

بهینه سازی فرآیند رنگرزی پشم با رنگزای ریشه کنار توسط رویه پاسخ

سمیه باصری

دانشیار گروه طراحی و چاپ پارچه، دانشکده هنر، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

Baseri@semnan.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۱۱

چکیده

صنعت نساجی از جمله اصلی ترین آلاینده های محیط زیست محسوب شده و این موضوع سبب ترغیب محققان به ارائه راه کارهای زیست سازگار و جایگزینی مواد شیمیایی خطرناک با محصولات طبیعی شده است. در این راستا در پژوهش حاضر برای اولین بار از فرآورده های جانبی گیاهی ریشه کنار و بیودندانه سیچکا برای رنگرزی پایدار نخ های پشمی استفاده شد. سیچکا یک گال غیر جنسی بوده که در نتیجه نیش زنبور (*Andricus curtisii* (*Cynips mediterranea* Trott) بر روی جوانه های بلوط گونه *Quercus infectoria* Oliv به وجود می آید. ترکیبات زیست فعال موجود در کنار و گال به روش فراصوت استخراج شد و به ترتیب به عنوان رنگزا و بیودندانه برای فرآیند رنگرزی مورد استفاده قرار گرفت. به منظور بررسی اثر هر یک از متغیرها و بهینه سازی فرآیند از روش آماری رویه پاسخ و طرح مرکب مرکزی استفاده شد. نتایج نشان داد که مواد انتخاب شده حاوی بیوترکیبات فنولی و تاننی بوده و از قابلیت مناسبی برای استفاده در رنگرزی سازگار با محیط زیست منسوجات برخوردار می باشند. نتایج آنالیز واریانس روی مدل درجه دوم نشان داد که به ترتیب پارامترهای غلظت رنگزا، غلظت بیودندانه و pH حمام رنگرزی معنی دار بوده و متغیر پاسخ قدرت رنگی را تحت تأثیر قرار می دهند. تحت شرایط مورد مطالعه در این پژوهش، بررسی پارامترهای رنگرزی نشان داد که مقدار ۹۶٪ رنگزای کنار، ۱۲٪ بیودندانه سیچکا در pH = ۷/۵ مناسب ترین شرایط برای رنگرزی پشم با این ضایعات کشاورزی می باشد. پایداری پیوند میان رنگزا و نخ های پشمی از نظر ثبات رنگ در برابر شستشو و نور مورد ارزیابی قرار گرفت. استفاده از بیودندانه سیچکا در رنگرزی با عصاره ریشه کنار سبب افزایش قدرت رنگی نمونه های پشمی شده و ثبات های رنگی قابل قبولی را ایجاد می کند. به این ترتیب ریشه کنار و سیچکا می توانند جایگزین مناسبی برای رنگزاهای دندانه های سمی باشند به ویژه اینکه راندمان رنگرزی نخ های پشمی را بدون اثرات نامطلوب زیست محیطی بهبود می بخشند و محصولات زیست تخریب پذیر با ارزش افزوده بالا تولید می کنند.

واژه های کلیدی: رنگرزی پایدار، استخراج فراصوت، بیودندانه، تانن، روش رویه پاسخ

Optimization of Wool Dyeing Process with *Z. Spina-Christ* Root Dye by RSM

Somayeh Baseri

Associate Professorin Textile Design and Printing, Art Department, Semnan University, Semnan, Iran

Baseri@semnan.ac.ir

Abstract

The textile industry is one of the major environmental polluters. It has been increased the researcher interest to explore eco-friendly ways and replace hazardous chemical materials with natural products. In the present work, for the first time, *Z. Spina-christ* root and *Sichka* gall plant by-products were employed for sustainable dyeing of wool yarns. *Sichka* is an asexual gall that results from the sting of the wasp *Andricus curtisii* (*Cynips mediterranea* Trott) on the buds of the oak (*Quercus infectoria*). Bio-compounds of *Z. Spina-christ* and gall were extracted by ultrasonic method and the extracts were used as a natural dye and bio-mordant for the dyeing process, respectively. Response surface method and central composite design were used to evaluate the effect of the main process parameters and dyeing optimization. Results showed that the selected materials contain phenolic and tannin bio-constitute and have a sufficient ability to use in the eco-dyeing process of textiles. The analysis of the variance of the quadratic model showed that the dye concentration, bio-mordant concentration, and pH were significant model terms and had the highest effects on the dyeing performance, respectively. Results indicate that for the conditions used in our experiments, the optimum dyeing conditions are dye conc. =96%, bio-mordant conc. =12%, and pH=7.5. Dye fiber bonding stability of the dyed samples was evaluated in terms of colorfastness to wash and light. Using *Sichka* as a bio-mordant in the dyeing process with *Z. Spina-christ* root extract can improve the color strength of wool yarns and obtain acceptable dye fastness properties. As a result, *Z. Spina-christ* root and *Sichka* bio-wastes, may, thus, be considered good replacements for the toxic dyes and mordants, especially because they improve the natural dyeing efficiency of wool yarns without adverse environmental effects and produce biodegradable byproducts with value-added properties.

Keywords: Sustainable Dyeng, Ultrasonic Extraction, Bio-mordant, Tannins, Response Surface Methodology

۱-مقدمه

در سال‌های اخیر، فرآیند رنگرزی در صنعت نساجی به دلیل عدم تعادل اکولوژیکی به موضوعی نگران‌کننده در سراسر جهان به ویژه در کشورهای در حال توسعه تبدیل شده است. گزارش شده است که صنایع نساجی در بخش تولید سالیانه حدود ۹۳ میلیارد متر مکعب آب مصرف می‌کنند [۱] و به تبع آن حجم عظیمی از پساب‌های صنعتی حاوی مواد شیمیایی تولید می‌شود به نحویکه ۲۰ درصد از آلودگی آب جهان به صنایع نساجی مربوط می‌شود [۲]. از طرف دیگر مقدار زیادی از رنگزاهای شیمیایی در حین فرآیند رنگرزی، جذب الیاف نشده و در فاضلاب، رودخانه‌ها و دریاچه‌ها تخلیه می‌شوند. پساب‌های نساجی حاوی مواد شیمیایی خطرناک و سمی از قبیل ترکیبات آزو، آمین‌های معطر، نیترات‌ها، سولفور و فلزات سنگین هستند [۳ و ۴]. این مواد با کاهش سطح اکسیژن آب و وارد کردن مواد سمی، سبب آلودگی و مرگ ماهی‌ها و آبیان شده و خطرات جدی برای اکوسیستم‌های آبی ایجاد می‌کنند [۵]. علاوه بر آلودگی آب، تولید و کاربرد رنگزاهای شیمیایی نقش مهمی در آلودگی خاک و هوا نیز دارد. در حین تولید این مواد، گازهای خطرناکی چون دی‌اکسید نیتروژن، دی‌اکسید گوگرد، مونوکسید کربن و دی‌اکسید کربن تولید می‌شود که در هوا انتشار یافته و آلاینده‌ی محیط را تشدید می‌کند [۶]. همچنین مواد سمی مورد استفاده در رنگزاهای شیمیایی می‌توانند به داخل خاک نفوذ کرده و بر حاصلخیزی آن تأثیر گذاشته و سبب تخریب

میکروارگانسیم‌های لازم برای حفظ اکوسیستم‌های سالم، گردند [۷]. به این ترتیب نیاز مبرم به توسعه فناوری و استفاده از مواد اولیه پایدار، ایمن و زیست‌سازگار در صنایع نساجی وجود دارد. در اواسط دهه ۱۹۶۰، دانش جهانی در مورد آلودگی آب، دفع زباله، اکولوژی و مشکلات زیست-محیطی باعث افزایش علاقه به استفاده از محصولات طبیعی در صنعت رنگرزی شد [۸].

رنگزاهای طبیعی که از منابع تجدیدپذیر مانند گیاهان، جانوران و مواد معدنی به دست می‌آیند، در مقایسه با رنگزاهای شیمیایی مزایای زیست‌محیطی متعددی دارند. این مواد زیست‌تخریب‌پذیر، غیرسمی و در دسترس بوده [۹] و سبب افزایش صادرات، ایجاد اشتغال و صرفه‌جویی ارزی نیز می‌گردند. ویژگی تجدیدپذیری این مواد با اهداف پایداری در صنعت نساجی همسو بوده و سبب تسهیل گذار از اقتصاد خطی به دورانی در این صنعت می‌گردد [۱۰]. از طرف دیگر نهادهای نظارتی در سراسر جهان، مقررات سختگیرانه‌ای را در مورد استفاده از رنگزاهای شیمیایی به‌ویژه در صنایع نساجی اعمال نموده‌اند [۱۱]. افزایش آگاهی مصرف‌کنندگان برای کاهش ضایعات نیز سبب افزایش تمایل به تولید محصولات سازگار با محیط‌زیست و پایدار شده است [۱۲]. به این ترتیب آینده صنایع نساجی با رویکردهایی با هدف کاهش میزان آلاینده‌ی زیست-محیطی این صنعت شکل خواهد گرفت و انتظار می‌رود این صنعت به سمت تولید رنگزاهای تجدیدپذیر، اعمال شیوه‌های رنگرزی پایدار، فرآیندهای انرژی کارآمد و استفاده از سیستم‌های حلقه بسته حرکت کند.

۱۱۸]. وجود این بیوترکیبات در ریشه کنار آن را به گزینه مناسبی برای استفاده در صنایع نساجی به ویژه فرآیند رنگرزی تبدیل می‌کند. اگرچه در مورد اندام‌های مختلف درخت کنار و کاربردهای آنها به خصوص برگ گیاه تحقیقات متعددی در ایران انجام شده است [۱۳ و ۱۵ و ۲۰]؛ اما استفاده از ریشه گیاه به عنوان یک رنگزا تاکنون مورد مطالعه قرار نگرفته است و در پژوهش حاضر برای اولین بار از آن استفاده خواهد شد.

از طرف دیگر همانطور که قبلاً نیز اشاره شد، یکی از محدودیت‌های استفاده از رنگزاهای طبیعی محدوده فام باریک و ثبات عمومی پایین آنها می‌باشد. این مشکل اغلب با استفاده از دندانه‌های معدنی که نمک فلزات واسطه می‌باشند، برطرف می‌گردد. این در حالی است که این مواد حاوی مقادیر زیادی یون فلزات سنگین بوده که غیرقابل تجزیه، سمی و سرطان‌زا هستند و تخلیه یون‌های سمی آنها در فاضلاب، تهدیدی جدی برای سلامت عمومی و محیط‌زیست می‌باشد [۲۱]. لذا جایگزین نمودن دندانه‌های معدنی سنتی با بیودندانه‌های تجدیدپذیر، کم هزینه و سازگار با محیط‌زیست، رویکردی نوین در کاهش آلاینده‌های صنایع نساجی می‌باشد. برای این منظور، استفاده از مواد طبیعی غنی از تانن در فرآیند رنگرزی منسوجات می‌تواند گزینه مناسبی باشد و به اقتصاد سبزتر کمک نماید. تانن‌ها ترکیبات آروماتیک با وزن مولکولی حدود ۳۰۰-۵۰۰ می‌باشند که در اندام‌های مختلف گیاهی از قبیل چوب، میوه، برگ، ریشه، جوانه، گال، دانه و پوست یافته می‌شوند. تانن‌ها بر اساس ساختار شیمیایی

خود به دو نوع متراکم و قابل هیدرولیز تقسیم می‌شوند. تانن‌های متراکم، پروآنتوسیانیدین‌های متراکم بر پایه پلی‌هیدروکسی فلاوان و فلاونوئیدها در نظر گرفته می‌شوند. تانن‌های قابل هیدرولیز نیز استرهای فنل کربوکسیلیک‌اسید هستند [۲۲]. هر دو نوع تانن دارای گروه‌های هیدروکسیل فنولی بوده که می‌توانند با مولکول‌های رنگزا و زنجیرهای پلیمری اتصال برقرار نمایند. بنابراین، می‌توان انتظار داشت که هم سبب افزایش جذب رنگزا و هم منجر به تثبیت آن در درون الیاف شوند [۲۳].

گال سیچکا از جمله محصولات فرعی درختان بلوط، می‌باشد. سیچکا یک گال غیرجنسی بر روی جوانه‌های درختان بلوط از گونه‌ی *Quercus infectoria Oliv* می‌باشد که در نتیجه‌ی نیش زنبور (*Cynips*) *Andricus curtisii mediterranea Trott* به وجود می‌آید. به طور کلی نحوه‌ی تشکیل گال‌ها روی درختان بلوط به این صورت است که موجودات گال‌زا در بافت گیاهی تخم‌ریزی کرده و در نتیجه‌ی واکنش گیاه نسبت به ترشحات لاروی عامل گال‌زا، برجستگی‌های کروی شکل و یا به شکل‌های دیگر بر روی برگ، ریشه، میوه، شاتون و شاخه‌های درختان بلوط، به وجود می‌آید که گال نامیده می‌شود [۲۴]. لایه‌های ضخیمی با بافت چوبی یا اسفنجی، بافت خارجی گال‌ها را تشکیل می‌دهند که دارای متابولیت‌های ثانویه مهمی چون گالوتانیک اسید یا گالوتن، فلاونوئیدها، فنل‌ها و تانن‌ها، می‌باشند. بخش داخلی گال‌ها نیز سرشار از ترکیبات زیست‌فعال گیاهی از قبیل آلکالوئیدها،

ترپنوئیدها، تاننها، پلی‌تنها و لیپیدها است. به این ترتیب می‌توان گال‌ها را به عنوان منابع غنی از ترپنوئیدها، آلکالوئیدها، پلی‌تنها، لیپیدها، فلاونوئیدها، تاننها، فنولها و گالوتانین‌ها در نظر گرفت [۲۴ و ۲۵]. وجود بیوترکیبات فنولی به خصوص تاننها در گالها، آنها را به گزینه بسیار مناسبی برای استفاده به عنوان بیودندانه در فرآیند رنگرزی زیست‌سازگار تبدیل می‌نماید.

با توجه به اینکه ریشه کنار و گال سیچکا را می‌توان منابع مهمی از ترکیبات زیست‌فعال گیاهی در نظر گرفت؛ لذا هدف از پژوهش حاضر این است که برای اولین بار به استخراج ترکیبات فنولی موجود در این گیاهان با رویکرد بهینه‌سازی فرآیند رنگرزی زیست‌پایدار الیاف پشم با آنها پرداخته شود تا به این ترتیب آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از رنگزاهای شیمیایی و دندانه‌های فلزی در فرآیند رنگرزی کاهش یافته و مواد با ارزش افزوده بالا تولید شود. برای استخراج ترکیبات زیست‌فعال موجود در ریشه کنار و سیچکا از دو روش استخراج جوشاندن و فراصوت استفاده شد و نتایج مورد مقایسه قرار گرفت. با به کارگیری روش رویه پاسخ و طرح مرکب مرکزی تلاش شد تا ضمن مطالعه متغیرهای مهم در فرآیند رنگرزی الیاف پشمی با رنگزای کنار، به بهینه‌سازی فرآیند نیز پرداخته شود. در ادامه ویژگی‌های رنگی و ثبات‌های نوری و شستشویی نمونه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد مصرفی

ریشه کنار به صورت تجاری از منطقه خوزستان تهیه شد. گال سیچکا از بلوط گونه‌ی *Quercus infectoria Oliv* از جنگل‌های بلوط واقع در شهرستان سردشت استان آذربایجان غربی به صورت تصادفی جمع‌آوری شدند. در این پژوهش از نخ پشمی سفید مرینوس دولا با نمره نخ ۱۶۰ تکس استفاده شد و برای شستشوی آن نیز از شوینده غیر یونی Nikogen SDN ساخت شرکت نیک‌فام شیمی استفاده گردید. همچنین از معرف فولین سیوکالتو تهیه شده از شرکت مرک برای اندازه‌گیری مقدار کل ترکیبات فنولی و از آب مقطر برای ساختن و رقیق کردن تمام محلول‌ها استفاده شد.

۲-۲- تجهیزات مورد استفاده

به منظور پودر کردن ریشه کنار و گال سیچکا از آسیاب برقی ناسیونال، برای توزین مواد از ترازوی Tanita مدل 1210N با دقت ۰/۰۰۱ گرم و برای اندازه‌گیری pH محلول‌ها از دستگاه pH متر Metrohm-914 استفاده شد. همچنین از تجهیزاتی چون دستگاه اسپکتروفوتومتر انعکاسی مدل X-Rite Sp64، گرم‌کننده حرارتی مجهز به همزن مغناطیسی، آون، سانتریفیوژ دوربالا و دستگاه‌های اندازه‌گیری ثبات نوری و شستشویی نیز استفاده گردید.

۲-۳- روش آزمایش

۲-۳-۱- آماده‌سازی اولیه پشم

به منظور حذف ناخالصی‌ها، روغن‌های ریسندگی و آلودگی‌های موجود در سطح نخ‌های پشمی، آنها را در محلول صابونی که شامل ۲ گرم بر لیتر شوینده غیریونی و

شده و سپس در خلأ با استفاده از یک اپراتور چرخشی تغلیظ گردیدند.

۲-۳-۳- طراحی آزمایش به روش رویه پاسخ

طراحی آزمایش به روش رویه پاسخ روشی مناسب برای بهینه سازی پاسخ مطلوب در فرآیندهایی است که در آنها چندین متغیر مستقل، متغیر پاسخ را تحت تأثیر قرار می-دهند. طراحی آزمایش‌ها، آنالیز داده‌ها و بهینه سازی شرایط رنگرزی توسط روش رویه پاسخ و با استفاده از طرح مرکب مرکزی در قالب مرکز وجهی^۱ در سه سطح با فواصل برابر و سه متغیر توسط نرم افزار Design Expert 12 انجام شد. در حالت مرکز وجهی حدود بیشینه و کمینه با کد سطح‌های (+۱) و (-۱) مشخص می‌شوند و سطح سوم به عنوان سطح صفر یا مرکزی (۰)، مقداری بین کمینه و بیشینه است. طرح مرکب مرکزی (CCD) روشی کاربردی و ساده است که با بررسی تعاملات میان پارامترها، قادر به بهینه سازی تمام فاکتورها به طور همزمان می‌باشد [۲۶]. بر اساس آزمایش‌های اولیه انجام شده سه متغیر غلظت رنگزا، غلظت بیودندانه و pH حمام رنگرزی به عنوان متغیرهای مستقل و قدرت رنگی نمونه‌ها در طول موج جذب بیشینه به عنوان متغیر وابسته انتخاب شدند. جدول ۱ متغیرهای مستقل، سطوح و دامنه آنها در واحدهای واقعی و کدگذاری شده را نشان می‌دهد.

۱ گرم بر لیتر سدیم کربنات بود در دمای ۵۰ درجه سانتیگراد به مدت زمان ۳۰ دقیقه صابونی نموده و سپس ابتدا با آب گرم و بعد با آب سرد به خوبی شسته و در نهایت خشک شدند.

۲-۳-۲- استخراج ترکیبات زیست فعال کنار و سیچکا

ابتدا ریشه‌های کنار و گال‌های سیچکا به خوبی با آب مقطر شسته شده و در سایه خشک شدند. سپس به منظور افزایش سطح تماس آنها با حلال و افزایش راندمان استخراج، با استفاده از آسیاب صنعتی به پودر ریز با ذرات تقریباً یکسان تبدیل شدند. به منظور استخراج ترکیبات زیست فعال از حلال اتانول ۷۰٪ استفاده شد. در هر دو مورد ابتدا پودر با حلال مورد نظر در حجم مایع نسبت به وزن کالای ۱:۵ خیسانده شد و به مدت یک شب در ظروفی دربسته و تیره در دمای اتاق نگهداری شدند. استخراج به دو روش جوشاندن سنتی و فراصوت انجام شد. در روش جوشاندن، عصاره گیری از مخلوط در دمای جوش به مدت زمان ۱۰۰ دقیقه توسط گرم کننده حرارتی مجهز به همزن مغناطیسی انجام شد. در استخراج فراصوت نیز مخلوط گیاه و حلال در دمای ۷۵ درجه سانتیگراد به مدت زمان ۳۰ دقیقه، در معرض امواج فراصوت (فرکانس ۲۵ کیلوهرتز و حداکثر توان اسمی ۷۵۰ وات) قرار داده شد در هر دو مورد پس از سرد شدن مخلوط، ترکیبات زیست فعال استخراج شده توسط کاغذ صافی واتمن شماره ۴۲، فیلتر

¹ Face Centered

جدول ۱- متغیرهای مستقل، سطوح واقعی و کدگذاری شده

آنها				متغیرهای مستقل
سطوح کدگذاری شده				
پایین	مرکز	بالا	نماد	
-1	0	+1		
40	70	100	A	غلظت رنگزا (%OWF)
0	6	12	B	غلظت بیودندانه (%OWF)
3	6	9	C	pH

رنگرزی به روش پیش‌دندانه انجام شد. به این منظور نخ‌های پشمی در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد وارد محلول استخراج شده از بیودندانه گال سیچکا با غلظت‌های مختلف (۰-۱۲ درصد نسبت به وزن نخ) در pH = ۴/۵ شدند. سپس دما به تدریج و در طی نیم ساعت تا دمای ۸۰ °C افزایش یافت و عملیات دندانه‌دار شدن در این دما به مدت زمان ۶۰ دقیقه ادامه یافت. رنگرزی بر اساس رمق‌کشی در حمام رنگ شامل مقادیر مختلف رنگزای استخراج شده از ریشه کنار (۱۰۰-۴۰ درصد نسبت به وزن نخ) در مقادیر مختلف pH (۳-۹) انجام شد. در اینجا نیز ابتدا دمای حمام رنگرزی به ۴۰ درجه سانتی‌گراد رسانده شد و نمونه‌ها وارد حمام شدند. دما به تدریج و در طی نیم ساعت تا دمای ۹۵ °C افزایش یافت و فرآیند رنگرزی در این دما به مدت زمان ۹۰ دقیقه ادامه یافت. در همه حمام‌ها نسبت حجم مایع به وزن کالا ۳۰:۱ در نظر گرفته شد.

تعداد آزمایش‌ها با استفاده از رابطه زیر به دست آمد.

$$N = 2^K + 2K + nc \quad (1)$$

در رابطه (۱) K تعداد پارامترهای مستقل، 2^K نقاط فاکتوریل، $2K$ تعداد نقاط محوری و nc تعداد نقاط مرکزی می‌باشند. با توجه به اینکه در این پژوهش تعداد متغیرهای مستقل مورد بررسی ۳ تا می‌باشد لذا تعداد نقاط فاکتوریل ۸ عدد، تعداد نقاط محوری ۶ تا و تعداد نقاط مرکزی نیز ۶ می‌باشد و در نهایت ۲۰ آزمایش طراحی شد و مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۳).

۲-۴- اندازه‌گیری‌ها

۲-۴-۱- اندازه‌گیری ترکیبات زیست‌فعال استخراج شده

برای اندازه‌گیری محتویات فنولی کل از معرف فولین-سیوکالتو استفاده شد. به این ترتیب که ابتدا ۲۰ میکرولیتر عصاره گیاه، ۱۰۰ میکرولیتر معرف فولین-سیوکالتو و ۲ میلی‌لیتر آب مقطر را با هم مخلوط کرده و پس از گذشت ۹ دقیقه، ۳۰۰ میکرولیتر محلول کربنات سدیم ۷٪ را به آن اضافه نموده و مخلوط در دمای اتاق و در محیطی تاریک به مدت زمان ۲ ساعت همزده شد. پس از انجام واکنش و گسترش فاز آبی، جذب محلول با استفاده از اسپکتروفتومتر UV-Vis در طول موج ۷۶۵ نانومتر اندازه‌گیری شد. محلول استاندارد با استفاده از گالیک اسید تهیه شد. مقدار کل ترکیبات فنولی قابل استخراج از عصاره‌ها به صورت میلی‌گرم گالیک اسید در هر گرم وزن خشک (mg GAE/g DW)، اندازه‌گیری شد. به منظور تعیین مقدار تانن عصاره‌ها، ۱ میلی‌لیتر عصاره گیاه را با ۱ میلی‌لیتر آب مقطر رقیق کرده و به آن ۰/۱ گرم پلی‌وینیل‌پلی‌پیرولیدون اضافه شد.

مخلوط در ظرف حاوی یخ به مدت زمان ۱۵ دقیقه قرار داده شد سپس با سرعت ۳۰۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۱۰ دقیقه سانتریفیوژ شد تا در نهایت محلول شفاف با رنگ قهوه‌ای روشن به دست آید. جذب این محلول نیز در طول موج ۷۶۵ نانومتر اندازه‌گیری شد. میزان تانن موجود در عصاره‌ها بر حسب میلی‌گرم گالیک اسید در هر گرم وزن خشک (mg GAE/g DW) اندازه‌گیری شد. تمام آنالیزها سه بار تکرار شد و میانگین آنها گزارش گردید.

۲-۴-۲- اندازه‌گیری قدرت رنگی

محرکه‌های رنگی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر انعکاسی X-Rite Sp64 ساخت آمریکا زیر منبع نوری استاندارد D65 و تحت زاویه مشاهده‌کننده استاندارد ۱۰ درجه در فضای رنگی $L^*a^*b^*$ اندازه‌گیری شد. قدرت رنگی نخ‌های پشمی رنگرزی شده در شرایط مختلف در طول موج حداکثر جذب با استفاده از رابطه کیوبلکا-مانک (۲) اندازه‌گیری شد.

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

۲-۴-۳- اندازه‌گیری ثبات‌های شستشویی و نوری

از استانداردهای مؤسسه ملی استاندارد ایران برای اندازه‌گیری ثبات‌های رنگی نخ‌های رنگرزی شده در شرایط بهینه استفاده شد. ثبات شستشویی و نوری نمونه‌ها به ترتیب بر اساس استانداردهای ISIRI 10076 و ISIRI 205 مورد

ارزیابی قرار گرفت. به این منظور از دستگاه‌های ساخت شرکت نساج صنعت یزد استفاده شد. برای اندازه‌گیری ثبات شستشویی نمونه‌ها، ابتدا حمام‌هایی با غلظت دو گرم بر لیتر صابون استاندارد در نسبت حجم مایع به وزن کالای ۱:۵۰ آماده شدند و نمونه‌ها در دمای ۴۰ درجه سانتیگراد به مدت زمان نیم ساعت در این حمام‌ها شسته، به خوبی آبکشی و خشک شدند. سپس ثبات شستشویی آنها با معیار خاکستری، اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری ثبات نوری، نمونه‌ها به نحوی که بخشی از آنها در معرض نور زنون و بخش دیگر آنها پنهان از نور باشند، در معرض لامپ زنون قرار گرفتند و پس از گذشت مدت زمان ۶۰ ساعت، اختلاف رنگ میان قسمت‌های در معرض نور قرار گرفته و قسمت‌های پنهان شده از نور توسط معیار آبی، اندازه‌گیری شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی میزان ترکیبات زیست فعال استخراج شده

در پژوهش حاضر ترکیبات زیست فعال قابل استخراج از مواد کنار و سیچکا با استفاده از دو روش سنتی و فراصوت، استخراج شدند. نتایج بر اساس اندازه‌گیری مقادیر کل ترکیبات فنلی و تاننی قابل استخراج در هر روش مورد بررسی و مقایسه قرار گرفتند. نتایج برای هر دو روش در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲- ترکیبات زیست فعال قابل استخراج از ریشه کنار و گال سیچکا

روش استخراج								ماده
فراصوت				سنتی				
تانن (mg GAE/g DW)	فنل کل (mg GAE/g DW)	زمان (min)	دما (°C)	تانن (mg GAE/g DW)	فنل کل (mg GAE/g DW)	زمان (min)	دما (°C)	
28.77	72.56	30	75	12.28	59.29	100	97	کنار
99.24	195.03	30	75	76.84	150.71	100	97	سیچکا

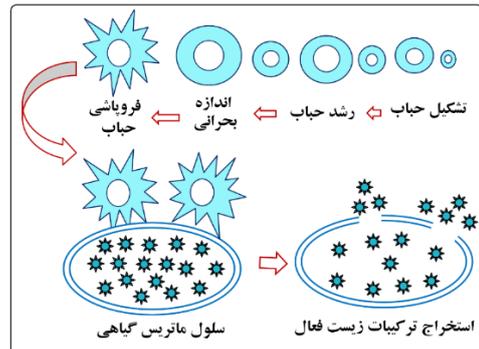
افزایش می یابد. ترکیبیدن حبابها سبب شکسته شدن غشای سلولی، تخریب دیواره های سلولی در یک بازه زمانی کوتاه و افزایش سرعت نفوذپذیری حلال به درون بافت گیاهی می گردد [۲۷]. بنابراین می توان گفت که در حین استخراج فراصوت، فرآیند کاویتاسیون صوتی اعمال شده سبب شکستگی و تخریب دیواره های سلولی ماتریس گیاهی شده و برهمکنش های مؤثر جامد-مایع تحت سینتیک انتقال جرم، منجر به استخراج متابولیت های ثانویه بیشتری از بافت جامد گیاهی به درون حلال می شود؛ لذا عملکرد استخراج بهبود می یابد. علاوه بر این در منابع اشاره شده است که مکانیسم های استخراج متعددی مانند تکه تکه شدن، فرسایش، سونوپوراسیون، نیروی برشی و شاخص تورم در ماتریس سلولی نمونه را می توان در نتیجه فروپاشی حباب های کاویتاسیون و انتشار امواج فراصوتی به دست آورد [۲۸] (شکل ۱).

کوتاه تر بودن زمان استخراج با کمک امواج فراصوت نسبت به استخراج سنتی، بازدهی بالا، ساده تر بودن تجهیزات نسبت به روش های استخراج با سیال فوق بحرانی و ماکروویو، ارزان قیمت بودن فرآیند استخراج، کاهش دمای استخراج و به دنبال آن امکان استخراج ترکیبات حساس به حرارت،

همان طور که ملاحظه می گردد، برای هر دو ماده کنار و سیچکا مقدار ترکیبات زیست فعال استخراج شده در روش فراصوت بیشتر از مقادیر استخراج شده در روش سنتی تخمین زده شده است. علاوه بر این، دما و مدت زمان عملیات در استخراج فراصوت در مقایسه با روش سنتی به میزان قابل ملاحظه ای کاهش یافته است. بنابراین روش فراصوت در استخراج ترکیبات زیست فعال مؤثرتر از روش سنتی بوده و دارای راندمان استخراج بالاتری است.

امواج فراصوت دارای فرکانس های بالاتر از ۲۴ کیلوهرتز بوده و با انتشار آنها در محیط، متوسط فاصله بین مولکولی مولکول های موجود در محیط تغییر یافته و این موضوع سبب نوسان مولکول های محیط در اطراف موقعیت اصلی خود و ایجاد چرخه های انبساط و انقباض می گردد. امواج فراصوت در حالت انبساط با تولید فشار منفی مناسب سبب ایجاد حباب های حفره زار در محیط مایع می شوند. اندازه حباب های ایجاد شده در طی سیکل های انبساط، افزایش و در سیکل های انقباض کاهش می یابد. این فرآیند تحت عنوان کاویتاسیون شناخته می شود. زمانی که اندازه حباب ها به حد بحرانی می رسد، حباب ها متلاشی شده و انرژی زیادی آزاد می گردد و در نهایت سرعت واکنش

بهبود کیفیت عصاره استخراج شده و توانایی استفاده از حلال‌های مختلف برای استخراج طیف وسیعی از ترکیبات زیست‌فعال موجود در گیاهان از جمله مهمترین مزایای استفاده از امواج فراصوت در فرآیند استخراج به شمار می‌رود [۲۹].



شکل ۱: کاویتاسیون، تخریب دیواره‌های سلولی گیاه و استخراج ترکیبات زیست فعال

۳-۲- آنالیز واریانس داده‌ها و توسعه مدل رگرسیون به منظور بررسی اثر هر یک از متغیرهای مستقل پژوهش بر متغیر پاسخ، بررسی اثر متقابل متغیرها، برآورد مدل رگرسیون مناسب و بهینه‌سازی فرآیند رنگرزی پشم با بیودندانه سیچکا و رنگزای کنار از روش رویه پاسخ و طرح کامپوزیت مرکزی استفاده شد. بر اساس رابطه (۱) نهایتاً ۲۰ آزمایش توسط نرم‌افزار طراحی و انجام شد. جدول شماره ۳ طراحی آزمایش‌ها، سطوح متغیرهای مستقل، مقادیر تجربی قدرت رنگی نمونه‌ها در طول موج بیشینه و مقادیر پیش‌بینی شده آنها نشان داده شده است.

جدول ۳- ماتریس طرح کامپوزیت مرکزی، متغیرهای مستقل و نتایج قدرت رنگی اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده

شماره آزمایش	متغیرهای مستقل			متغیر پاسخ		
	رنگزا (%owf)	بیودندانه (%owf)	pH	واقعی	پیش‌بینی شده	باقیمانده
1	100	0	3	5.89	5.72	0.1673
2	70	6	6	5.81	5.85	-0.0405
3	70	0	6	5.24	5.25	-0.0075
4	70	6	6	5.92	5.85	0.0695
5	40	0	9	4.38	4.23	0.1477
6	70	6	6	6.01	5.85	0.1595
7	70	12	6	6.72	6.45	0.2665
8	100	0	9	6.02	6.04	-0.0187
9	70	6	3	5.97	5.97	0.0000
10	40	6	6	4.22	4.29	-0.0660
11	70	6	6	5.83	5.85	-0.0205
12	100	12	9	7.52	7.47	0.0478
13	40	12	3	4.81	4.89	-0.0848
14	70	6	6	5.6	5.85	-0.2505
15	100	6	6	6.16	6.32	-0.1600
16	40	0	3	3.87	3.92	-0.0463
17	40	12	9	5.26	5.21	0.0493
18	70	6	9	6.06	6.29	-0.2260
19	70	6	6	5.9	5.85	0.0495
20	100	12	3	7.12	7.16	-0.0362

به منظور بررسی رابطه بین متغیر پاسخ فرآیند و متغیرهای مستقل و به دست آوردن معادله رگرسیون مناسب برای پیش‌بینی مقادیر متغیر وابسته، مدل‌های آماری مختلف روی داده‌های تجربی جدول ۳ مورد برآزش قرار گرفت و نتایج حاصل از آنها در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول ۴- نتایج آنالیز واریانس مدل‌های آماری مختلف روی نتایج تجربی قدرت رنگی نمونه‌ها

مدل برآزش شده	مقدار P ترتیبی	عدم برآزش مقدار P	ضریب همبستگی تعدیل یافته	ضریب همبستگی پیش‌بینی شده	
خطی	< 0.0001	0.0299	0.8943	0.8643	
اثرات متقابل	0.7183	0.0203	0.8822	0.7998	
درجه دوم	0.0003	0.4735	0.9756	0.9282	پیشنهاد شده
مکعبی	0.3314	0.6133	0.9791	0.5478	

بر اساس نتایج جدول ۵ و با بررسی مقادیر ضریب رگرسیون (F) و مقادیر متغیر پاسخ (p) متغیرها می‌توان چنین استنباط نمود که قدرت رنگی نمونه‌ها با سطح اطمینان ۹۵٪ به مرتبه اول هر سه متغیر مستقل انتخاب شده (اثرات خطی)، اثرات متقابل متغیرهای غلظت رنگزا و غلظت بیودندانه و همچنین مرتبه دوم (اثرات مربعی) متغیرهای غلظت رنگزا و pH حمام رنگرزی وابسته است. متغیرهای با مقادیر p بزرگتر از ۰/۰۵ از نظر آماری غیرمؤثر بوده و می‌توان با حذف آنها از مدل رگرسیون، دقت مدل را بهبود بخشید. بر این اساس معادله مدل رگرسیون (۳) به صورت زیر اصلاح گردید.

$$\frac{K}{S} = 5.85 + 1.02A + 0.6030B + 0.1580C + 0.1138AB - 0.5475A^2 + 0.2775C^2 \quad (4)$$

با استفاده از نتایج جدول شماره ۵ می‌توان اعتبار مدل رگرسیون پیش‌بینی شده را بررسی نمود. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد مقدار ضریب رگرسیون مدل ۸۵/۲۴ می‌باشد که بسیار بزرگتر از مقدار ضریب رگرسیون بحرانی

بر اساس نتایج آنالیز واریانس در جدول ۴ می‌توان گفت که مدل درجه دو به دلیل برخورداری از بالاترین مقادیر ضرایب همبستگی پیش‌بینی شده و تعدیل یافته و همچنین مقدار پی کم، مناسب‌ترین مدل برای پیش‌بینی روابط میان متغیرهای مستقل و وابسته فرآیند رنگرزی پشم با عصاره‌های کنار و سیچکا می‌باشد. مقادیر ضریب همبستگی تعدیل یافته و ضریب همبستگی پیش‌بینی شده به ترتیب ۰/۹۷۵۶ و ۰/۹۲۸۲ می‌باشند. با توجه به اینکه تفاوت این دو عدد کمتر از ۰/۲ می‌باشد لذا انتخاب مدل چند جمله‌ای درجه دوم می‌تواند به خوبی با نتایج تجربی سازگار باشد. مدل انتخاب شده در رابطه ۳ نشان داده شده است.

$$\frac{K}{S} = 5.83 + 1.02A + 0.6030B + 0.1580C + 0.1138AB - 0.0537AC + 0.0263BC - 0.6136A^2 + 0.1764B^2 + 0.2114C^2 \quad (3)$$

به منظور بررسی متغیرهای مؤثر از نظر آماری برای قرارگرفتن در مدل و همچنین بررسی اعتبار و صحت مدل، نتایج حاصل از آنالیز واریانس داده‌ها در فضای طراحی آزمایش در جدول ۵ نشان داده شده است.

است. بنابراین عوامل کنترل پذیر (سیگنال) در مقایسه با عوامل کنترل ناپذیر (نویز)، نقش بسیار بیشتری در مدل برازش شده داشته‌اند. نسبت سیگنال به نویز را می‌توان با مقدار کفایت دقت^۱ نیز ارزیابی نمود. در پژوهش حاضر این مقدار برابر با ۳۵/۴۷ می‌باشد (بیشتر از ۴)، لذا مدل از توانایی خوبی در پیش‌بینی نتایج برخوردار است [۳۰]

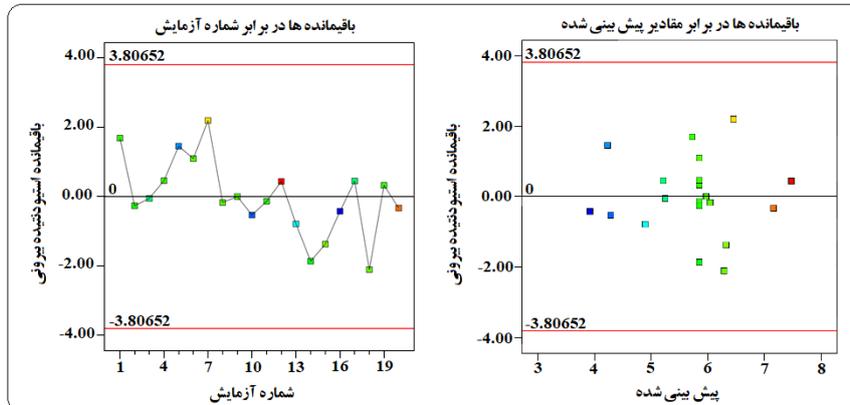
جدول ۵- جدول آنالیز واریانس مدل درجه دوم برای بررسی اثر متغیرهای مستقل و وابسته در طرح کامپوزیت مرکزی

منبع واریانس	مجموع توان دوم	درجه آزادی	میانگین توان دوم	F-value	p-value
مدل	15.42	9	1.71	85.24	< 0.0001
رنگزا-A	10.34	1	10.34	514.63	< 0.0001
بیودندانه-B	3.64	1	3.64	180.92	< 0.0001
C-pH	0.2496	1	0.2496	12.42	0.0055
AB	0.1035	1	0.1035	5.15	0.0466
AC	0.0231	1	0.0231	1.15	0.3087
BC	0.0055	1	0.0055	0.2743	0.6119
A ²	1.04	1	1.04	51.52	< 0.0001
B ²	0.0855	1	0.0855	4.26	0.0661
C ²	0.1229	1	0.1229	6.11	0.0330
خطای باقیمانده	0.2010	10	0.0201		
عدم برازش	0.1036	5	0.0207	1.06	0.4735
خطای خالص	0.0973	5	0.0195		
کل	15.62	19			
ضریب تغییرات	2.48				
کفایت دقت	35.4735				
ضریب همبستگی	0.9871				
ضریب همبستگی تعدیل یافته	0.9756				

می‌باشد. ارزیابی اعتبار و دقت مدل پیش‌بینی شده می‌تواند توسط نمودارهای باقیمانده‌ها نیز تأیید گردد. منظور از باقیمانده‌ها، اختلاف میان مقادیر تجربی و مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل رگرسیون می‌باشد. نمودار باقیمانده‌ها در برابر ترتیب انجام آزمایش‌ها و همچنین باقیمانده‌ها در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده از مدل، در شکل ۲ نشان داده شده است.

همچنین مقدار متغیر پاسخ برای معادله رگرسیون نیز بسیار کم ($p < 0.0001$) می‌باشد. بنابراین مدل برازش شده از نظر آماری معنی‌دار است. تکرارپذیری مدل را می‌توان با استفاده از ضریب تغییرات بررسی نمود. این ضریب، نسبت خطای استاندارد برآورد شده به میانگین مقدار پاسخ مشاهده شده است و همان‌طور که در جدول ۵ ملاحظه می‌گردد ضریب تغییرات مدل پیش‌بینی شده ۲/۴۸ می‌باشد (کمتر از ۱۰)، بنابراین مدل برازش شده تکرارپذیر

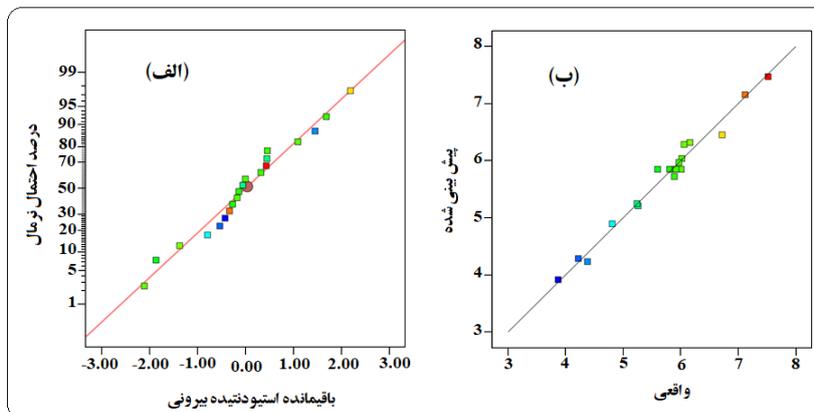
^۱ Adequate precision



شکل ۲- نمودار باقیمانده‌ها در برابر ترتیب انجام آزمایش‌ها و مقادیر پیش‌بینی شده

است. به منظور بررسی نرمال بودن توزیع باقیمانده‌ها، نمودار احتمال نرمال باقیمانده‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است. منظور از نرمال بودن باقیمانده‌ها این است که میانگین تفاوت میان باقیمانده‌ها و مقادیر واقعی بسیار کم و در حد صفر باشد.

همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، الگوی مشخصی در نمودار باقیمانده‌ها مشاهده نمی‌شود. این موضوع نشان دهنده این است که باقیمانده‌ها از توزیع تصادفی برخوردار بوده و بنابراین پیش‌فرض استفاده از رگرسیون مبنی بر تصادفی بودن باقیمانده‌ها و ثابت بودن واریانس‌ها نسبتاً محقق شده



شکل ۳- (الف) نمودار احتمال نرمال باقیمانده‌ها (ب) نمودار مقادیر قدرت رنگی پیش‌بینی شده در برابر مقادیر واقعی

شکل ۳ ب نیز تأیید می‌کند که میان مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر واقعی، همبستگی مناسبی وجود دارد و خطای مدل بسیار کم است.

در شکل ۳ الف به خوبی مشاهده می‌شود که نمودار الگوی خطی داشته و داده‌ها به خط راست نزدیک می‌باشند، لذا خطای مدل کم بوده و توزیع باقیمانده‌ها نرمال می‌باشد.

۳-۳- بررسی اثر متغیرهای مستقل بر متغیر پاسخ

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 آنالیز واریانس داده‌ها نشان داد که تمام متغیرهای مستقل مورد بررسی در پژوهش حاضر و همچنین اثرات متقابل متغیرهای غلظت رنگزا و غلظت بیوندانه نقش معنی‌داری بر قدرت رنگی نمونه‌ها دارند. اثر هر یک از متغیرهای مستقل غلظت رنگزا، غلظت بیوندانه و pH حمام رنگرزی بر قدرت رنگی نمونه‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است. نتایج شکل ۴ نشان می‌دهد که با افزایش غلظت رنگزای کنار در حمام رنگرزی، قدرت رنگی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. فرآیند رنگرزی در سه مرحله جذب سطحی، نفوذ و جذب کامل اتفاق می‌افتد. افزایش غلظت اولیه مولکول‌های رنگزا در حمام رنگرزی سبب افزایش گرادیان غلظتی رنگزا و همچنین افزایش نیروی لازم برای انتقال مولکول‌های رنگزا به درون زنجیرهای پلیمری الیاف می‌گردد [۳۱]. در نتیجه جذب سطحی مولکول‌های رنگزا افزایش یافته و در نهایت قدرت رنگی نمونه‌ها بهبود می‌یابد.

همان‌طور که ملاحظه می‌گردد استفاده از عصاره سیچکا به عنوان یک بیوندانه نیز در بهبود جذب رنگزای کنار مؤثر بوده و با افزایش غلظت سیچکا، قدرت رنگی نمونه‌های رنگرزی شده افزایش یافته است. این موضوع می‌تواند به دلیل وجود گروه‌های هیدروکسیل فنولی به خصوص تانن‌ها در عصاره سیچکا باشد (جدول ۲) که می‌توانند به عنوان

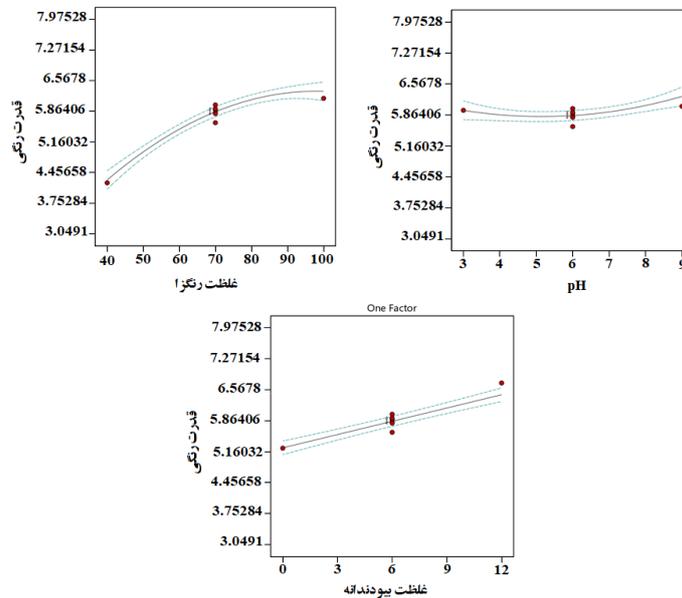
یک پیوند قوی بین مولکول‌های رنگزا و زنجیرهای پلیمری الیاف عمل کنند. از طرف دیگر وجود این گروه‌های هیدروکسیل فنولی در عصاره سیچکا [۲۴ و ۲۵] می‌تواند سبب افزایش تعداد گروه‌های عاملی قطبی در سطح زنجیرهای پلی‌پیتیدی پشم و بهبود میزان آب‌دوستی آن شده و در نهایت جذب رنگ و قدرت رنگی نمونه‌ها را افزایش دهد.

شکل ۴ به خوبی نشان می‌دهد که pH حمام رنگرزی نقش قابل ملاحظه‌ای در میزان جذب رنگ رنگزای کنار توسط الیاف پشمی دارد. افزایش pH از ۳ تا حدود ۸ سبب افزایش قدرت رنگی نمونه‌ها شده است. علت این موضوع می‌تواند با در نظر گرفتن ساختار رنگ، لیف و نقطه ایزوالکتریک پشم، بررسی گردد. نقطه ایزوالکتریک پشم حدود ۵ است. در مقادیر pH بالاتر از این مقدار، تعداد گروه‌های انتهایی کربوکسیلیک‌اسید روی الیاف پشم افزایش یافته و در نتیجه برهم‌کنش‌های یونی میان آنها و گروه‌های آلکالوئیدی با بار مثبت موجود در مولکول‌های رنگزا افزایش می‌یابد [۳۲]. به این ترتیب میزان جذب رنگ توسط زنجیرهای پلی‌پیتیدی پشم افزایش می‌یابد.

در شکل ۵ اثر متقابل دو متغیر غلظت رنگزا و غلظت بیوندانه بر قدرت رنگی نمونه‌ها در pH رنگرزی در قالب نمودار دو بعدی کانتر و نمودار سه بعدی رویه پاسخ نشان داده شده است. در هر دو نمودار مقادیر متغیرهای مستقل غلظت رنگزا، غلظت بیوندانه و متغیر وابسته قدرت رنگی به ترتیب در راستای محورهای مختصات X، Y و Z نشان

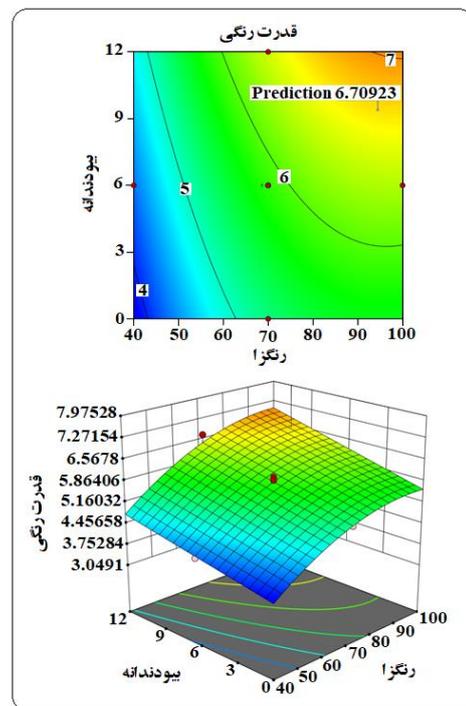
مقادیر متغیر وابسته به صورت خطوط کانتر نمایش داده شده است.

داده شده است. با این تفاوت که در نمودار رویه پاسخ، مقادیر متغیر وابسته با استفاده از یک سطح صاف در راستای محور Z نشان داده شده است و در نمودار کانتر،



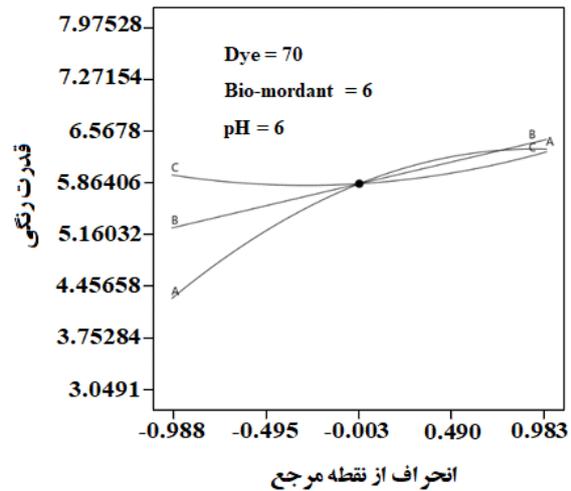
شکل ۴- اثر متغیرهای مستقل غلظت رنگزا، غلظت بیودندانه و pH حمام رنگرزی بر پاسخ قدرت رنگی نمونه‌ها

همان‌طور که از جهت خطوط کانتر و نمودار رویه پاسخ در شکل ۵ ملاحظه می‌گردد افزایش غلظت رنگزا و بیودندانه هر دو نقش مهمی در افزایش قدرت رنگی نمونه‌های پشمی دارند به نحویکه مقادیر بیشینه قدرت رنگی در غلظت‌های بالای رنگزای کنار و بیودندانه سیچکا حاصل می‌گردد. به منظور بررسی تغییرات قدرت رنگی نمونه‌ها با تغییر متغیرهای مستقل نسبت به یک نقطه مرجع، نمودار پریشانی در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد متغیرهای غلظت رنگزا و بیودندانه صعودی هستند و برای متغیر pH حمام رنگرزی، مقادیر بهینه در حدود $pH = 7-8$ مشاهده می‌شود. همچنین با استفاده از این نمودار می‌توان میزان اثر هر یک از متغیرهای مستقل را بر متغیر وابسته در یک نقطه خاص بررسی نمود.



شکل ۵- اثر متقابل متغیرهای مستقل غلظت رنگزا و غلظت بیودندانه بر قدرت رنگی نمونه‌ها

پژوهش، اثر پارامترهای مستقل بر میزان قدرت رنگی نخ-های پشمی به ترتیب به صورت غلظت رنگزای کنار، غلظت بیودندانه سیچکا و pH حمام رنگرزی می باشد. این موضوع به خوبی می تواند توسط مقایسه بزرگی پارامترهای F در جدول آنالیز واریانس داده ها (جدول ۴) و همچنین مقایسه ضرایب عاملی در مدل رگرسیون (رابطه ۴) تأیید شود.



شکل ۶- منحنی پریشانی تغییرات قدرت رنگی نمونه ها با

تغییر متغیرهای مستقل غلظت رنگزا، غلظت بیودندانه و pH

حمام رنگرزی

۳-۴- بهینه سازی فرآیند رنگرزی پشم با رنگزای

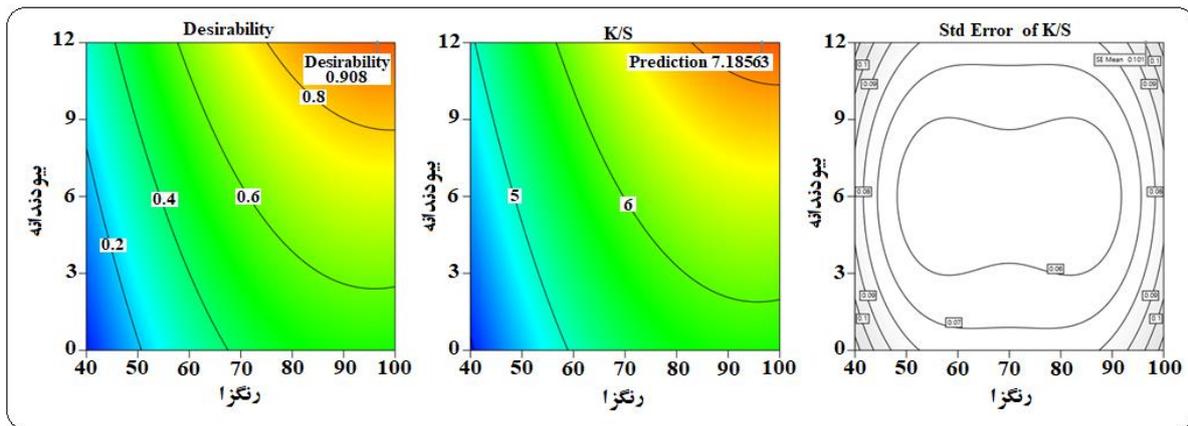
کنار با استفاده از تابع مطلوبیت

به منظور بهینه سازی فرآیند رنگرزی نخ های پشمی با عصاره ریشه کنار از تابع بهینه عددی نرم افزار دیزاین اکسپرت استفاده شد. به این ترتیب که تمام پارامترهای مستقل غلظت رنگزای کنار، غلظت بیودندانه سیچکا و pH حمام رنگرزی در محدوده انتخاب شده در نظر گرفته شدند و متغیر پاسخ قدرت رنگی نمونه ها در مقدار بیشینه تنظیم شد (جدول ۶). شرایط رنگرزی بهینه ارائه شده توسط نرم-افزار به صورت گرافیکی در شکل ۷ نشان داده شده است.

همان طور که ملاحظه می گردد، غلظت رنگزا بالاترین شیب خط را دارد لذا بیشترین تأثیر را روی قدرت رنگی نمونه ها می گذارد. بعد از غلظت رنگزا، غلظت بیودندانه و pH حمام رنگرزی به ترتیب قدرت رنگی نمونه ها را تحت تأثیر قرار می دهند. به این ترتیب تحت شرایط مورد مطالعه در این

جدول ۶- محدودیت ها و معیارهای بهینه سازی

نام	هدف	حد پایین	حد بالا	وزن پایین	وزن بالا	اهمیت
A: رنگزا	درمحدوده	40	100	1	1	3
B: بیودندانه	درمحدوده	0	12	1	1	3
C: PH	درمحدوده	3	9	1	1	3
قدرت رنگی	بیشینه	3.87	7.52	1	1	3



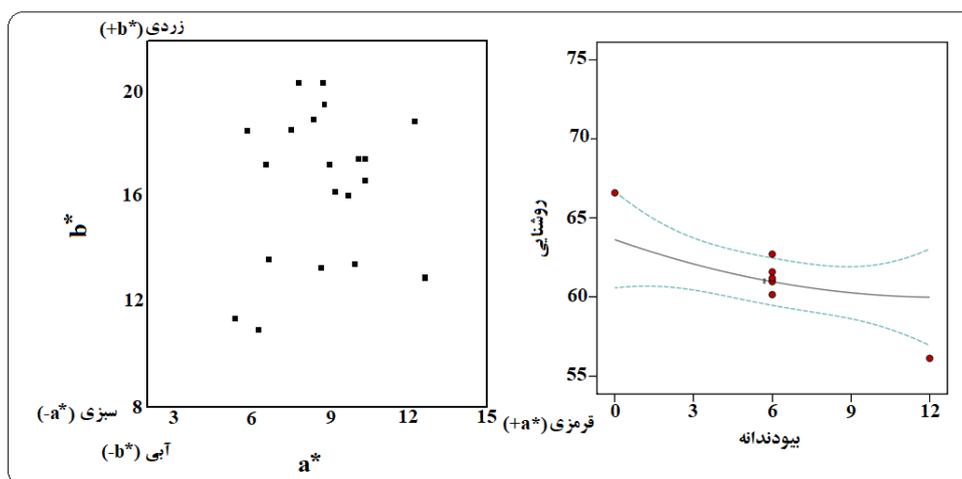
شکل ۷- شرایط بهینه رنگرزی پشم با رنگزای کنار

بوده و اختلاف میان مقادیر قدرت رنگی های پیش بینی شده توسط مدل و مقادیر به دست آمده از طریق تجربی کم است. این موضوع به خوبی تأیید می کند که هماهنگی مناسبی میان روش آماری و تجربی وجود دارد.

۳-۵- بررسی ویژگی ها و ثبات رنگی نخ های پشمی رنگزای شده با کنار

مختصات رنگی نمونه های رنگرزی شده تحت شرایط مختلف در شکل ۸ نشان داده شده است.

به این ترتیب می توان گفت که مقدار ۹۶٪ رنگزای کنار، ۱۲٪ بیوندانه سیچکا در $pH = 7/5$ مناسب ترین شرایط برای رنگرزی پشم با ضایعات کشاورزی ریشه کنار و گال سیچکا می باشد. همچنین مقایسه قدرت رنگی نمونه رنگرزی شده در شرایط بهینه (شکل ۷) با مقادیر قدرت رنگی نمونه های رنگرزی شده در شرایط غیربهینه (جدول ۳) نشان می دهد که کیفیت برآزش مدل طراحی شده برای پیش بینی وابستگی متغیر پاسخ به متغیرهای مستقل غلظت رنگزای کنار، غلظت بیوندانه سیچکا و pH مناسب



شکل ۸- ویژگی های رنگی نمونه های پشم رنگرزی شده با رنگزای کنار در شرایط متفاوت رنگرزی

نمونه‌ها می‌گردد. به این ترتیب می‌توان گفت که بیودندانه سیچکا منجر به کاهش میزان انعکاس نور و افزایش میزان جذب رنگزا می‌گردد. این موضوع به خوبی توسط مقادیر قدرت رنگی نمونه‌های دندانه‌دار شده با سیچکا در جدول ۳ تأیید می‌شود.

جدول ۷ ثبات‌های رنگی نخ‌های پشمی رنگ شده با عصاره کنار در شرایط بهینه را نشان می‌دهد.

همان‌طور که محل قرارگرفتن نمونه‌ها در شکل ۸ نشان می‌دهد، تمام نمونه‌ها دارای رنگ زرد مایل به قرمز می‌باشند. همچنین با تغییر شرایط رنگرزی، گستره‌ای از فام‌های مختلف از رنگزای کنار حاصل شده است. علاوه بر این نمودار تغییرات روشنایی نمونه‌ها بر اساس تغییرات غلظت بیودندانه نشان می‌دهد که استفاده از بیودندانه سیچکا در فرآیند رنگرزی پشم با عصاره کنار سبب کاهش روشنایی

جدول ۷: ثبات رنگی نخ پشمی رنگرزی شده با کنار در شرایط بهینه

نمونه‌ها	ثبات شستشویی			
	ثبات نوری	تغییر رنگ	لکه‌گذاری روی پشم	لکه‌گذاری روی پنبه
نمونه اولیه	-	-	-	-
رنگرزی	4	3-4	4-5	4-5
بیودندانه و رنگرزی	5	4	5	5

برقرار کرده و مانع از خروج رنگزا از کالا به هنگام شستشو شوند [۳۳]. همچنین در جدول ۷ ملاحظه می‌گردد که بیودندانه کردن نخ‌های پشمی با عصاره سیچکا سبب بهبود ثبات شستشویی نمونه‌ها می‌گردد. علت این موضوع را می‌توان به وجود ترکیبات فنولی به خصوص تانن‌ها در عصاره سیچکا (جدول ۲) و تشکیل کمپلکس نامحلول بین زنجیره‌های پپتیدی پشم، تانن‌های موجود در سیچکا و ترکیبات زیست‌فعال موجود در کنار از طریق برهمکنش‌های هیدروژنی، نیروهای واندروالس و همچنین اتصالات آبریز مربوط دانست. در شکل ۹ برهم‌کنش شیمیایی میان مولکول‌های بیودندانه و رنگزا با زنجیره‌های پپتیدی پشم نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه

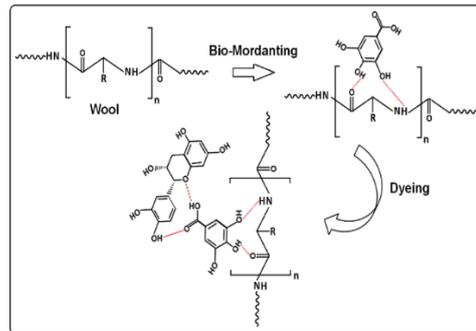
نتایج حاصل از ثبات شستشویی نمونه‌ها نشان می‌دهد که رنگرزی با عصاره کنار به تنهایی می‌تواند ثبات شستشویی خوبی را در نمونه‌ها ایجاد نماید. علت این موضوع را می‌توان به وجود ترکیبات زیست‌فعال در عصاره کنار مربوط دانست (جدول ۲). همان‌طور که قبلاً اشاره شد، عصاره کنار دارای ترکیبات زیست‌فعال متعددی به ویژه تانن است که میل خوبی به نخ‌های پشمی نشان می‌دهند. گزارش شده است که اپیکاتچین، کامپفرول، کانابینول، ایندول ۳-کربکسیلیک اسید و ۵-متوکسی-۲-متیل-۱-(۳-متیل-فنیل) مهمترین ترکیبات فنولی موجود در عصاره ریشه کنار هستند [۱۷ و ۱۸]. ساختار فنولی موجود در این ترکیبات می‌توانند با زنجیره‌های پپتیدی پشم پیوند عرضی

نمونه سبب بهبود ثبات نوری آن شده است. بنابراین می-توان نتیجه گرفت که استفاده از رنگزای ریشه کنار و بیودندانه گال سیچکا در فرآیند رنگرزی دستبافته‌ها، از دیدگاه مصرف‌کنندگان قابل قبول است.

در سال‌های اخیر به دلیل مشکلات زیست‌محیطی و لزوم اجرای فرآیندهای پایدار، استفاده از رنگزاهای طبیعی تجدیدپذیر، کم‌هزینه و سازگار با محیط‌زیست رویکردی مهم و نوین در کاهش میزان آلاینده‌های فرآیندهای رنگرزی منسوجات معرفی شده و مطالعات متعددی در این زمینه انجام شده است. از جمله این مطالعات می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

حسین‌نژاد و قرنجیک (۱۳۹۹) در مقاله خود با عنوان «مروری بر دندانه‌های طبیعی و فلزی برای کاربرد در رنگرزی الیاف» بیان نموده‌اند که امروزه تقاضای بیشتری برای کاربرد مواد رنگزای طبیعی به دلیل قابلیت تجزیه زیستی بهتر و سازگاری بالاتر آنها با محیط‌زیست وجود دارد. همچنین می‌توان از گیاهان و مواد طبیعی متعددی به عنوان دندانه‌های زیستی به منظور گسترش دامنه فام و تثبیت رنگزای استفاده نمود. این دندانه‌ها طیف وسیعی از گیاهان حاوی فلز، اسید تارتاریک، اسید تانیک، تانن، محصولات جانبی صنایع و پساب‌های زیستی را شامل می-شوند. هرچند که در میان آنها تانن‌ها نقش پررنگ‌تری دارند. دندانه‌های زیستی بر اساس نوع، ساختار و غلظت خود، نقش مهمی در برداشت و ثبات رنگی منسوجات دارند [۳۶]. پرناتا و همکاران در مطالعه‌ای با عنوان «استخراج رنگزاهای بیودندانه‌های سازگار با محیط زیست برای

می‌گردد اتصال میان پشم، بیودندانه و رنگزای که عمدتاً از طریق برهم‌کنش‌های هیدروژنی اتفاق می‌افتد سبب افزایش اندازه مولکول‌های رنگزای در داخل الیاف شده و لذا مهاجرت و خروج رنگزای از کالا کاهش و ثبات شستشویی نمونه‌ها بهبود می‌یابد [۳۴].



شکل ۹- برهم‌کنش شیمیایی میان مولکول‌های

بیودندانه و رنگزای با زنجیرهای پپتیدی پشم

علاوه بر این ملاحظه می‌گردد که استفاده از بیودندانه سیچکا در رنگرزی پشم با عصاره کنار سبب بهبود ثبات نوری نمونه‌ها نیز می‌گردد. به خوبی مشخص شده است که با افزایش میزان مولکول‌های رنگزای درون نمونه، تجمع، اندازه و شکل توده‌های رنگی در نمونه تغییر می‌یابد. این موضوع نه تنها سبب کاهش سطح تماس رنگزای با نور می-شود بلکه اثرات فتوشیمیایی را نیز کاهش داده و در نهایت سبب کاهش رنگ‌پریدگی کالا می‌گردد [۳۵]. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، نمونه‌های دندانه‌دار شده با گال سیچکا و رنگرزی شده با رنگزای کنار در مقایسه با نمونه‌هایی که به تنهایی با کنار رنگرزی شده‌اند، از قدرت رنگی بالاتری برخوردار بوده و لذا افزایش غلظت رنگزای درون

رنگرزی منسوجات» سیاست‌ها و افزایش آگاهی‌های زیست‌محیطی را سبب تغییر جهت حرکت صنایع نساجی به سمت پایداری دانسته و به بررسی جدیدترین پیشرفت‌ها در رنگزها و دندان‌های سازگار با محیط‌زیست پرداخته‌اند. آنها بیان نموده‌اند که استفاده از بیودندان‌های گیاهی نه تنها سبب افزایش رمق‌کشی و ثبات رنگی می‌گردد بلکه استفاده از آنها سبب پایداری بیشتر فرآیند رنگرزی و کاهش مشکلات ناشی از دفع دندان‌های فلزی می‌گردد. در این مقاله تلاش شده است تا با شناسایی شیوه‌های پایدار در رنگرزی منسوجات و بررسی جامع رنگزهای طبیعی سازگار با محیط‌زیست و فرآیندهای استخراج و کاربرد آنها به تولیدکنندگان در انتخاب گزینه‌های سازگار با محیط‌زیست برای رنگرزی منسوجات تجاری کمک شود و به این ترتیب نیازهای مصرف‌کننده برای محصولات اخلاقی و آگاهانه از نظر زیست‌محیطی برآورده شود [۳۷]. موسوی و همکاران (۱۴۰۳) در مطالعه خود با عنوان «ارائه مدل توسعه فناوری استفاده از رنگزهای طبیعی در صنعت فرش دستباف با رویکرد پویایی‌شناسی کیفی سیستم» رنگرزی طبیعی را جز جدایی‌ناپذیر فرش دستباف ایرانی از گذشته دور تا به امروز دانسته و مدلی پویا جهت توسعه فناوری استفاده از رنگزهای طبیعی در صنعت فرش دستباف را ارائه داده‌اند [۳۸]. بنلی (۲۰۲۴) در پژوهشی با عنوان «بیودندان‌ها» مروری بر جدیدترین پیشرفت‌ها در زمینه دندان‌های سبز و همچنین روش‌های کاربردی برای استفاده از آنها پرداخته است. در رنگرزی طبیعی، از دندان‌های معدنی به منظور بهبود پایداری رنگ و ایجاد تنوع رنگی

استفاده می‌شود این درحالی است که این دندان‌ها از یون‌های فلزی تشکیل شده‌اند و در پایان فرآیند رنگرزی به عنوان پساب در محیط رها می‌شوند، لذا آسیب عمده‌ای به اکوسیستم وارد می‌کنند. در این پژوهش، بر لزوم استفاده گسترده از انواع دندان‌های تجزیه‌پذیر و جایگزین نمودن آنها با نمک‌های فلزی تأکید شده و مطالعات متعدد انجام شده در این زمینه، مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت دندان‌های طبیعی به سه دسته بیودندان‌های گیاهی، دندان‌های روغنی و دندان‌های نسل جدید و غیر گیاهی طبقه‌بندی شده‌اند [۳۹]. ریپون و همکاران (۲۰۲۴) در مقاله‌ای با عنوان «رنگرزی منسوجات با استفاده از دندان‌ها و رنگزهای طبیعی» افزایش آلودگی محیط‌زیست توسط رنگزهای مصنوعی را مشکلی جدی در صنایع نساجی برشمرده و توسعه روش‌های تولید منسوجات سبز را ضروری دانسته‌اند. در این راستا به معرفی و طبقه‌بندی انواع رنگزها و دندان‌های طبیعی زیست‌تخریب‌پذیر، تجدیدپذیر، غیرخطرناک، غیرآلرژیک و ساده برای استفاده در رنگرزی منسوجات پرداخته‌اند. آنها انواع روش‌های بهبود رنگرزی منسوجات شامل روش‌های فراصوت، پلاسما، اشعه ماوراء-بنفش، مایکروویو و تابش گاما را نیز مورد مطالعه قرار داده‌اند. نتایج این مطالعه نشان داد که بیودندان‌ها نقش مهمی در بهبود اتصال رنگزهای طبیعی به منسوجات و ایجاد ثبات‌های رنگی مناسب دارند [۴۰].

نتایج و دستاوردهای عملی پژوهش حاضر با مطالعات پرانتا و همکاران [۳۷]، طهرانی و مالکی [۴۱]، بنلی [۳۹]، رفیعی [۴۲]، ریپون و همکاران [۴۰]، حاجی [۴۳]، جعفری و

قرنجیک [۴۴] و اصلاحی و مکتوبی [۴۵] مبنی بر لزوم استفاده گسترده از انواع رنگرها و بیودندانه‌های تجزیه پذیر در فرآیند رنگرزی و جایگزین نمودن آنها با رنگهای شیمیایی و نمک‌های فلزی و همچنین نقش بیودندانه‌های گیاهی در بهبود اتصال رنگهای طبیعی به منسوجات و ایجاد ثبات‌های رنگی مناسب، همخوان است. در نهایت پیشنهاد می‌کند محققان بر دغدغه‌ها و اهداف پژوهش حاضر به صورت گسترده‌تری تمرکز نمایند تا بتوانند با معرفی رنگرها و بیودندانه‌های نوین، تجدیدپذیر، در دسترس، سازگار با محیط‌زیست و ارزان قیمت به توسعه پایدار صنایع رنگرزی کمک شایانی نمایند.

۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، سیچکا و ریشه کنار به ترتیب به عنوان بیودندانه سازگار با محیط‌زیست و رنگزای طبیعی برای رنگرزی نخ‌های پشمی مورد استفاده قرار گرفتند. متابولیت‌های ثانویه هر دو گیاه با استفاده از دو روش جوشاندن و فراصوت استخراج گردید و راندمان این دو روش با اندازه‌گیری میزان ترکیبات فنولی و تانن‌ها مقایسه شد. نتایج نشان داد که روش فراصوت در استخراج ترکیبات زیست‌فعال مؤثرتر از روش سنتی بوده و برای هر دو ماده کنار و سیچکا در دمای پایین‌تر و مدت زمان استخراج کوتاه‌تر، قادر به استخراج مقدار ترکیبات زیست‌فعال بیشتری می‌باشد. برای طراحی آزمایش‌ها از روش رویه پاسخ و طراحی مرکب مرکزی استفاده شد. شرایط بهینه رنگرزی بر اساس ارزیابی اثرات پارامترهای رنگرزی و

همچنین برهمکنش آنها با یکدیگر با استفاده از تابع بهینه-سازی نرم‌افزار به دست آمد. بر اساس نتایج به دست آمده، غلظت رنگزا، غلظت بیودندانه و pH حمام رنگرزی بر قدرت رنگی نمونه‌های رنگرزی شده تأثیر معنی‌داری دارند. نتایج به خوبی نشان داد که سیچکا از توانایی بسیار خوبی در افزایش جذب رنگ، تغییر فام رنگی و همچنین بهبود ثبات رنگ در برابر شستشو و نور برخوردار است لذا می‌تواند به عنوان یک بیودندانه ارزان جایگزین دندانه‌های معدنی سمی گردد. بر اساس نتایج حاصل از این تحقیق، سیچکا و ریشه کنار را می‌توان فرآورده‌های جانبی گیاهی مناسب برای استفاده در صنعت نساجی در نظر گرفت که بدون هیچ‌گونه مراحل پیچیده و اثرات نامطلوب زیست‌محیطی قادر به تولید محصولات با ارزش افزوده بالا می‌باشند.

پیشرفت در بیوتکنولوژی، اصلاح ژنتیکی، اصلاح گیاهان و صنایع نساجی می‌توانند سبب کشف منابع ضایعاتی جدید به عنوان رنگرها و دندانه‌های طبیعی برای استفاده در رنگرزی منسوجات گردند. استفاده از ضایعات کشاورزی در زمینه فرآیندهای رنگرزی منسوجات دارای مزایای متعددی از قبیل کاهش باقیمانده‌های مضر، ترویج شیوه‌های دوستدار محیط‌زیست و مقرون به صرفه، کاهش ضایعات و حمایت از جوامع کشاورزی محلی می‌باشد. این فرآیند می‌تواند سبب تولید منسوجات ایمن، ضدآلرژی، ضدباکتری، ضدسرطان و ضدحساسیت نیز گردد. اگرچه امروزه با توجه به اهمیت اجرای اقتصاد چرخشی در صنایع نساجی لزوم تحقیقات بیشتر برای ارزش‌گذاری مواد جانبی گیاهی و ضایعات کشاورزی به عنوان مواد زیستی تجدیدپذیر و

در منسوجات، افزایش آگاهی زیست‌محیطی مصرف‌کننده‌ها و تشویق به پذیرش این مواد توسط صنایع مختلف، از جمله مواردی است که باید در آینده مورد ارزیابی و تحقیقات بیشتری قرار گیرد.

۵- تشکر و قدردانی

از دانشگاه سمنان جهت حمایت مالی‌اش تقدیر و تشکر به عمل می‌آید.

۶- مراجع

- Berger, M., Campos, J., Carolli, M. et al. Advancing the water footprint into an instrument to support achieving the Sdgs – recommendations from the “Water as a Global Resources” Research Initiative, *Water Resource Management*, 35, 1291–1298, 2021.
- Chen, X., Memon, H. A., Wang, Y., Marriam, I., Tebyetekerwa, M. Circular Economy and Sustainability of the Clothing and Textile Industry, *Materials Circular Economy*, 3, 12, 2021.
- Rai, R., Vijayakumar, B. S. Myco-Remediation of Textile Dyes Via Biosorption by *Aspergillus tamarii* Isolated from Domestic Wastewater, *Water, Air, and Soil Pollution*, 234, 542, 2023.
- Saeed, T., Hanif, M. A., Rashid, U., Hanif, M. A., Rashid, U., Anwar, H., Bhatti, J. A., Alharthi, F. A., Han, J., Yoo, J. Utilisation of Sunflower Marble Waste Nanocomposites for Efficient Removal of Dyes from Wastewater: Synthesis, Adsorption Performance, and Characterization. *Water, Air, and Soil Pollution*, 234, 678, 2023.
- Allouche, J. The Governance of Central Asian Waters: National Interests Versus

کم‌هزینه مورد نیاز است تا جایگزین مناسبی برای مواد خطرناک و آلاینده شیمیایی شوند، اما با این وجود، محدودیت‌های مهمی برای توسعه و کاربردهای بعدی آنها وجود دارد. مشکلاتی از قبیل بهینه‌سازی فرآیند، روش‌های آماده‌سازی و استخراج، فرآیندهای طولانی استخراج، اثرات مرتبط با مواد خطرناک فلزی، ثبات‌های رنگی، استانداردهای، تغییرپذیری، توسعه ویژگی‌های عملکردی

Regional Cooperation in Disarm. InForum, 46-55, 2007.

- Mia, R., Selim, M., Shamim, A. M., Chowdhury, M., Sultana, S., Armin, M., Hossain, M., Akter, R., Dey, S., Naznin, H. Review on various types of pollution problem in textile dyeing & printing industries of Bangladesh and recommendation for mitigation, *J Textile Eng Fashion Technol.*, 5(4), 220–226, 2019.
- Benkhaya, S., M'rabet, S., El Harfi, A. A review on classifications, recent synthesis and applications of textile dyes, *Inorganic Chemistry Communications*, 115, 107891, 2020.
- Mirjalili, M., Nazarpour, K., Karimi, L. Eco-friendly dyeing of wool using natural dye from weld as co-partner with synthetic dye, *J. Cleaner Prod.*, 19, 1045–1051, 2011.
- Paulo, H. F., Pereira, S. A., Costa, S. M., Costa, V. A. Efficient production of lignin nanoparticle colloids and their feasibility for eco-friendly dyeing of natural and synthetic textile fabrics, *Industrial Crops and Products*, 225, 120390, 2025.
- Charnley, F., Cherrington, R., Mueller, F., Jain, A., Nelson, C., Wendland, S., Ventosa, S. Retaining product value in post-consumer

- textiles: how to scale a closed-loop system, *Resour. Conserv. Recycl.* 205, 107542, 2024.
11. Al-Etaibi, A., El-Asasery, M. A., Mahmoud, H., Al-Awadi, N. Synthesis, characterization and antimicrobial activity, and applications of new azo pyridone disperse dyes on polyester fabric, *European Journal of Chemistry*, 5(2), 321-327, 2014.
 12. Shrivastava, A., Jain, G., Kamble, S.S., Belhadi, A., Sustainability through online renting clothing: circular fashion fueled by instagram micro-celebrities, *J. Clean. Prod.*, 278, 2021.
 13. Fazeli Nasab, B., Mirzaei, N. Evaluation of Total Phenol and Flavonoid Content in a Wide Range of Local and imported Plants. *J. Ilam Uni. Med. Sci.* 26 (2), 141-154, 2018.
 14. Khorsandi, L. S., Rahbar, N., Shirani, M., Evaluation of Therapeutic Properties of Sidr (*Zizyphus Spina-Christi*) in the Teachings of Islamic, Persian Medicine and its Conformity with the New Findings of Medical Sciences. *Med Hist J*, 11(40), 79-87, 2019.
 15. Ahmadi, R., Rahimi, S., Ehteshamzad, N., The effect of hydroalcoholic *Zizyphus spina-christi* leaf extract on breast cancer cell life (MCF7) and evaluation of Bax and Bcl2 genes expression level. *Feyz*, 21(5), 407-413, 2017.
 16. Agrawal, P., Singh, T., Pathak, D., Chopra, H., An updated review of *Zizyphus jujube*: Major focus on its phytochemicals and pharmacological properties, *Pharmacological Research - Modern Chinese Medicine*, 8, 100297, 2023.
 17. Yagoub, A. E. A., Alshammari, G. M., Subash-Babu, P., Mohammed, M. A., Yahya, M. A., Alhosain, A. I., Synthesis of *Zizyphus spina-christi* (Jujube) Root Methanol Extract Loaded Functionalized Silver Nanoparticle (ZS-Ag-NPs); Physicochemical Characterization and Effect of ZS-Ag-NPs on Adipocyte Maturation, Adipokine and Vascular Smooth Muscle Cell Interaction, *Nanomaterials*, 11, 2563, 2021.
 18. Elaoui M., Hamdi, S. H., Nasr, R. B., Ghazghazi, H., Bouslih, E., Laamouri, A., Ammari, Y., Mediouni, J., Characterization of epicatechin contents in the *Zizyphus spina-christi* L. root extracts using LC-MS analyses and their insecticidal potential, *Plant Biosystems - An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology*, 155, 685-690, 2021.
 19. Li, S., Zhai, S., Che, Y. Determination of the tannins content in *Zizyphus jujuba* roots and its extraction technology, *Medicinal plant*, 4(1), 69-71, 2013.
 20. Edalatpanah, Y., Rezaei Zarchi, S., Enayati Parvar, F., Rostam Pour, S., Moradi Jafari, L., Investigation of the complementary anti-diabetic effect of *Zizyphus spina-christi* alcohol extract and insulin in male Wistar diabetic male rats. *Experimental animal Biology*, 7(4), 11-17, 2019.
 21. Rehman, A., Irfan, M., Hameed, A., Saif, M. J., Abdul Qayyum, M., Farooq, T., Chemical-Free Dyeing of Cotton with Functional Natural Dye: A Pollution-Free and Cleaner Production Approach, *Front. Environ. Sci*, 16, 2022.
 22. Das, A. K., Islam, N., Faruk, O., Ashaduzzaman, M., Dungani, R., Review on tannins: extraction processes, applications and possibilities. *South Afr. J. Bot.* 135, 58-70, 2020.
 23. Zhang, Y., Zhou, Q., Rather, L. J., Li, Q., Agricultural waste of *Eriobotrya japonica* L. (Loquat) seeds and flora leaves as source of natural dye and bio-mordant for coloration and bio-functional finishing of wool textiles, *Ind. Crops Prod.*, 169, 113633, 2021.

24. Zargaran, M. R., Sadeghi, S. E., Tavakoli, M., Morphobiological specifications of Mazooj gall in oak forests of west Iran. Iran. J. For. Range Prot. Res. 5(2), 105-113, 2007.
25. Paydar, M., Identification of chemical components of gall-induced by oak cynipid wasps and study on their insecticidal activity, Master thesis, Razi University, 2013.
26. Izadian, P., Hemmateenejad, B., Multi-response optimization of factors affecting ultrasonic assisted extraction from Iranian basil using central composite design, Food Chem., 190, 864-870, 2016.
27. Aynehchee, F., Bagherzadeh Kasiri, M., Gharanjig, K., Study and Optimization of Extraction of Dye from Weld with Ultrasonic Waves Assisted Extraction (Uae), J. Color. Sci. Tech., 12(2), 115-124, 2018.
28. Sivakumar, V., Verma, V. R., Rao, P. G., Swaminathan, G., Studies on the use of power ultrasound in solid-liquid myrobalan extraction process. J. Clean. Prod., 15(18), 1813-1818, 2007.
29. Wang, L., Waler, CL. Recent advances in extraction of nutraceuticals from plants, Trends Food Sci. Technol., 17, 300-312, 2006.
30. Taheriyoun, M., Memaripour, A., Evaluation of Coagulation and Flocculation Process in Removal of Heavy Metals from Chemical Wastewater of Mobarakeh Steel Complex. Journal of Environmental Science and Technology, 21(6), 46-60, 2019.
31. Shabbir, M., Rather, L. J., Shahid, ul I., Bukhari, M. N., Shahid, M., Khan, M. A., Mohammad, F., An eco-friendly dyeing of woolen yarn by Terminalia chebula extract with evaluations of kinetic and adsorption characteristics, J Adv Res, 7, 473-482, 2016.
32. Ali, SH., Hussain, T., Nawaz, R., Optimization of alkaline extraction of natural dye from Henna leaves and its dyeing on cotton by exhaust method, J Clean Prod., 17, 61-66, 2009.
33. Singh, G., Mathur, P., Singh, N., Sheikh, J., Functionalization of wool fabric using kapok flower and bio-mordant, Sustainable Chem. Pharm., 14, 100184, 2019.
34. Uddin, M. G., Effects of different mordants on silk fabric dyed with onion outer skin extracts, Journal of Textiles, 405626, 1-8, 2014.
35. Manian, A. P., Paul, R., Bechtold, T., Metal mordanting in dyeing with natural colorants, Color. Technol., 132, 107-113, 2016.
36. Hosseinezhad, M. Gharanjig, K., Review on Metal and Natural Mordants for Dyeing Fibers. Journal of Studies in Color World, 10(4), 21-30, 2021.
37. Pranta, A. D., Rahaman, Md. T., Extraction of eco-friendly natural dyes and biomordants for textile coloration: A critical review, Nano-Structures & Nano-Objects, 39, 101243, 2024.
38. Mousavi, A., Zakariaei Kerman, I., Haji Gholam Saryazdi, A. Designing of the Technology Development Model the Use of Natural Dyes in the Handwoven Carpet Industry with a Qualitative System Dynamics Approach. Journal of Studies in Color World, 14(4), 303-313, 2024.
39. Benli, H., Bio-mordants: a review. Environ Sci Pollut Res Int., 31(14), 20714-20771, 2024.
40. Repon, M. R., Dev, B., Rahman, M. A., et al. Textile dyeing using natural mordants and dyes: a review. Environ Chem Lett, 22, 1473-1520, 2024.
41. Tehrani, M. Maleki, N., The effect of plant and metallic mordants on the colorimetric and fastness properties of wool yarns dyed with cochineal natural colorant. Journal of Textile Science and Technology, 2025.
42. Rafiei, S., Comparison of colorimetric parameters and antibacterial effect of two dyes,

henna and jaft, on silk. Journal of Textile Science and Technology, 13(1), 15-29, 2024.

43. Haji, A., Methods of Improvement of Dyeability of Wool with Natural Dyes. Journal of Studies in Color World, 11(2), 1-16, 2021.

44. Jafari, R. Gharanjig, K., A Study on Colorimetric Attributes of Natural Fibers Dyed

with Natural Colorants. Journal of Studies in Color World, 8(1), 63-74, 2018.

45. Eslahi, N. Maktoobi, S., Dyeing of nylon fabrics with natural sumac dye using recycled feather keratin. Journal of Textile Science and Technology, 11(1), 1-10, 2022.