

Application of Agricultural Industry Wastes in the Dyeing Process of Handwovens

Somayeh Baseri^{1*} 

1. *Corresponding Author*, Assistant Professor of Textile Design and Printing, Faculty of Art Department, Semnan University, Semnan, Iran

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received: 03 January 2024

Revised: 06 October 2024

Accepted: 03 November 2024

Keywords:

Handwovens, Dyeing, Amaranth, Pistacia shell, Response surface methodology.

ABSTRACT

Textile processing industries are one of the major hazardous sources from an ecological point of view that produce large amounts of toxic and dangerous waste containing heavy metals every year. Heavy metal accumulation and contamination in water and soil is a serious problem throughout the world due to their non-biodegradable nature, toxicity, abundant sources, and accumulative behavior in the environment. There is an urgent need to explore biocompatible and safe ways for textile dyeing industries to use environment benign route. Recently, there has been greater interest in the use of natural products in the dyeing industry due to improving international awareness of waste disposal, water pollution, and the environment. In the present work, Pistacia shell and Amaranth were considered as bio-compatible mordant and dye for the wool dyeing process. The research method is practical in terms of purpose and response surface methodology based on Box-Behnken Design (BBD) was used to design experiments and minimize the amount of consumables and production waste. The effects of three main parameters i. e. dyeing time, dye concentration, and citric acid concentration on the color performance of wool yarns were investigated and the optimum conditions were specified. The validity of the model for optimization and prediction of the process with a low number of experiments was established by experimental results (low difference between adjusted correlation coefficient (0.9832) and predicted coefficient value (0.9307)) and also by a high value of model correlation (0.9927). Also, it was found that all independent factors, the quadratic effect of dyeing concentration, and the interaction terms citric acid-dyeing concentration were significant at a confidence level of 95%. The results show that the Pistacia shell used as a bio-mordant can improve the affinity of wool yarns to the dye extract and obtain acceptable dye fastness properties. The use of Pistacia shell as a biodegradable and new sustainable bio-mordant in the dyeing industry resulted not only in increasing dyeing efficiency but also in minimizing the environmental problem of agricultural waste and byproducts. Hence, the proposed novel approach might serve as an excellent and economical replacement for the common metallic mordants and provide a space for new businesses with value-added at no environmental costs.

Cite this article: Baseri, S. (2025). Application of Agricultural Industry Wastes in the Dyeing Process of Handwovens. Journal of Natural Environmental Hazards, 14(43), 1-18. DOI: 10.22111/jneh.2024.47634.2015



© Somayeh Baseri

Publisher: University of Sistan and Baluchestan


DOI: 10.22111/jneh.2024.47634.2015

* Corresponding Author Email: Baseri@semnan.ac.ir



مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۴، شماره ۴۳، پیاپی ۱، بهار ۱۴۰۴

کاربرد پسماندهای صنایع کشاورزی در فرآیند رنگرزی دستبافته‌ها

سمیه باصری^{۱*} 

۱. استادیار طراحی و چاپ پارچه، دانشکده هنر، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران (نویسنده مسئول)

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۱۳	
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۳/۰۷/۱۵	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۱۳	
واژه‌های کلیدی:	
دستبافته‌ها، رنگرزی، تاج خروس، پوست پسته، رویه - پاسخ.	

صنایع رنگرزی یکی از مهم‌ترین منابع آلاینده محیط‌زیست بوده است که سالانه مقادیر زیادی پساب سمی و خطرناک حاوی فلزات تولید می‌کنند. آلودگی و انباشت فلزات سنگین در خاک و آب به سبب تجزیه‌ناپذیر بودن و انباشت آنها در محیط، فراوانی منابع آلاینده و سمیت، مشکلی جدی در سطح جهان است. امروزه ارائه راه‌کارهای ایمن و سازگار با محیط‌زیست در صنایع رنگرزی دستبافته‌ها، یک مسئله مهم است و دانشمندان را ترغیب نموده تا با جدیت بیشتری درصدد یافتن راه حل باشند. در سال‌های اخیر افزایش آگاهی عمومی در مورد محیط‌زیست، اکولوژی و کنترل آلودگی سبب ترغیب صنایع نساجی به استفاده از مواد طبیعی شده است. در این راستا در این پژوهش برای اولین بار از پوست پسته و تاج خروس به‌عنوان زائدات صنایع کشاورزی برای رنگرزی زیست‌سازگار نخ پشمی استفاده شد. روش پژوهش از نظر هدف کاربردی است و به منظور به حداقل رساندن میزان مواد مصرفی و زباله‌های تولیدی، از روش آماری رویه پاسخ از روش آماری رویه سطح پاسخ و از روش طراحی باکس - بهنکن بر پایه روش فاکتوریل ناقص سه سطحی استفاده شد. اثر سه پارامتر غلظت رنگزا، غلظت سیتریک اسید و مدت زمان رنگرزی بر میزان قدرت رنگی نسبی نمونه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت و بر اساس آنها شرایط بهینه رنگرزی معرفی شد. نتایج حاصل از ضرایب همبستگی که اختلاف کمی را بین ضریب تنظیم‌شده (۰/۹۸۳۲) و ضریب پیش‌بینی‌شده (۰/۹۳۰۷) نشان داد و همچنین ضریب همبستگی بالای مدل (۰/۹۹۲۷) نشان داد که روش رویه - پاسخ قادر است تا فرآیند رنگرزی پشم با رنگزای تاج‌خروس را با تعداد کمی از آزمایش‌ها، پیش‌بینی و بهینه‌سازی کند. همچنین تمامی متغیرهای مستقل مورد بررسی در این پژوهش، مربع غلظت رنگزا و تداخل همزمان متغیرهای غلظت رنگزا و سیتریک اسید، با سطح اطمینان ۹۵٪ بر متغیر پاسخ (قدرت‌رنگی نسبی) معنی‌دار و مؤثر می‌باشند. استفاده از بیودندانه زیست‌سازگار پوست پسته در رنگرزی پشم با عصاره تاج‌خروس منجر به بهبود میزان جذب رنگ توسط الیاف شده و ثبات‌های عمومی قابل‌قبولی را حاصل می‌سازد. استفاده از پوست‌پسته به‌عنوان یک بیودندانه زیست‌تخریب‌پذیر و پایدار جدید در صنایع رنگرزی نه تنها منجر به افزایش راندمان رنگرزی می‌شود، بلکه در به حداقل رساندن مشکلات زیست‌محیطی ضایعات کشاورزی و محصولات جانبی نیز مفید خواهد بود. بنابراین این روش می‌تواند به‌عنوان یک جایگزین عالی و اقتصادی برای دندانه‌های فلزی متداول در نظر گرفته شود و کمک شایانی به کاهش آلودگی محیط‌زیست و تولید مواد با ارزش افزوده بالا نماید.

استناد: باصری، سمیه. (۱۴۰۴). کاربرد پسماندهای صنایع کشاورزی در فرآیند رنگرزی دستبافته‌ها. مخاطرات محیط طبیعی، ۱۴(۴۳)، ۱-۱۸.

DOI: 10.22111/jneh.2024.47634.2015



© سمیه باصری.

ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان

مقدمه

آلودگی آب و خاک از جمله مهم‌ترین مشکلات زیست‌محیطی است که در سراسر دنیا حیات موجودات زنده به-خصوص انسان را با خطری جدی مواجه ساخته است. در دهه‌های اخیر توسعه صنعتی و شهری جوامع، استفاده از انواع مواد شیمیایی، ضایعات و لجن حاصل از فاضلاب‌های صنعتی سبب افزایش میزان غلظت آلاینده‌ها در محیط-زیست شده است. این موضوع می‌تواند عامل محدودکننده مهمی در راستای توسعه پایدار جوامع به‌ویژه در صنایع تولیدی باشد. صنایع نساجی به‌عنوان یکی از صنایع مادر، از جمله عمده‌ترین آلاینده‌های محیط‌زیست می‌باشند که مقادیر زیادی پساب سمی و خطرناک تولید کرده و در بسیاری از موارد آنها را مستقیماً وارد رودخانه‌ها، کانال‌ها و جویبارها می‌نمایند. به منظور تولید یک تن منسوج، بیش از ۲۷۰-۲۳۰ تن آب استفاده می‌شود. پساب به‌جامانده از این آب حاوی مقادیر زیاد مواد شیمیایی، فلزات سنگین، مقادیر بالای اکسیژن‌خواهی شیمیایی^۱ و اکسیژن‌خواهی زیست شیمیایی^۲ می‌باشد (Mirjallili et al., 2011). همچنین در دنیای مدرن امروز، از رنگزاهای شیمیایی متعدد برای رنگرزی منسوجات استفاده می‌شود. اغلب رنگزاهای شیمیایی که از منابع پتروشیمی و نفتی حاصل می‌شوند، از طریق فرآیندهای شیمیایی خطرناک تولید شده و از این‌رو تهدیدی مهم برای سلامت انسان و محیط‌زیست می‌باشند. در این زمینه گزارش شده است که بیش از ۱۰۰۰۰ نوع رنگزاهای شیمیایی مختلف در صنایع نساجی استفاده می-شود و بیش از ۷۰۰۰۰۰ تن رنگزاهای سنتتیک در جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد (Ogugbue, 2011; Ayele et al., 2020). به‌دلیل ناکارآمدی فرآیندهای رنگرزی و عدم کنترل و ضعف مدیریت پساب‌ها، سالیانه حدود ۲۰۰۰۰۰ تن از این رنگزاهای به‌عنوان آلاینده وارد محیط‌زیست می‌شوند (Ayele et al., 2020). تعدادی از این آلاینده‌ها سمی بوده و تعدادی دیگر باعث جهش در موجودات زنده آبی می‌شوند. رهاسازی این پساب‌های آلوده در آب‌های سطحی و زیرزمینی، زندگی آبزیان را مختل نموده و با توجه به ساختار مولکولی پایدار آنها، در برابر تجزیه شیمیایی و یا بیولوژیکی مقاوم بوده و مشکلات محیط‌زیستی متعددی را ایجاد می‌نمایند (Mahnoodi and Arami, 2009). بنابراین، آلودگی آب‌ها با مواد شیمیایی و فلزات سنگین و حفاظت از محیط‌زیست به یک چالش بزرگ برای صنایع نساجی تبدیل شده است و مقررات سخت‌گیرانه‌ای توسط سازمان‌های محیط‌زیستی در نظر گرفته شده است. در راستای کاهش خسارت به محیط‌زیست با کاهش مصرف انرژی و تولید زباله و حذف مواد شیمیایی خطرناک از زنجیره فرآیندهای نساجی، دو راه‌کار مهم وجود دارد. راه‌کار اول، بهینه‌سازی فرآیندها و ماشین‌آلات رنگرزی با مواد رنگزای شیمیایی می‌باشد و راه‌کار دوم، جایگزینی مواد طبیعی با مواد شیمیایی و توسعه زمینه فناوری و استفاده از مواد پایدار، زیست‌سازگار، تجدیدپذیر و دوست‌دار محیط‌زیست در فرآیندهای نساجی می‌باشد (Li et al., 2020; Baseri, 2022; Macchi et al., 2021; Zhang et al., 2022; Baseri 2022; Zeng et al., 2020).

از اواسط سال ۱۹۶۰، افزایش آگاهی عمومی در مورد محیط‌زیست، اکولوژی و کنترل آلودگی سبب ترغیب صنایع به استفاده از رنگزاهای طبیعی شد. امروزه صنعت رنگرزی بیش‌از پیش تلاش می‌کند تا آلاینده‌های سمی را کاهش داده و تولید رنگدانه‌ها یا رنگزاهای خطرناک را متوقف سازد (Mirjallili et al., 2011). مواد رنگزای طبیعی از انواع منابع گیاهی، حیوانی و معدنی به‌دست می‌آیند و زیست‌تخریب‌پذیر، تجدیدپذیر و سازگار با محیط‌زیست بوده و

1 COD
2 BOD

برای انسان نیز ضدسرطان، ضدحساسیت و غیرسمی می‌باشند. علاوه بر این بعضی از رنگزاهای طبیعی دارای خواصی چون ضدبو، ضد باکتری و جذب پرتو فرابنفش نیز می‌باشند (Baseri, 2020; Khattab et al., 2020; Zhang et al., 2022; Dias et al., 2020). بنابراین، یافتن مواد رنگزای طبیعی ارزان قیمت با قابلیت تجزیه بیولوژیکی که زیست‌سازگار و در دسترس باشند و همچنین بهینه‌سازی فرآیند کاربرد آنها در صنعت رنگرزی به‌ویژه رنگرزی دستبافته‌ها بسیار حایز اهمیت است. در این راستا در این پژوهش از گیاه تاج‌خروس به‌عنوان یک رنگزای دوستدار محیط‌زیست و جایگزین خوش آتیه برای مواد رنگزای سنتتیک سمی استفاده شده است.

گیاه تاج‌خروس^۱ گیاهی سریع‌الرشد، علفی، پرطاقت، علف هرز و شبه غله بوده و متعلق به خانواده *Amaranthaceae* می‌باشد. این گیاه در نقاط مختلف جهان از جمله ایران می‌روید و دارای ۶۰ گونه می‌باشد که اکثر آنها وحشی بوده و بیشتر به‌عنوان علف هرز و تزیینی مطرح می‌باشند (انصاری اردلی و آقاعلیخانی، ۱۳۹۴). این گیاه از جمله گیاهان پهن برگ است که دارای مسیر فتوسنتزی چهار کربنه بوده و دارای متابولیسم شدید نیتروژن و دارای کارایی بالای فتوسنتز می‌باشد. تاج‌خروس به شرایط خشکی مقاوم بوده و برای کشت در مناطق خشک و کم باران و برای کاهش هزینه‌های آبیاری مناسب می‌باشد. در ایران نیز بیشتر از این گیاه به‌عنوان علوفه در جیره نشخوارکنندگان استفاده می‌شود (صفایی و همکاران، ۱۳۹۵). این در حالی است که تاج‌خروس منبعی غنی از مواد زیست‌فعال چون ترکیبات پلی‌فنلی (به خصوص روتین، کوئرستین گلاکتوزید و کامپفرول روتینوزید)، فلاونوئیدها، آلکالوئیدها، تانن‌ها، اسیدهای فنلی و بتاکاروتن می‌باشد (Manyelo et al., 2020). مهم‌ترین اسیدهای فنلی موجود در تاج‌خروس کافئیک اسید، فرولیک اسید، وانیلیک اسید، پی‌کوماریک اسید، سینامیک اسید، کلروژنیک اسید و پی‌هیدروکسی بنزوئیک اسید می‌باشند (Ogrodowska et al., 2012). اگرچه در ایران مطالعاتی در زمینه تاج‌خروس و خصوصیت‌های کمی، آنتی-اکسیدانی و ارزش علوفه‌ای آن انجام شده است (سیاری و همکاران، ۱۴۰۰؛ صفایی و همکاران، ۱۳۹۵)؛ اما تاکنون استفاده از آن به‌عنوان یک رنگزای زیست‌سازگار در صنعت رنگرزی مورد مطالعه قرار نگرفته است. این در حالی است که تاج‌خروس به‌عنوان یک علف هرز به میزان زیادی در کشور ما موجود بوده و به‌دلیل برخورداری از ترکیبات فعال زیستی متعدد، می‌تواند گزینه بسیار مناسبی برای استفاده در رنگرزی زیست‌سازگار باشد.

علی‌رغم خواص محیط‌زیستی بسیار عالی رنگزاهای طبیعی، در رنگرزی با این رنگزاهای محدودیت‌هایی نیز وجود دارد. از جمله اینکه رنگزاهای طبیعی اغلب از جذب رنگ کمی برخوردار بوده، ثبات شستشویی خوبی نداشته و بازده رنگی آنها نیز کم می‌باشد. به منظور برطرف نمودن این مشکلات و همچنین ایجاد تنوع در طیف رنگی، از انواع دنداندهای فلزی در رنگرزی با آنها استفاده می‌شود. دنداندهای فلزی که نمک‌های فلزات چندظرفیتی هستند، با تشکیل کمپلکس پایدار از طریق اتصال کوئوردینانس میان مولکول‌های رنگ و لیف باعث بهبود جذب رنگ و خصوصیت‌های ثباتی کالای نهایی می‌شوند. این در حالی است که متأسفانه بخش مهمی از این فلزات با لیف واکنش نداده، وارد پساب شده و با ورود این پساب به چرخه آب، مشکلات محیط‌زیستی متعددی پدیدار می‌گردد. ورود این فلزات زیست تجزیه‌ناپذیر و سمی به چرخه آب نه تنها سبب ایجاد تغییرات در اکوسیستم می‌شود، بلکه باعث تهدید زندگی موجودات آبی و ماهیان اعم از وحشی یا پرورشی می‌شود. همچنین این فلزات سنگین سبب

آلودگی خاک و از بین رفتن ارزش کشاورزی خاک شده و با نفوذ به طبقات زیرین زمین، آب‌های زیرزمینی را نیز آلوده می‌سازند (Obinna and Ebere, 2019; Rehman et al., 2022). با توجه به ضرورت انجام اقدامات لازم در راستای به حداقل رساندن آلودگی‌های محیط‌زیستی صنایع و اهمیت حفاظت از محیط‌زیست، یافتن بیودندانه‌های زیست‌سازگار و تجزیه‌پذیر اقتصادی و جایگزین نمودن آنها با دندانه‌های فلزی در صنعت رنگرزی بسیار حایز اهمیت است. در این راستا در این پژوهش از پوست پسته به‌عنوان یک دندانه زیستی ارزان قیمت و در دسترس که قابلیت تجدیدپذیری مناسبی نیز دارد، به منظور بهبود جذب رنگزای طبیعی تاج‌خروس توسط الیاف پشمی استفاده شده است تا با محوریت قرار دادن پسماندهای کشاورزی و استفاده بهینه از آنها زمینه‌ساز کاربردهای جدید آنها در صنایع نساجی و معرفی موادی با حداقل هزینه اقتصادی شده و به توسعه پایدار کشور کمک شایانی نماید.

پسته یکی از مهم‌ترین محصولات کشاورزی ایران است که حدوداً دارای ۴۰٪ پوست سبز می‌باشد. پوست پسته که هنگام فرآوری از میوه جدا می‌شود، ذاتاً فسادپذیر بوده و با گذشت چند روز سیاه، گندیده و کپک زده می‌شود. به تدریج این ضایعات مورد هجوم حشرات مزاحم قرار گرفته و موجبات آلودگی فزاینده محیط‌زیست خواهند شد. همچنین بستر مناسبی برای زمستان‌گذرانی اسپرژیلوس ایجاد نموده که این امر نه تنها مبارزه با گسترش زهرا به آفلاتوکسین را مشکل می‌سازد؛ بلکه به توسعه آن نیز کمک شایانی می‌نماید. بنابراین، مطالعه بر روی ترکیبات فعال‌زیستی این بخش از محصول پسته و کاربردی نمودن آن در صنعت، می‌تواند افق‌های جدیدی را در تولید و بهره‌برداری بیشتر پسته ایجاد نموده و کمک شایانی به کاهش آلودگی محیط‌زیست و تولید مواد با ارزش افزوده بالا نماید. از این رو و با توجه به یافتن اهداف توجیهی برای ضایعات پسته با استفاده از روش‌های نوین فرآوری، در این پژوهش تلاش شد تا ترکیبات فنلی موجود در پوست پسته را استخراج نموده و از آن به‌عنوان یک بیودندانه ارزان قیمت و در دسترس برای رنگرزی نخ پشمی با رنگزای تاج‌خروس استفاده شود تا به این ترتیب نه تنها کمک به کاهش حجم آن در محیط و برطرف شدن مشکل دفع آن گردد؛ بلکه آلودگی‌های محیط‌زیستی ناشی از دندانه‌های فلزی و فلزات سنگین را نیز بر طرف نمود. برای دستیابی به اهداف اصلی، پاسخ دادن به سؤالات ذیل مورد توجه قرار گرفت:

۱- چگونه می‌توان از ترکیبات زیست‌فعال موجود در تاج‌خروس و پوست پسته برای صنایع رنگرزی استفاده نمود؟

۲- شرایط بهینه رنگرزی به منظور به حداقل رساندن میزان مواد مصرفی و زباله‌های تولیدی چیست؟

در راستای تحقق اهداف مطرح‌شده، ابتدا تلاش شد تا ترکیبات فنلی و تاننی موجود در تاج‌خروس و پوست پسته استخراج گردد و سپس به بررسی عوامل مهم در فرآیند رنگرزی و بهینه‌سازی شرایط رنگرزی نخ پشمی با رنگزای تاج‌خروس به روش طراحی آزمایش سطح پاسخ پرداخته شد.

داده‌ها و روش‌ها

الف- روش پژوهش و مواد اولیه

این پژوهش کاملاً تجربی بوده و داده‌ها در نتیجه آزمایشات به‌دست آمده است. در این پژوهش از نخ پشمی سفید مرینوس دولا با نمره نخ ۱۶۰ تکس استفاده شد که توسط صابون نانیونیک Nikogen SDN ساخت شرکت نیک فام

شیمی شسته شد. از زائادات گیاهی تاج‌خروس و پوست پسته به ترتیب به عنوان ماده رنگزا و بیودندانه استفاده شد. برای محلول‌سازی نیز از آب مقطر استفاده شده است. به منظور پودر نمودن تاج‌خروس و پوست پسته از آسیاب برقی ناسیونال استفاده شد و عملیات دندانه دادن و رنگرزی نمونه‌ها در ماشین رنگرزی آزمایشگاهی انجام شد. برای توزین مواد از ترازوی Tanita مدل 1210N با دقت ۰/۰۰۱ گرم استفاده شد. منحنی‌های انعکاسی، قدرت رنگی و مؤلفه-های رنگی نمونه‌های رنگرزی‌شده مختلف، توسط دستگاه طیف‌سنج انعکاسی مدل X-Rite Sp64 ساخت آمریکا، در محدوده ۷۰۰-۴۰۰ نانومتر زیر منبع نوری D65 با زاویه مشاهده‌کننده استاندارد ۱۰ درجه در فضای رنگی $L^* a^* b^*$ اندازه‌گیری شد.

ب- آماده‌سازی نخ‌های پشمی

به منظور عاری نمودن پشم از مواد زائد و چربی، ابتدا آنها را با محلول ۳ گرم بر لیتر صابون نانیونیک و ۱ گرم بر لیتر سدیم کربنات در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت زمان ۳۰ دقیقه شست‌وشو داده و سپس با آب گرم و بعد آب سرد به خوبی آبکشی و در نهایت خشک شدند (Baseri, 2022).

پ- تهیه رنگزای تاج‌خروس

پودر تاج‌خروس با محلول اتانول - آب ۴۰ v/v٪ مخلوط شد و در دمای محیط به مدت زمان ۴۸ ساعت در ظرفی تیره خیسانده و همزده شد تا مواد رنگزای موجود در آن در مرحله عصاره‌گیری راحتی‌تر از مواد نباتی جدا شده و راندمان عصاره‌گیری افزایش یابد. بعد از گذشت این مدت زمان، عصاره‌گیری در دمای جوش به مدت زمان ۹۰ دقیقه با استفاده از یک گرم‌کننده حرارتی مجهز به همزن مغناطیسی انجام شد. سپس اجازه داده شد تا دمای مخلوط تا دمای محیط سرد شود و در نهایت عصاره رنگزا توسط کاغذ صافی واتمن از تفاله جدا شد. به منظور افزایش راندمان، صاف کردن عصاره سه بار تکرار شد و عصاره به دست آمده در آن با دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد تغلیظ گردید (باصری، ۱۴۰۱).

ت- انتخاب عوامل مؤثر بر فرآیند رنگرزی و محدوده آنها

در ابتدا یکسری آزمایش‌های اولیه انجام شد و بر اساس نتایج حاصل از آنها، متغیرهای مهم در فرآیند رنگرزی و محدوده آنها مشخص گردید. به این ترتیب سه متغیر مستقل غلظت ماده رنگزا، غلظت سیتریک‌اسید و مدت زمان فرآیند به عنوان متغیرهای اصلی فرآیند در نظر گرفته شدند. سطوح هر یک از متغیرها بر اساس جدول شماره ۱ در نظر گرفته شد.

جدول ۱: متغیرهای مستقل و محدوده آنها در رنگرزی پشم با رنگزای تاج‌خروس (منبع: نگارندگان)

متغیرهای مستقل	سطح پایین	سطح بالا
غلظت رنگزا (% owf)	۵۰	۹۰
سیتریک‌اسید (% owf)	۰	۱۰
مدت زمان رنگرزی (min)	۴۰	۸۰

ث- طراحی آزمایش و توسعه معادله رگرسیون مدل

به منظور بررسی عوامل بالا و بهینه‌سازی فرآیند رنگ‌رزی نخ پشمی با رنگزای تاج خروس، از روش طراحی باکس - بهنکن استفاده شد. این روش طراحی آزمایش، بر پایه روش فاکتوریل ناقص سه سطحی استوار بوده و از کارایی بالایی برخوردار می‌باشد (Ferreira et al., 2007). طراحی آزمایش‌ها با استفاده از نرم‌افزار طراحی آزمایش Design Expert Version 12.0.3.0 با رویکرد سطح پاسخ و با انتخاب روش باکس - بهنکن انجام شد. بر این اساس ۱۷ نمونه نخ پشمی رنگ‌رزی شد و قدرت رنگی نسبی آنها در طول موج حداکثر جذب به‌عنوان متغیر پاسخ در نظر گرفته شد. در تمامی آزمایش‌ها شرایط انجام آزمایش و سایر عوامل ثابت نگه داشته شد. در هر آزمایش پس از آماده‌سازی حمام رنگ و رساندن دمای آن به ۳۰ درجه سانتی‌گراد، نمونه‌ها وارد حمام رنگ‌رزی شده و سپس دمای حمام با نرخ ثابت ۲ درجه سانتی‌گراد در دقیقه تا دمای جوش افزایش یافت و فرآیند رنگ‌رزی در دمای جوش به مدت زمان مورد نظر ادامه یافت. در نهایت دمای حمام رنگ‌رزی با سرعت ثابت ۲ درجه سانتی‌گراد در دقیقه تا دمای محیط کاهش یافت و نمونه‌ها پس از خروج از حمام، آبکشی و در دمای محیط خشک شدند. بررسی اثر هر یک از متغیرهای مستقل و همچنین اثرات متقابل آنها، در سطح اطمینان ۹۵٪ مورد ارزیابی قرار گرفت (باصری، ۱۴۰۲).

ج-دندانه دادن پشم با بیودندانه پوست پسته

به منظور دندانه‌دار کردن نخ‌های پشمی از روش آغشته کردن - انبار کردن استفاده شد (باصری و احمدزاده، ۱۴۰۱). به این ترتیب که نخ پشمی با عصاره ۲۰ درصد وزنی پوست پسته در نسبت حجم مایع به وزن کالای برابر با ۱:۲۵ در دمای جوش به مدت زمان یک ساعت عمل شد. سپس نمونه‌های پیش دندانه‌دار شده آبکشی، چلانده و در دمای محیط خشک شدند.

چ-اندازه‌گیری استحکام رنگ

نمونه‌های رنگ‌رزی شده در شرایط مختلف در فضا رنگ $CIE L^*a^*b^*$ (جعفری و همکار، ۱۳۹۷) توسط دستگاه اسپکتروفوتومتر انعکاسی مدل X-Rite Sp64 تحت زاویه مشاهده‌کننده استاندارد ۱۰ درجه و زیر منبع نوری استاندارد D65 در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۲۶٪ مورد ارزیابی قرار گرفتند. میزان قدرت رنگی نمونه‌ها بر اساس رابطه کیوبلکا - مانک اندازه‌گیری شد و قدرت رنگی نسبی نمونه‌ها از رابطه ۱ محاسبه شد.

$$RCS = \frac{K}{S_{raw}} \times 100 \quad (1)$$

در این رابطه K/S_{dye} و K/S_{raw} مقادیر قدرت رنگی نمونه رنگ‌رزی شده و نمونه اولیه می‌باشند (Baseri, 2020).

ح-اندازه‌گیری خواص ثباتی نمونه‌ها

ثبات نوری نمونه‌ها توسط معیار مقایسه شاخص آبی و با استفاده از استاندارد مؤسسه ملی استاندارد ایران به شماره ISIRI 205 اندازه‌گیری شد. همچنین ثبات شست‌وشویی نمونه‌های رنگ‌رزی شده بر اساس استاندارد ISIRI 10076 و با معیار خاکستری مورد ارزیابی قرار گرفت (Baseri, 2023).

خ-مشخصه‌های رنگی

برای اندازه‌گیری مشخصه‌های رنگی و مختصات رنگی نمونه‌های مختلف رنگرزی شده با عصاره رنگزای تاج‌خروس در شرایط بهینه و دندان‌دار شده با بیودندان پست‌پسته به روش پیش‌دندان، از دستگاه اسپکتروفتومتر انعکاسی مدل XRite SP-64 و نرم‌افزار Color I Control استفاده شد. اندازه‌گیری‌های انجام شده بر اساس استانداردهای ASTM E1331 و ASTM E308 در محدوده طول موج ۷۰۰ - ۴۰۰ نانومتر با فواصل ۱۰ نانومتری در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۲۶ درصد انجام گرفت. در کلیه موارد، محرکه رنگی پایه با احتساب منبع نوری D65 و مشاهده‌کننده ۱۰ درجه محاسبه شدند. ارزیابی نتایج در سیستم CIEL*a*b* انجام شده است. زاویه فام و خلوص رنگی نمونه‌های رنگرزی شده به ترتیب با استفاده از روابط (۲) و (۳) محاسبه شد.

$$Hue\ Angle = \begin{cases} \text{Arctan} \left(\frac{b^*}{a^*} \right) & \text{for } a^* > 0 \text{ and } b^* > 0 \\ 180 + \text{Arctan} \left(\frac{b^*}{a^*} \right) & \text{for } a^* < 0 \text{ and } b^* > 0 \\ 180 + \text{Arctan} \left(\frac{b^*}{a^*} \right) & \text{for } a^* < 0 \text{ and } b^* < 0 \\ 360 + \text{Arctan} \left(\frac{b^*}{a^*} \right) & \text{for } a^* > 0 \text{ and } b^* < 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$Chroma = \sqrt{(a^{*2} + b^{*2})} \quad (3)$$

در روابط بالا b^* درجه‌ی زردی یا آبی و مؤلفه‌ی a^* نشان‌دهنده‌ی درجه سبزی یا قرمزی نمونه‌ها می‌باشد. اگر مؤلفه- a^* در محدوده منفی قرار گیرد، بیانگر فاز سبز در نمونه‌ها و a^* مثبت معرف فام قرمز می‌باشد. همچنین b^* در محدوده منفی به مثبت به ترتیب بیانگر تغییر رنگ از فام آبی به زرد است. مؤلفه‌ی L^* بیانگر میزان روشنایی نمونه‌ها بوده و می‌تواند مستقل از تهرنگ اندازه‌گیری گردد. افزایش در روشنایی نمونه‌ها می‌تواند مبین انعکاس بیشتر آنها باشد. L^* در محدوده صفر تا ۱۰۰ قرار می‌گیرد. مقدار صفر معرف سیاه و مقدار صد معرف سفید می‌باشد (Baseri, 2022b).

با در نظر گرفتن نمونه خام اولیه به عنوان نمونه کنترل، می‌توان میزان تغییر خلوص، تغییر فام، تغییر روشنایی و اختلاف رنگی نمونه‌های رنگرزی شده را به ترتیب بر اساس روابط (۳)، (۴)، (۵) و (۶) محاسبه نمود.

$$\Delta C^* = C_S - C_C \quad (3)$$

$$\Delta H^0 = H_S - H_C \quad (4)$$

$$\Delta L^* = L_C - L_S \quad (5)$$

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta a^{*2} + \Delta b^{*2} + \Delta L^{*2})} \quad (6)$$

در روابط بالا اندیس S نشان‌دهنده نمونه رنگرزی شده و اندیس C مربوط به نمونه کنترل می‌باشد. جدول (۶) اثر دندان زبست‌سازگار پست‌پسته و رنگزای تاج‌خروس را روی مقادیر تغییر خلوص، تغییر فام، روشنایی و اختلاف رنگی نمونه‌ها نشان می‌دهد.

یافته‌های پژوهش

الف-طراحی آزمایش با روش باکس - بهنکن

به منظور به دست آوردن شرایط بهینه رنگریزی و استفاده حداقلی از منابع، اثر سه عامل مهم غلظت رنگزا، غلظت سیتریک اسید و مدت زمان رنگریزی بر راندمان فرآیند مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا آزمایشات بر اساس جدول شماره ۲ انجام شد و داده‌های تجربی حاصل گشت.

جدول ۲: طراحی آزمایش‌ها و مقدار قدرت رنگی نسبی نمونه‌ها در رنگریزی با رنگزای تاج خروس (منبع: نگارندگان)

شماره آزمایش	متغیرهای مستقل			متغیر وابسته
	رنگزا	سیتریک اسید	زمان	قدرت رنگی نسبی
۱	۷۰	۵	۶۰	۱۲/۰۶۶
۲	۵۰	۱۰	۶۰	۸/۰۴۱
۳	۷۰	۵	۶۰	۱۱/۸۲۰
۴	۹۰	۰	۶۰	۱۱/۵۹۱
۵	۷۰	۱۰	۴۰	۱۲/۰۵۱
۶	۹۰	۱۰	۶۰	۱۴/۸۹۸
۷	۵۰	۵	۴۰	۶/۹۵۱
۸	۷۰	۵	۶۰	۱۲/۱۶۸
۹	۷۰	۰	۸۰	۱۱/۶۶۱
۱۰	۹۰	۵	۸۰	۱۴/۵۳۲
۱۱	۷۰	۰	۴۰	۱۰/۲۲۸
۱۲	۵۰	۰	۶۰	۶/۶۷۴
۱۳	۷۰	۵	۶۰	۱۲/۲۱۴
۱۴	۹۰	۵	۴۰	۱۳/۱۲۵
۱۵	۵۰	۵	۸۰	۸/۲۴۹
۱۶	۷۰	۱۰	۸۰	۱۲/۹۵۸
۱۷	۷۰	۵	۶۰	۱۱/۵۴۳

ب-داده‌های آماری

مدل‌های مختلف روی داده‌های تجربی جدول شماره ۲ مورد برازش قرار گرفت و نتایج حاصل از آنالیز واریانس آنها در جدول شماره ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳: آنالیز واریانس حاصل از برازش مدل‌های مختلف روی داده‌های تجربی

مدل برازش شده	مقدار P ترتیبی	عدم برازش مقدار P	ضریب همبستگی تنظیم شده	ضریب همبستگی پیش بینی شده
خطی	< ۰/۰۰۰۱	۰/۰۱۱۵	۰/۸۷۰۸	۰/۸۱۱۶
اثرات متقابل	۰/۷۶۹۰	۰/۰۰۷۱	۰/۸۴۹۳	۰/۶۴۶۱
درجه دوم	۰/۰۰۰۳	۰/۳۲۱۲	۰/۹۸۳۲	۰/۹۳۰۷
مکعبی	۰/۳۲۱۲		۰/۹۸۶۷	

به منظور بررسی اثر متغیرهای مورد بررسی و همچنین اثر متقابل آنها بر متغیر پاسخ، آنالیز واریانس داده‌ها بر اساس مدل چندجمله‌ای درجه دوم در فضای طراحی آزمایش انجام شد و نتایج در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول ۴: نتایج آنالیز واریانس مدل چندجمله‌ای درجه دوم برای بررسی اثر متغیرها

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار P	تأثیر متغیر
مدل	۹۳/۳۵	۹	۱۰۳۷	۱۰۵/۳۳	<۰/۰۰۰۱	معنی‌دار
A-رنگزا	۷۳/۴۰	۱	۷۳/۴۰	۷۴۵/۳۰	<۰/۰۰۰۱	
B-سیتریک‌اسید	۷/۵۹	۱	۷/۵۹	۷۷/۱۰	<۰/۰۰۰۱	
C-مدت زمان	۳/۱۸	۱	۳/۱۸	۳۲/۳۰	۰/۰۰۰۷	
AB	۰/۹۴۰۷	۱	۰/۹۴۰۷	۹/۵۵	۰/۰۱۷۵	
AC	۰/۰۰۳۰	۱	۰/۰۰۳۰	۰/۰۳۰۶	۰/۸۶۶۱	
BC	۰/۰۶۸۹	۱	۰/۰۶۸۹	۰/۶۹۹۵	۰/۴۳۰۶	
A ²	۷/۵۱	۱	۷/۵۱	۷۶/۲۵	<۰/۰۰۰۱	
B ²	۰/۴۴۶۲	۱	۰/۴۴۶۲	۴/۵۳	۰/۰۷۰۸	
C ²	۰/۰۳۲۴	۱	۰/۰۳۲۴	۰/۳۲۸۸	۰/۵۸۴۳	
خطای باقیمانده	۰/۶۸۹۳	۷	۰/۰۹۸۵			
عدم برازش	۰/۳۷۶۷	۳	۰/۱۲۵۶	۱/۶۱	۰/۳۲۱۲	بی‌معنی
خطای خالص	۰/۳۱۲۶	۴	۰/۰۷۸۲			
کل	۹۴/۰۴	۱۶				

ضریب همبستگی=۰/۹۹۲۷ ضریب همبستگی تنظیم‌شده=۰/۹۸۳۲ ضریب همبستگی پیش‌بینی‌شده=۰/۹۲۰۷

پ-داده‌های حاصل از ثبات رنگی

نتایج حاصل از اندازه‌گیری ثبات شست‌وشویی، نوری و لکه‌گذاری نمونه‌های حاصل از رنگرزی پشم با رنگزای تاج-خروس در جدول (۵) نشان داده شده است.

جدول ۵: ثبات شست‌وشویی ونوری نخ‌های پشمی رنگرزی‌شده با رنگزای تاج‌خروس در شرایط بهینه

نمونه‌ها	ثبات نوری	ثبات شست‌وشویی	
		تغییر رنگ	لکه‌گذاری روی پشم
رنگرزی	۴-۳	۴	۵-۴
بیودندانه و رنگرزی	۴	۴	۵-۴

نتایج و بحث

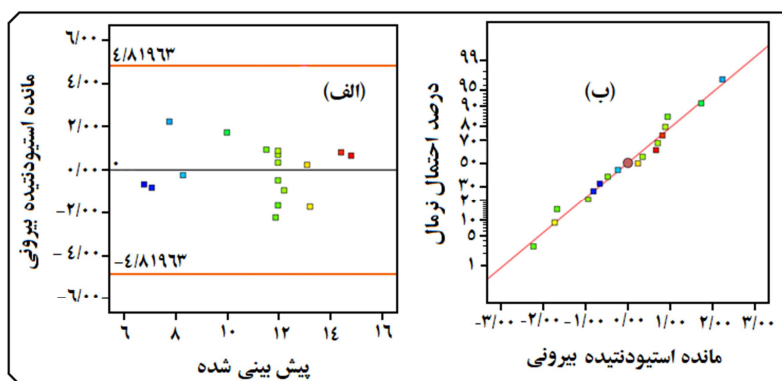
الف- تجزیه و تحلیل آماری و استخراج مدل رگرسیون

نتایج حاصل از آنالیز واریانس از برازش مدل‌های مختلف روی داده‌های تجربی (جدول ۳) به خوبی نشان می‌دهد که مدل درجه دو دارای مقدار متغیر پاسخ بسیار کمی بوده و درعین حال دارای بالاترین مقادیر ضرایب همبستگی

تنظیم شده و پیش‌بینی شده می‌باشد. بنابراین، مدل چندجمله‌ای درجه دوم بهترین مدل برای تطابق میان متغیرهای مستقل و وابسته در نظر گرفته شد و بر اساس آن آنالیز واریانس داده‌ها در فضای طراحی آزمایش انجام شد (جدول ۴). به‌طور کلی، در جدول آنالیز واریانس داده‌ها هرچه مقدار ضریب رگرسیون (F) یک متغیر مستقل بزرگ‌تر و مقدار متغیر پاسخ آن (p) کوچک‌تر باشد، میزان تأثیرگذاری آن متغیر در متغیر وابسته بیشتر است. با بررسی مقادیر متغیر پاسخ و ضریب رگرسیون متغیرها در جدول ۴، می‌توان چنین نتیجه گرفت که تمامی متغیرهای مستقل مورد بررسی در این پژوهش، مربع غلظت رنگزا و تداخل همزمان متغیرهای غلظت رنگزا و سیتریک اسید، با سطح اطمینان ۹۵٪ بر متغیر پاسخ (قدرت رنگی نسبی) معنی‌دار و مؤثر می‌باشند. در مقابل، عبارت‌های مربعی سیتریک اسید و مدت‌زمان و عبارت‌های مربوط به تداخل همزمان متغیرهای غلظت رنگزا و مدت‌زمان، غلظت سیتریک اسید و مدت‌زمان اثر معنی‌داری بر قدرت رنگی نمونه‌ها ندارند. به منظور بهبود دقت مدل، اثر متغیرهای غیرمؤثر از مدل حذف گردید و معادله مدل رگرسیون برای پیش‌بینی قدرت رنگی نسبی نمونه‌ها بر اساس متغیرهای مستقل استخراج و در رابطه ۲ نشان داده شده است.

$$RCS = 11/86 + 3/03A + 0/9742B + 0/6306C + 0/4850AB - 1/35A^2 \quad (2)$$

اعتبار مدل پیش‌بینی شده توسط مقادیر ضرایب همبستگی، آنالیز واریانس و نمودارهای باقیمانده و نرمال مورد ارزیابی قرار گرفت. همان‌طور که در جدول ۴ ملاحظه می‌گردد، مقدار ضریب همبستگی مدل ۰/۹۹۲۷ می‌باشد که به خوبی نشان‌دهنده اعتبار مدل است. همچنین، مقدار اختلاف ضرایب همبستگی تنظیم شده و پیش‌بینی شده کمتر از ۰/۲ می‌باشد که این موضوع خود تأییدکننده اعتبار مدل رگرسیونی است. از طرف دیگر، مقدار بسیار کم متغیر پاسخ برای معادله رگرسیون ($p < 0.0001$) نشان‌دهنده این است که مدل پیش‌بینی شده توسط نرم‌افزار به خوبی در سطح اطمینان ۹۵٪ با داده‌های تجربی منطبق شده است. نمودار مانده‌ها در مقابل مقادیر تطبیق یافته و همچنین نمودار تحلیل پراکندگی در شکل (۱) نشان داده شده است.



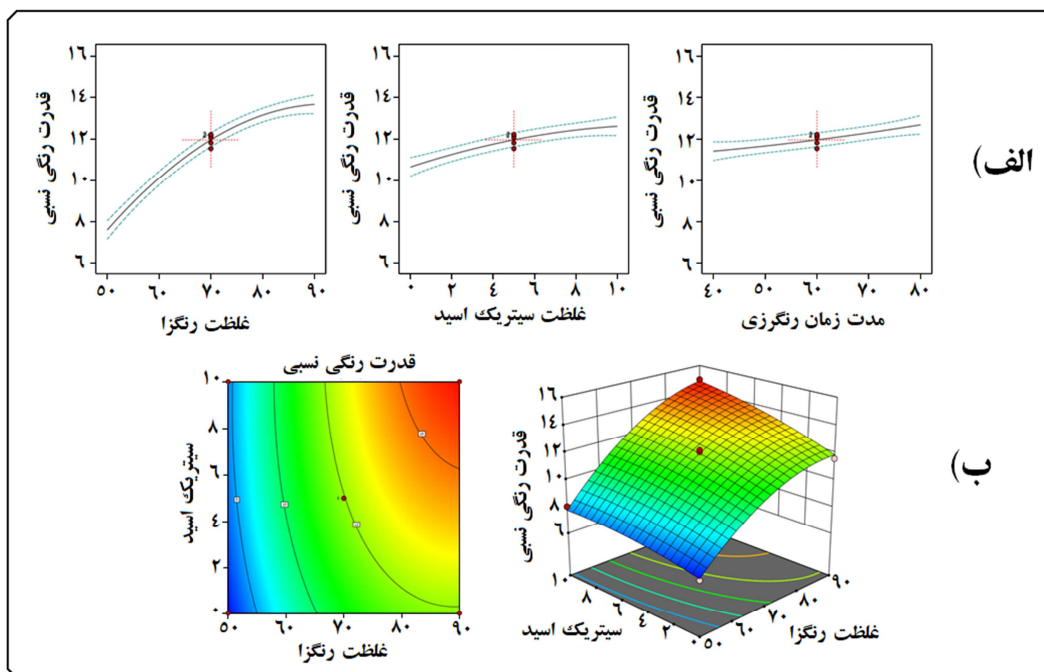
شکل ۱: (الف) نمودار مانده‌ها (ب) نمودار احتمال نرمال (منبع: نگارنده)

نمودار احتمال نرمال نشان می‌دهد که داده‌ها به خط رسم شده توسط نرم‌افزار بسیار نزدیک بوده، بنابراین خطای مدل بسیار کم است و داده‌های پیش‌بینی شده بسیار نزدیک به مقادیر تجربی می‌باشند. همچنین ملاحظه می‌گردد که در نمودار مانده‌ها در مقابل مقادیر تطبیق یافته، تمامی نقاط در محدوده خطوط قرمز رنگ قرار گرفته و به صورت

تصادفی در دو طرف خط صفر توزیع شده‌اند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مدل پیشنهادی از توانایی خوبی در پیش‌بینی مقادیر قدرت رنگی نمونه‌ها در محدوده تعیین شده برخوردار است.

ب- بررسی عوامل مؤثر در فرآیند رنگرزی بر قدرت رنگی نسبی

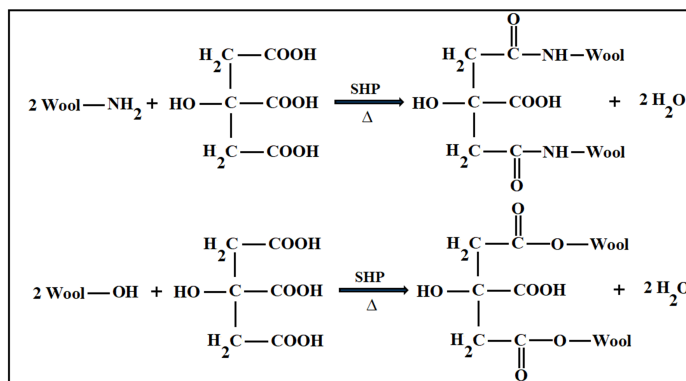
شکل (۲) اثر هر یک از متغیرهای مستقل و همچنین اثر همزمان دو متغیر مستقل زمانی که متغیر سوم در نقطه مرکزی قرار دارد را بر روی قدرت رنگی نسبی نمونه‌ها نشان می‌دهد.



شکل ۲: الف) اثر متغیرهای مستقل ب) اثرات متقابل متغیرها روی قدرت رنگی نمونه‌ها (منبع: نگارنده)

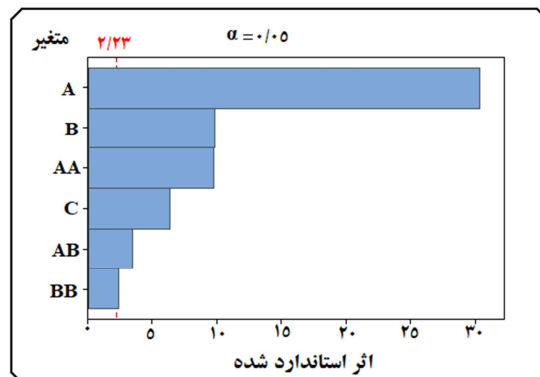
همان‌طور که در شکل (۲) ملاحظه می‌گردد، با افزایش غلظت رنگزای تاج‌خروس در حمام رنگرزی از ۵۰ تا ۹۰ درصد نسبت به وزن کالا، قدرت رنگی نسبی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. با افزایش غلظت ماده رنگزا، گرادیان غلظتی رنگزا افزایش یافته و نیروی بیشتری به‌منظور انتقال مولکول‌های رنگزا از درون حمام رنگرزی بر سطح الیاف حاصل شده و به این ترتیب جذب سطحی مولکول‌های ماده رنگزا بر سطح الیاف افزایش می‌یابد. این موضوع در نهایت منجر به نفوذ و تثبیت بیشتر مولکول‌های رنگزا در درون الیاف شده و قدرت رنگی نمونه‌ها را افزایش می‌دهد. همچنین به خوبی مشاهده می‌شود که مدت زمان‌های طولانی‌تر رنگرزی با رنگزای تاج‌خروس سبب افزایش قدرت رنگی نسبی نمونه‌های پشمی می‌گردد. به‌عبارت‌دیگر، می‌توان گفت که با افزایش مدت زمان رنگرزی، مولکول‌های رنگزا از زمان بیشتری برای نفوذ به درون الیاف برخوردار بوده و در نتیجه می‌توانند با گروه‌های عاملی بیشتری در زنجیرهای پلی-پپتیدی پشم واکنش دهند. بنابراین میزان جذب رنگ نمونه‌ها افزایش می‌یابد.

از جمله عوامل مهم در میزان جذب رنگ مواد رنگزای طبیعی توسط الیاف پروتئینی از قبیل پشم، pH فرآیند رنگرزی می‌باشد. در شکل (۲) ملاحظه می‌گردد که با افزایش غلظت سیتریک‌اسید در حمام رنگرزی، قدرت رنگی نسبی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، تاج‌خروس یک رنگزای طبیعی است که دارای ترکیبات فنلی متعددی می‌باشد. بنابراین از نظر یونی جزء رنگ‌های آنیونیک محسوب می‌شود. در محیط اسیدی، گروه‌های آمینوی انتهایی زنجیرهای پلی‌پپتیدی پشم پروتونه شده و از این رو می‌توانند به صورت یونی جذب گروه‌های هیدروکسیل موجود در رنگزای تاج‌خروس شوند. در واقع آنیون رنگ که در pH‌های پایین ایجاد می‌شود، به دلیل تمایل بیشتر به لیف از طریق واکنش تبادل یونی با اسید جایگزین می‌شود. این برهم‌کنش‌های یونی منجر به افزایش جذب رنگزا توسط لیف پشم می‌شوند. از طرف دیگر، سیتریک‌اسید از جمله مهم‌ترین اسیده‌های پلی‌کربوکسیلیک زیست‌سازگار و ایمن است که با داشتن یک گروه هیدروکسیل و سه گروه کربوکسیل قادر به شکستن اتصالات هیدروژنی میان زنجیرهای پلیمری و کاهش برهم‌کنش‌های بین‌مولکولی شده و از این رو می‌تواند یک نرم‌کننده باشد. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، گروه‌های عاملی آمینو و هیدروکسیل موجود در زنجیرهای پلی‌پپتیدی پشم قادر به تشکیل پیوندهای استری و آمیدی با گروه‌های هیدروکسیل و کربوکسیل موجود در سیتریک‌اسید می‌باشند. به این ترتیب اتصالات عرضی بیشتری با ماکرومولکول‌های پشم تشکیل داده و میزان رنگ‌پذیری الیاف را بهبود می‌دهند (باصری و احمدزاده، ۱۴۰۱). واکنش و نحوه تشکیل پیوند میان گروه‌های عاملی پشم و سیتریک‌اسید در شکل ۳ نشان داده شده است (Miohsin et al., 2014).



شکل ۳: انواع پیوندهای استری و آمیدی میان دندان‌های سیتریک‌اسید و لیف پشم (Miohsin et al., 2014)

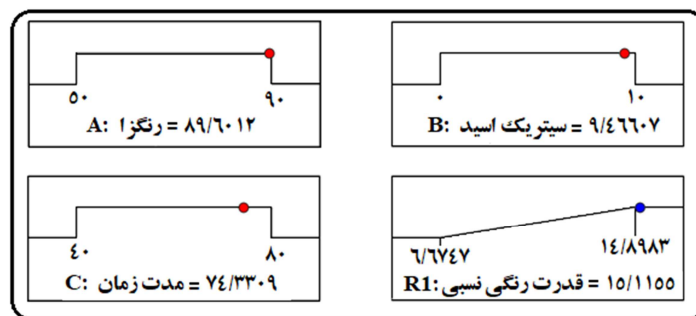
نکته قابل‌توجه دیگر در شکل (۲) این است که نرخ افزایش قدرت رنگی نسبی نمونه‌ها با افزایش مدت زمان رنگرزی و غلظت سیتریک‌اسید، کمتر از نرخ افزایش قدرت رنگی نسبی با افزایش غلظت رنگزا می‌باشد. بر این اساس می‌توان گفت که غلظت ماده رنگزا بیشترین تأثیر در افزایش جذب رنگ نمونه‌ها را دارد. این موضوع می‌تواند به خوبی توسط نمودارهای پاراتو تأیید گردد (شکل ۴). همان‌طور که در شکل (۴) ملاحظه می‌شود، متغیر غلظت ماده رنگزا دارای بیشترین ضریب می‌باشد. بنابراین بیشترین اثر را روی متغیر پاسخ دارد.



شکل ۴: نمودار پاراتو برای بررسی میزان تأثیرگذاری متغیرهای مستقل روی متغیر پاسخ (منبع: نگارنده)

پ- بهینه‌سازی فرآیند

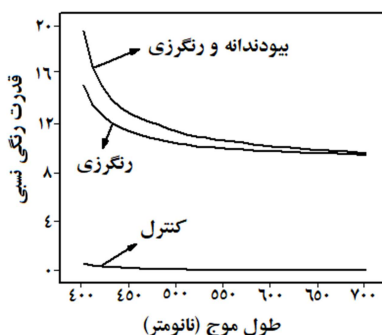
شرایط بهینه رنگرزی توسط نرم‌افزار دیزاین اکسپرت مشخص شد (Nwuzor et al., 2023). به این منظور متغیر پاسخ قدرت رنگی نسبی نمونه‌ها در مقدار بیشینه تنظیم شد و متغیرهای مستقل غلظت ماده رنگزا، غلظت سیتریک-اسید و مدت زمان رنگرزی در محدوده انتخابی قرار داده شدند. شرایط بهینه ارائه‌شده توسط نرم‌افزار در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل ۵: شرایط بهینه فرآیند رنگرزی پشم با رنگزای تاج‌خروس (منبع: نگارنده)

ت- بهبود راندمان رنگرزی توسط دندانۀ زیست‌سازگار پوست پسته

پس از بهینه‌سازی فرآیند رنگرزی، به منظور افزایش راندمان رنگرزی از پوست پسته به‌عنوان دندانۀ زیست‌سازگار استفاده شد. نخ‌های پشمی بر اساس روش توضیح داده‌شده در بخش ۲-۲-۵ با بیودندانۀ پوست پسته دندانۀ دار شده و سپس تحت شرایط بهینه با رنگزای تاج‌خروس رنگرزی شدند. با توجه به اینکه رنگ کالا به رفتار آن در ناحیه مرئی بستگی دارد و به منظور تکرارپذیری رنگ باید طیف انعکاسی نمونه رنگرزی‌شده در ناحیه مرئی مورد مطالعه قرار گیرد، بنابراین قدرت رنگی نسبی نمونه‌های پشمی مختلف در طول موج ۴۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل ۶: منحنی‌های قدرت رنگی نسبی نمونه‌های خام و رنگرزی شده با رنگزای تاج خروس (منبع: نگارنده)

شکل (۶) نشان می‌دهد که با افزایش طول موج، میزان قدرت رنگی نسبی نمونه‌ها کاهش می‌یابد. بیشترین قدرت رنگی نسبی نمونه‌ها در طول موج ۴۰۰ نانومتر ملاحظه می‌شود. نکته قابل توجه دیگر این است که استفاده از بیودندانه پوست پسته سبب بهبود جذب رنگ و قدرت رنگی نمونه‌ها شده است. علت این موضوع را می‌توان چنین بیان نمود که پوست پسته منبع غنی از ترکیبات زیست‌فعال، پلی‌فنل‌ها و فلاونوئیدها از قبیل گالوتنین، مریستین، کورستین، گالیک‌اسید، پی - هیدروکسی بنزوئیک‌اسید، پروتوکاتکویک‌اسید، اپیکاتچین، سیرینجیک‌اسید، پی - کوماریک‌اسید و کافئیک‌اسید می‌باشد (Barreca et al., 2016; Ozbeck et al., 2020; Shaikhiev et al., 2023). بنابراین، دندانه‌دار کردن الیاف پشمی با پوست پسته منجر به افزایش تعداد گروه‌های عاملی از قبیل کربونیل، آمینو، هیدروکسیل و کربوکسیل در سطح الیاف شده و از این رو میزان آب‌دوستی الیاف و تمایل آنها به جذب رنگزاهای طبیعی افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، زمانی که از رنگزا به تنهایی استفاده می‌شود، مولکول رنگزا قادر به برقراری اتصالات محدودی با لیف می‌باشد؛ این در حالی است که در لیف دندانه‌دار شده، گروه‌های عاملی بیشتری در لیف ایجاد شده و بنابراین می‌تواند با تعداد بیشتری مولکول‌های رنگزا اتصال برقرار کند و در نتیجه میزان جذب رنگزا توسط لیف بهبود می‌یابد.

ث- بررسی مشخصه‌های رنگی

میزان تغییر خلوص، تغییر فام، تغییر روشنایی و اختلاف رنگی نمونه‌های رنگرزی شده در جدول ۶ نشان داده شده است.

جدول ۶: اثر بیودندانه پوست پسته و رنگزای تاج خروس روی مقادیر تغییر خلوص، تغییر فام، روشنایی و اختلاف رنگی نمونه‌ها

نمونه‌ها	ΔE	ΔL^*	ΔH^0	ΔC^*
کنترل	-	-	-	-
رنگرزی	۱۷/۳۳	۱۳/۱۵	۲۴/۹۲	۸/۸۶
بیودندانه و رنگرزی	۲۳/۰۱	۱۹/۵۱	۱۱/۰۴	۱۱/۷۵

همان‌طور که در جدول (۶) به خوبی ملاحظه می‌گردد، زاویه فام و روشنایی نمونه‌های رنگرزی شده نسبت به نمونه کنترل کاهش یافته است. این کاهش در میزان روشنایی در مورد نمونه‌های پیش دندانه‌دار شده با پوست پسته و

رنگرزی شده با تاج خروس قابل ملاحظه‌تر می‌باشد. در مقابل، رنگرزی پشم با تاج خروس اثر مثبتی روی خلوص رنگی نمونه‌ها داشته و باعث افزایش آنها شده است. همچنین ملاحظه می‌گردد که اختلاف خلوص رنگی نمونه پیش دندانه‌دار شده نسبت به نمونه کنترل بیشتر از اختلاف خلوص رنگی نمونه به تنهایی رنگرزی شده می‌باشد. نکته قابل-ملاحظه دیگر در جدول شماره (۶)، این است که اختلاف رنگی نمونه‌ای که ابتدا با پوست پسته پیش دندانه‌دار شده و سپس رنگرزی شده است، نسبت به نمونه خام اولیه بیشتر از اختلاف رنگی نمونه به تنهایی رنگرزی شده با رنگزای تاج خروس می‌باشد. بنابراین می‌توان پوست پسته را به‌عنوان یک دندانه‌زیست‌سازگار و ایمن در نظر گرفت که منجر به بهبود جذب رنگ رنگزای تاج خروس توسط الیاف پشمی می‌شود.

ج- بررسی ثبات رنگی نمونه‌ها

با توجه به اینکه منسوجات در معرض شست‌وشوهای مکرر قرار می‌گیرند، از این رو پایداری رنگ پس از رنگرزی (ثبات رنگ) یکی از خواص بسیار مهم کالاهای رنگرزی شده می‌باشد. منسوجات با ثبات رنگی خوب، لکه‌گذاری رنگی قابل-ملاحظه یا انواع دیگر تغییر رنگ را از خود نشان نمی‌دهند. نتایج حاصل از اندازه‌گیری ثبات شست‌وشویی، نوری و لکه‌گذاری نمونه‌های حاصل از رنگرزی پشم با رنگزای تاج خروس (جدول ۵) نشان می‌دهد که ثبات شست‌وشویی نمونه‌های رنگ شده با رنگزای تاج خروس و همچنین میزان لکه‌گذاری نمونه‌های مورد بررسی روی پارچه‌های مجاور پشمی (هم‌جنس) و پنبه‌ای (غیر هم‌جنس) در محدوده خوب تا عالی (۴-۵) می‌باشد. همچنین در جدول (۵) مشاهده می‌شود که پیش دندانه‌دار کردن نمونه‌ها با پوست پسته منجر به کاهش لکه‌گذاری رنگ روی پارچه پنبه‌ای شده و بنابراین سبب بهبود ثبات شست‌وشویی نمونه‌ها گردیده است. علت این موضوع می‌تواند به اندازه مولکول‌های رنگزا درون نمونه‌های رنگرزی شده مربوط باشد (Uddin, 2014; Li et al., 2024). همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، برهم‌کنش میان گروه‌های عاملی موجود در ترکیبات پلی‌فنلی موجود در رنگزای تاج خروس و بیودندانه پوست پسته، سبب افزایش اندازه نهایی مولکول‌های رنگزا درون الیاف و کاهش حلالیت آنها شده و از این رو از آب‌شویی رنگ در حین شست‌وشو جلوگیری می‌کند. همچنین جدول شماره (۵) نشان می‌دهد که ثبات نوری نمونه‌هایی که به تنهایی با رنگزای تاج خروس رنگرزی شده‌اند، در محدوده متوسط تا نسبتاً خوب قرار می‌گیرد. علاوه بر این ملاحظه می‌شود که پیش دندانه‌دار کردن نخ‌های پشمی با بیودندانه پوست پسته، ثبات نوری نمونه‌ها را اندکی بهبود می‌بخشد. به خوبی مشخص شده است که اثر فتوشیمیایی برای سیستم‌هایی که مولکول‌های رنگ بیشتری دارند، کمتر قابل ملاحظه می‌باشد (Broadbent, 2001; Harsito et al., 2021). این نتیجه به خوبی توسط نتایج حاصل از بررسی قدرت رنگی و مقادیر رنگی نمونه‌ها تأیید می‌شود. همان‌طور که نتایج جدول ۶ و شکل ۶ نشان می‌دهند، پیش‌دندانه‌دار نمودن نمونه‌های پشمی با بیودندانه پوست پسته، سبب افزایش میزان جذب مولکول‌های رنگزا توسط نمونه‌های رنگرزی شده می‌گردد و بنابراین ثبات نوری نمونه‌ها افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، اتصال میان ترکیبات زیست‌فعال موجود در رنگزای تاج خروس و بیودندانه پوست پسته سبب تغییرات رزونانس درون حلقه شش‌عضوی و پراکنده ساختن انرژی توسط فوتون‌های جذب شده در مولکول رنگزا شده و از این رو مانع از تخریب نوری کروموفور رنگزا می‌شوند (باصری و احمدزاده، ۱۴۰۱).

نتیجه‌گیری

در این پژوهش از گیاه تاج‌خروس به‌عنوان رنگزای سازگار با محیط‌زیست برای رنگرزی نخ پشمی مورد استفاده در دستبافته‌ها استفاده شد. سه متغیر غلظت ماده رنگزا، غلظت سیتریک‌اسید و مدت زمان رنگرزی به‌عنوان عوامل مهم در فرآیند رنگرزی در نظر گرفته شد و اثر هر یک از آنها به تنهایی، اثرات متقابل آنها و همچنین شرایط بهینه فرآیند به منظور حصول بیشترین قدرت‌رنگی، توسط روش طراحی رویه - پاسخ مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت ماده رنگزا، غلظت سیتریک‌اسید و مدت زمان عملیات رنگرزی پشم با رنگزای تاج‌خروس، میزان قدرت رنگی نسبی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. همچنین، مدل پیشنهادی توسط نرم‌افزار از ضریب همبستگی بالایی برخوردار بوده و به خوبی با نتایج تجربی سازگار است. پس از دستیابی به شرایط بهینه رنگرزی، نخ‌های پشمی با ترکیبات زیست‌فعال موجود در پوست پسته عمل شدند تا قابلیت جذب رنگ آنها با رنگزای استخراج‌شده از عصاره تاج‌خروس، افزایش یابد. استفاده از دندانۀ زیست‌سازگار پوست پسته در رنگرزی پشم با عصاره تاج‌خروس منجر به بهبود میزان جذب رنگ توسط الیاف شده و ثبات‌های عمومی قابل‌قبولی را حاصل می‌سازد. بنابراین می‌توان گفت که پوست پسته می‌تواند راندمان فرآیند رنگرزی پشم با رنگزای تاج‌خروس را بهبود دهد. از این رو می‌توان آن را به‌عنوان یک دندانۀ سازگار با محیط‌زیست در نظر گرفت که می‌تواند نقش مهمی در حذف فلزات سنگین در پساب رنگرزی با رنگزاهای طبیعی، کاهش آلودگی محیط‌زیست و تولید مواد با ارزش افزوده بالا داشته باشد.

منابع

- انصاری اردلی، سجاد؛ آقاعلیخانی، مجید. (۱۳۹۴). اثر تراکم بوته و مقدار کود نیتروژن بر عملکرد و کیفیت علوفه تاج‌خروس زراعی. مجله علوم زراعی ایران، ۱۱(۱)، ۳۵-۴۵.
- باصری، سمیه؛ احمدزاده، سوران. (۱۴۰۱). رنگرزی ضد میکروبی و سازگار با محیط زیست پشم توسط گال سیچکا. مجله علوم و فناوری رنگ، ۱۶(۲)، ۱۰۹-۱۲۲.
- باصری، سمیه. (۱۴۰۲). استخراج ترکیبات زیست‌فعال عناب توسط امواج فراصوت و بهینه‌سازی فرآیند رنگرزی خامه فرش دستباف با آن توسط رویه پاسخ. مجله علوم و فناوری رنگ، ۱۷(۱)، ۱۷-۳۲.
- جعفری، راضیه؛ قرنجیک، کمال‌الدین. (۱۳۹۷). مطالعه مشخصه‌های رنگی الیاف طبیعی رنگرزی‌شده با مواد رنگزای طبیعی. مجله علمی-ترویجی مطالعات در دنیای رنگ، ۱(۸)، ۶۳-۷۴.
- صفایی، امیررضا؛ رضایی، مرتضی؛ راهنما، عبدالامیر. (۱۳۹۵). مقایسه خصوصیات کمی و ارزش غذایی علوفه سه رقم تاج‌خروس در مزارع استان البرز. فصلنامه تحقیقات کاربردی در علوم دامی، ۵(۲۰)، ۳۱-۴۲.
- سیاری، محمد؛ حمیدی، مریم؛ عزیزی، علی؛ احمدوند، گودرز. (۱۴۰۰). بررسی برخی ترکیبات زیست‌فعال و اسیدهای فنولیک گیاه تاج‌خروس گسترده در مراحل مختلف فنولوژیکی. مجله پژوهش‌های گیاهی، ۲۳(۲)، ۲۱۰-۲۲۳.
- Ayele, M., Tesfaye, T., Mengistie, D. A., Limeneh, M. (2020). Natural dyeing of cotton fabric with extracts from mango tree: A step towards sustainable dyeing. Sustainable chemistry and pharmacy, 17, pp 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2020.100293>
- Barreca, D., Laganà, G., Leuzzi, U., Smeriglio, A., Trombetta, D., Bellocco, E. (2016). Evaluation of the nutraceutical, antioxidant, and cytoprotective properties of ripe pistachio (*Pistacia vera* L., variety Bronte) hulls. Food Chem, 196, pp 493-502. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.09.077>
- Broadbent, A. D. (2001). Basic principles of textile coloration. Society of Dyers and Colorists, West Yorkshire.
- Baseri, S. (2022). Ecological dyeing of cotton fabric with *Matricaria recutita* L. in the presence of human hair keratins as an alternative copartner to metallic mordants. Sustainable Materials and Technologies, 32, e00405. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2022.e00405>

- Baseri, S. (2022). Sustainable dyeing of wool yarns with renewable sources. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 29, pp 53238-53248. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19629-6>
- Baseri, S. (2020). Eco-friendly production of anti-UV and antibacterial cotton fabrics via waste products. *Cellulose*, 27, pp 10407–10423. <https://doi.org/10.1007/s10570-020-03471-5>
- Dias, M., Valério, A., Oliveira, D., Ulson de Souza, A. A., Guelli U. de Souza, S. M. (2020). Adsorption of natural annatto dye by kaolin: kinetic and equilibrium. *Environmental Technology*, 41, pp 2648-2656. <https://doi.org/10.1080/09593330.2019.1578418>
- Ferreira, S. L. C., Bruns, R. E., Ferreira, H. S., Matos, J. D., David, J. M., Brandão, G. C., da Silva, E. G. P., Portugal, L. A., dos Reis, P. S., Souza, A. S., dos Santos, W. N. L. (2007). Box-Behnken design: An alternative for the optimization of analytical methods. *Anal. Chim. Acta.*, 597, pp 179-186.
- Harsito, C., Prabowo, A. R., Prasetyo, S. D., Arifin, Z. (2021). Enhancement stability and color fastness of natural dye: A review. *De Gruyter*, 11, pp 548-555.
- Khattab, T. A., Abdelrahman, M. S., Rehan, M. (2020). Textile dyeing industry: environmental impacts and remediation. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, pp 3803–3818. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-07137-z>
- Li, C. J., Zhang, Y. J., Chen, H., He, P. Y., Meng, Q. (2022). Development of porous and reusable geopolymer adsorbents for dye wastewater treatment. *Journal of Cleaner Production*, 348, pp 131278. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131278>
- Li, M., Chai, J., Liu, Y., Cao, G., Wang, Y., Ji, H., Wu, J., Sheng, D., Xia, L., Xu, W. (2024). Coloration of cotton fibers with natural plant dyes using an overlay dyeing method. *Industrial Crops and Products*, 212, 118284, <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118284>.
- Macchi, S., Siraj, N., Viswanathan, T. (2021). Kinetic and mechanistic study of dye sorption onto renewable resource-based doped carbon prepared by a microwave-assisted method. *Environmental Technology*, 42(26), pp 4115-4124. <https://doi.org/10.1080/09593330.2020.1745293>
- Mahmoodi, N. M., Arami, M. (2009). Degradation and toxicity reduction of textile wastewater using immobilized titanian anophotocatalysis. *J. Photochem. B: Biol.*, 94, pp 20-24. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2008.09.004>
- Manyelo, T. G., Amenda Sebola, N., Mohammed Hassan, Z., Mabelebele, M. (2020). Characterization of the phenolic compounds in different plant parts of *Amaranthus cruentus* grown under cultivated conditions. *Molecules*, 25(18), pp 4273. <https://doi.org/10.3390/molecules25184273>
- Mirjalili, M., Nazarpour, K., Karimi, L. (2011). Eco-friendly dyeing of wool using natural dye from weld as co-partner with synthetic dye. *Journal of Cleaner Production*. 19, pp 1045-1051. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.02.001>
- Mohsin, M., Farooq, U., Ali Reza, Z., Ahsan, M., Afzal, A., Nazir, A. (2014). Performance enhancement of wool fabric with environmentally-friendly bio-cross-linker. *Clean Prod.*, 68, pp 130-134. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.12.083>
- Nwuzor, I. C., Adinoyi, B. J., Okey-Onyesolu, C. F., Oyeoka, H. C. (2023). Hibiscus sabdariffa natural dye extraction process with central composite design for optimal extract yield. *Sustainable Chemistry for the Environment*, 2, 100008, <https://doi.org/10.1016/j.scenv.2023.100008>.
- Obinna, I. B., Ebera, E. C. (2019). A Review: Water pollution by heavy metal and organic pollutants: Brief review of sources, effects, and progress on remediation with aquatic plants. *Analytical Methods in Environmental Chemistry Journal*, 2, pp 5-38. <https://doi.org/10.24200/amecj.v2.i03.66>
- Ogrodowska, D., Czaplicki, S., Zadernowski, R., Mattila, P., Hellstrom, J., Nacz, M. (2012). Phenolic acids in seeds and products obtained from *Amaranthus cruentus*. *Journal of food and nutrition research*, 51(2), pp 96-101.
- Ogugbue, C. J., Sawidis, T. (2011). Bioremediation and detoxification of synthetic wastewater containing triaryl methane dyes by *Aeromonas hydrophila* isolated from industrial effluent. *Biotechnol. Res. Int.*, 2011, pp 1-10. <https://doi.org/10.4061/2011/967925>
- Ozbeck, H. N., Halahlil, F., Gogus, F., Yanik, D. K., Azaizeh, H. (2020). Pistachio (*Pistacia vera* L.) hull as a potential source of phenolic compounds: Evaluation of ethanol-water binary solvent extraction on antioxidant activity and phenolic content of pistachio hull extracts. *Waste Biomass Valorization*, 11(2), pp 2101–2110. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0512-6>
- Rehman, A., Irfan, M., Hameed, A., Saif, M. J., Abdul Qayyum, M., Farooq, T. (2022). Chemical-Free Dyeing of Cotton with Functional Natural Dye: A Pollution-Free and Cleaner Production Approach. *Front. Environ. Sci.*, 16, <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.848245>
- Shaikhiev, I. G., Kraysman, N. V., Svergzova, S. V. (2023). Review of Pistachio (*Pistacia*) Shell Use to Remove Pollutants from Aqua Media. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 13(4), 389, <https://doi.org/10.33263/BRIAC134.389>
- Uddin, M. G. (2014). Effects of different mordants on silk fabric dyed with onion outer skin extracts. *J. Text.*, 2014, pp 1-8. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/4056266>
- Zeng, K., Tong, Z., Ma, L., Zhu, W. H., Wu, W., Xie, Y. (2020). Molecular engineering strategies for fabricating efficient porphyrin-based dye-sensitized solar cells. *Energy Environ. Sci.*, 13, pp 1617-1657. <https://doi.org/10.1039/C9EE04200H>
- Zhang, Y., Zhou, Q., Xia, W., Rather, L. J., Li, Q. (2022). Sonochemical mordanting as a green and effective approach in enhancing cotton bio-natural dye affinity through soy surface modification. *Journal of Cleaner Production*, 336, pp 130465. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130465>.

References

References (in Persian)

- Ansari Ardali, S., Aghaalikani, M. (2015). Biomass, Crude protein, Plant nutrition, Planting pattern, and Vegetative growth. Iranian Journal of Crop Sciences, 17, pp 35-45. <http://agrobreedjournal.ir/article-1-504-fa.html>. [In Persian]
- Baseri, S., Ahmadzadeh, S. (2022). Eco-friendly Antibacterial Dyeing of Wool Using Sichka Gall. Journal of Color Science and Technology, 16(2), pp 109-122. DOR: 20.1001.1.17358779.1401.16.2.2.6. [In Persian]
- Baseri, S. (2023). Extraction of Bioactive Compounds from Jujube Fruit with Ultrasonic Waves and Optimization of Carpet Piles Dyeing Process by RSM. Journal of Color Science and Technology, 17(1), pp 17-32. DOR: 20.1001.1.17358779.1402.17.1.2.1 [In Persian]
- Jafari, R., Gharanjig, K. (2018). A Study on Colorimetric Attributes of Natural Fibers Dyed with Natural Colorants. Journal of studies in color world, 8(1), 63-74 [In Persian].
- Sayyari, M., Hamidi, M., Azizi, A., Ahmadvand, G. (2023). Evaluation of some bioactive compounds and phenolic acids of *Amaranthus blitoides* at different phenological stages. Journal of Plant Research, 36(2), pp 210-223. Doi: [20.1001.1.23832592.1402.36.2.7.0](https://doi.org/10.1001.1.23832592.1402.36.2.7.0). [In Persian]
- Safai, A. R., Rezaei, M., Rahnama, A. A. (2016). The Comparison of Quality, Quantitate, and Nutritional Value of Three Varieties of Amaranth Forages at Alborz Province Farm. Applied Animal Science Research Journal, 5, pp 31-42. [In Persian]

References (in English)

- Ayele, M., Tesfaye, T., Mengistie, D. A., Limeneh, M. (2020). Natural dyeing of cotton fabric with extracts from mango tree: A step towards sustainable dyeing. Sustainable chemistry and pharmacy, 17, pp 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2020.100293>
- Barreca, D., Laganà, G., Leuzzi, U., Smeriglio, A., Trombetta, D., Bellocco, E. (2016). Evaluation of the nutraceutical, antioxidant, and cytoprotective properties of ripe pistachio (*Pistacia vera* L., variety Bronte) hulls. Food Chem, 196, pp 493-502. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.09.077>
- Broadbent, A. D. (2001). Basic principles of textile coloration. Society of Dyers and Colorists, West Yorkshire.
- Baseri, S. (2022). Ecological dyeing of cotton fabric with *Matricaria recutita* L. in the presence of human hair keratins as an alternative copartner to metallic mordants. Sustainable Materials and Technologies, 32, e00405. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2022.e00405>
- Baseri, S. (2022). Sustainable dyeing of wool yarns with renewable sources. Environ. Sci. Pollut. Res., 29, pp 53238-53248. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19629-6>
- Baseri, S. (2020). Eco-friendly production of anti-UV and antibacterial cotton fabrics via waste products. Cellulose, 27, pp 10407–10423. <https://doi.org/10.1007/s10570-020-03471-5>
- Dias, M., Valério, A., Oliveira, D., Ulson de Souza, A. A., Guelli U. de Souza, S. M. (2020). Adsorption of natural annatto dye by kaolin: kinetic and equilibrium. Environmental Technology, 41, pp 2648-2656. <https://doi.org/10.1080/09593330.2019.1578418>
- Ferreira, S. L. C., Bruns, R. E., Ferreira, H. S., Matos, J. D., David, J. M., Brandão, G. C., da Silva, E. G. P., Portugal, L. A., dos Reis, P. S., Souza, A. S., dos Santos, W. N. L. (2007). Box-Behnken design: An alternative for the optimization of analytical methods. *Anal. Chim. Acta.*, 597, pp 179-186.
- Harsito, C., Prabowo, A. R., Prasetyo, S. D., Arifin, Z. (2021). Enhancement stability and color fastness of natural dye: A review. De Gruyter, 11, pp 548-555.
- Khattab, T. A., Abdelrahman, M. S., Rehan, M. (2020). Textile dyeing industry: environmental impacts and remediation. Environmental Science and Pollution Research, 27, pp 3803–3818. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-07137-z>
- Li, C. J., Zhang, Y. J., Chen, H., He, P. Y., Meng, Q. (2022). Development of porous and reusable geopolymer adsorbents for dye wastewater treatment. Journal of Cleaner Production, 348, pp 131278. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131278>
- Li, M., Chai, J., Liu, Y., Cao, G., Wang, Y., Ji, H., Wu, J., Sheng, D., Xia, L., Xu, W. (2024). Coloration of cotton fibers with natural plant dyes using an overlay dyeing method. Industrial Crops and Products, 212, 118284, <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118284>.
- Macchi, S., Siraj, N., Viswanathan, T. (2021). Kinetic and mechanistic study of dye sorption onto renewable resource-based doped carbon prepared by a microwave-assisted method. Environmental Technology, 42(26), pp 4115-4124. <https://doi.org/10.1080/09593330.2020.1745293>
- Mahmoodi, N. M., Arami, M. (2009). Degradation and toxicity reduction of textile wastewater using immobilized titanian anophotocatalysis. J. Photochem. B: Biol., 94, pp 20-24. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2008.09.004>
- Manyelo, T. G., Amanda Sebola, N., Mohammed Hassan, Z., Mabelebele, M. (2020). Characterization of the phenolic compounds in different plant parts of *Amaranthus cruentus* grown under cultivated conditions. Molecules, 25(18), pp 4273. <https://doi.org/10.3390/molecules25184273>
- Mirjalili, M., Nazarpour, K., Karimi, L. (2011). Eco-friendly dyeing of wool using natural dye from weld as co-partner with synthetic dye. Journal of Cleaner Production, 19, pp 1045-1051. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.02.001>
- Mohsin, M., Farooq, U., Ali Reza, Z., Ahsan, M., Afzal, A., Nazir, A. (2014). Performance enhancement of wool fabric with environmentally-friendly bio-cross-linker. Clean Prod., 68, pp 130-134. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.12.083>

- Nwuzor, I. C., Adinoyi, B. J., Okey-Onyesolu, C. F., Oyeoka, H. C. (2023). Hibiscus sabdariffa natural dye extraction process with central composite design for optimal extract yield. *Sustainable Chemistry for the Environment*, 2, 100008. <https://doi.org/10.1016/j.scenv.2023.100008>.
- Obinna, I. B., Ebera, E. C. (2019). A Review: Water pollution by heavy metal and organic pollutants: Brief review of sources, effects, and progress on remediation with aquatic plants. *Analytical Methods in Environmental Chemistry Journal*, 2, pp 5-38. <https://doi.org/10.24200/amecj.v2.i03.66>
- Ogrodowska, D., Czaplicki, S., Zadernowski, R., Mattila, P., Hellstrom, J., Nacz, M. (2012). Phenolic acids in seeds and products obtained from *Amaranthus cruentus*. *Journal of food and nutrition research*, 51(2), pp 96-101.
- Ogugbue, C. J., Sawidis, T. (2011). Bioremediation and detoxification of synthetic wastewater containing triaryl methane dyes by *Aeromonas hydrophila* isolated from industrial effluent. *Biotechnol. Res. Int.*, 2011, pp 1-10. <https://doi.org/10.4061/2011/967925>
- Ozbeck, H. N., Halahli, F., Gogus, F., Yanik, D. K., Azaizeh, H. (2020). Pistachio (*Pistacia vera* L.) hull as a potential source of phenolic compounds: Evaluation of ethanol-water binary solvent extraction on antioxidant activity and phenolic content of pistachio hull extracts. *Waste Biomass Valorization*, 11(2), pp 2101–2110. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0512-6>
- Rehman, A., Irfan, M., Hameed, A., Saif, M. J., Abdul Qayyum, M., Farooq, T. (2022). Chemical-Free Dyeing of Cotton with Functional Natural Dye: A Pollution-Free and Cleaner Production Approach. *Front. Environ. Sci.*, 16, <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.848245>
- Shaikhiev, I. G., Kraysman, N. V., Svergzova, S. V. (2023). Review of Pistachio (*Pistacia*) Shell Use to Remove Pollutants from Aqua Media. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 13(4), 389, <https://doi.org/10.33263/BRIAC134.389>
- Uddin, M. G. (2014). Effects of different mordants on silk fabric dyed with onion outer skin extracts. *J. Text.*, 2014, pp 1-8. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/4056266>
- Zeng, K., Tong, Z., Ma, L., Zhu, W. H., Wu, W., Xie, Y. (2020). Molecular engineering strategies for fabricating efficient porphyrin-based dye-sensitized solar cells. *Energy Environ. Sci.*, 13, pp 1617-1657. <https://doi.org/10.1039/C9EE04200H>
- Zhang, Y., Zhou, Q., Xia, W., Rather, L. J., Li, Q. (2022). Sonochemical mordanting as a green and effective approach in enhancing cotton bio-natural dye affinity through soy surface modification. *Journal of Cleaner Production*, 336, pp 130465. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130465>.