

Wool Dyeing With Chamomile Natural Dye Through Statistical Optimization Using the Response Surface Methodology and Binary Metal Mordants

Majid Tehrani^{*1}, Mahdi Safi²

1- Department of Art, Shahrekord University, P.O. Box: 5681188617, Shahrekord, Iran

2- Department of Color Physics, Institute for Color, Science and Technology, P.O. Box: 16765-654, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 22-01-2026

Accepted: 27-04-2026

Available online: 14-05-2026

Print ISSN: 1735-8779

Online ISSN: 2383-2169

DOI:10.30509/jcst.2026.167762.1280

Keywords:

Chamomile natural dye

Optimization

Response Surface Methodology (RSM)

Binary metal mordants

Wool fibers

ABSTRACT

Textile dyeing with natural colorants, in response to environmental requirements and the increasing demand for sustainable products, requires scientifically based and optimized processes. This study aimed to develop an efficient and sustainable process for wool dyeing using a natural dye extracted from chamomile flowers and to investigate the role of metallic mordants. Response surface methodology based on a central composite design was applied to evaluate the effects of four key dyeing parameters—dye concentration, pH, temperature, and dyeing time—on color strength. The developed second-order model showed good statistical fitness (predicted correlation coefficient of 94.75) and confirmed the significant influence of both main factors and their interactions. The optimal conditions were identified as 75 wt% dye concentration, pH 3.5, temperature of 80 °C, and dyeing time of 116 min, yielding a color strength of 4.33. Furthermore, the use of single and combined metallic mordants demonstrated that binary mordant systems, particularly Cu-Fe, Cu-Sn, and Cu-Al, significantly enhanced color strength (above 10) and improved wash fastness (grade 5) and light fastness (levels 6–7).

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





رنگرزی پشم با رنگزای بابونه از طریق بهینه‌سازی آماری روش سطح پاسخ و دندانه‌های فلزی دوتایی

مجید طهرانی^{۱*}، مهدی صفی^۲

۱- دانشیار، دانشکده هنر، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران، صندوق پستی: ۵۶۸۱۱۸۸۶۱۷

۲- دانشیار، پژوهشکده فیزیک رنگ، پژوهشگاه رنگ، تهران، ایران، صندوق پستی: ۶۵۴-۱۶۷۶۵

چکیده

رنگرزی منسوجات با رنگزاهای طبیعی، در پاسخ به الزامات زیست‌محیطی و تقاضا برای محصولات پایدار، نیازمند طراحی فرایندهای علمی و بهینه است. این پژوهش با هدف توسعه یک فرایند کارآمد و پایدار برای رنگرزی پشم با رنگزای طبیعی گل بابونه و بررسی نقش دندانه‌های فلزی انجام شد. روش سطح پاسخ طرح مرکب مرکزی برای تحلیل اثر چهار متغیر اصلی رنگرزی شامل غلظت رنگزا، pH، دما و زمان رنگرزی بر قدرت رنگی استفاده گردید. مدل درجه دوم توسعه یافته از برازش آماری مطلوب برخوردار بود (ضریب همبستگی پیش‌بینی شده ۹۴/۷۵) و نشان داد که متغیرهای اصلی و اثرات متقابل آنها نقش معناداری در تغییرات قدرت رنگ دارند. شرایط بهینه شامل ۷۵ درصد وزنی رنگزا، pH حدود برابر ۳/۵، دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۱۱۶ دقیقه بود که قدرت رنگ ۴/۳۳ را ایجاد کرد. همچنین بررسی دندانه‌های فلزی تکی و ترکیبی نشان داد دندانه‌های دوگانه، به‌ویژه آهن-مس، مس-قلع و مس-آلومینیم، موجب افزایش قدرت رنگ تا بیش از ۱۰ و بهبود ثبات شستشویی تا درجه ۵ و ثبات نوری تا سطوح ۶-۷ شدند.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۰۷

در دسترس به صورت الکترونیکی: ۱۴۰۵/۰۲/۲۴

شاپا چاپی: ۱۷۳۵-۸۷۷۹

شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۲۱۶۹

DOI:10.30509/jcst.2026.167762.1280

واژه‌های کلیدی:

رنگزای طبیعی بابونه

بهینه‌سازی

روش سطح پاسخ

دندانه فلزی دوتایی

الیاف پشم



۱- مقدمه

صنعت رنگرزی منسوجات به‌عنوان یکی از بخش‌های کلیدی صنایع تولیدی، همواره با چالش‌های زیست‌محیطی و نگرانی‌های مربوط به سلامت انسانی همراه بوده است. رنگ‌های سنتزی که عمدتاً از مشتقات نفتی و ترکیبات آلی تشکیل شده‌اند، با وجود مزایایی مانند تنوع رنگی بالا، قیمت مناسب و عملکرد فنی مطلوب، اثرات زیان‌باری بر منابع آبی، خاکی و سلامت انسان و سایر موجودات زنده دارند. پایداری بالا، سمیت و خاصیت سرطان‌زایی این ترکیبات موجب شده است که توجه پژوهشگران به‌سوی رنگزاهای طبیعی به‌عنوان گزینه‌هایی زیست‌سازگار، ایمن و پایدار جلب شود (۱، ۲).

رنگزاهای طبیعی که از منابع گیاهی، جانوری یا معدنی استخراج می‌شوند، دارای مزایایی همچون تجزیه‌پذیری زیستی، عدم سمیت، سازگاری با پوست انسان و قابلیت استخراج از منابع تجدیدپذیر هستند. افزون بر خاصیت رنگ‌دهی، بسیاری از این ترکیبات دارای عملکردهای زیستی نظیر پاداکسنده، ضدالتهابی، ضدسرطان، ضدباکتریایی و محافظت در برابر پرتو فرابنفش می‌باشند. این ویژگی‌ها، زمینه کاربرد گسترده آن‌ها را در صنایع نساجی، دارویی، غذایی، آرایشی و بهداشتی فراهم کرده است. با این حال، محدودیت‌هایی مانند ثبات نوری و شستشویی پایین، وابستگی عملکرد به شرایط رنگرزی و تنوع محدود در طیف رنگی، چالش‌هایی جدی در مسیر تجاری‌سازی این رنگزاهای به‌شمار می‌روند (۲، ۳).

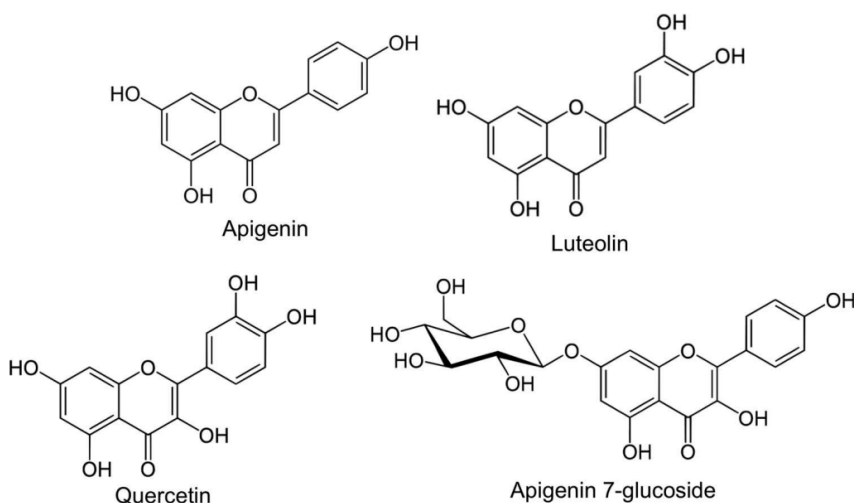
برای رفع این مشکلات، راهکارهایی مانند استفاده از دندانه‌های فلزی، اصلاح ساختار الیاف و بهینه‌سازی فرایند رنگرزی با بهره‌گیری از روش‌های آماری پیشنهاد شده‌اند. دندانه‌ها با ایجاد کمپلکس‌های پایدار بین مولکول‌های رنگزا و الیاف، می‌توانند به شکل مؤثری قدرت رنگ، تنوع سایه، ثبات نوری و ثبات شستشویی را افزایش دهند (۵)

(۲، ۴). در کنار آن، بهره‌گیری از روش‌های آماری مانند روش سطح پاسخ به‌عنوان یک ابزار قدرتمند آماری، امکان بررسی سامانمند و هم‌زمان متغیرهای فرایندی را فراهم می‌سازد و به تعیین شرایط بهینه برای دستیابی به بیشترین بازدهی و کمترین هزینه کمک می‌کند (۶-۹).

در میان رنگزاهای گیاهی، گل بابونه به‌عنوان یکی از رنگزاهای گیاهی زرد رنگ، با ترکیبات زیست‌فعالیتی همچون فلاونوئیدها (آپی‌ژنین، کوئرستین)، ترپنوئیدها (α -بیزابولول، اکسید بیزابولول A و B، کامازولن، β -فارنسن)، اسیدهای فنولیک و کومارین‌ها، جایگاه ویژه‌ای در رنگرزی طبیعی پیدا کرده است. در بین موارد ذکر شده فلاونوئیدهای آپی‌ژنین، کوئرستین و لوتئولین ترکیبات اصلی برای ایجاد رنگ معرفی شده‌اند (شکل ۱) (۱۱، ۱۰، ۳). مطالعات متعددی خواص پاداکسنده، ضدالتهابی، ضد میکروبی، ضدسرطان و محافظت در برابر پرتو فرابنفش این ترکیبات را تأیید کرده‌اند، به طوری که کاربرد بابونه در صنایع دارویی، بهداشتی، غذایی و نساجی در حال گسترش است (۱۳، ۱۲).

بررسی منابع پیشین نشان می‌دهد مطالعات محدودی در زمینه کاربرد رنگزای بابونه در رنگرزی الیاف طبیعی صورت گرفته است. منگازو و همکارانش، در رنگرزی پشم با عصاره بابونه نشان دادند که مقدار جذب رنگ، به غلظت رنگزا، دما و pH وابسته است. همچنین حتی در غیاب دندانه نیز ثبات رنگی قابل قبول حاصل شده است (۱۱).

1. Shade
2. Response Surface Methodology
3. *Matricaria chamomilla* L.
4. Menegazzo



شکل ۱: ساختار اصلی فلاونوئیدهای رنگزا در عصاره گل بابونه (۱۱، ۱۰، ۳)

Figure 1: Chemical structures of the main flavonoid colorants in chamomile extract (3, 10, 11)

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد

برای رنگرزی از پارچه پشمی با بافت تافته و وزن ۲۸۰ گرم در متر مربع تهیه شده از شرکت هورنگ، ایران استفاده شد. برای حذف ناخالصی‌ها و متورم کردن الیاف پشم، ابتدا پارچه پشمی در آب مقطر حاوی ۲ درصد صابون نساجی غیر یونی (لیساپول ان سی شرکت آی‌سی‌آی) در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه غوطه‌ور شد، آنگاه با آب چند بار شسته شد.

برای تهیه رنگزا، گل‌های بابونه از مزارع کشاورزی جمع‌آوری و با آب شسته شد. سپس در دمای محیط و در سایه خشک و با استفاده از آسیاب صنعتی ایمپکس مدل SX150 به پودر ریز تبدیل شد. برای تهیه پودر ریز با ذرات تقریباً یکسان، از مش نایلونی شماره ۴۰ استفاده شد. استخراج رنگزا در حمام حاوی آب مقطر و نسبت رنگزا به حلال ۵۰:۱ گرم در میلی‌لیتر در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۶۰ دقیقه انجام شد.

به منظور تثبیت رنگ و افزایش سایه‌های رنگ، از دندان‌های فلزی مختلف شامل سولفات مضاعف آلومینیم پتاسیم $KAl(SO_4)_2$ ، سولفات آهن $(FeSO_4)$ ، کلرید قلع $(SnCl_2)$ ، دی کرومات پتاسیم $(K_2Cr_2O_7)$ و سولفات مس $(CuSO_4)$ (شرکت مرک) استفاده شد. علاوه بر این، اسید استیک تهیه‌شده در شرکت مرک، برای تنظیم pH در فرایند رنگرزی به کار گرفته شد. pH محلول با pH متر کالیبره‌شده اندازه‌گیری و تا رسیدن به مقدار هدف با تلرانس آزمایشگاهی (۰/۰۵ واحد) تنظیم شد.

۲-۲- طراحی آزمایش

بهینه‌سازی فرایند رنگرزی با تغییر چهار متغیر اصلی شامل غلظت رنگزا، pH، زمان رنگرزی و دمای رنگرزی انجام شد. در جدول ۱ متغیرها، کدگذاری آنها و سطوح متناظر آنها آورده شده است.

1. El-Zawahry
2. Gawish
3. Mansour
4. Kizil
5. Lissapol NC
6. ICI Company

ال-زواهری و همکارانش با استفاده از نانوذرات نقره به همراه عصاره بابونه استخراج‌شده با متانل و اتانل، موفق به تولید پارچه‌های پنبه‌ای با سایه‌های متنوع و خواص پاداکسنده و محافظت در برابر پرتو فرابنفش شدند (۳). گاویش و همکارانش نیز نشان دادند که مخلوط عصاره بابونه با سایر رنگزاهای مانند پوست پیاز و ریشه روناس، بدون نیاز به دندان، توانسته محافظت در برابر پرتو فرابنفش (UPF بالاتر از ۵۰) و ثبات شستشویی، نوری و مالشی مناسبی روی الیاف پشم، پنبه، ابریشم و نایلون ایجاد کند (۱۳). در مطالعاتی منصور و همکارانش رنگرزی پشم با عصاره‌های بابونه، پوست انار، روناس و پوست درخت سیب نشان دادند که حتی بدون دندان نیز قدرت رنگ قابل قبول است، اما با دندان‌گذاری، تنوع رنگی و ثبات به شکل قابل ملاحظه‌ای ارتقا یافته است (۱۲، ۱۰). بارانی و همکارانش گزارش کردند که رنگرزی نخ پشمی با بابونه باعث ایجاد رنگ زرد یکنواخت و ثبات شستشویی قابل قبول می‌شود (۱۴). کیزیل و همکارانش تاثیر شرایط مختلف اقلیمی بر عملکرد گل، میزان برداشت، توانایی رنگ‌دهی گل و قابلیت ایجاد سایه‌های مختلف رنگی را در گیاه بابونه بررسی کردند و پتانسیل این گیاه را برای تولید رنگ طبیعی در مقیاس صنعتی تأیید نمودند (۱۵).

بر این اساس، هدف از تحقیق حاضر توسعه یک فرایند رنگرزی کارآمد، پایدار و چندمنظوره برای الیاف پشمی با استفاده از عصاره گل بابونه و دندان‌های فلزی متفاوت است. در مرحله اول، تأثیر چهار متغیر کلیدی شامل غلظت رنگزا، pH، دما و زمان رنگرزی با استفاده از روش طراحی سطح پاسخ مورد بهینه‌سازی قرار گرفت. سپس، برای بررسی بهبود قدرت رنگ، ثبات شستشویی و نوری و ایجاد سایه‌های رنگ متنوع، رنگرزی با دندان‌های فلزی به صورت تکی و ترکیب دوتایی انجام شد. نوآوری اصلی این پژوهش در ترکیب بهینه‌سازی آماری با بررسی سامانمند نقش دندان‌های ترکیبی در رنگرزی بابونه است که پیش‌تر به‌طور جامع مورد بررسی قرار نگرفته است. این رویکرد می‌تواند نه تنها عملکرد رنگرزی را از نظر شدت، ثبات و تنوع رنگ ارتقا بخشد، بلکه چارچوبی علمی و قابل تکرار برای توسعه پایدار فناوری‌های رنگرزی طبیعی در مقیاس صنعتی ارائه کند.

جدول ۱: متغیرهای کنترل فرایند و سطوح کدگذاری شده آنها

Table 1: Process control parameters and their coded levels

Variable	Code	Unit	Level				
Dye concentration	A	% owf	20	40	60	80	100
pH	B	--	3	4	5	6	7
Time	C	min	40	60	80	100	120
Temperature	D	°C	30	45	60	75	90

$$\text{Number of experiments} = 2^k + 2k + nc \quad (1)$$

در رابطه ۱، k تعداد متغیرهای مستقل (در این پژوهش ۴ متغیر) و nc تعداد تکرار نقطه مرکزی (در این پژوهش ۶ تکرار) می‌باشند. در این مطالعه، تعداد ۱۶ نقطه فاکتوریل، ۸ نقطه محوری و ۶ نقطه مرکزی، در مجموع ۳۰ آزمایش در شرایط مختلف رنگرزی انجام شد. در جدول ۲، ۳۰ ترکیب آرایه شده از متغیرهای کنترل فرایند رنگرزی آورده شده است.

1. Central Composite Design
2. Response Surface Methodology

روش طراحی مرکب مرکزی که زیرمجموعه‌ای از روش سطح پاسخ با نقطه مرکزی برابر با ۶ است، با استفاده از نرم‌افزار Design Expert نسخه ۱۱ به کار گرفته شد تا ترکیب‌های مختلفی از متغیرهای طراحی ایجاد گردد. روش طراحی مرکب مرکزی به‌طور گسترده برای برآزش مدل‌های مرتبه دوم انتخاب می‌شود، زیرا امکان ارائه بینش جامع نسبت به چگونگی تأثیر عوامل جداگانه بر فرایند رنگرزی را فراهم می‌آورد. این امر به اجرای کارآمدتر و بهینه‌تر فرایند رنگرزی منسوجات کمک می‌کند. یکی از مزایای مهم روش طراحی مرکب مرکزی قابلیت آن در ارائه مدل‌سازی قوی با حداقل تعداد آزمایش‌های تجربی موردنیاز است. تعداد آزمایش‌های مورد نیاز براساس رابطه ۱ تعیین می‌شود (۱۶).

جدول ۲: ماتریس طرح مرکب مرکزی، ترکیب متغیرهای مستقل، مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده قدرت رنگ.

Table 2: Central composite design matrix, combinations of independent variables, actual, and predicted color strength.

Run	A	B	C	D	Actual K/S	Predicted K/S
1	60	5	80	30	1.71	1.65
2	40	4	100	75	2.51	2.57
3	40	4	60	75	2.28	2.25
4	20	5	80	60	1.12	1.08
5	60	5	80	60	2.57	2.54
6	60	5	40	60	2.25	2.22
7	80	4	100	75	3.85	3.79
8	80	4	60	45	2.26	2.48
9	40	6	60	75	1.56	1.47
10	80	6	100	45	2.36	2.34
11	60	5	120	60	2.64	2.87
12	60	5	80	60	2.57	2.54
13	60	5	80	60	2.57	2.54
14	100	5	80	60	3.03	3.11
15	80	4	100	45	2.89	2.80
16	60	5	80	60	2.57	2.54
17	40	4	100	45	2.09	1.99
18	80	6	60	45	2.15	2.02
19	60	7	80	60	1.72	1.73
20	60	3	80	60	2.93	2.96
21	40	6	100	45	1.58	1.53
22	80	6	100	75	3.1	3.02
23	40	4	60	45	1.67	1.67
24	40	6	60	45	0.96	1.21

جدول ۲: ادامه.

Table 2: Continue.

Run	A	B	C	D	Actual K/S	Predicted K/S
25	40	6	100	75	1.81	1.80
26	80	6	60	75	2.63	2.69
27	60	5	80	60	2.57	2.54
28	60	5	80	90	2.8	2.91
29	60	5	80	60	2.57	2.54
30	80	4	60	75	3.57	3.46

روشنایی استاندارد D65 و مشاهده‌گر استاندارد ۱۰ درجه تعیین شد. مقدار قدرت رنگ (K/S) نمونه‌ها نیز با استفاده از معادله کیو بلکا-مانک (رابطه ۲) محاسبه گردید. برای بررسی اختلاف عمق رنگ و شدت رنگ نمونه‌های رنگرزی شده، ابتدا طیف بازتابی آنها در ناحیه مرئی (۴۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر) اندازه‌گیری شد. پس از ثبت منحنی طیفی بازتابش، مقادیر محرک‌های سه‌گانه رنگی و مختصات رنگ در فضاها رنگ استاندارد CIELAB و CIELCH محاسبه گردید تا امکان مقایسه کمی و دقیق رنگ نمونه‌ها فراهم شود. قدرت رنگ با رابطه ۲ محاسبه می‌شود.

$$\frac{K}{S} = \frac{(1-R_{\lambda_{\min}})^2}{2R_{\lambda_{\min}}} \quad (2)$$

در رابطه ۲، K/S نشان‌دهنده نسبت ضریب جذب به ضریب انتشار نمونه بوده و معیاری کمی از قدرت رنگ و عمق رنگرزی است؛ به‌گونه‌ای که افزایش مقدار K/S بیانگر شدت رنگ بیشتر یا عمق رنگی بالاتر می‌باشد. $R_{\lambda_{\min}}$ مقدار بازتابش نمونه در طول موجی است که حداقل بازتابش را در طیف نشان می‌دهد (بیشترین جذب رنگزا). استفاده از این مقدار امکان محاسبه دقیق تری از عملکرد نوری رنگزا در نمونه فراهم می‌نماید.

۲-۳- فرایند دندان‌دادن نخ‌های پشمی با نمک‌های فلزی

برای ارزیابی اثر دندان‌های فلزی بر شدت و ثبات‌های رنگ، نخ‌های پشمی به روش پیش‌دندان رنگرزی شدند. بدین منظور ابتدا نخ‌های پشمی با استفاده از نمک‌های فلزی مختلف (۵ دندان تکی و ۱۰ مخلوط دوجزئی) در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۶۰ دقیقه دندان‌ده داده شدند. پس از آن، نمونه‌های دندان‌ده شده خارج شدند و برای حذف دندان‌های سطحی تثبیت‌نشده به خوبی با آب مقطر شسته و در دمای محیط خشک گردیدند. برای سهولت ارجاع، در جدول ۳ اطلاعات دقیق مربوط به نوع، نسبت و کد نمونه‌های دندان‌دار آورده شده است. در ادامه، پارچه‌های دندان‌ده شده تحت شرایط بهینه غلظت رنگزا، pH، دما و زمان، رنگرزی شدند تا حداکثر قدرت رنگی و بالاترین ثبات حاصل شود.

۲-۴- رنگ‌سنجی و تعیین قدرت رنگ

تفاوت میان عمق رنگ نمونه‌ها با اندازه‌گیری طیف بازتابی آنها در ناحیه مرئی (محدوده ۴۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر) و سپس محاسبه مقدار محرک‌های سه‌گانه و قدرت رنگ مورد مطالعه قرار گرفت. به منظور اندازه‌گیری طیف بازتابی نمونه‌ها از دستگاه طیف‌سنج انعکاسی YS6010 (شرکت شنزن چین) استفاده شد. مقادیر رنگ در سامانه CIELAB تحت

جدول ۳: نوع، غلظت و کد دندان‌های فلزی استفاده شده برای رنگرزی پارچه پشمی

Table 3: Type, concentration, and code of metal mordants used for dyeing of wool fabrics

Sample code	Mordant (% owf)	Sample code	Mordant (% owf)
Control	--	Al-Cr	Al (2.5%) + Cr (2.5%)
Al	Al (5%)	Al-Cu	Al (2.5%) + Cu (2.5%)
Fe	Fe (5%)	Fe-Sn	Fe (2.5%) + Sn (2.5%)
Sn	Sn (5%)	Fe-Cr	Fe (2.5%) + Cr (2.5%)
Cr	Cr (5%)	Fe-Cu	Fe (2.5%) + Cu (2.5%)
Cu	Cu (5%)	Sn-Cr	Sn (2.5%) + Cr (2.5%)
Al-Fe	Al (2.5%) + Fe (2.5%)	Sn-Cu	Sn (2.5%) + Cu (2.5%)
Al-Sn	Al (2.5%) + Sn (2.5%)	Cr-Cu	Cr (2.5%) + Cu (2.5%)

۲-۵- آزمون‌های ثابت رنگ

ثبات شست‌وشویی نمونه‌های رنگرزی شده بر اساس استاندارد ISO 105-C06:2010 (ثبات رنگ در برابر شست‌وشوی خانگی و تجاری) ارزیابی شد. آزمون با استفاده از دستگاه لندرومتر مدل Hi-D421235 انجام گرفت. برای این منظور، نمونه‌های رنگرزی شده در محلول شوینده استاندارد با غلظت ۵ درصد و نسبت حمام ۱:۵۰ در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه شست‌وشو داده شدند. پس از پایان آزمون شست‌وشو، میزان تغییر رنگ نمونه‌ها از طریق مقایسه دیداری با مقیاس خاکستری تغییر رنگ در بازه ۱ تا ۵ ارزیابی شد. این مرحله مطابق با استاندارد ISO 105-A02 انجام شد، که مرجع اصلی ارزیابی دیداری تغییر رنگ در اثر شست‌وشو است.

برای بررسی ثبات نوری نمونه‌های رنگرزی شده، آزمون در دستگاه سنجش ثبات نوری ساخت شرکت ریس‌سنج ایران مجهز به لامپ زنون با توان ۱۰۰۰ وات به مدت ۱۲ ساعت صورت گرفت. استفاده از منبع نوری زنون به دلیل شباهت طیف تابشی آن به نور طبیعی خورشید، امکان ارزیابی دقیق‌تری از مقاومت رنگ در برابر نور فراهم می‌کند. آزمون مطابق با رویه استاندارد ISO 105-B02:2014 انجام شد که روش معتبر ارزیابی پایداری رنگ تحت تابش نوری کنترل شده است. میزان ثبات نوری نمونه‌ها با استفاده از مقیاس آبی^۱ در بازه ۱ تا ۸ تعیین گردید. درجات پایین‌تر بیانگر مقاومت کمتر و درجات بالاتر نشان‌دهنده ثبات نوری بالاتر رنگ هستند.

۳- بحث و نتایج

۳-۱- نتایج روش سطح پاسخ

۳-۱-۱- پیش‌پردازش داده‌ها

در فرایند ساخت مدل مبتنی بر داده‌های تجربی، ارزیابی روابط بین متغیرهای مستقل برای جلوگیری از هم‌خطی چندگانه اهمیت دارد. هم‌خطی چندگانه زمانی رخ می‌دهد که دو یا بیشتر از متغیرهای پیش‌بینی‌کننده به مقدار زیاد با یکدیگر همبستگی داشته باشند، در این شرایط مشکلاتی در تحلیل رگرسیون ایجاد می‌شود. این مشکلات شامل برآوردهای ناپایدار ضرایب، افزایش خطای استاندارد، کاهش اعتبار آماری، افزایش مقادیر شاخص تورم واریانس (VIF) و در نهایت کاهش

قابلیت تفسیر مدل و عملکرد پیش‌بینی است. برای ارزیابی احتمال هم‌خطی چندگانه، از ضریب همبستگی پیرسون استفاده می‌شود. ضریب همبستگی پیرسون یک معیار آماری پرکاربرد است که رابطه خطی بین دو متغیر پیوسته را اندازه‌گیری می‌کند، با مقادیری که از -۱ (همبستگی منفی کامل) تا +۱ (همبستگی مثبت کامل) متغیر است و عدد صفر نشان‌دهنده عدم وجود همبستگی خطی است (۱۶). مقادیر محاسبه شده ضریب همبستگی پیرسون برای متغیرهای ورودی این تحقیق در جدول ۴ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، همبستگی‌ها بین متغیرهای مستقل به طور قابل ملاحظه‌ای کم (نزدیک صفر) است، که نشان‌دهنده عدم وجود مشکل هم‌خطی چندگانه در این مجموعه داده است. در عوض، متغیر خروجی (قدرت رنگ) همبستگی قابل‌قبول و معناداری با متغیرهای ورودی دارد، که حاکی از ارتباط مناسب متغیرهای انتخابی با قدرت رنگ نمونه رنگرزی شده است.

۳-۱-۲- ارزیابی مدل

روش طراحی مرکب مرکزی برای برقراری ارتباط بین متغیرهای فرایند رنگرزی (ورودی مدل) و شدت رنگ پارچه‌های رنگ شده (خروجی مدل) به کار برده شده است. بر اساس روش مجموع مربعات، مدل ارزیابی شد. انتخاب مدل بر اساس بالاترین مرتبه چندجمله‌ای که از نظر آماری معنادار بوده و هم‌پوشانی نداشته باشند انجام شد. در این پژوهش بین مدل‌های آزمایش شده، مدل درجه دوم مطابق رابطه ۳، به عنوان مناسب‌ترین مدل شناسایی شد.

$$\hat{f}(X_1, \dots, X_4) = a_0 + \sum_1^4 a_i X_i + \sum_1^4 a_{ii} X_i^2 + \sum_1^4 \sum_1^4 a_{ij} X_i X_j \quad (3)$$

بر اساس نتایج نرم‌افزار در جدول ۵، این مدل بهترین توصیف را از داده‌های تجربی ارائه می‌دهد و تأثیر متغیرهای مستقل بر شدت رنگ را با دقت بالا نشان می‌دهد. مقادیر ضریب همبستگی تعدیل یافته و ضریب همبستگی پیش‌بینی شده به ترتیب ۰/۹۶۵۹ و ۰/۸۹۸۳ می‌باشند.

1. Blue Wool Scale
2. Aliasing
3. Quadratic model

جدول ۴: ضریب همبستگی پیرسون بین متغیرهای فرایند و قدرت رنگ.

Table 4: Pearson correlation matrix between process variables and color strength.

	A	B	C	D	K/S
A	1.00	0.00	0.00	0.00	0.70
B	0.00	1.00	0.00	0.00	-0.43
C	0.00	0.00	1.00	0.00	0.23
D	0.00	0.00	0.00	1.00	0.44
K/S	0.70	-0.43	0.23	0.44	1.00

جدول ۵: نتایج آزمون واریانس مدل‌های آماری مختلف برای پیش‌بینی قدرت رنگ در روش سطح پاسخ.

Table 5: Analysis of variance results for different statistical models in predicting color strength in the response surface methodology.

Source	Sequential p-value	Adjusted R ²	Predicted R ²	
Linear	< 0.0001	0.9084	0.8868	
2FI	0.2759	0.9159	0.8706	
Quadratic	0.0012	0.9659	0.8983	Suggested
Cubic	0.1103	0.9817	0.3649	Aliased

در مقابل، متغیرهای مشترک AB، AC، BC و CD و متغیر درجه دوم C² تاثیر معناداری بر پاسخ مدل نداشتند، لذا از مدل نهایی حذف شدند. با حذف این عبارات، مقدار F مدل اصلاح شده به ۱۰۱،۷۴ افزایش یافت که تأکید بیشتری بر معناداری مدل ارائه شده دارد (۶). مدل واقعی و کد شده نهایی بر اساس متغیرهای تاثیرگذار به ترتیب مطابق رابطه‌های ۴ و ۵ می‌باشند.

1. ANOVA

نتایج تحلیل واریانس مدل درجه دوم برای پیش‌بینی قدرت رنگ در جدول ۶ آورده شده است. مدل دارای مقدار ضریب رگرسیون (F-value) بالا معادل ۵۹/۶۲ است که نشان می‌دهد از نظر آماری مدل معنادار و قابل قبول است. به طور کلی در ارزیابی مدل، متغیرهایی که مقادیر متغیر پاسخ (P-value) کمتر از ۰/۰۵ دارند بر پاسخ مدل تأثیر معناداری دارند. در این تحلیل، متغیرهای اصلی غلظت رنگزا (A)، pH (B)، زمان رنگرزی (C) و دمای رنگرزی (D) به همراه متغیرهای مشترک AD و BD و متغیرهای درجه دوم A²، B² و D² به عنوان مؤلفه‌های آماری معنادار در مدل شناسایی شدند.

جدول ۶: جدول آزمون واریانس برای مدل درجه دوم سطح پاسخ.

Table 6: Analysis of variance (ANOVA) for response surface quadratic model.

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	Significant
Model	12.20	14	0.8715	59.62	< 0.0001	
A-Dye concentration	6.17	1	6.17	422.16	< 0.0001	
B-pH	2.28	1	2.28	155.66	< 0.0001	
C-Time	0.6305	1	0.6305	43.13	< 0.0001	
D-Temperature	2.36	1	2.36	161.61	< 0.0001	
AB	0.0060	1	0.0060	0.4109	0.5312	
AC	0.0003	1	0.0003	0.0209	0.8868	
AD	0.1661	1	0.1661	11.36	0.0042	
BC	6.250E-06	1	6.250E-06	0.0004	0.9838	
BD	0.0977	1	0.0977	6.68	0.0207	
CD	0.0264	1	0.0264	1.81	0.1989	
A ²	0.3608	1	0.3608	24.68	0.0002	
B ²	0.0747	1	0.0747	5.11	0.0391	
C ²	0.0135	1	0.0135	0.9237	0.3517	
D ²	0.1332	1	0.1332	9.11	0.0086	
Residual	0.2193	15	0.0146			
Lack of Fit	0.2193	10	0.0219			
Pure Error	0.0000	5	0.0000			
Cor Total	12.42	29				

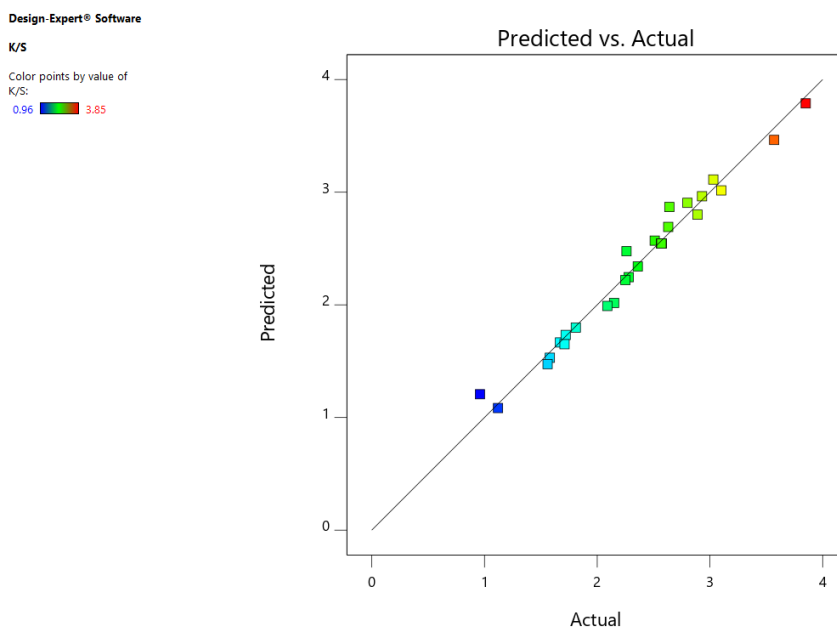
۳-۱-۳- نتایج مدل بهینه

یکی از قابلیت‌های مهم روش سطح پاسخ این است که امکان بررسی اثر هر یک از متغیرهای مستقل و همچنین اثر متقابل آنها بر روی متغیر پاسخ را فراهم می‌سازد. جدول آزمون واریانس داده‌ها (جدول ۶) نشان داد که تمام متغیرهای مستقل مورد بررسی در پژوهش حاضر و همچنین اثرات متقابل متغیرهای غلظت رنگزا-دما و pH-دما نقش معنی‌داری بر قدرت رنگ نمونه‌ها دارند. در شکل ۳، اثر هر یک از متغیرهای مستقل بر قدرت رنگ نمونه‌ها آورده شده است. یافته‌ها نشان می‌دهد افزایش غلظت رنگزا تا ۷۵ درصد (وزنی الیاف)، افزایش قدرت اسیدی (کاهش pH) تا حدود ۳٫۵ (۳٫۴۳)، افزایش زمان رنگرزی تا ۱۱۶ دقیقه و افزایش دما (D) تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد به ارتقای موثر در قدرت رنگ منجر می‌شود. عبور از این سطوح بهینه تغییر جزئی بر مقدار قدرت رنگ نمونه‌ها داشته است. افزایش غلظت رنگزا از یک مقدار بهینه باعث افزایش تجمع بیشتر آنها، عدم نفوذ به ساختار درونی الیاف، جذب سطحی و در نهایت کاهش جذب می‌شود (۱۷). همچنین افزایش زمان و دمای رنگرزی از یک نقطه بهینه باعث افزایش تخریب ساختارهای رنگی می‌شود (۱۸). از طرفی کاهش pH باعث افزایش گروه‌های پروتونه شده در زنجیرهای پلیمری لیف پشم و تمایل بیشتر رنگزا برای جذب در این الیاف می‌شود (۱۹).

$$K/S = -2.97375 + 0.038435 A + 0.494762 B + 0.008104 C + 0.062060 D + 0.000340 AD - 0.005208 BD - 0.000279 A^2 - 0.049018 B^2 - 0.000296 D^2 \quad (۴)$$

$$K/S = -2.54 + 0.5071 A - 0.3079 B + 0.1621 C + 0.3138 D + 0.1019 AD - 0.0781 BD - 0.1115 A^2 - 0.0490 B^2 - 0.0665 D^2 \quad (۵)$$

رابطه رگرسیون بیان شده بر حسب عوامل واقعی، امکان پیش‌بینی قدرت رنگی به عنوان پاسخ را برای مقادیر مشخص متغیرهای ورودی فراهم می‌کند. برای سنجش اعتبار و دقت پیش‌بینی، از شاخص‌هایی مانند ضریب همبستگی (R^2)، انحراف معیار و درصد پراکندگی استفاده شد. در مدل ارائه شده مقدار ضریب همبستگی پیش‌بینی شده ۰٫۵/۹۴۷۵، مقدار انحراف معیار ۰/۱۱۵۲ و درصد پراکندگی ۴/۸۸ به دست آمد. این مقادیر نشان می‌دهند همبستگی بالایی میان نتایج آزمایش تجربی و نتایج پیش‌بینی مدل وجود دارد. به طور کلی هر چه مقدار ضریب همبستگی به ۱ نزدیک‌تر و انحراف معیار و درصد پراکندگی کوچک‌تر باشند، مدل دقیق‌تر و قابل‌انکاتر است (۱۶). همان‌طور که در شکل ۲ دیده می‌شود، نقاط پیش‌بینی شده نزدیک خط ۴۵ درجه قرار می‌گیرند و برازش مناسب و قدرت پیش‌بینی مدل را تأیید می‌کنند. در این شکل میان مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر واقعی، همبستگی مناسبی وجود دارد، لذا خطای مدل بسیار کم خواهد بود.

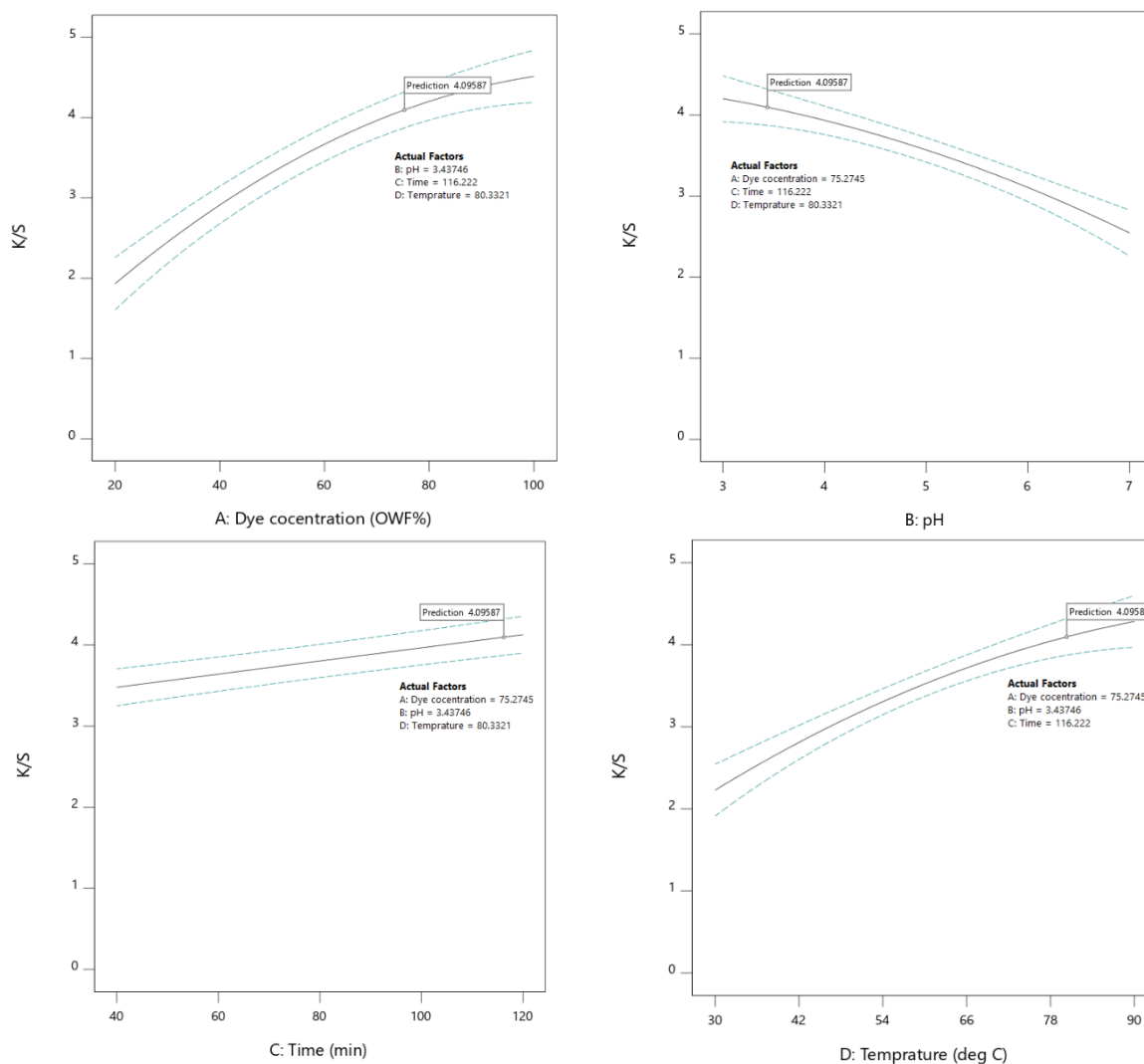


شکل ۲: برازش نقاط پیش‌بینی شده در مدل سطح پاسخ.

Figure 2: Goodness of fit for the RSM model.

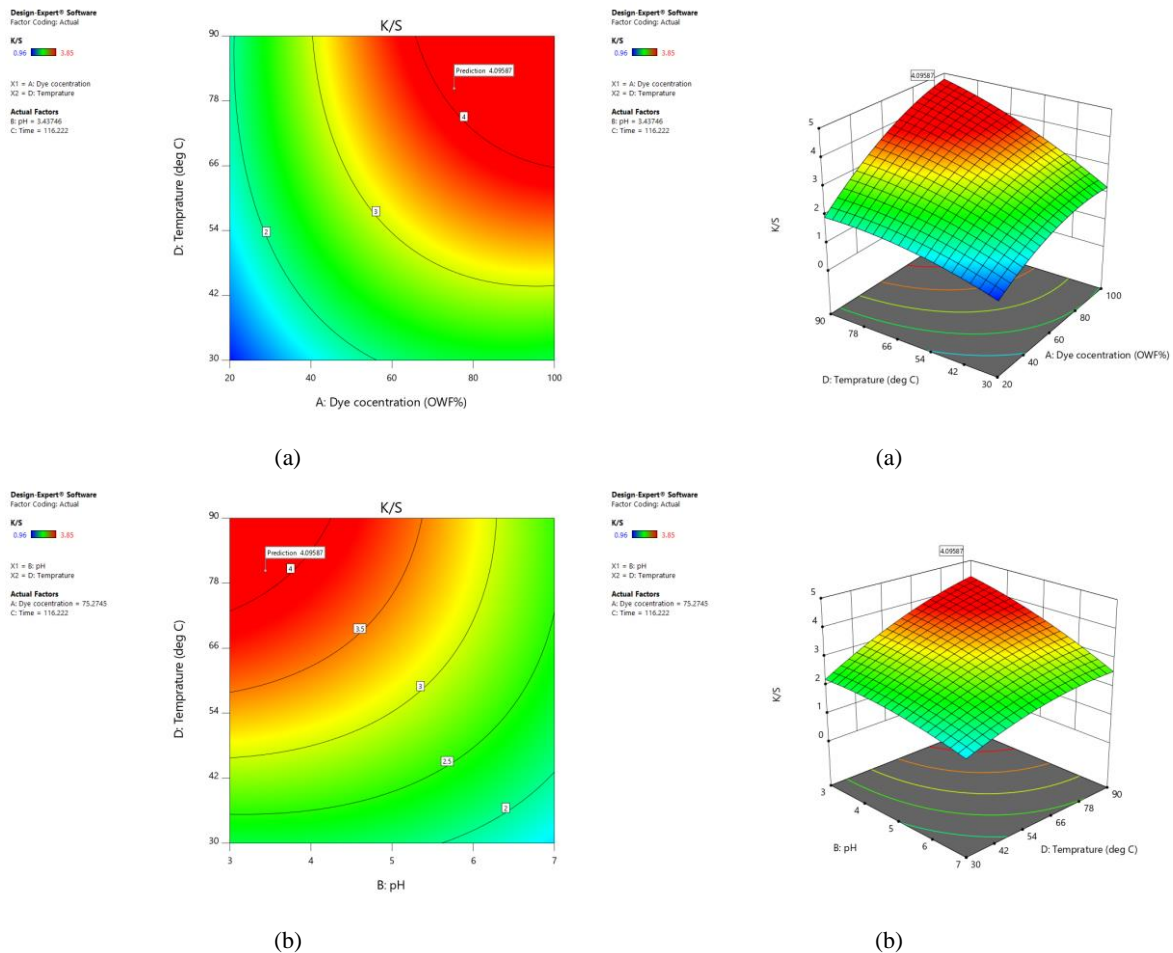
مستقل نسبت به یک نقطه مرجع، نمودار پریشانی در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد متغیرهای غلظت رنگزا، دما و زمان صعودی هستند و متغیر pH روندی نزولی دارد. با استفاده از این نمودار می‌توان میزان اثر هر یک از متغیرهای مستقل را بر متغیر وابسته در یک نقطه خاص بررسی نمود. نتایج نشان می‌دهد غلظت رنگزا بیشترین تأثیر را روی قدرت رنگ نمونه‌ها دارد. بعد از غلظت رنگزا، دما و pH حمام رنگرزی به ترتیب قدرت رنگ نمونه‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهند. در بین متغیرهای بررسی‌شده، زمان رنگرزی کمترین تأثیر را بر قدرت رنگ پارچه پشمی رنگرزی شده با گل بابونه داشته است. این موضوع به خوبی می‌تواند توسط مقایسه بزرگی عوامل F در جدول آزمون واریانس داده‌ها (جدول ۶) و همچنین مقایسه ضرایب عاملی در مدل رگرسیون (رابطه ۵) تأیید شود.

نتایج جدول ۶ نشان می‌دهند متغیرهای مشترک غلظت رنگزا-دما و pH-دما، مؤلفه‌های آماری معنادار در مدل ارائه شده می‌باشند. در شکل ۴، تأثیر متقابل غلظت رنگزا-دما و pH-دما در سطوح پاسخ دویبعدی و سه‌بعدی آورده شده است. نتایج بیانگر آن است که قدرت رنگ به همه متغیرهای رنگرزی - شامل غلظت رنگزا، دما، زمان و pH حساس است و با تغییر جداگانه یک یا دو متغیر نمی‌توان به وضعیت بهینه رسید. برای دستیابی به قدرت رنگ بالا در بازه ۳,۷۹ تا ۴,۰۹، حداقل غلظت رنگزای ۷۵ درصد، دمای بیش از ۸۰ درجه سانتی‌گراد، زمان رنگرزی حداقل ۱۱۶ دقیقه، و pH حداکثر ۳,۵ باید باشد. در مجموع، نتایج بر وجود یک ناحیه عملیاتی بهینه برای هر عامل و نیز بر ضرورت کنترل هم‌زمان متغیرها به منظور دستیابی به بیشینه قدرت رنگ تأکید می‌کند. به منظور بررسی تغییرات قدرت رنگ نمونه‌ها با تغییر متغیرهای



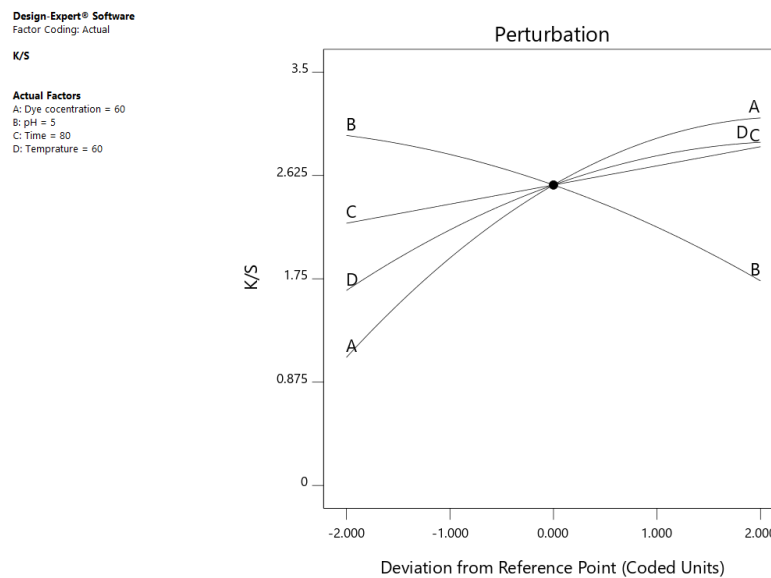
شکل ۳: تأثیر متغیرهای مستقل بر قدرت رنگ

Figure 3: Effect of independent variables on the K/S



شکل ۴: نمودارهای سه‌بعدی و کانتوری برهم‌کنش و کانتوری برهم‌کنش (a) غلظت رنگزا-دما و (b) pH-دما بر مقدار قدرت رنگی.

Figure 4: 3D surface and contour plots showing the interaction effects of (a) dye concentration and temperature, and (b) pH and temperature on color strength.



شکل ۵: نمودار پیریشانی اثر متغیرهای غلظت رنگزا، pH، دما و زمان بر پاسخ قدرت رنگ در مدل سطح پاسخ.

Figure 5: Perturbation plot illustrating the influence of dye concentration, pH, temperature, and dyeing time on the color strength response in the RSM model.

ثبات‌های نوری و شستشویی دارد. تحلیل طیف‌های بازتابی نمونه‌ها که در شکل ۶ ارائه شده است، این تأثیرات را نشان می‌دهند. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، تمامی نمونه‌های دندان‌گذاری شده، با یک فلز و با ترکیب دو فلز، شدت بازتاب کمتری نسبت به نمونه بدون دندان (کنترل) از خود نشان داده‌اند. این کاهش بازتاب، به‌ویژه در ناحیه ۴۰۰ تا ۴۳۰ نانومتر، بیانگر تشکیل کمپلکس‌های پایدار میان مولکول‌های رنگزا، یون‌های فلزی و گروه‌های عاملی لیف پشمی مطابق شکل ۷ است که موجب افزایش میزان رنگ تثبیت‌شده روی الیاف و افزایش جذب نور می‌شود (۴، ۲۰). بیشترین کاهش بازتاب در نمونه‌های دندان‌گذاری‌شده با ترکیبات Fe، Fe-Cu و Sn-Cu مشاهده شد که گویای افزایش جذب و در نتیجه ایجاد رنگ‌های عمیق‌تر و تیره‌تر است.

تأثیر این دندان‌ها بر فام و کیفیت رنگ با تحلیل عوامل رنگی L^* ، a^* ، b^* و C^* و h° که در جدول ۸ گزارش شده‌اند، کاملاً قابل مشاهده است. همان‌گونه که داده‌های جدول ۸ نشان می‌دهند، دندان‌هایی مانند آلومینیم و قلع، به‌صورت تکی و در ترکیب دوتایی، معمولاً رنگ‌هایی روشن‌تر و شفاف‌تر تولید می‌کنند. افزایش روشنایی در نمونه‌های دندان‌داده‌شده با آلومینیم و قلع با روشنایی ۶۸ تا ۷۲ در کنار افزایش مقدار b^* (۵۲ تا ۵۹) و زاویه فام (h°) نزدیک به ۸۵ تا ۸۹ نشان می‌دهد که این دندان‌ها فامی زرد روشن، شفاف و متمایل به زرد-طلایی ایجاد کرده‌اند. این رفتار را می‌توان به نحوه برهم‌کنش آلومینیم و قلع با رنگ‌سازهای فلاونوئیدی نسبت داد؛ به‌گونه‌ای که کمپلکس‌های حاصل نسبت به دندان‌های آهن و مس، تغییر کمتری در ساختار الکترونی رنگزا ایجاد می‌کنند (۲۰، ۲۱). در نتیجه جابجایی فام و توسعه نوار جذب در ناحیه مرئی محدودتر بوده و فام زرد طبیعی بابونه تا حد زیادی حفظ می‌شود. ترکیب Al-Sn که هم روشنایی بالاتر و هم زاویه فام ۸۹ دارد، روشن‌ترین و طبیعی‌ترین فام زرد را تولید کرده و نشان می‌دهد که این ترکیب کم‌ترین اثر تیره‌کنندگی و بیشترین توانایی در حفظ فام اصلی رنگزای بابونه را دارد. در مقابل، حضور آهن در ساختار دندان‌ها، تکی و ترکیب با دندان دیگر، موجب کاهش روشنایی، افزایش جذب ناحیه آبی-بنفش و در نتیجه تولید فام‌هایی تیره‌تر و متمایل به قهوه‌ای-زرد شده است.



برای اعتبارسنجی مدل، نمونه‌ای از الیاف پشم در شرایط بهینه رنگرزی شد. قدرت رنگ نمونه رنگرزی شده در غلظت ۷۵ درصد رنگزا، دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد، زمان رنگرزی ۱۱۶ دقیقه و pH ۳/۵ برابر ۴/۳۳ شد. طبق روش سطح پاسخ، مقدار بهینه پیش‌بینی شده قدرت رنگ برای پارچه پشمی در این شرایط برابر با ۴/۰۹ بود. جدول ۷ تحلیل مقایسه‌ای نتایج حاصل از فرایند بهینه‌شده با روش سطح پاسخ و آزمایش شماره ۷ (جدول ۲) از مجموع آزمایش‌های اولیه آورده شده است. داده‌های این جدول نشان می‌دهد درصد اختلاف قدرت رنگ در حالت تجربی و پیش‌بینی شده برای آزمایش شماره ۷ و نمونه رنگرزی شده در شرایط بهینه‌شده به ترتیب ۱/۵۵ و ۵/۵۴ می‌باشد. این مقادیر قابلیت اطمینان مدل را تأیید می‌کند. علاوه بر این، ارزیابی دیداری و تحلیل طیف‌سنجی نشان می‌دهد نمونه رنگ‌شده تحت شرایط بهینه‌شده با روش سطح پاسخ دارای مقادیر قدرت رنگ بالاتر و رنگ تیره‌تری نسبت به نمونه غیر بهینه‌شده (آزمایش ۷) می‌باشد. در شرایط بهینه، با افزایش ۱۶ دقیقه در زمان رنگرزی، افزایش ۵ درجه سانتی‌گراد در دما و کاهش ۰٫۵ واحد pH در حمام رنگرزی، مقدار قدرت رنگ به میزان ۰/۴۸ واحد (از ۳/۸۵ به ۴/۳۳) افزایش یافت؛ این در حالی است که میزان مصرف رنگزا نیز ۵ درصد (نسبت به وزن پارچه) کاهش پیدا کرد. کاهش هم‌زمان مصرف رنگزا در کنار دستیابی به عمق رنگ بیشتر، بیانگر بهبود توأمان کارایی فنی و اقتصادی فرایند است. از منظر صنعتی، کاهش مصرف مواد اولیه می‌تواند به طور مستقیم منجر به کاهش هزینه‌های فرایند و قیمت تمام‌شده محصول گردد. این یافته‌ها نشان‌دهنده اثربخشی روش سطح پاسخ در بهینه‌سازی فرایند رنگرزی الیاف پشم با رنگزاهای طبیعی و تأییدکننده پتانسیل آن در بهبود جذب رنگ در کاربردهای صنعتی است.

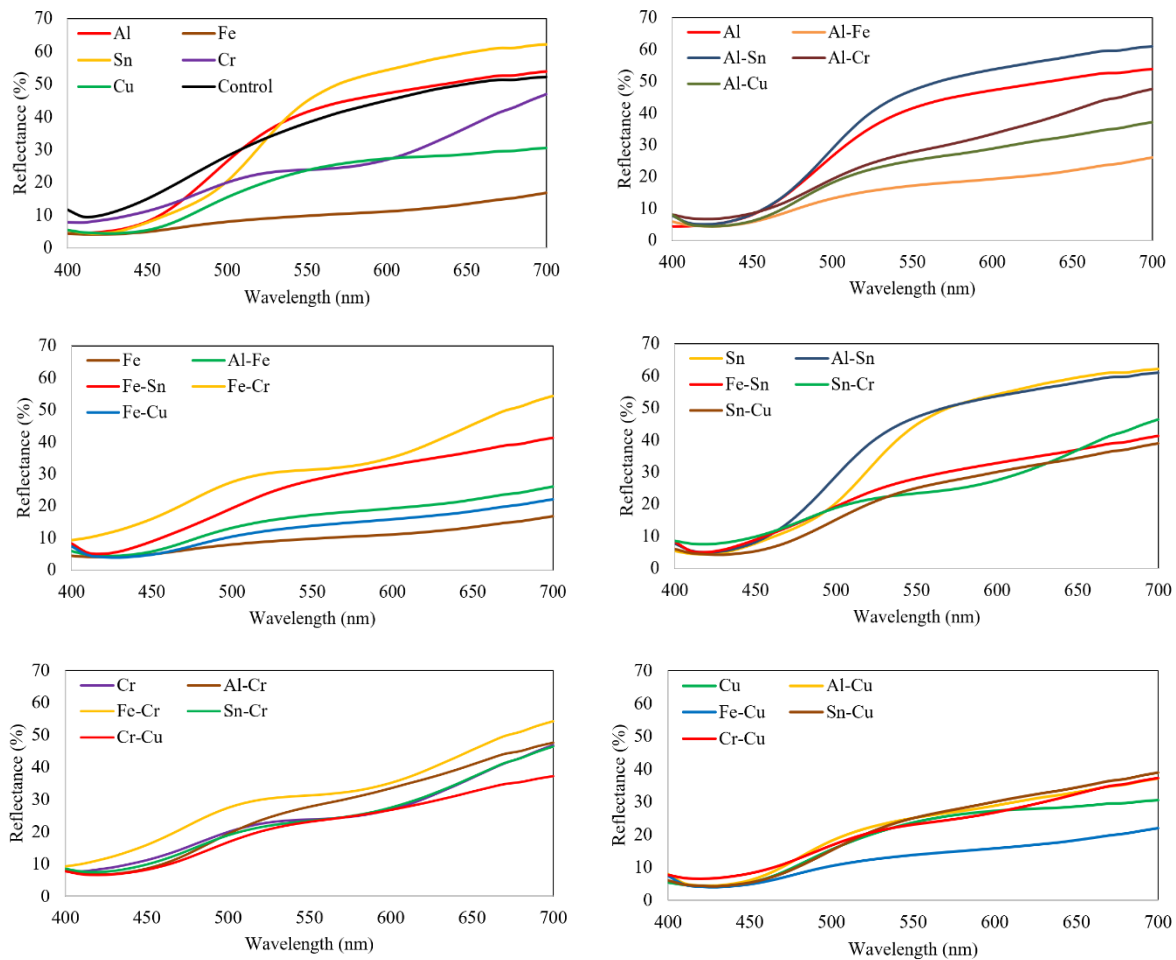
۲-۳- نتایج رنگ‌سنجی و ثباتی استفاده از دندان‌های تکی و دوتایی فلزی

بررسی عوامل رنگی پارچه پشمی رنگرزی شده با عصاره گل بابونه در حضور دندان‌های فلزی تکی و دوتایی نشان داد که نوع و ترکیب فلز نقش بسیار تعیین‌کننده‌ای در کیفیت رنگ، عمق رنگ، فام نهایی و

جدول ۷: مقایسه شرایط فرایند و قدرت رنگ قبل و بعد از بهینه‌سازی روش سطح پاسخ.

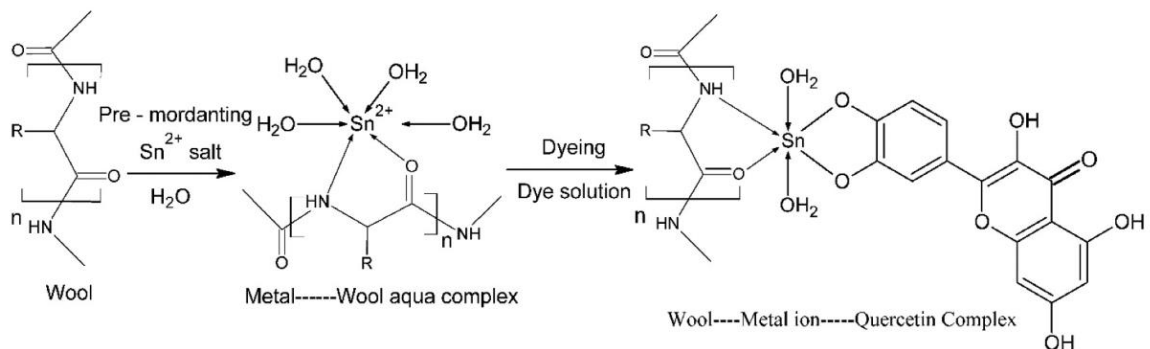
Table 7: Comparison of process parameters and color strength before and after RSM-based optimization

	Control parameter				Experimental Response	Predicted Response	Error (%)	Dyed samples
	A	B	C	D	K/S			
Run 7	80	4	100	75	3.85	3.79	1.55	
Optimum condition	75	3.5	116	80	4.33	4.09	5.54	
Difference	-5	-0.50	16	5	0.48	0.30	--	



شکل ۶: اثر دندانده‌های فلزی تکی و دوتایی بر طیف بازتابی الیاف پشمی رنگرزی شده با رنگزای طبیعی بابونه

Figure 6: Effects of single and binary metal mordants on the reflectance spectra of wool fibers dyed with chamomile natural dye



شکل ۷: شمایی از برهم‌کنش‌های میان لیف پشم، یون‌های فلزی و مولکول‌های رنگزای بابونه.

Figure 7: Schematic representation of the interactions between wool fiber, metal ions, and chamomile dye molecules.

مرئی، کاهش روشنایی و ایجاد فام‌های تیره‌تر و زرد-قهوه‌ای می‌شود (۲۲، ۲۳). ترکیب Fe-Cu نیز با روشنایی ۴۳ و مقدار زاویه فام حدود ۸۷، فامی عمیق ایجاد کرده است. این نتایج با پراکندگی داده‌ها در فضای a^*-b^* که در شکل ۸ ارائه شده هماهنگ است. نمونه‌های

نمونه تکی آهن با مقدار روشنایی برابر ۳۷ فامی نزدیک به زرد-قهوه‌ای تیره ایجاد کرده است. این رفتار را می‌توان به توان بالای Fe^{3+} در تشکیل کمپلکس‌های قوی با گروه‌های فنولی رنگزای بابونه نسبت داد که معمولاً منجر به گسترش ناحیه جذب در محدوده

















بالا‌ترین قدرت رنگ را در بین نمونه‌های دوجزئی نشان دادند؛ به‌گونه‌ای که مقدار قدرت رنگ آنها به‌ترتیب ۱۱,۸۴، ۱۰,۹۰، ۱۰,۴۱ و ۱۰,۳۶ ثبت شده است. دندان‌های تکی Fe، Cu و Sn نیز مقادیر ۱۱,۴۹، ۱۰,۵۷ و ۱۰,۶۰ را ایجاد کرده‌اند. در بین همه نمونه‌ها ترکیب Fe-Cu بیشترین قدرت رنگ را ایجاد کرده است. نتایج میانگین قدرت رنگی در طول موج‌های مختلف (جدول ۸) نیز نشان می‌دهند که روند کلی نتایج حفظ شده است و نمونه‌های Fe-Cu، Sn-Cu، Al-Cu و Al-Fe همچنان در میان نمونه‌های ترکیبی با قدرت رنگ بالاتر قرار دارند؛ بنابراین، برتری این نمونه‌ها تنها به یک طول موج خاص محدود نیست و با در نظر گرفتن مجموع ناحیه مرئی نیز قابل مشاهده است. این مقادیر به‌خوبی نشان می‌دهند که ترکیبات دوگانه (به‌ویژه ترکیبات حاوی آهن و مس)، برهم‌کنش قوی و در برخی موارد اثر هم‌افزایی میان مولکول‌های رنگزا، یون‌های فلزی و لیف پشمی ایجاد می‌کنند که به عمق رنگ بیشتر منجر می‌شود (۴، ۲۵).

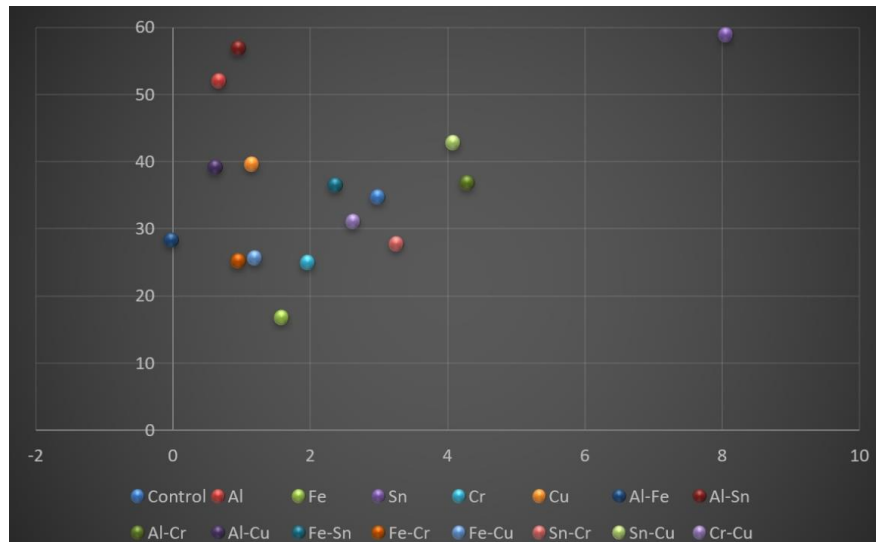
حاوی آهن در ناحیه پایین نمودار قرار می‌گیرند (a^* و b^* پایین‌تر)، جایی که فام به سمت زرد-قهوه‌ای و خاکی تغییر می‌کند. ترکیبات Sn، Sn-Cu و Al-Cu که مقدار b^* بالاتر از ۴۰ و زاویه فام در محدوده ۸۴ تا ۹۰ دارند، فام‌هایی زرد روشن، زرد-نارنجی و زرد گرم ایجاد کرده‌اند. ترکیب Sn-Cu با مقدار زردی برابر ۴۳ و زاویه فام ۸۴، یکی از گرم‌ترین فام‌های حاصل از رنگرزی پشم با بابونه را ایجاد کرده و فام آن به سمت زرد-نارنجی متمایل شده است. این ویژگی را می‌توان به تمایل بالای یون Cu^{2+} به تشکیل کمپلکس‌های پایدار با گروه‌های فنلی رنگزا و تقویت جذب در ناحیه آبی-بنفش طیف مرئی (حدود ۴۲۰-۴۵۰ نانومتر) نسبت داد که رنگ را به سمت فام زرد-نارنجی سوق می‌دهد (۲، ۲۴).

نتایج قدرت رنگ در طول موج بیشینه جذب که در جدول ۸ گزارش شده‌اند نیز کاملاً با این تحلیل‌ها مطابقت دارد. همان‌گونه که در جدول ۸ آمده، نمونه‌های Fe-Cu، Sn-Cu، Al-Cu و Al-Fe

جدول ۸: عوامل رنگ‌سنجی، قدرت رنگی و ثباتی پارچه پشمی دندان‌دار شده با دندان‌های فلزی تکی و دوتایی.

Table 8: Colorimetric parameters, color strength, and fastness properties of wool fabrics mordanted with single and binary metal mordants.

Name	L*	a*	b*	C*	h°	K/S	λ_{max}	(K/S) _{ave}	W.F.	L.F.	Dyed sample
Control	67.35	2.99	34.66	34.79	85.06	4.33	410	1.13	4	4	
Al	68.41	0.67	52.00	52.00	89.26	10.57	400	2.22	4-5	5	
Fe	37.04	1.58	16.74	16.82	84.59	11.49	420	5.39	5	6	
Sn	69.94	8.06	58.83	59.38	82.20	10.57	420	2.30	4	5-6	
Cr	55.80	1.97	25.00	25.08	85.49	5.49	410	1.83	4	5-6	
Cu	54.07	1.15	39.57	39.59	88.33	10.60	430	3.22	4	6	
Al-Fe	47.59	-0.02	28.25	28.25	90.04	10.36	420	3.54	4-5	5	
Al-Sn	71.85	0.96	56.86	56.86	89.03	9.02	420	1.88	4-5	5-6	
Al-Cr	58.94	4.29	36.79	37.04	83.35	6.43	420	2.00	4	5-6	
Al-Cu	55.98	0.62	39.16	39.17	89.09	10.41	420	2.78	4-5	5-6	
Fe-Sn	58.79	2.37	36.45	36.53	86.27	8.85	420	2.19	4	5-6	
Fe-Cr	62.76	0.96	25.18	25.20	87.81	4.44	400	1.20	4	5	
Fe-Cu	43.24	1.19	25.63	25.66	87.35	11.84	430	4.25	5	6-7	
Sn-Cr	55.44	3.26	27.69	27.88	83.29	5.67	420	1.95	4	5-6	
Sn-Cu	55.68	4.08	42.80	42.99	84.56	10.90	430	3.10	4	5-6	
Cr-Cu	54.32	2.63	31.05	31.16	85.15	6.67	420	2.31	4	5-6	



شکل ۸: پراکنش نمونه‌های پشمی دندانه‌دار شده در فضای رنگی a^*-b^* پس از رنگرزی با رنگزای طبیعی بابونه

Figure 8: a^*-b^* chromaticity distribution of metal-mordanted wool samples dyed with chamomile natural dye

دندانه‌های ترکیبی راهبردی مؤثر و پایدار برای بهبود عملکرد رنگزاهای طبیعی در صنعت نساجی می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که رنگرزی الیاف پشمی با رنگزای طبیعی گل بابونه، در صورتی که با تدوین یک راهبرد علمی مبتنی بر بهینه‌سازی آماری و استفاده هدفمند از دندانه‌های فلزی همراه شود، قابلیت تبدیل شدن به یک فرایند صنعتی پایدار و کارآمد را دارد. تحلیل سطح پاسخ نشان داد که متغیرهای غلظت رنگزا، pH، دما و زمان رنگرزی، هر یک تأثیر قابل توجهی بر قدرت رنگی دارند و مدل درجه دوم ارائه شده با دقتی بالا توانست رفتار سیستم را پیش‌بینی کند. شرایط بهینه مشخص شده در این مدل نه تنها موجب افزایش محسوس قدرت رنگ شد، بلکه مصرف مواد و انرژی را کاهش داد و بهره‌وری فرایند را ارتقا بخشید؛ موضوعی که از منظر اقتصاد صنعتی و پایداری زیست‌محیطی اهمیت فراوان دارد. همچنین بررسی عملکرد دندانه‌های فلزی نشان داد که ترکیب دندانه‌ها به‌ویژه آهن-مس، قلع-مس و آلومینیم-مس نسبت به دندانه‌های تکی، برهم‌کنش‌های قوی‌تری با مولکول‌های رنگزا ایجاد کرده و به تشکیل کمپلکس‌های پایدارتر منجر می‌شود. این ویژگی، افزایش عمق رنگ، ایجاد فام‌های غنی‌تر و بهبود قابل توجه ثبات شستشویی و نوری را به دنبال داشت. ثبات بالای نمونه‌های رنگ‌شده بیانگر آن است که ساختارهای فلاونوئیدی بابونه، در حضور یون‌های فلزی، شبکه‌ای مقاوم در برابر تخریب نوری و شستشو ایجاد می‌کنند و همین امر کارآمدی دندانه‌های ترکیبی را تقویت می‌کند. به طور کلی، ترکیب بهینه‌سازی فرایند با مهندسی دندانه‌های

کارایی دندانه‌های فلزی تکی و ترکیبی در افزایش پایداری رنگ نیز قابل توجه است. ثبات شستشویی همه نمونه‌ها بین درجه ۴ (بسیار خوب) تا ۵ (عالی) است. در نمونه‌های Fe و Fe-Cu ثبات شستشویی عالی (درجه ۵) بوده است. این نتیجه نشان می‌دهد که همه نمونه‌ها، حتی نمونه بدون دندانه، با توجه به اینکه بر اساس مقیاس ایزو درجه ۴ به عنوان ثبات شستشویی خوب و قابل قبول تعریف می‌شود، از ثبات شستشویی قابل قبولی برخوردار بوده‌اند. ساختار نسبتاً بزرگ رنگزاهای موجود در بابونه، در کنار برهم‌کنش‌های متعدد با لیف پشم، باعث می‌شود در شستشو سخت‌تر از لیف جدا شوند (۹، ۲۶). ثبات نوری نمونه‌های دندانه‌دار بین درجه ۵ تا ۷-۶ بوده است اما نمونه بدون دندانه ثبات نوری ضعیفی (درجه ۴) داشته است. ثبات نوری نمونه‌های حاوی Fe و Cu در محدوده ۶ تا ۷-۶ بوده است که نشان‌دهنده مقاومت در برابر تغییر فام و تجزیه نوری است. سایر ترکیبات فلزی نیز ثبات نوری ۵ تا ۶-۵ داشته‌اند. ترکیبات Sn و Al نیز ثبات شستشویی و نوری مناسبی ارائه کرده‌اند، این ترکیبات فامی روشن ولی مقاوم ایجاد کرده‌اند. پایداری بالای نمونه‌های دندانه‌دار در برابر نور می‌تواند ناشی از تشکیل کمپلکس‌های پایدار رنگزا-فلز باشد که تخریب نوری و اکسایش رنگزا را دشوارتر می‌کنند (۲۵، ۲۷).

به طور کلی نتایج نشان می‌دهند دندانه‌های فلزی و ترکیب آنها قابلیت بسیار بالایی در ایجاد فام‌های مختلف و پایداری رنگ دارند. با استفاده از رنگزای بابونه و ترکیب دندانه‌های فلزی، فام‌های زرد بسیار روشن و طلایی تا زرد-قهوه‌ای تیره ایجاد شده است. ترکیب دندانه‌ها با ایجاد کمپلکس‌های پایدارتر، جذب رنگزا را تقویت کرده و مقاومت رنگ در برابر نور و شستشو را افزایش می‌دهند. از این‌رو، استفاده از

تشکر و قدردانی

این مقاله مستخرج از نتایج طرح تحقیقاتی اجرا شده به شماره قرارداد IGRN36M797 از محل اعتبارات معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهرکرد می‌باشد.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

فلزی یک رویکرد یکپارچه و علمی برای ارتقای عملکرد رنگرزی‌های طبیعی ارائه می‌دهد. این رویکرد می‌تواند به عنوان الگویی کاربردی برای توسعه رنگرزی سبز در صنعت نساجی مورد استفاده قرار گیرد و زمینه‌ساز جایگزینی تدریجی رنگزاهای سنتزی در محصولات با ارزش افزوده بالا باشد. آینده پژوهش در این حوزه می‌تواند شامل بررسی دندانه‌های با پایه گیاهی، توسعه روش‌های استخراج سبز و ارزیابی اثرات محیط‌زیستی در چرخه عمر محصول باشد؛ مسیری که می‌تواند به استقرار کامل فناوری‌های رنگرزی پایدار در صنعت نساجی کمک کند.

۵- مراجع

1. Hoque MB, Oyshi TH, Hannan MA, Haque P, Rahman MM, Shahid MA, et al. Unraveling the ecological footprint of textile dyes: A growing environmental concern. *Pollut Study*. 2024;5(2):3014. <https://doi.org/10.54517/ps.v5i2.3014>.
2. Tehrani M, Asadi Farsani T. Sustainable wool dyeing: Utilizing *Syzygium aromaticum* (clove bud) extract and plant-derived mordants. *Prog Color Colorant Coat*. 2025;18(3): 363–373. <https://doi.org/10.30509/pccc.2025.167426>. 1343.
3. El-Zawahry MM, El Khatib HS, Shokry GM, Rashad HG. One-pot robust dyeing of cotton fabrics with multifunctional chamomile flower dyes. *Fiber Polym*. 2022;23(8): 2234–2249. <https://doi.org/10.1007/s12221-022-4206-0>.
4. Safapour S, Rather LJ. Assessment of colorimetric and fastness properties of Prangos ferulacea (jashir) dyed wool yarns in conjunction with mixed metal mordant combinations via reflectance spectroscopy. *J Nat Fiber*. 2023;20(1): 2134267. <https://doi.org/10.1080/15440478.2022.2134267>.
5. Hosseinezhad M, Gharanjig K. Review on metal and natural mordants for dyeing fibers. *J Stud Color World*. 2021;10(4):21–30. <https://dori.net/dor/20.1001.1.22517278.1399.10.4.3.0>. [In Persian]
6. Shokrzadeh S, Razbin M, Ghaheh FS, Tehrani M, Sadrjahani, M. Optimizing the eco-friendly dyeing of wool and nylon fabrics with Prangos ferulacea (L.) Lindl using artificial intelligence. *Sci Report*. 2025;15(1):13267. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-97551-w>.
7. Aftab M, Ahmad T, Adeel S, Javed M. Ecofriendly process optimization of natural dye extraction from clove (*Syzygium aromaticum* L.) using response surface methodology and artificial neural network modeling. *Sustain. Chem. Pharm*. 2024;37: 101401. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101401>
8. Bahman H, Gharanjig K, Rouhani S, Tahvili A, Hosseinezhad M, Imani H, Mahmoudi nahavandi A. Optimization of dye extraction from madder by response surface methodology and study of dyeing properties. *J Color Sci Tech*. 2020;14(2):83-96. <https://dori.net/dor/20.1001.1.17358779.1399.14.2.1.1>. [In Persian]
9. Rafiei S, Valipour P, Alaie O, Hosseini 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]
10. Mansour R, Dhoub S, Sakli F. Dyeing properties of wool fabrics dyed with madder roots, chamomiles, pomegranate peels and apple tree branches bark aqueous extracts. *Trends in Textile & Fashion Design*. 2019;3: 628–633. <https://doi.org/10.32474/LTTFD.2019.03.000165>.
11. Menegazzo MAB, Giacomini F, Barros MASD. Study of wool dyeing with natural dye extracted from chamomile flowers. *J Nat Fiber*. 2020;17(2): 271–283. <https://doi.org/10.1080/15440478.2018.1489333>.
12. Mansour R, Dhoub S, Sakli F. UV protection and dyeing properties of wool fabrics dyed with aqueous extracts of madder roots, chamomiles, pomegranate peels, and apple tree branches barks. *J Nat Fiber*. 2022;19(2): 610–620. <https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1758280>.
13. Gawish SM, Helmy HM, Ramadan AN, Farouk R, Mashaly HM. UV protection properties of cotton, wool, silk and nylon fabrics dyed with red onion peel, madder and chamomile extracts. *J Text Sci Eng*. 2016;6(4): 1–13. <https://doi.org/10.4172/2165-8064.1000266>.
14. Barani H, Ahmadi S. Study on the color characteristics and fastness properties of dyed wool yarn with some yellow natural colorants. *Rajshomar J*. 2020;1(1):51–63. <https://doi.org/10.22077/rajshomar.2020.3404.1014>.
15. Kizil S, Kayabasi N, Arslan N. Determination of some agronomical and dyeing properties of dyer's chamomile (*Anthemis tinctoria* L.). *J Cent Eur Agr*. 2005;6(3): 403–408.
16. Marwala T, Leke CA. Handbook of machine learning: Volume 2: Optimization and decision making. World Scientific; 2019. <https://doi.org/10.1142/11425>
17. Eyupoglu S, Eyupoglu C, Merdan N. Investigation of dyeing behaviors of bio-mordanted wool fabric dyed with natural dye. *Fiber Polym*. 2025;1-15. <https://doi.org/10.1007/s12221-025-00858-8>.
18. Fernández-López JA, Angosto JM, Giménez PJ, León G. Thermal stability of selected natural red extracts used as food colorants. *Plant Food Human Nut*. 2013;68(1):11–17. <https://doi.org/10.1007/s11130-013-0337-1>.
19. Sadeghi-Kiakhani M, Hashemi E, Gharanjig K. Inorganic nanoparticles and natural dyes for production of antimicrobial and antioxidant wool fiber. *Biotech*. 2019; 9(12): 456. <https://doi.org/10.1007/s13205-019-1974-3>.
20. Malacaria L, La Torre C, Furia E, Fazio A, Caroleo MC, Cione E, et al. Aluminum (III), iron (III) and copper (II) complexes of luteolin: Stability, antioxidant, and anti-inflammatory properties. *J Mol Liq*. 2022;345: 117895.

21. Safapour S, Mazhar M, Abedinpour S. Broadening color shade range of *Rubia tinctorum* L. natural colorants on wool fibers via combination of metal mordants: Color characteristics and fastness studies. *J Nat Fiber*. 2023;20(1): 2157923. <https://doi.org/10.1080/15440478.2022.2157923>.
22. Ran JH, Shushina I, Priazhnikova V, Telegin F. Inhibition of mordant dyes destruction in Fenton reaction. *Adv Mater Res*. 2013;821: 493–496.
23. Tehrani M, Ahmadi S. Ecological dyeing of cotton fabrics with cochineal: Influence of bio-mordants on colorimetric and aging parameters. *Fiber Polym*. 2025;26: 3047–3060. <https://doi.org/10.1007/s12221-025-01006-y>
24. Su X, Liu X, Deng C, Deng X, Qu Y, Huang X. The chemical spectroscopic characterization of Cu^{2+} coordinated red sandalwood dyestuff and its dyeing properties. *SSRN Electronic J*. 2023. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4399280>.
25. Manian AP, Paul R, Bechtold T. Metal mordanting in dyeing with natural colourants. *Color Technol*. 2016;132(2): 107–113. <https://doi.org/10.1111/COTE.12199>.
26. Tang RC, Tang H, Yang C. Adsorption isotherms and mordant dyeing properties of tea polyphenols on wool, silk, and nylon. *Ind. Eng. Chem. Res*. 2010;49(19): 8894–8901. <https://doi.org/10.1021/IE100052B>.
27. Cristea D, Vilarem G. Improving light fastness of natural dyes on cotton yarn. *Dyes Pigm*. 2006;70(3):238–245. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2005.03.006>.

How to cite this article:

Tehrani M, Safi M. Wool Dyeing With Chamomile Natural Dye Through Statistical Optimization Using the Response Surface Methodology and Binary Metal Mordants. *J Color Sci Tech*. 2026;19(4):389-405. <https://doi.org/10.30509/jcst.2026.167762.1280> [In Persian]