویی نیز در نمونه‌هایی مشاهده شد که با استفاده از برگ گیاه رنگرزی شده‌اند (ΔE =۳/۵۹). این نتایج نشان می‌دهد که استفاده از برگ گیاه برای رنگرزی کلاف های پشمی می‌تواند به ثبات نوری و شستشویی بیشتری منجر شود.

تأثیر نوع دندانه نیز می‌تواند بر ثبات نوری و شستشویی نمونه‌های رنگرزی شده تأثیرگذار باشد. با توجه به اطلاعات ارائه شده در جدول (۴)، مشاهده می‌شود که مقادیر ΔE برای نمونه‌های رنگرزی شده با مس، کروم، کلرید قلع، آهن و زاج سفید در هر دو مورد ثبات نوری و شستشویی متفاوت هستند. بنابراین، نوع دندانه انتخاب شده برای رنگرزی ممکن است به طور مستقیم بر ثبات نوری و شستشویی نمونه‌های رنگرزی شده با برگ و گل گیاه تأثیرگذار باشد. بر اساس نتایج به دست آمده دندانه آهن دارای بهترین ثبات شستشویی در بخش برگ و گل می‌باشد. همچنین دندانه کروم در فرایند رنگرزی با برگ و دندانه مس در رنگرزی با گل دارای بهترین ثبات‌های نوری می‌باشد.

جدول (۴). نتایج حاصل ارزیابی ثبات شستشویی کلاف نخ پشمی رنگرزی شده با عصاره آبی گیاه گل گندم طلایی

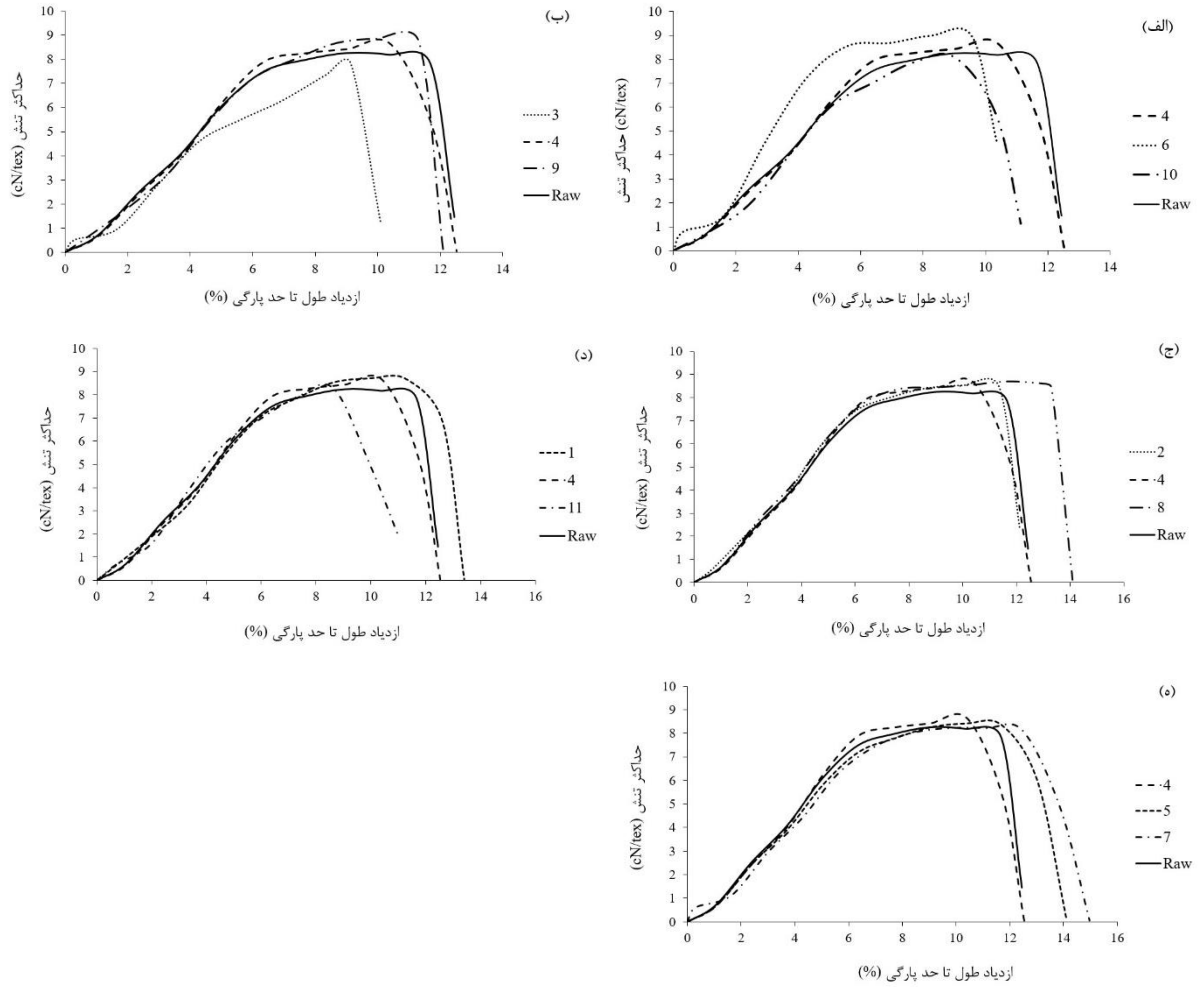
نمونه		ثبات شستشویی		لکه گذاری (ΔE)		ثبات نوری	
بخش گیاه	نوع دندانه	ΔE	مقیاس خاکستری	پشم	پنبه	ΔE	مقیاس آبی
برگ	Al	1.97	4-5	1.24	4.61	1.74	8
	Cr	1.96	4-5	0.74	4.85	0.40	8
	Cu	2.74	4	0.92	5.06	1.76	8
	Fe	0.43	4-5	1.14	4.20	2.68	7-8
	Sn	1.25	4-5	1.08	4.22	2.13	7-8
گل	Al	6.98	4	6.21	3.89	3.22	7
	Cr	1.11	5	1.76	5.04	1.03	8
	Cu	2.98	4-5	1.14	3.59	0.74	8
	Fe	0.84	4	4.18	4.13	1.80	8
	Sn	3.84	4	4.02	4.24	3.49	7

۸-۳- ویژگی های 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 رنگزا، 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 با گیاه گل گندم طلایی در شرایط مختلف رنگرزی، تغییرات کمی از خود نشان دادند. مقادیر حداکثر تنش در بازه تقریبی ۷/۸۴ تا ۸/۹۷ cN/tex متغیر بود. به طور مشابه، مدول یانگ با مقادیری در محدوده ۴۱ تا ۶۰ cN/tex متغیر بود، و مقادیر ازدیاد طول تا حد پارگی در محدوده ۱۰٪ تا ۱۵٪ قرار داشتند (جدول ۵). این نتایج نشان می‌دهد که فرآیند رنگرزی بر عملکرد مکانیکی نخ‌های پشمی تأثیر قابل توجهی نداشته است. منحنی‌های تنش- ازدیاد طول حاصل از آزمون کششی نمونه نخ ها در شکل (۹) نیز نتایج را تأیید کرده و رفتار مشابهی را در میان نمونه‌های نخ‌های رنگرزی شده نشان دادند.

جدول (۵). ویژگی‌های مکانیکی نخ‌های پشمی رنگرزی‌شده با گیاه گل گندم طلایی در شرایط مختلف رنگرزی

کد	نمونه					نمره نخ (tex)	حداکثر تنش (cN/tex)	مدول یانگ (cN/tex)	ازدیاد طول تا حد پارگی (٪)
	غلظت رنگزا (٪)	غلظت دندانه (٪)	دمای رنگرزی (°c)	مدت‌زمان رنگرزی (دقیقه)	pH حمام رنگرزی				
Raw	-	-	-	-	-	330	8.49 ± 0.50	56.88 ± 4.49	12.73 ± 1.40
1	100	5	80	30	5.5	309	8.65 ± 0.49	55.16 ± 5.07	12.62 ± 1.26
2	100	5	60	60	5.5	317	8.55 ± 0.30	41.03 ± 8.67	12.16 ± 0.24
3	100	0	80	60	5.5	281	7.84 ± 1.00	58.57 ± 6.79	10.09 ± 2.44
4	100	5	80	60	5.5	326	8.60 ± 0.54	42.72 ± 5.62	12.35 ± 2.32
5	100	5	80	60	8.0	295	8.52 ± 0.58	52.65 ± 6.87	14.14 ± 3.20
6	150	5	80	60	5.5	299	8.97 ± 0.21	76.23 ± 13.03	11.00 ± 1.18
7	100	5	80	60	3.0	287	8.14 ± 0.85	59.15 ± 3.69	12.16 ± 2.17
8	100	5	100	60	5.5	312	8.68 ± 0.36	53.85 ± 1.33	14.09 ± 1.01
9	100	10	80	60	5.5	301	8.85 ± 0.36	55.02 ± 7.74	12.93 ± 2.69
10	50	5	80	60	5.5	303	8.06 ± 0.94	54.35 ± 10.52	10.51 ± 1.35
11	100	5	80	90	5.5	309	8.48 ± 0.64	46.43 ± 1.54	11.48 ± 1.60



شکل (۹). منحنی‌های تنش-ازدیاد طول نخ‌های پشمی رنگرزی شده با گیاه گل گندم طلایی، نشان دهنده تأثیر (الف) غلظت ماده رنگزا، (ب) غلظت دندانه، (ج) دمای رنگرزی، (د) مدت‌زمان رنگرزی، و (ه) pH حمام رنگرزی.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، استفاده از گیاه گل گندم طلایی به عنوان یک منبع رنگزای طبیعی برای رنگرزی الیاف پشم مورد بررسی قرار گرفت. با انجام آزمایشات مقدماتی، عوامل غلظت ماده رنگزا، غلظت دندانه، دمای رنگرزی، مدت زمان رنگرزی، و pH حمام رنگرزی به عنوان متغیرهای تأثیرگذار انتخاب شد و محدوده‌های تجربی مؤثر آنها در بازه‌های ۵۰-۱۰۰ درصد وزنی، ۰-۱۰ درصد، ۶۰-۱۰۰ در جه سانتیگراد، ۹۰-۳۰ دقیقه، و ۳-۸ به ترتیب، تعیین گردید. با توجه به پارامترهای متعدد تأثیرگذار بر فرایند رنگرزی، از رویکرد طراحی آزمایش برای طراحی نسخه‌های رنگرزی، تجزیه و تحلیل‌های آماری، و در نهایت بهینه سازی فرآیند رنگرزی استفاده شد. در طی آزمایشات مقدماتی همچنین مشخص شد که گیاه گل گندم طلایی توانایی ایجاد شید رنگی زرد دارد. بر اساس مشاهده‌ها، این گیاه جزو رنگزاهای طبیعی دسته‌بندی شد که نیاز به دندانه برای بهبود جذب رنگ دارد. بنابراین، روش پیش دندانه برای فرآیند دندانه‌دادن و رنگرزی به کار برده شد. نسخه‌های رنگرزی طبیعی الیاف پشم در شرایط مختلف رنگرزی از جمله غلظت‌های مختلف از مواد رنگزا (٪۵۰، ٪۱۰۰ و ٪۱۵۰)، غلظت‌های مختلف دندانه سولفات پتاسیم آلومینیوم (٪۰ ، ٪۵، ٪۱۰ نسبت به وزن الیاف)، دمای رنگرزی (۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درجه سانتیگراد)، مدت زمان رنگرزی (۳۰، ۶۰ و ۹۰ دقیقه) و pH حمام رنگرزی (۳، ۵/۵ و ۸) با استفاده از روش RSM طراحی شد. با بهره‌گیری از طیف سنجی جذبی، ترکیبات استخراج شده از گل گندم طلایی دارای pH~۵/۳ و بیشینه جذبی در محدوده ۴۰۰ نانومتر، مربوط به ساختارهای فلاونوئیدی بود. با تغییرات pH، شدت این بیشینه جذب تغییر کرد، به طوری که بیشترین شدت مربوط به محدوده قلیایی (pH 8) بود. بنابراین می توان گفت که ماده رنگزای استخراج شده از گل گندم طلایی در محیط‌های قلیایی از قابلیت جذب نور بیشتری برخوردار است. بر اساس ارزیابی ویژگی‌های رنگی با استفاده از دستگاه طیف سنج انعکاسی در بازه ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر، نمونه‌های نخ پشمی رنگرزی‌شده دارای فام زرد، زرد ته قرمز و زرد متمایل به سبز بودند. در ادامه، این ویژگی‌های رنگی به صورت آماری مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحلیل واریانس نشان داد که با افزایش غلظت ماده رنگزا، غلظت دندانه، دما، مدت زمان رنگرزی، و pH حمام رنگرزی، قدرت رنگی به صورت معناداری افزایش یافت. غلظت رنگزا، غلظت دندانه، و pH حمام رنگرزی تأثیر معناداری بر خلوص رنگ داشتند ($p <$ ۰/۰۰۰۱)، در حالی که تأثیر متغیرهای دما و مدت زمان بر خلوص از نظر آماری معنادار نبود. پس از مطالعه اثر متغیرهای رنگرزی، فرآیند رنگرزی با استفاده از روش RSM بهینه سازی شد، و شرایط بهینه رنگرزی شامل دمای ۹۰°c، مدت زمان ۹۰ دقیقه، غلظت رنگزا ۱۵۰ درصد، غلظت دندانه ۵ درصد وزنی، و pH حمام ۸، جهت کسب بیشترین میزان خلوص، و قدرت رنگ تعیین گردید. با کاربرد اجزای

مختلف برگ و گل گیاه، و همچنین دندانه‌های فلزی مختلف سولفات پتاسیم آلومینیم، دی کرومات سدیم، سولفات مس، سولفات آهن، و کلرید قلع، فام‌های رنگی متنوع با ثبات رنگی مطلوب ایجاد شد. به دلیل وجود ترکیبات آنتی‌اکسیدانی، بیشترین ثبات نوری در نمونه‌هایی مشاهده شده که با استفاده از برگ گیاه رنگرزی شده‌اند (ΔE=۰/۴). بیشترین ثبات شستشویی نیز مربوط به نمونه‌هایی بود که با استفاده از برگ گیاه رنگرزی شده‌اند (ΔE=۳/۵۹). نوع دندانه انتخاب شده برای رنگرزی نیز بر ثبات نوری و شستشویی تأثیرگذار بود. بر اساس نتایج به دست آمده، دندانه آهن دارای بهترین ثبات شستشویی، و دندانه کروم در فرآیند رنگرزی با برگ، و دندانه مس در رنگرزی با گل، دارای بهترین ثبات‌های نوری بودند. ارزیابی تغییرات ویژگی‌های مکانیکی نخ شامل حداکثر تنش (cN/tex)، مدول یانگ (cN/tex)، و ازدیاد طول تا حد پارگی (٪) نمونه‌های نخ‌های رنگرزی شده در شرایط مختلف نشان داد که فرآیند رنگرزی بر عملکرد مکانیکی نخ‌های پشمی تأثیر قابل توجهی نداشته است. بنابر نتایج حاصل از این پژوهش، استفاده از گیاه بومی گل گندم طلایی به‌عنوان یک منبع طبیعی رنگزا می‌تواند یک راه حل پایدار و مؤثر برای صنایع نساجی باشد.

۵-منابع

[1] S. Rafiei, Comparison of colorimetric parameters and antibacterial effect of two dyes, henna and jaft, on silk, Journal of Textile Science and Technology. 13 (2024). 21863–21871.

[2] M. Tehrani, T. Navayee, Investigating the effect of acid and metal mordant types on the colorimetric and fastness properties of woolen yarn dyed with cinnamon bark as a natural dye, Journal of Textile Science and Technology. 13 (2024).

[3] L.K. Mirki, H. Barani, S. Khaleghi, Enhancing sustainability and hygiene in dyeing of wool yarn with Daphne mucronata, Sustain. Chem. Pharm. 37 (2024) 101382. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101382.

[4] A. Haji, N. Arefi, Application of response surface methodology in optimization of dyeing of wool with citrus aurantium leaves as natural dye, Journal of Textile Science and Technology. 8 (2019) 5–13.

[5] S. Adeel, N. Amin, Fazal-ur-Rehman, T. Ahmad, F. Batool, A. Hassan, Sustainable Isolation of Natural Dyes from Plant Wastes for Textiles, in: Recycl. from Waste Fash. Text., 2020: pp. 363–390. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/9781119620532.ch17.

[6] A. Ghorbani, S. Esmaeili, R.W. Bussmann, K. Batsatsashvili, Z. Kikvidze, N.Y. Paniagua-Zambrana, Centaurea behen L. Asteraceae, in: 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-28940-9_37.

[7] A. Shakeri, E. Amini, J. Asili, M. Masullo, S. Piacente, M. Iranshahi, Screening of several biological activities induced by different sesquiterpene lactones isolated from Centaurea behen L. and Rhaponticum repens (L.) Hidalgo, Nat. Prod. Res. 32 (2018) 1436–1440. https://doi.org/10.1080/14786419.2017.1344661.

[8] S. Akbar, Centaurea behen L. (Asteraceae/Compositae) BT - Handbook of 200 Medicinal Plants: A Comprehensive Review of Their Traditional Medical Uses and Scientific Justifications, in: S. Akbar (Ed.), Springer International Publishing, Cham, 2020: pp. 569–571. https://doi.org/10.1007/978-3-030-16807-0_60.

[9] A. Esmaeili, Z. Mousavi, M. Shokrollahi, A. Shafaghat, Antioxidant activity and isolation of luteoline from Centaurea behen L. grown in Iran, J. Chem. 2013 (2013).

[10] M. NADAF, Floristic study and introduce medicinal plants of Babaaman region, North Khorasan, J. Plant Res. (Iranian J. Biol. 34 (2021) 205–219. https://plant.ijbio.ir/article_1656.html.

[11] S. Yousefi, H. Ahangar, M. Bahrami, M. Kamalinejad, A. Yaghoubi, H. Azizi, Effectiveness of" Centaurea behen" root on quality of life in patients with systolic heart failure: A randomized clinical trial, J. Cardiovasc. Thorac. Res. 15 (2023).

[12] F.Ç. Çelikezen, Ş. Hayta, Ö. Özdemir, H. Türkez, Cytotoxic and antioxidant properties of essential oil of Centaurea behen L. in vitro, Cytotechnology. 71 (2019) 345–350.
[13] M. Abdoli, E. Arkan, Z. Shekarbeygi, S. Khaledian, Green synthesis of gold nanoparticles using Centaurea behen leaf aqueous extract and investigating their antioxidant and cytotoxic effects on acute leukemia cancer cell line (THP-1), Inorg. Chem. Commun. 129 (2021) 108649.
[14] M. Entezari, S. Sheikhan, Evaluation of Bcl2 gene expression in MCF-7 Human Breast Cancer Cells under treatment of Centaurea Behen extract and Cisplatin, Arch. Adv. Biosci. 9 (2018) 11–16.
[15] M. Bastouh Filabadi, M. Yousofi, S.A. Mirjalili, Floristic investigation in Chubin Mountaion, Chaharmahal and Bakhtyari Province, J. Plant Res. (Iranian J. Biol. 33 (2020) 266–284. https://plant.ijbio.ir/article_1530.html.
[16] W. Feng, Z. Hao, M. Li, Isolation and Structure Identification of Flavonoids, in: Flavonoids - From Biosynth. to Hum. Heal., 2017. https://doi.org/10.5772/67810.
[17] A.-A. Naghipour Borj, M. Nowroozi, H. Bashari, Investigation of the flora, life forms and chorotypes of the plants in the Meymand Protected Area, Kohkilouyeh va Boyer Ahmad provice, Iran, Taxon. Biosyst. 6 (2014) 67–84. https://tbj.ui.ac.ir/article_17517.html.
[18] F. Nejadhabibvash, H. Makali, I. Rezaei Chiyaneh, Flora, life form and chorology of plants in Razhan protected area in West Azerbaijan Province, Taxon. Biosyst. 8 (2016) 85–95. https://doi.org/10.22108/tbj.2016.20982.
[19] M.A. Tabad, V. Abaszadeh, H. Maroofi, N. Jalilian, Floristic study of Lailakh region in Dehgolan, Kurdistan Province, J. Plant Res. (Iranian J. Biol. 34 (2021) 297–315. https://plant.ijbio.ir/article_1707.html.
[20] M. Heidari Rikan, A. Alijanpour, Investigation on flora, life form and chorology of silver birch site in marmisho region- west Azarbaijan, J. Plant Res. (Iranian J. Biol. 32 (2019) 692–708. https://plant.ijbio.ir/article_1369.html.
[21] K. SafiKhani, A Floristic Study of the Almabolaq Asadabad Protected Area in Hamadan Province, Taxon. Biosyst. 15 (2023) 41–82. https://doi.org/10.22108/tbj.2023.137553.1231.
[22] M.A. Tabad, N. Jalilian, H. Maroofi, Study of flora, life form and chorology of plant Species in Zarivar Region of Marivan, Kurdistan, Taxon. Biosyst. 8 (2016) 69–102. https://doi.org/10.22108/tbj.2016.21538.
[23] L. Labarrière, A. Moncomble, J.-P. Cornard, pH dependency of the structural and photophysical properties of the atypical 2′,3-dihydroxyflavone, RSC Adv. 10 (2020) 35017–35030. https://doi.org/10.1039/D0RA06833K.
[24] H. Maleki, H. Barani, Extraction and antibacterial activity of Pulicaria gnaphalodes as a natural colorant: Characterization and application on wool fibers, Prog. Color. Color. Coatings. 12 (2019).
[25] H. Barani, S. Rahimpour, The dyeing procedures evaluation of wool fibers with prangos ferulacea and fastness characteristics, Adv. Mater. Sci. Eng. 2014 (2014).
[26] N. Buchner, A. Krumbein, S. Rohn, L.W. Kroh, Effect of thermal processing on the flavonols rutin and quercetin, Rapid Commun. Mass Spectrom. 20 (2006) 3229–3235. https://doi.org/10.1002/rcm.2720.
[27] A. Kataria, S. Sharma, B.N. Dar, Changes in phenolic compounds, antioxidant potential and antinutritional factors of Teff (Eragrostis tef) during different thermal processing methods, Int. J. Food Sci. Technol. 57 (2022) 6893–6902. https://doi.org/10.1111/ijfs.15210.
[28] K. Huber, Phenolic Acid, Flavonoids and Antioxidant Activity of Common Brown Beans (Phaseolus vulgaris L.) Before and After Cooking, J. Nutr. Food Sci. (2016). https://doi.org/10.4172/2155-9600.1000551.