رنگرزی پارچه پنبه با آنتوسیانین‌های استخراج شده از کلم قرمز: بهینه‌سازی فرآیند استخراج و مقایسه عملکرد دندانه‌های فلزی و طبیعی

مجید طهرانی[1*]، کیمیا خلیلی سامانی[1]

[1]دانشکده هنر، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

mtehrani@sku.ac.ir

تاریخ دریافت ۱۴۰۴/۰۵/۰۹ تاریخ پذیرش ۱۴۰۴/۰۸/۱۱

چکیده

در این مطالعه، آنتوسیانین‌های استخراج‌شده از کلم قرمز به عنوان رنگزای طبیعی برای رنگرزی پارچه‌های پنبه‌ای مورد استفاده قرار گرفت. به‌منظور بهینه‌سازی فرآیند استخراج، آزمایش‌ها بر اساس طراحی فاکتوریل انجام گرفت و تأثیر سه متغیر مستقل شامل نوع حلال (آب مقطر، اتانول، متانول، اسید سیتریک و هیدروکسید سدیم)، دمای استخراج (۴۰، ۶۰ و ۹۰ درجه سانتی‌گراد) و زمان استخراج (۱، ۲ و ۴ ساعت) بررسی شد. پس از تحلیل نتایج قدرت رنگی در پارچه‌های پنبه‌ای رنگرزی شده با این عصاره‌ها، شرایط بهینه استخراج تعیین شد. آنگاه از عصاره استخراج شده در شرایط بهینه برای رنگرزی در حضور دندانه‌های فلزی (قلع و آلومینیوم) و طبیعی (پوست انار و سماق) استفاده شد. نتایج نشان دادند که هر سه پارامتر نوع حلال، زمان استخراج و دمای استخراج به طور معناداری بر قدرت رنگی، فام و اشباع رنگ تأثیرگذار هستند. بهترین نتیجه قدرت رنگی (۱/۹۶) با استفاده از حلال اتانول در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد و زمان ۲ ساعت حاصل شد. هم‌چنین در بین دندانه‌های به‌کار برده شده، دندانه قلع بیشترین قدرت رنگ (۱/۹۶) و اشباع رنگ (۲۱/۰۳) را فراهم کرد، در حالی‌که دندانه‌های طبیعی پوست انار و سماق، با ایجاد فام‌های گرم و متنوع، ثبات نوری بالاتری (تا درجه ۶) از خود نشان دادند. ثبات نوری، نمونه‌های دندانه داده شده با قلع و آلومینیوم در محدوده ۴ تا ۵-۴ بوده است. نتایج ثبات شستشویی نیز نشان داد که تمامی نمونه‌های دندانه داده شده در برابر شستشو از ثبات خوبی (۴ تا ۵-۴) برخوردار بوده‌اند.

کلمات کلیدی: آنتوسیانین، کلم قرمز، پارچه پنبه‌ای ، شرایط استخراج، دندانه طبیعی.

Eco-Friendly Dyeing of Cotton Fabric with Anthocyanins Extracted from Red Cabbage: Optimization of the Extraction Process and Comparative Evaluation of Natural and Metallic Mordants

Majid Tehrani[1*], Kimiya Khalili Samani[1]

[1] Department of Art, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

mtehrani@sku.ac.ir

Abstract

In this study, anthocyanins extracted from red cabbage were employed as natural dye for dyeing cotton fabrics. To optimize the dye extraction process, a factorial experimental design was applied to investigate the effects of three independent variables: extraction solvent (distilled water, ethanol, methanol, citric acid, and sodium hydroxide), extraction temperature (40°C, 60°C, and 90°C), and extraction time (1, 2, and 4 hours). After analyzing the color strength (K/S) of dyed cotton fabrics obtained from each extract, the optimal extraction condition was identified. Subsequently, the extract obtained under optimal conditions was used for dyeing in the presence of both metallic mordants (tin and aluminum) and natural mordants (pomegranate rind and sumac). The results revealed that all three parameters, solvent type, extraction time, and extraction temperature, significantly influenced the color strength, hue, and chroma of the dyed fabrics. The best result in terms of color strength (1.96) was achieved using ethanol as a solvent, at 60°C and an extraction duration of 2 hours. Among the used mordants, tin provided the highest color strength (1.96) and color saturation (21.03), while the natural mordants, pomegranate rind and sumac (rhus), yielded warmer and more varied hues, along with superior light fastness (up to grade 6). The light fastness of the samples mordanted with tin and aluminum ranged from grade 4 to 4-5. Also, the results showed that all mordanted samples exhibited very good wash fastness (grade 4 to 4-5).

Key-words: Anthocyanin, Red cabbage, Cotton fabric, Extraction condition, Natural mordant.

۱-مقدمه

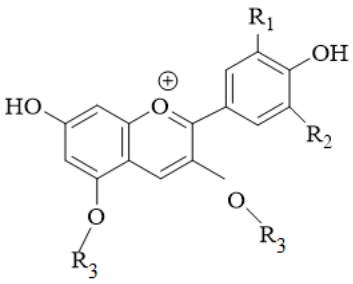
رنگزاهای طبیعی از دوران باستان و پیش از پیدایش رنگزاهای شیمیایی مورد استفاده قرار می‌گرفتند. این رنگزاها به‌ویژه در صنایع نساجی برای رنگرزی الیاف طبیعی مانند پشم، پنبه و ابریشم کاربرد داشتند [۱]. با این حال استفاده از این رنگزاها در صنایع نساجی به‌دلیل هزینه‌های بالای تولید، محدودیت در تنوع فام، جذب کم و ثبات پایین در برابر نور و شست‌وشو با محدودیت‌هایی همراه بوده است [۱، ۲]. با وجود این مشکلات، رنگزاهای طبیعی در مقایسه با رنگزاهای مصنوعی معمولا با محیط زیست سازگارتر هستند و مصرف آن‌ها در سال‌های اخیر به ویژه در راستای حفظ محیط زیست و کاهش آلودگی‌ها در حال افزایش است [۳]. برای رفع محدودیت‌های رنگزاهای طبیعی، مطالعات زیادی انجام شده است. در سال‌های اخیر، تحقیقات بیشتر بر بهبود عملکرد رنگرزی این مواد از طریق بهینه‌سازی فرآیند استخراج رنگزا، استفاده از روش‌های مختلف استخراج رنگزا، بهبود شرایط رنگرزی و استفاده از دندانه‌های طبیعی و فلزی متمرکز شده است [۱، ۴، ۵].

آنتوسیانین‌ها گروهی از رنگزاهای طبیعی هستند که به خانواده فلاونوئیدها تعلق دارند و معمولاً در میوه‌ها، گل‌ها و برگ‌های گیاهان یافت می‌شوند [۶]. در صنعت، آنتوسیانین‌ها کاربردهای زیادی دارند. در صنایع غذایی و دارویی این ترکیبات به‌عنوان رنگزای طبیعی به‌کار برده می‌شوند [۷، ۸]. در صنعت نساجی، آنتوسیانین‌ها به عنوان رنگزاهای طبیعی برای رنگرزی منسوجات استفاده می‌شوند. با این حال، چالش‌هایی مانند مشکلات استخراج آن‌ها، میل ترکیبی کم آن‌ها با الیاف، پایداری پایین در برابر نور و شستشو، حساسیت به شرایط محیطی و محدودیت طیف رنگی مانع از کاربرد گسترده صنعتی شده است [۱، ۲، ۹]. برای بهبود عملکرد رنگرزی می‌توان از روش‌های مختلف استخراج رنگزا، دندانه‌های مختلف و یا تغییر pH در فرآیند رنگرزی استفاده کرد [۲، ۱۱-۹].

یکی از گیاهانی که غنی از آنتوسیانین می‌باشد، کلم قرمز است. کلم قرمز یکی از سبزیجات مهم و پرمصرف است که به‌دلیل خواص تغذیه‌ای و زیبایی رنگی‌اش در بسیاری از غذاها استفاده می‌شود [۱۲]. ترکیبات شیمیایی کلم قرمز عمدتاً شامل آنتوسیانین‌ها، فلاونوئیدها، ویتامین‌ها و مواد معدنی هستند. آنتوسیانین‌هایی همچون سیانیدین-۳-گلوکوزید[1]، دلفینیدین[2]، پئونیدین[3] و پلارگونیدین[4] مسئول ایجاد رنگ‌های قرمز، بنفش و آبی در کلم قرمز می‌باشند (شکل ۱). رایج‌ترین فرم آنتوسیانین در کلم قرمز، سیانیدین-۳- گلوکوزید است که یک ملکول گلوکز در موقعیت کربن شماره ۳ حلقه مرکزی به آن متصل شده است [۱۳]. علاوه بر آنتوسیانین‌ها، کلم قرمز حاوی فلاونوئیدهای دیگری مانند فلاون‌ها و فلاونول‌ها است که خواص ضد التهابی و آنتی‌اکسیدانی قوی دارند [۱۴].

1 . Cyanidin-3-glucoside
2. Delphinidin
3. Peonidin
4. Pelargonidin

مطالعات اخیر پتانسیل کلم قرمز را به عنوان منبع رنگزای طبیعی برای رنگرزی الیاف مختلف نساجی بررسی کرده‌اند. پژوهشگران دریافتند با استفاده از عصاره کلم قرمز می‌توان پارچه‌های پنبه، پشم، کتان و ابریشم را با کیفیت مناسب رنگرزی کرد [۱، ۲، ۹-۱۱، ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۸]. نتایج این تحقیق‌ها نشان داد فرآیند رنگرزی را می‌توان با تنظیم پارامترهایی نظیر pH، دما و مدت زمان رنگرزی بهینه‌سازی کرد [۲، ۱۰]. هم‌چنین برای افزایش ثبات رنگ، می‌توان از روش‌های دندانه دادن شامل پیش دندانه، همزمان و پس-دندانه استفاده کرد [۱۷، ۱۸].



R_1	R_2	Anthocyanin	Aglycon
H	H	Pelargonin	Pelargonidin
OH	H	Cyanin	Cyanidin
OCH_3	H	Peonin	Peonidin
OH	OH	Delphin	Delphinidin
OCH_3	H	Petunin	Petunidin
OCH_3	OCH_3	Malvin	Malvidin

R_3=Subbubiside or Glucose

شکل ۱: ساختار آنتوسیانین‌های رایج در رنگزاهای گیاهی [۱۳]

در همه تحقیق‌هایی که تاکنون با رنگزای کلم قرمز انجام شده است، از نمک‌های فلزی به‌عنوان دندانه برای افزایش ثبات شستشویی و نوری، افزایش قدرت رنگ و یا تنوع فام استفاده گردیده است. دندانه‌های فلزی که در فرآیند رنگرزی مورد استفاده قرار می‌گیرند، با وجود اثربخشی بالا، دارای آسیب‌های قابل‌توجهی هستند. از نظر زیست‌محیطی، این ترکیبات موجب آلودگی منابع آب و خاک می‌شوند و برای موجودات زنده به‌ویژه آبزیان، سمی هستند. از نظر سلامت انسان نیز تماس طولانی مدت با فلزات سنگین مانند کروم می‌تواند منجر به آلرژی‌های پوستی و اختلالات تنفسی در بدن شود [۱۹]. با توجه به این موارد، جایگزین‌هایی مانند استفاده از دندانه‌های طبیعی، بهینه‌سازی شرایط استخراج رنگزا و یا روش‌های نوین رنگرزی بدون دندانه به‌عنوان راهکارهای ایمن‌تر و پایدارتر پیشنهاد می‌شوند [۱۰، ۲۰، ۲۱]. استفاده از دندانه‌های طبیعی تأثیرات منفی زیست‌محیطی صنعت رنگرزی را به‌طور قابل توجهی کاهش خواهد داد. این ترکیبات پایدار که معمولاً از محصولات فرعی کشاورزی مانند پوست میوه‌ها، برگ‌ها و سایر مواد طبیعی به‌دست می‌آیند، علاوه بر این‌که گزینه‌ای ایمن‌تر برای محیط زیست هستند، به‌طور مؤثری می‌توانند ویژگی‌های ثبات رنگ و جذب رنگزا را بهبود بخشند [۲۰، ۲۱].

علی‌رغم ویژگی‌های بالقوه کلم قرمز برای رنگرزی منسوجات، به‌نظر می‌رسد هنوز مطالعه جامعی در مورد تاثیر شرایط و نوع حلال در فرآیند استخراج رنگزا و هم چنین تاثیر دندانه‌های طبیعی بر روی ویژگی‌های رنگی منسوج رنگرزی شده با این منبع گیاهی انجام نشده است. لذا در این تحقیق، ابتدا تاثیر پارامترهای زمان، دما و نوع حلال در فرآیند استخراج رنگزا بر ویژگی‌های رنگی پارچه پنبه‌ای رنگرزی شده با عصاره کلم قرمز به روش فاکتوریل بررسی شد. آنگاه پارچه‌های پنبه‌ای با استفاده از عصاره بهینه و دندانه‌های فلزی و طبیعی مختلف رنگرزی شدند و تأثیر دندانه‌های فلزی و طبیعی بر خواص رنگی و ثباتی نمونه‌های رنگ‌شده بررسی و مقایسه شدند. تحقیقات پیشین به بهینه‌سازی فرآیند استخراج آنتوسیانین از کلم قرمز به روش تک عاملی پرداخته‌اند، اما در تحقیق حاضر برای اولین بار از روش طراحی فاکتوریل برای بهینه‌سازی هم‌زمان سه متغیر کلیدی (نوع حلال، دما و زمان استخراج) استفاده شده است که در مقایسه با روش‌های پیشین، دقت بالاتری در تعیین شرایط بهینه استخراج به همراه دارد. علاوه بر این در مقایسه با کارهای قبلی که بیشتر بر روی دندانه‌های فلزی متمرکز بوده‌اند، این تحقیق مقایسه هم-زمان دندانه‌های طبیعی (پوست انار و سماق) با دندانه‌های فلزی را به‌طور جامع مورد بررسی قرار می‌دهد و به نقش مهم دندانه‌های طبیعی در بهبود ثبات نوری و ویژگی‌های رنگی اشاره دارد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- آماده سازی مواد

در این تحقیق از زاج سفید و کلرید قلع (شرکت مرک) به-عنوان دندانه فلزی، هیدروکسید سدیم (شرکت کهن تاج کیمیا)، اسید سیتریک (شرکت مرک) و اتانول و متانول (۹۹ درصد شرکت مرک) به‌عنوان حلال در مرحله استخراج رنگزا استفاده شد. برگ‌های کلم قرمز (کاشته شده در همدان) به‌عنوان رنگزا و پوست انار[5] و سماق[6] (کاشته شده در اصفهان) به‌عنوان دندانه طبیعی ابتدا با آب مقطر کاملا شسته شدند، سپس در دمای محیط خشک گردیدند. مواد خشک شده آسیاب شدند، آن‌گاه برای تهیه پودر ریز با ذرات تقریباً یکسان از مش فلزی شماره ۵۰ عبور داده شدند.

۲-۲- استخراج رنگزا

استخراج رنگزا با استفاده از حلال‌های مختلف شامل آب مقطر/اتانول با نسبت حجمی ۸۰ به ۲۰، آب مقطر/متانول با نسبت حجمی ۸۰ به ۲۰، اسید سیتریک ۱٪، هیدروکسید سدیم ۱٪ و آب مقطر انجام شد. برای استخراج، مقدار ۲۵ گرم پودر رنگزا در ۱۰۰۰ میلی‌لیتر از هر حلال ریخته شد، محلول‌های حاصل در یک ارلن مایر متصل به کندانسور در دماها و زمان‌های مختلف حرارت داده شدند و سپس از فیلتر واتمن شماره ۴۲ عبور داده شدند. استخراج در ۵ سطح از نوع حلال (حلال‌های اشاره شده)، سه سطح دما (۴۰، ۶۰ و ۹۰ درجه سانتی‌گراد) و سه سطح زمان (۱، ۲ و

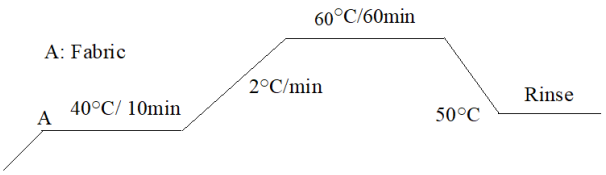
5. Pomegranate rind
6. Rhus

۴ ساعت) به روش طراحی آزمایش فاکتوریل انجام شد. در مجموع، ۴۵ نوع عصاره مختلف برای رنگرزی آماده شد.

۲-۳- دندانه‌دادن و رنگرزی

برای انجام فرآیند رنگرزی از پارچه تاری-پودی پنبه‌ای با وزن سطحی ۱۴۰ گرم بر متر مربع، تراکم تاری ۴۸، تراکم پودی ۴۲ و با بافت تافته که از شرکت هورنگ ایران تهیه شده بود، استفاده شد. پیش از آغاز عملیات رنگرزی، پارچه‌ها به‌منظور حذف ناخالصی‌ها و آهار باقیمانده به مدت ۳۰ دقیقه در محلول حاوی ۲ درصد صابون نساجی غیر یونی و در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد شست‌وشو داده شدند. پارچه‌های شسته‌شده پس از آبکشی با آب مقطر و خشک شدن در دمای محیط، جهت مراحل بعدی رنگرزی مورد استفاده قرار گرفتند.

رنگرزی در هر دو بخش تحقیق به روش هم‌زمان با نسبت وزنی پارچه به حجم حلال برابر ۱:۴۰ مطابق نمودار آورده شده در شکل ۲ انجام شد. در بخش اول تحقیق، رنگرزی با استفاده از ۵۰ درصد (نسبت به وزن پارچه) عصاره استخراج شده به عنوان رنگزا و ۵ درصد (نسبت به وزن پارچه) کلرید قلع به عنوان دندانه انجام شد. در این بخش بهترین حلال، بهترین دما و بهترین زمان برای استخراج عصاره و به دست آوردن بالاترین قدرت رنگی در نمونه‌های پنبه رنگرزی شده تعیین شد. سپس عصاره‌ای که در بخش اول تحقیق بهترین نتیجه را داشت، به عنوان رنگزا در بخش دوم مقاله استفاده شد. در بخش دوم تحقیق رنگرزی با استفاده از ۵۰ درصد (نسبت به وزن پارچه) عصاره استخراج شده به عنوان رنگزا و سولفات مضاعف آلومینیوم پتاسیم (۱۰ درصد نسبت به وزن پارچه)، کلرید قلع (۵ درصد نسبت به وزن پارچه)، پوست انار (۱۰ درصد نسبت به وزن پارچه) و سماق (۱۰ درصد نسبت به وزن پارچه) به عنوان دندانه های فلزی و طبیعی انجام شد. پس از رنگرزی، نمونه‌ها به‌طور کامل با آب مقطر در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۳۰ دقیقه شسته شدند و در دمای محیط خشک گردیدند.



شکل ۲: نمودار رنگرزی و دندانه دادن پارچه‌های پنبه‌ای

۲-۴- اندازه‌گیری پارامترهای رنگی

برای ارزیابی تفاوت عمق رنگی نمونه‌ها، ابتدا طیف بازتابی آن‌ها در ناحیه مرئی (در محدوده طول موج ۴۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر) اندازه‌گیری شد. سپس بر اساس داده‌های طیفی، مقادیر محرکه‌های سه‌گانه و قدرت رنگی مورد بررسی قرار گرفت. اندازه‌گیری طیف بازتابی با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر بازتابی مدل YS6010 ساخت شرکت شنژن چین و با منبع نوری D65 و زاویه مشاهده‌کننده استاندارد ۱۰ درجه انجام شد. پس از به‌دست آوردن طیف بازتابی، قدرت رنگی (K/S) و قدرت نسبی رنگ ($(K/S)_R$) نمونه‌ها با استفاده از روابط شماره ۱ و ۲ محاسبه گردید.

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

$$(\frac{K}{S})_R\ (\%)=\frac{(\frac{K}{S})_{others}}{(\frac{K}{S})_{Water}}\times 100 \quad (۲)$$

در رابطه شماره ۱، K/S نسبت ضریب جذب به انتشار منسوج رنگرزی شده (قدرت رنگی) و R مقدار بازتاب آن در طول موج کمترین بازتاب است. در رابطه شماره ۲، $(K/S)Water$ قدرت رنگی نمونه رنگرزی شده با عصاره حلال آب مقطر و $(K/S)Others$ قدرت رنگی نمونه‌های رنگرزی شده با سایر عصاره‌های استخراج شده است.

برای بررسی تاثیر دندانه‌های فلزی و طبیعی بر فام ایجاد شده، تغییر رنگ (ΔE) بین نمونه‌های دندانه داده شده و نمونه بدون دندانه (کنترل) مطابق با رابطه شماره ۳ محاسبه شد.

$$\Delta E=\sqrt{(L_m-L_{um})^2+(a_m-a_{um})^2+(b_m-b_{um})^2} \quad (۳)$$

در این رابطه، L_m، a_m و b_m محرکه‌های سه‌گانه نمونه دندانه داده شده و L_{um}، a_{um} و b_{um} محرکه‌های سه‌گانه نمونه بدون دندانه (کنترل) هستند.

ثبات شستشویی و نوری نمونه‌های مختلف به ترتیب بر اساس استانداردهای ISO 105-C02 و ISO 105-B02 انجام شد. برای بررسی ثبات شستشویی، ابتدا نمونه‌ها در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه در آب مقطر حاوی ۵ درصد صابون نساجی شسته شدند. آنگاه تغییر رنگ پارچه مطابق با مقیاس خاکستری تعیین شد. برای بررسی ثبات نوری نمونه‌ها از دستگاه سنجش ثبات نوری ساخت شرکت ریس‌سنج ایران و مقیاس آبی استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تاثیر شرایط استخراج بر ویژگی‌های رنگی

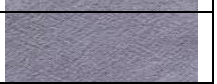
پارامترهای رنگی پارچه‌های پنبه رنگرزی شده با عصاره استخراج شده در زمان‌ها، حلال‌ها و دماهای متفاوت در جدول‌های ۱ تا ۳ نمایش داده شده اند. بررسی داده‌های جدول‌های ۱ تا ۳ نشان می‌دهد که هر سه پارامتر نوع حلال، دما و زمان استخراج تأثیر قابل توجهی بر ویژگی‌های رنگی پارچه‌های پنبه‌ای رنگرزی شده با عصاره کلم قرمز دارند. نوع حلال نقش اساسی در بازده استخراج آنتوسیانین و در نتیجه ویژگی‌های رنگی نهایی دارد. داده‌های جدول ۲ (زمان استخراج ۲ ساعت) نشان می‌دهند که در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد، استفاده از اتانول و متانول نسبت به آب مقطر و اسید سیتریک، موجب افزایش معنادار قدرت رنگی پارچه می‌شود. در این شرایط مقدار قدرت رنگی برای اتانول برابر۱/۹۶ و برای متانول ۱/۲۹ بوده است، در حالی که آب مقطر (۰/۸۶) و اسید سیتریک (۰/۷۵) مقادیر کمتری دارند. در مقابل، نمونه استخراج‌شده با هیدروکسید سدیم کمترین قدرت رنگی را با مقدار ۰/۳۰ نشان داده است. نتایج قدرت نسبی نشان می‌دهد حلال اتانول و متانول با قدرت رنگی نسبی ۲/۲۷ و ۱/۵۰، بیشترین بازده را نسبت به آب مقطر دارند. هم‌چنین اسید سیتریک عملکردی نزدیک به آب مقطر و اندکی پایین‌تر (۰/۸۷) ارائه کرد و هیدروکسید

سدیم با قدرت رنگی نسبی ۰/۳۴، ضعیف‌ترین نتیجه را داشت. این روند در تمامی دماها و زمان‌های استخراج در جدول‌های ۱ تا ۳ نیز مشاهده می‌شود و بیانگر اثرگذاری بالای حلال‌های الکلی بر استخراج آنتوسیانین است. حلال‌های الکلی مانند اتانول و متانول به دلیل قطبیت متعادل و نفوذپذیری بالا، گزینه‌ای مناسب برای استخراج آنتوسیانین از گیاهان محسوب می‌شوند [۲۲، ۲۳]. نتایج تحقیق‌های علمی پیشین نیز نشان می‌دهند که حلال‌های ترکیبی آب مقطر با الکل‌ها، در بسیاری از موارد، عملکرد بهتری در استخراج آنتوسیانین‌ها نسبت به آب مقطر خالص داشته‌اند [۲۴].

دمای استخراج نیز به‌طور مستقیم بر بازده استخراج و قدرت رنگ مؤثر است. داده‌های جداول ۱ تا ۳ نشان می‌دهند که با افزایش دما از ۴۰ به ۶۰ درجه سانتی‌گراد، قدرت رنگی در همه حلال‌ها افزایش می‌یابد. به عنوان نمونه، برای اتانول در زمان ۲ ساعت، مقدار قدرت رنگی از ۰/۸۰ در ۴۰ درجه به ۱۶/۹۶ در ۶۰ درجه افزایش یافته است (جدول ۲). هم‌چنین در متانول، مقدار قدرت رنگی از ۰/۶۷ به ۱/۲۹ رسیده است. این افزایش را می‌توان به تسهیل استخراج آنتوسیانین‌ها و افزایش تحرک مولکولی در دماهای بالاتر نسبت داد [۲۵]. با این حال، افزایش بیشتر دما تا ۹۰ درجه معمولاً موجب افت یا ثبات مقدار قدرت رنگی شده است. در اتانول، مقدار قدرت رنگی از ۱/۹۶ در ۶۰ درجه به ۰/۷۶ در ۹۰ درجه کاهش یافته است (جدول ۲). در آب مقطر نیز همین روند مشاهده می‌شود (افزایش تا ۶۰ درجه و سپس کاهش در ۹۰ درجه). این کاهش می‌تواند به تخریب حرارتی یا اکسیداسیون آنتوسیانین‌ها و ایجاد محصولات جانبی کم‌رنگ یا بی‌رنگ مرتبط باشد. آنتوسیانین‌ها در دمای پایین به صورت یون فلاوینیوم هستند. وجود پیوندهای دوگانه در حلقه پیریلیوم یون فلاوینیوم باعث می‌شود این یون قرمز روشن یا بنفش رنگ دیده شود. افزایش دما و افزایش pH (محیط قلیایی) باعث شکسته شدن ساختار حلقه‌ای پیریلیوم می‌شود، لذا رنگ قرمز یا بنفش آنتوسیانین را از بین می‌برد و آن‌را به ترکیبات زرد کم رنگ و یا بی‌رنگ مانند شالکون یا اسیدهای فنولیک تبدیل می‌کند [۱۰، ۱۱، ۲۶].

زمان استخراج نیز پارامتر کلیدی دیگری است که در تعامل با نوع حلال و دما، عملکرد فرآیند استخراج را تعیین می‌کند. افزایش زمان استخراج از ۱ ساعت (جدول ۱) به ۲ ساعت (جدول ۲) منجر به افزایش چشمگیر قدرت رنگی در بیشتر حلال‌ها، به ویژه در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد می‌شود. برای اتانول در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد، مقدار قدرت رنگی از ۰/۷۹ در یک ساعت به ۱/۹۶ در دو ساعت می‌رسد. برای متانول این مقدار از ۰/۷۳ به ۱/۲۹ افزایش می‌یابد. اما با افزایش زمان استخراج به ۴ ساعت (جدول ۳)، در اغلب موارد کاهش قدرت رنگی مشاهده می‌شود (برای اتانول ۰/۵۰ و برای متانول ۰/۵۳). این کاهش در زمان‌های طولانی ناشی از تخریب رنگزاهای آنتوسیانین حساس به حرارت و اکسیداسیون است [۱۱].

جدول ۱: پارامترهای رنگی پارچه‌های پنبه رنگرزی شده با عصاره‌های استخراج شده در زمان یک ساعت و حلال‌ها و دماهای متفاوت

Temperature	Solvent	L*	a*	b*	C*	h°	K/S	$(K/S)_R$	Dyed sample
40	Water	69.98	1.39	-11.84	11.92	276.69	0.48	--	
	Citric acid	71.97	0.96	-8.95	9.00	276.15	0.48	1.00	
	Ethanol	70.94	1.04	-11.83	11.88	275.03	0.61	1.27	
	Methanol	72.56	-0.49	-9.42	9.43	267.04	0.56	1.16	
	NaOH	83.62	0.75	0.17	0.77	12.78	0.27	0.56	
60	Water	71.26	1.93	-11.89	12.05	279.24	0.54	--	
	Citric acid	70.67	2.34	-12.26	12.49	280.79	0.57	1.05	
	Ethanol	67.01	2.27	-13.55	13.73	279.49	0.79	1.46	
	Methanol	67.99	1.85	-13.09	13.23	278.06	0.73	1.35	
	NaOH	84.87	-0.42	3.79	3.81	96.27	0.18	0.33	
90	Water	68.93	2.13	-12.95	13.13	279.34	0.51	--	
	Citric acid	69.24	2.72	-10.81	11.14	284.12	0.54	1.05	
	Ethanol	71.46	2.13	-11.96	12.15	280.10	0.66	1.29	
	Methanol	70.90	0.00	-11.04	11.04	269.99	0.61	1.19	
	NaOH	83.84	1.75	1.07	2.05	31.59	0.23	0.45	

تأثیر پارامترهای استخراج بر فام و محرکه‌های رنگی نمونه‌ها نیز قابل مشاهده است. داده‌های جدول‌های ۱ تا ۳ نشان می‌دهند که حلال‌های الکلی مانند اتانول و متانول در مقایسه با سایر حلال‌ها فام‌های بنفش-آبی عمیق‌تری تولید می‌کنند. در شرایط دمای ۶۰ درجه و زمان ۲ ساعت، مقدار h° (زاویه فام) برای اتانول برابر ۲۸۹/۷۶، برای متانول برابر ۲۸۷/۸۵ و برای آب مقطر ۲۹۷/۷۰ ثبت شده است (جدول ۲). این مقادیر نشان‌دهنده این است که حلال‌های اتانول و متانول در ایجاد فام‌های اشباع‌شده و عمیق‌تر نسبت به آب مقطر عملکرد بهتری دارند. در مقابل، هیدروکسید سدیم که محیط قلیایی ایجاد می‌کند، به‌طور قابل توجهی فام رنگ را تغییر می‌دهد. در شرایط مشابه (دمای ۶۰ درجه و زمان ۲

ساعت)، مقدار زاویه فام برای هیدروکسید سدیم تنها ۶۹/۲۳ است که نشان‌دهنده انتقال فام به سمت رنگ‌های زرد (*b برابر ۸/۷۹) است. دما و زمان استخراج نیز تأثیر زیادی بر فام رنگ دارند. افزایش دمای استخراج از ۴۰ به ۶۰ درجه سانتی‌گراد باعث تقویت شدت رنگ و تغییر فام به سمت رنگ‌های بنفش-آبی عمیق‌تر می‌شود. در اتانول در دمای ۴۰ درجه مقدار زاویه فام برابر ۲۶۴/۷۰ (جدول ۲) بوده که در دمای ۶۰ درجه به ۲۸۹/۷۶ (جدول ۲) افزایش می‌یابد. اما افزایش دما از ۶۰ درجه به ۹۰ درجه تأثیر معکوسی دارد و موجب کاهش شدت رنگ می‌شود.

جدول ۲: پارامترهای رنگی پارچه‌های پنبه رنگرزی شده با عصاره استخراج شده در زمان دو ساعت و حلال‌ها و دماهای متفاوت

Temperature	Solvent	L*	a*	b*	C*	h°	K/S	$(K/S)_R$	Dyed sample
40	Water	66.75	4.06	-14.65	15.2	285.5	0.56	--	
	Citric acid	68.91	1.32	-12.85	12.92	275.88	0.54	0.96	
	Ethanol	71.1	-0.89	-9.6	9.64	264.7	0.8	1.42	
	Methanol	71.31	2.63	-13.25	13.51	281.23	0.67	1.19	
	NaOH	78.47	0.33	11.88	11.88	88.43	0.24	0.42	
60	Water	65.95	2.42	-14.15	14.35	279.7	0.86	--	
	Citric acid	67.42	4.58	-14.75	15.45	287.25	0.75	0.87	
	Ethanol	55.59	7.11	-19.79	21.03	289.76	1.96	2.27	
	Methanol	61.07	5.32	-16.54	17.37	287.85	1.29	1.50	
	NaOH	83.36	3.33	8.79	9.4	69.23	0.3	0.34	
90	Water	68.96	0.09	-10.27	10.27	270.48	0.66	--	
	Citric acid	67.04	0.48	-10.66	10.67	272.59	0.53	0.80	
	Ethanol	71.54	-1.62	-7.34	7.52	257.52	0.76	1.15	
	Methanol	72.2	-0.91	-7.59	7.64	263.18	0.57	0.86	
	NaOH	80.72	3.03	3.75	4.82	51.07	0.38	0.57	

جدول ۳: پارامترهای رنگی پارچه‌های پنبه رنگرزی شده با عصاره استخراج شده در زمان چهار ساعت و حلال‌ها و دماهای متفاوت

Temperature	Solvent	L*	a*	b*	C*	h°	K/S	$(K/S)_R$	Dyed sample
40	Water	69.29	2	-13.77	13.91	278.28	0.64	--	
	Citric acid	71.52	2.56	-12.21	12.48	281.83	0.52	0.81	
	Ethanol	70.53	2.27	-13.03	13.23	279.89	0.58	0.90	
	Methanol	73.16	-0.83	-8.65	8.69	264.52	0.46	0.71	
	NaOH	83.9	0.23	5.36	5.36	87.5	0.21	0.32	
60	Water	67.81	-1.69	-8.88	9.04	259.22	0.71	--	
	Citric acid	69.98	1.73	-12.87	12.98	277.66	0.61	0.85	
	Ethanol	72.05	0.3	-9.06	9.07	271.9	0.5	0.70	
	Methanol	71.73	0.19	-10.55	10.55	271.02	0.53	0.74	
	NaOH	83.28	0.32	3.14	3.16	84.17	0.2	0.28	
90	Water	70.53	0.13	-8.56	8.56	270.86	0.56	--	
	Citric acid	68.11	2.71	-10.3	10.65	284.75	0.66	1.17	
	Ethanol	71.62	1.13	-10.83	10.89	275.94	0.52	0.92	
	Methanol	70.87	0.98	-10.07	10.11	275.57	0.49	0.87	
	NaOH	81.39	0.55	3.72	3.76	81.61	0.25	0.44	

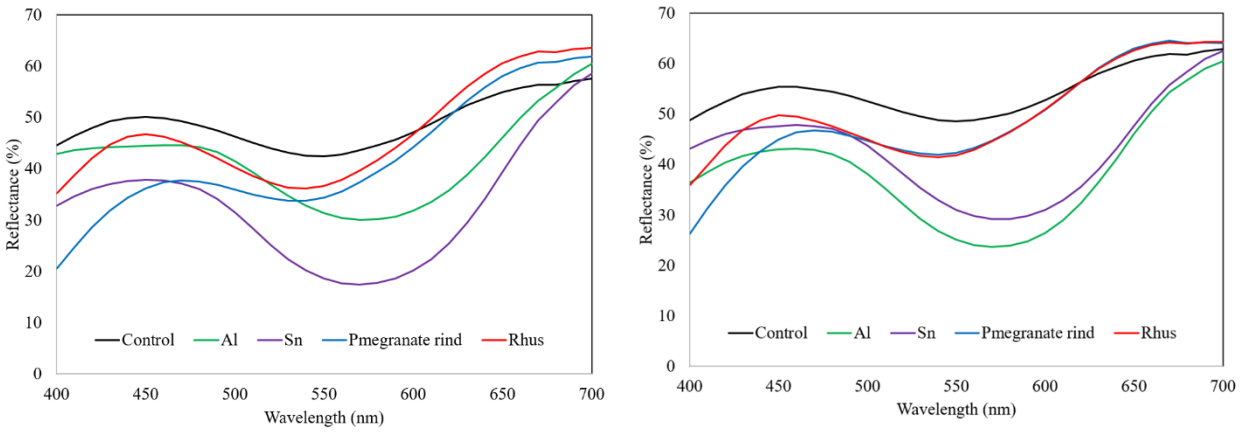
در اتانول مقدار زاویه فام از ۲۸۹/۷۶ در ۶۰ درجه به ۲۵۷/۵۲ در ۹۰ درجه سانتی‌گراد کاهش می‌یابد (جدول ۳). همین روند در آب مقطر نیز مشاهده می‌شود، به‌طوری‌که زاویه فام از ۲۷۹/۷۰ در ۶۰ درجه به ۲۷۰/۸۶ در ۹۰ درجه کاهش می‌یابد (جدول ۳). افزایش زمان استخراج از ۱ ساعت (جدول ۱) به ۲ ساعت (جدول ۲) در دمای ۶۰ درجه موجب افزایش شدت رنگ و تغییر فام به سمت رنگ‌های بنفش-آبی عمیق‌تر می‌شود. در اتانول مقدار زاویه فام از ۲۶۹/۲۵ در زمان ۱ ساعت به ۲۸۹/۷۶ در زمان ۲ ساعت افزایش می‌یابد (جدول ۲). در آب مقطر نیز زاویه فام از ۲۷۹/۲۴ در ۱ ساعت به ۲۷۹/۷۰ در ۲ ساعت رسیده است. با این حال زمان‌های طولانی‌تر (۴ ساعت) در برخی شرایط،

مانند آب مقطر، باعث کاهش قدرت رنگی و تغییر فام به سمت رنگ‌هایی با شدت کم‌تر می‌شود. در آب مقطر مقدار زاویه فام از ۲۷۹/۷۰ در ۲ ساعت به ۲۵۹/۲۲ در ۴ ساعت کاهش می‌یابد (جدول ۳).

در مجموع، داده‌های جداول ۱ تا ۳ تأیید می‌کنند که بهترین شرایط استخراج آنتوسیانین از کلم قرمز و کسب بیشترین قدرت رنگی و فام مطلوب در رنگرزی پارچه پنبه-ای استفاده از حلال‌های الکلی (اتانول یا متانول)، دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد و زمان استخراج دو ساعت است. افزایش بیش از حد دما یا زمان استخراج، با کاهش قدرت رنگی و تغییر فام همراه خواهد بود.

۳-۲- تاثیر دندانه های فلزی و طبیعی بر ویژگی‌های رنگی

ضریب بازتاب نمونه‌های رنگرزی شده با عصاره استخراج شده از کلم قرمز در دو حلال اتانول و آب مقطر در شرایط بهینه و در حضور دندانه‌های فلزی و طبیعی مختلف در محدوده ۴۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر در شکل ۳ آورده شده است. در بررسی نمودار بازتاب نمونه‌های رنگرزی‌شده، الگوی بازتاب طیفی به وضوح تحت تأثیر نوع دندانه و حلال قرار گرفته است. دندانه قلع در عصاره اتانولی با کاهش پیوسته بازتاب از طول موج ۴۰۰ تا ۵۷۰ نانومتر و ایجاد کمترین در این ناحیه، بیشترین جذب و فام بنفش-آبی با اشباع بالا را فراهم کرده است. دندانه آلومینیوم نیز روندی مشابه ولی با شدت جذب کمتر نشان می‌دهد. دندانه‌های طبیعی مانند پوست انار و سماق، کمترین بازتاب را در ناحیه ۴۰۰-۴۳۰ نانومتر داشته‌اند و با افزایش تدریجی بازتاب در طول‌موج‌های بالاتر، فام‌هایی گرم‌تر ایجاد کرده‌اند. این روندها در عصاره آبی نیز با بازتاب کلی بالاتر و کاهش شدت جذب، به‌ویژه در نمونه‌های فلزی تکرار شده است. در این حالت، دندانه‌های قلع و آلومینیوم با اثرگذاری ضعیف‌تر نسبت به اتانول، هم‌چنان بالاترین جذب را در طول موج ۵۷۰ نانومتر دارند. به‌طور کلی، روند بازتاب در طول‌موج‌های مختلف نشان می‌دهد که دندانه‌های فلزی با جذب در ناحیه مرکزی طیف (۵۷۰ نانومتر) رنگ‌های سرد و اشباع‌شده ایجاد می‌کنند، در حالی‌که دندانه‌های طبیعی با تمرکز جذب در نواحی ۴۰۰ نانومتر، رنگ‌هایی گرم و روشن‌تر را تولید می‌نمایند.



شکل ۳: نمودار ضریب بازتاب پارچه‌های پنبه رنگرزی شده با دندانه‌های مختلف و عصاره استخراج شده با حلالهای اتانول (سمت چپ) و آب مقطر (سمت راست) در شرایط بهینه

نتایج تأثیر دندانه‌های فلزی و طبیعی بر فام و پارامترهای رنگی پارچه‌های پنبه‌ای رنگرزی شده در شکل‌های ۴ و ۵ و جدول ۴ آورده شده است. این نتایج نشان می‌دهند در شرایط استفاده از عصاره استخراج شده با حلال اتانول، نمونه رنگرزی شده با دندانه قلع بیشترین قدرت رنگی را با مقدار ۱/۹۶ نشان داده است. هم‌چنین این نمونه دارای بیشترین اشباع رنگی (۲۱/۰۳) و فام بنفش-آبی (زاویه فام برابر۲۸۹/۷۶) است که نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه قلع در تثبیت و تشدید رنگ آنتوسیانینی استخراج‌شده از کلم قرمز می‌باشد. در همین شرایط، دندانه آلومینیوم با قدرت رنگی ۰/۸۱ و پوست انار با قدرت رنگی ۱/۵۴ نیز عملکرد نسبتا خوبی داشته‌اند. با این حال، فام ایجاد شده توسط پوست انار به سمت قرمز-نارنجی متمایل بوده و زاویه فام آن (۲۴/۳۶) نشان از تغییر محسوس در ماهیت رنگ داشته است. تغییر فام در نمونه دندانه داده شده با پوست انار می‌تواند ناشی از خواص رنگزایی این دندانه باشد. پوست انار حاوی گروه‌های پانیکالاژین[۷] و الاژیک اسید[۸] است که می‌توانند به‌عنوان گروه‌های رنگزا در رنگرزی الیاف طبیعی عمل کنند [۲۱]. دندانه سماق نیز با قدرت رنگی ۰/۶۰ و فامی متمایل به نارنجی-قهوه‌ای (زاویه فام برابر ۳۴۱/۵۳) عملکردی متوسط در قدرت رنگی داشته، ولی ثبات نوری قابل توجهی از خود نشان داده است. نتایج شاخص تغییر رنگ نمونه‌های دندانه-دار در جدول ۴ نشان می‌دهند دندانه‌های استفاده شده تغییر رنگ محسوسی ایجاد کرده‌اند. شاخص تغییر رنگ برای دندانه قلع برابر با ۲۳/۵۹، برای دندانه آلومینیوم برابر با ۱۰/۷۹ و برای پوست انار برابر با ۱۰/۷۸ بوده است. هم‌چنین مقدار شاخص تغییر رنگ برای سماق (۶/۹۷)، اگر چه کمتر از سایر دندانه‌ها است، اما هم‌چنان بالاتر از آستانه ادراک چشمی بوده و نمایانگر تأثیر ملموس دندانه در تغییر ویژگی‌های رنگی پارچه می‌باشد. از نظر ثبات شستشویی و نوری، دندانه‌های طبیعی پوست انار و سماق، عملکرد قابل

7. Punicalagin
8. Ellagic acid

توجهی داشته‌اند. ثبات نوری نمونه‌های رنگرزی‌شده با پوست انار به عدد ۶ و با سماق به ۵-۶ رسیده است، در حالی‌که نمونه‌های دارای دندانه‌های فلزی حداکثر ثبات نوری ۴-۵ (برای آلومینیوم) را نشان داده‌اند. این نتایج حاکی از پتانسیل بالای دندانه‌های طبیعی در حفظ پایداری رنگ در برابر نور می‌باشند. پوست انار و سماق دارای ترکیبات فنولی متنوعی هستند. این ترکیبات علاوه بر بهبود پیوند بین رنگ و الیاف، اشعه فرابنفش را به مقدار قابل توجهی جذب می‌کنند و ثبات نوری را افزایش می‌دهند [۵، ۱۰، ۱۱، ۲۶]. هم‌چنین برخی از این ترکیبات جزو ساختارهای رنگی نیز می‌باشند. لذا این مواد طبیعی علاوه بر دندانه، به‌عنوان رنگزا نیز عمل کرده و فام پارچه‌های رنگرزی شده را تغییر می‌دهند [۲۷].

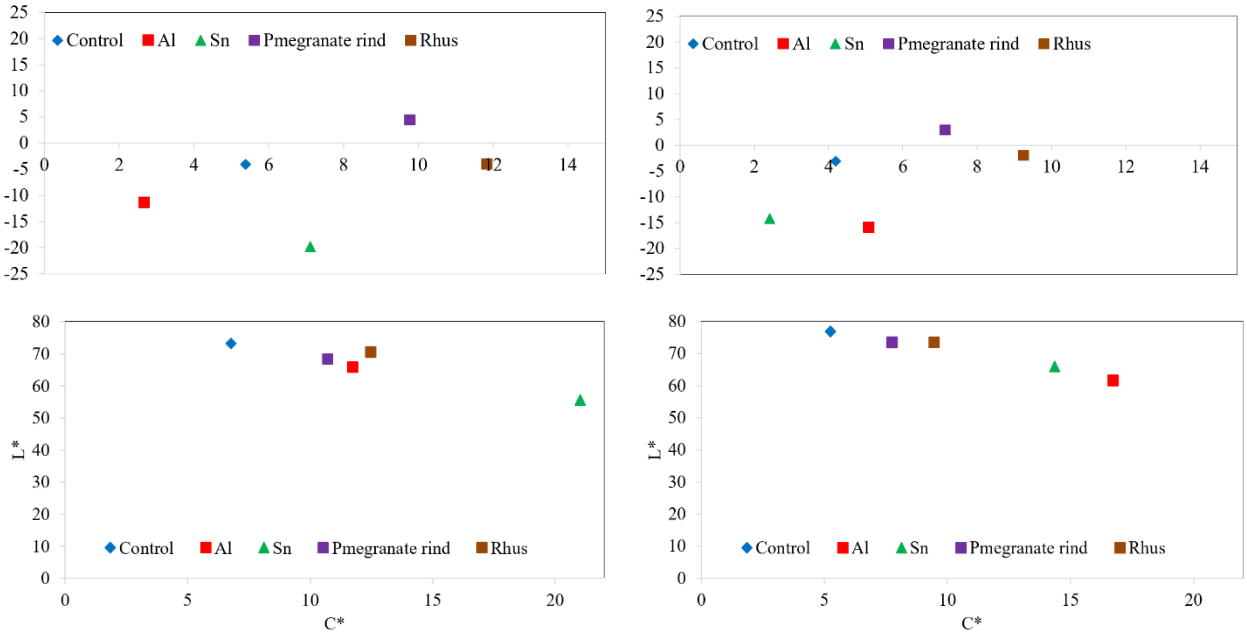
Solvent	Mordant type	Dyed sample	Solvent	Mordant type	Dyed sample
Ethanol	Control		Water	Control	
	Al			Al	
	Sn			Sn	
	Pomegranate rind			Pomegranate rind	
	Rhus			Rhus	

شکل ۴: تصویر پارچه‌های پنبه‌ای رنگرزی شده با دندانه‌های مختلف و رنگزای استخراج شده در حلال‌های اتانول و آب مقطر

جدول ۴: پارامترهای رنگی پارچه‌های پنبه رنگرزی شده با دندانه‌های مختلف و عصاره استخراج شده در شرایط بهینه

Solvent	Mordant type	L*	a*	b*	ΔE*ab	C*	h°	K/S	Wash fastness	Light fastness
Ethanol	Control	73.14	5.39	-4.12	--	6.78	322.62	0.39	3-4	3-4
	Al	65.68	2.68	-11.44	10.79	11.75	283.20	0.81	4-5	4-5
	Sn	55.59	7.11	-19.79	23.59	21.03	289.76	1.96	4	4
	Pomegranate rind	68.23	9.77	4.42	10.78	10.72	24.36	1.54	4-5	6
	Rhus	70.48	11.84	-3.95	6.97	12.48	341.53	0.60	4-5	5-6
Water	Control	76.88	4.20	-3.14	--	5.24	323.27	0.27	3-4	3
	Al	61.63	5.10	-15.92	19.91	16.72	287.76	1.24	4	4
	Sn	65.95	2.42	-14.15	15.61	14.35	279.70	0.86	4	4
	Pomegranate rind	73.55	7.14	3.02	7.59	7.75	22.92	1.03	4-5	5
	Rhus	73.57	9.25	-1.93	6.15	9.45	348.24	0.57	4	5-6

در شرایط استفاده از عصاره استخراج شده با آب مقطر، دندانه آلومینیوم با قدرت رنگی برابر ۱/۲۴ نسبت به سایر دندانه‌ها عملکرد برتری داشته است. دندانه پوست انار با قدرت رنگی ۱/۰۳ و دندانه قلع با قدرت رنگی ۰/۸۶ نتیجه قابل قبولی را ارائه کرده‌اند. در مقابل، دندانه سماق با قدرت رنگی ۰/۵۷ عملکرد متوسط داشته است. زاویه فام در بیشتر نمونه‌ها مشابه نتایج حاصل از اتانول است، به‌طوری‌که آلومینیوم و قلع توانسته‌اند فام آبی–بنفش را تا حد زیادی حفظ کنند (زاویه فام به ترتیب برابر با ۲۸۷/۷۶ و ۲۷۹/۷۰)، اما همانند قبل، پوست انار و سماق موجب تغییر فام به سمت رنگ‌های گرم‌تر شده‌اند. در این حلال نیز مقایسه نمونه‌های دندانه‌دار با نمونه کنترل (قدرت رنگی برابر ۰/۲۷)، اهمیت دندانه‌دهی را آشکار می‌سازد. شاخص اختلاف رنگ برای دندانه آلومینیوم برابر ۱۶/۷۲، قلع ۱۵/۶۱، پوست انار ۷/۵۹ و سماق ۶/۱۵ بوده است؛ مقادیری که همگی نشان‌دهنده اختلاف بصری آشکار نسبت به نمونه کنترل هستند (جدول ۴). این اختلافات در نمودارهای a*–b* و C*–L* در شکل ۵ نیز به خوبی نمایان است و تفاوت موقعیت رنگی نمونه‌های دندانه‌دار با نمونه کنترل را به‌صورت کامل نشان می‌دهند. در بررسی ثبات‌ها نیز، دندانه سماق و پوست انار در حضور آب مقطر بالاترین ثبات نوری (۶-۵ و ۵) را نشان داده‌اند. در حالی‌که دندانه‌های فلزی در این حلال نیز در بهترین حالت دارای ثبات نوری در سطح ۴ بوده‌اند. ثبات شستشویی نیز برای تمام نمونه‌ها در بازه ۴ تا ۴-۵ قرار دارد که حاکی از پایداری قابل قبول این نمونه‌ها در برابر فرآیندهای شستشو است.



شکل ۵: نمودار a*–b* (ردیف بالا) و C*–L* (ردیف پایین) پارچه‌های پنبه رنگرزی شده با دندانه‌های مختلف و عصاره استخراج شده با حلال‌های اتانول (سمت چپ) و آب مقطر (سمت راست) در شرایط بهینه

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، کارایی آنتوسیانین‌های استخراج‌شده از کلم قرمز به‌عنوان رنگزای طبیعی در رنگرزی پارچه‌های پنبه‌ای بررسی گردید. به‌منظور بهینه‌سازی فرآیند استخراج، تأثیر سه عامل نوع حلال، دمای استخراج و زمان استخراج، بر ویژگی‌های رنگی نهایی به روش طراحی آزمایش فاکتوریل ارزیابی شد. نتایج حاصل نشان داد که تمامی پارامترهای مورد بررسی نقش معناداری در تغییر قدرت رنگی، فام و اشباع رنگ ایفا می‌کنند. در میان شرایط آزمایش‌شده، استخراج با اتانول ۲۰ درصد در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت دو ساعت، به عنوان شرایط بهینه تعیین شد؛ به‌طوری‌که در این شرایط بیشینه قدرت رنگی، بالاترین اشباع رنگی و فام مطلوب بنفش–آبی در پارچه‌های رنگرزی شده حاصل گردید.

در ادامه تأثیر دندانه‌های فلزی (قلع و آلومینیوم) و طبیعی (پوست انار و سماق) بر ویژگی‌های رنگی بررسی و مقایسه شدند. نتایج نشان داد که دندانه قلع در ترکیب با عصاره اتانولی، بیشترین قدرت رنگی (۱/۹۶) و اشباع رنگ(۲۱/۰۳) را به همراه فام بنفش-آبی ایجاد کرده و مؤثرترین دندانه فلزی از نظر شدت رنگ بوده است. در مقابل، دندانه‌های طبیعی پوست انار و سماق، ضمن ایجاد فام‌های گرم‌تر و متنوع‌تر، از ثبات نوری بالاتری برخوردار بوده‌اند (تا درجه ۶) و در عین حال، اثرات زیست‌محیطی کمتری نسبت به دندانه‌های فلزی دارند.

برآیند نتایج این مطالعه بیانگر آن است که با انتخاب مناسب شرایط استخراج و بهره‌گیری از دندانه‌های طبیعی، می‌توان رنگرزی پایدار، ایمن و کارآمدی را با بهره‌گیری از رنگزاهای گیاهی مانند آنتوسیانین کلم قرمز بر روی پارچه‌های پنبه‌ای محقق ساخت. این رویکرد، نه‌تنها کیفیت رنگرزی را ارتقا می‌دهد، بلکه با کاهش وابستگی به ترکیبات شیمیایی، در راستای توسعه پایدار و حفاظت از محیط زیست در صنعت نساجی گامی مؤثر تلقی می‌شود.

در تحقیقات آینده، پیشنهاد می‌شود که اثر pH در حمام رنگرزی به‌طور جامع‌تر بررسی شود تا تأثیر آن بر ویژگی‌های رنگی، قدرت رنگی و ثبات‌های مختلف نمونه‌ها مشخص گردد. هم‌چنین استفاده از دندانه‌های گیاهی به‌عنوان جایگزینی پایدار و سازگار با محیط زیست برای دندانه‌های فلزی و شیمیایی، مورد توجه ویژه قرار گیرد. ارزیابی ثبات سایشی و تعریقی نمونه‌ها نیز از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا می‌تواند درک بهتری از عملکرد عملی این روش‌های رنگرزی در شرایط استفاده واقعی، به‌ویژه در صنعت پوشاک، فراهم آورد. علاوه بر این موارد، استفاده از روش‌های نوین و سبز استخراج رنگزا نیز می‌تواند به بهینه‌سازی فرایند استخراج و کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی این روش‌ها کمک کند.

۵- منابع

[1] Pizzicato, B., Pacifico, S., Cayuela, D., Mijas, G., Riba-Moliner, M., Advancements in sustainable natural dyes for textile applications: a review, *Molecules*, 28(16), 5954, 2023.

[2] Barani, H., Maleki, H., Red cabbage anthocyanins content as a natural colorant for obtaining different color on wool fibers, *Pigment Resin Technol*, 49(3), 229-238, 2020.

[3] Kasiri, M. B., Safapour, S., Natural dyes and antimicrobials for textiles. In Green materials for energy, products and depollution (229-286), Dordrecht: Springer Netherlands, 2014.

[4] Rafiei, S., Dyeing of silk fibers with natural dye extracted from different parts of Ficus Johannis Boiss plant, *Journal of Textile Science and Technology*, 11(2), 1-17, 2022.

[5] Tehrani, M., Shahmoradi Ghaheh, F., Jahanbazi, Z., Dyeing silk fabric using anthocyanin pigments extracted in different solvents from Hibiscus sabdariffa L., *Journal of Textile Science and Technology*, 12(1), 27-39, 2023.

[6] Sangeeta, S., Rai, S., Bisht, S., Nazim, M., Chemical properties of anthocyanins sourced from different subtropical fruits. In Anthocyanins in Subtropical Fruits (33-58). CRC Press, 2023.

[7] Mohammad, S. S., Santos, R. O., Barbosa, M. I., Junior, J. L. B., Anthocyanins: chemical properties and health benefits: a review, *Curr. Nutr. Food Sci.*, 17(7), 662-672, 2021.

[8] Câmara, J. S., Locatelli, M., Pereira, J. A., Oliveira, H., Arlorio, M., Fernandes, I., ..., Bordiga, M., Behind the scenes of anthocyanins—from the health benefits to potential applications in food, pharmaceutical and cosmetic fields, *Nutrients*, 14(23), 5133, 2022.

[9] Benli, H., An investigation of dyeability of wool fabric with red cabbage (Brassica oleracea L. var.) extract/Studiu asupra capacitatii de vopsire a tesaturii din lâna cu extract din varza rosie (Brassica oleracea L. var.). *Ind. Text.*, 68(2), 108, 2017.

[10] Ticha, M. B., Haddar, W., Meksi, N., Guesmi, A., Mhenni, M. F., Improving dyeability of modified cotton fabrics by the natural aqueous extract from red cabbage using ultrasonic energy, *Carbohydr. Polym.*, 154, 287-295, 2016.

[11] 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.*, 32(2), 141-148, 2018.

[12] Araújo, A. C. D., Gomes, J. P., Silva, F. B. D., Nunes, J. S., Santos, F. S. D., Silva, W. P. D., ..., Lima, A. G. B. D., Optimization of extraction method of anthocyanins from red cabbage, *Molecules*, 28(8), 3549, 2023.

[13] Patel, A., Patel, N., Patani, P., The role of anthocyanins from red cabbage: a review, *J. Popul Ther. Clin. Pharmacol.*, 31(11), 1104-1112, 2024.

[14] Oancea, S., Mila, L., Ketney, O., Content of phenolics, in vitro antioxidant activity and cytoprotective effects against induced haemolysis of red cabbage extracts, *Biotech. Lett*, 24(1), 1-9, 2019.

[15] Yen, C. K., Peng, L. Y., Wang, C. X., Chen, Y. Y., Dyeing of Degummed Silk Fibers with Anthocyanins in Red Cabbage, *Adv. Mater. Res.*, 418, 585-588, 2012.

[16] Kaur, V., Arjunan, S., Nanaiah, I., Extraction of Dyes from Plant Sources and their application on Cotton and Wool using Mordants, *Curr. Trends Biotechnol. Pharm.*, 15(5), 503-506, 2021.

[17] Priyadarshini, M., Subash, A., Shobana, A., Sujatha, A., Potential use of brassica Oleracea

L.(purple cabbage) waste as a valuable source of natural colorant for the textile industry, *J. Adv. Sci. Res.*, 12(01), 183-189, 2021.

[18] Onal, A., Subasar, F. D., Cotton, wool and linen fabrics dyeing with natural dye extracted from red cabbage (Brassica oleracea var. capitata f. rubra), *Gaziosmanpasa J. Sci. Res.*, 1(4), 35-41, 2012.

[19] Saha, A., Roy, S., Harmful effects of different classes of heavy metals in our beautiful environment, Asian J. Res. Chem., 16(1), 13-17, 2023.

[20] Tehrani, M., Asadi Farsani, T., Sustainable wool dyeing: utilizing Syzygium Aromaticum (clove bud) extract and plant-derived mordants, *Prog. Color, Colorants Coat.*, 18(3), 363-373, 2025.

[21] Tehrani, M., Ahmadi, S., Ecological dyeing of cotton fabrics with cochineal: influence of bio-mordants on colorimetric and aging parameters, *Fibers Polym*, 26, 3047–3060, 2025.

[22] Taghavi, T., Patel, H., Rafie, R. Extraction solvents affect anthocyanin yield, color, and profile of strawberries, *Plants*, 12(9), 1833, 2023.

[23] Farooq, S., Shah, M.A., Siddiqui, M.W. *et al*, Recent trends in extraction techniques of anthocyanins from plant materials, *Food Meas.*, 14, 3508–3519, 2020.

[24] Oancea, S., Perju, M., Coman, D., Olosutean, H., Optimization of conventional and ultrasound-assisted extraction of Paeonia officinalis anthocyanins, as natural alternative for a green technology of cotton dyeing, *Biotechnol. Lett*, 26(2), 2527-2534, 2021.

[25] Kang, H. J., Ko, M. J., Chung, M. S., Anthocyanin structure and pH dependent extraction characteristics from blueberries (Vaccinium corymbosum) and chokeberries (Aronia melanocarpa) in subcritical water state, *Foods*, 10(3), 527, 2021.

[26] Enaru, B., Drețcanu, G., Pop, T. D., Stănilă, A., Diaconeasa, Z., Anthocyanins: Factors affecting their stability and degradation, *Antioxidants*, 10(12), 1967, 2021.

[27] Romeo, F. V., Ballistreri, G., Fabroni, S., Pangallo, S., Li Destri Nicosia, M. G., Schena, L., Rapisarda, P., Chemical characterization of different sumac and pomegranate extracts effective against Botrytis cinerea rots, *Molecules*, 20(7), 11941-11958, 2015.