مروری بر گسترهٔ کاربرد و توسعهٔ رنگزاهای طبیعی

زهرا احمدی

گروه آموزشی فرش، دانشکده هنرهای کاربردی، دانشگاه هنر ایران، تهران، ایران

ahmadi@art.ac.ir

تاریخ دریافت ۱۴۰۴/۰۷/۰۷ تاریخ پذیرش ۱۴۰۴/۱۱/۱۹

چکیده

افزایش آگاهی نسبت به آلاینده‌های صنعت نساجی و رنگزاهای مصنوعی، سبب تغییر انقلابی در بخش نساجی به سمت پایداری شده است. جستجو برای جایگزین‌های سازگار با محیط زیست برای رنگزاها و تثبیت‌کننده‌های مصنوعی رایج، که اغلب خطرات جدی برای سلامت انسان و محیط زیست ایجاد می‌کنند، در قلب این جنبش قرار داشته و با سرعت چشمگیری در جریان است. نتایج پژوهش‌ها نشان داده رنگزاهای طبیعی که در گذشته بیشتر از منابع گیاهی، حیوانی یا معدنی به دست می‌آمدند، به دلیل سازگاری با محیط زیست و پایداری، جایگزین خوبی برای رنگزاهای مصنوعی شده‌اند و محققین به دنبال شناخت ساختارهای شیمیایی آن‌ها، توسعهٔ فام‌های رنگی متنوع، کشف منابع جدیدتر از رنگزاهای طبیعی و رفع محدودیت‌های رنگزاهای طبیعی هستند. در این مقاله، نتایج تحقیقات گسترده در حوزهٔ جدیدترین پیشرفت‌ها در شناخت منابع رنگزاها و دندانه‌های زیستی سازگار با محیط زیست، چگونگی کاهش تأثیر زیست‌محیطی دندانه های معدنی، مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین آخرین دستاوردها در مورد روش‌های مختلف استخراج مواد رنگزا، از جمله فناوری‌های مدرن مانند اولتراسونیک، استخراج سیال فوق بحرانی و استخراج با کمک مایکروویو در روش‌های استخراج سنتی بیان شده‌اند. کارآیی و ویژگی رنگزاهای طبیعی از جمله خواص دارویی، خاصیت ضدبو، آنتی‌باکتریال و آنتی‌میکروب، ضدبید، محافظ پرتو فرابنفش، مطرح شده‌اند. نتایج پژوهش‌ها نشان داد که علیرغم توسعهٔ کاربرد رنگزاهای طبیعی در علوم مختلف و تعیین سهم کشورها و پژوهشگران در این پژوهش‌ها، هنوز نیاز به مطالعات جدی در سازگار نمودن رنگزاهای طبیعی با ماشین آلات رنگرزی و افزایش راندمان و کیفیت رنگرزی وجود دارد.

کلمات کلیدی: رنگزای طبیعی، استخراج رنگزا، دندانه، خواص رنگزاهای طبیعی

A Review of the Scope of Application and Development of Natural Dyes

Zahra Ahmadi

Carpet Department, Faculty of Applied Arts, Iran University of Art, Tehran, Iran

ahmadi@art.ac.ir

Abstract

The growing awareness of pollutants from the textile industry and synthetic dyes has led to a revolutionary shift in the textile sector towards sustainability. At the heart of this movement is the search for eco-friendly alternatives to conventional synthetic dyes and mordants, which often pose serious risks to human health and the environment. This search is progressing rapidly. Research findings have shown that natural dyes—traditionally derived from plant, animal, or mineral sources—have become promising alternatives to synthetic dyes due to their environmental compatibility and sustainability. Scientists are increasingly focused on understanding the chemical structures of these dyes, developing a wider range of color shades, discovering new natural dye sources, and overcoming the limitations of natural dyes. This article reviews the results of extensive research on the latest developments in identifying eco-friendly dye sources and bio-based mordants, as well as strategies for reducing the environmental impact of mineral mordants. It also presents the latest achievements in various dye extraction methods, including modern technologies such as ultrasonic extraction, supercritical fluid extraction, and microwave-assisted extraction, in comparison to traditional methods. The efficiency and functional properties of natural dyes are also discussed, including medicinal benefits, deodorizing effects, antibacterial and antimicrobial properties, moth repellence, and UV protection.Research results indicate that, despite the growing application of natural dyes across different scientific fields and the documented contributions of countries and researchers in this domain, there is still a need for more in-depth studies to adapt natural dyes to dyeing machinery and to improve dyeing efficiency and quality.

Keywords: Natural Dyes, Dye Extract, Mordant, Properties of Natural Dye

۱- مقدمه

رنگزاها و رنگدانه‌های طبیعی به طور گسترده در منسوجات، رنگزاهای غذایی، لوازم آرایشی، چرم و داروسازی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این رنگزاها به دلیل ترجیح مصرف‌کنندگان برای منسوجات سازگار با محیط زیست و پایدار، محبوبیت یافتند. جداسازی اجزای رنگزاهای طبیعی و توصیف آنها به شناسایی خواص اضافی علاوه بر زیست‌تخریب‌پذیر بودن، سازگار با محیط زیست بودن و حساسیت‌زایی کمتر کمک می‌کند [۱-۵]. رنگزاهای طبیعی نه تنها به دلیل جذابیت زیبایی‌شناختی، بلکه به دلیل خواص مختلف خود، از جمله اثرات ضد باکتری، ضد ویروسی، ضد سرطانی، ضد التهابی، و آنتی‌اکسیدانی، ارزش بازار خود را افزایش داده‌اند. در واقع، رنگزاهای طبیعی تهیه شده از گیاهان، حیوانات و میکروارگانیسم‌ها تجزیه‌پذیری و سازگاری بهتری با محیط زیست دارند. اهمیت رنگزاهای طبیعی در دوران مدرن، به دنبال آگاهی فزاینده‌ای از معایب رنگزاهای مصنوعی، دوچندان شده است. پس از کشف رنگزاهای آنیلین از قطران زغال سنگ در سال ۱۸۵۶، استفاده از رنگزاهای مصنوعی به سرعت گسترش یافت. در حال حاضر، پیش‌بینی می‌شود که بیش از ۱۰،۰۰۰ نوع ماده رنگزای مصنوعی مختلف در صنایع نساجی به کار می‌رود و سالانه بیش از ۷۰۰،۰۰۰ تن رنگزای مصنوعی در سطح جهان مصرف می‌شود. این گسترش بی‌رویه، اگرچه تنوع و پایداری رنگی بیشتری به ارمغان آورد، اما چالش‌های زیست‌محیطی و بهداشتی فراوانی را نیز به همراه داشته است. ناکارآمدی فرآیندهای رنگرزی در صنعت، منجر به رهاسازی حدود ۲۰۰،۰۰۰ تن از این رنگزاها به عنوان پساب به محیط زیست می‌شود که آسیب‌های جبران‌ناپذیری را به اکوسیستم‌ها وارد می‌کند (۵-۶). بسیاری از رنگزاهای مصنوعی، به ویژه رنگزاهای مبتنی بر آزو، سرطان‌زا شناخته شده‌اند. برای رنگرزی پایدار، رنگزاهای طبیعی یکی از بهترین جایگزین‌ها برای رنگ‌های مصنوعی هستند. علاوه بر این، رنگزاهای طبیعی در رنگ‌آمیزی مواد غذایی، لوازم آرایشی، سلول‌های خورشیدی حساس به رنگ، رنگ‌آمیزی بافت‌شناسی، نشانگر pH و چندین زمینه کاربردی دیگر استفاده می‌شوند [۷-۹]. مصرف‌کنندگان امروزی، به دنبال منسوجات و محصولاتی هستند که در کنار زیبایی و جنبهٔ کاربردی، سازگار با محیط زیست و پایدار نیز باشند. این گرایش به رنگزاهای طبیعی، به دلیل زیست‌تخریب‌پذیری، ایمنی و تجدیدپذیری‌شان، جایگاه ویژه‌ای بخشیده است. این مقاله به بررسی جامع رنگزاهای طبیعی، از تاریخچه و منابع گرفته تا روش‌های استخراج، کاربردها، چالش‌ها و چشم‌انداز آینده آن‌ها می‌پردازد.

۲- تاریخچه استفاده از رنگزاهای طبیعی

استفاده از رنگزاها از عصر حجر آغاز شد و پس از توسعه تکنیک بافندگی، استفاده از رنگزاها در بسیاری از تمدن‌های باستانی به منسوجات گسترش یافت. تخمین زده می‌شود که اولین کاربردهای رنگزاهای طبیعی روی الیاف نساجی در بین‌النهرین و هند در ۴۰۰۰ سال قبل از میلاد

مسیح آغاز شده باشد (۸-۱۱). شواهد یافت شده از سایت باستان شناسی نشان می دهد که استفاده از رنگ از دوره نوسنگی عصر برنز در ۳۳۰۰ سال قبل از میلاد آغاز شده است. گروهی از پارچه های قرمز رنگ یافت شده از دوره نوسنگی با اخرای قرمز (اکسید آهن خاک رس) به رنگ قرمز درآمده بودند. در مصر، در اوایل سلسله اول، مومیایی‌ها در پارچه کتانی قرمز رنگ شده با رنگ روناس پیچیده می‌شدند (۱۰). از اوایل ۱۶۰۰ سال قبل از میلاد، رنگ بنفش برای رنگرزی پارچه استفاده می‌شد. از قرن ۱۳ تا ۱۵ قبل از میلاد در سواحل شمالی سوریه، از پوسته‌های صدف‌های مورکس برای تولید رنگ بنفش استفاده می‌شد (۸و ۱۲). برخی از رنگزاهای رایج باستانی شامل روناس، نیل، زعفران یا زردچوبه بودند، در حالی که گل اخری، سنگ آهک و زغال سنگ رنگدانه‌های مهمی بودند (۱۳-۸). برای هزاران سال، قبل از کشف رنگزاهای مصنوعی در سال ۱۸۵۶، تنها منابع موجود برای رنگرزی منسوجات و دیگر مواد، همین رنگزاهای مشتق شده از طبیعت بودند (۱۱). در عصر حجر باستان، مواد معدنی رنگی رنگدانه‌های اصلی مورد استفاده بودند، در حالی که در فنیقی‌ها، هند باستان، روم باستان، مصر باستان و آفریقای باستان از مواد معدنی و همچنین رنگزاهای زیستی استفاده می‌شد. در دوران باستان، رنگ‌ها نمادی از جایگاه اجتماعی، قدرت و اعتقادات بودند. برای مثال، رنگ بنفش تیری، که از حلزون‌های دریایی خاصی به دست می‌آمد، آنقدر کمیاب و گران‌بها بود که در هزاره اول پیش از میلاد توسط فنیقی‌ها در منطقه مدیترانه به یک کالای تجاری لوکس تبدیل شد و فقط پادشاهان و اشراف قادر به استفاده از آن بودند. گفته می‌شود که یونانیان، فنیقی‌ها را از روی فینیکه، کلمه یونانی باستان به معنای "رنگ قرمز"، نامگذاری کردند، احتمالاً به دلیل تجارت معروف بنفش آنها در زمان تأسیس تمدن‌های مدیترانه‌ای بود. این رنگ، به عنوان اولین رنگ جهانی شناخته می‌شود که در مقیاس وسیع تجارت می‌شد و جایگاه مهمی در تمدن‌های مدیترانه‌ای داشت (۱۲). در سال‌های بین ۳۰۰ تا ۴۰۰ میلادی، صنایع دستی یونانی که به عنوان پاپیروس استکهلم شناخته می‌شوند، حاوی جزئیات و روش‌های رنگرزی بودند (۱۲). در سال ۱۵۴۰، کتاب پلیکتود لارتاید تنتوری [1] اثر خالق ونیزی، جیووانی ونتور روزتی (که به صورت جیووانی ونتورا روزتی نیز ثبت شده است) دستورالعمل‌هایی برای استفاده از رنگزای لاک، نیل و همچنین ۲۱۷ گیاه مختلف برای رنگرزی پارچه، لباس، پنبه و ابریشم با انواع مختلف رنگزاها را ثبت می‌کند. این کتاب بهترین راهنمای رنگرزی را برای ۲۰۰ سال آینده ارائه داده است (۱۴). قدمت غیرقابل درک هنر رنگرزی به لطف پیشرفت‌های عظیم انجام شده در تحقیقات باستان‌شناسی و تاریخی در طول صد سال گذشته است. در دهه‌های گذشته، محققان از تجزیه و تحلیل منسوجات باستانی به تاریخچه استفاده از رنگزاهای طبیعی و نوع آنها پی برده‌اند و رنگزاها را با آزمایش‌های میکروشیمیایی مانند TLC، HPLC فاز معکوس، طیف‌سنجی FT-IR، طیف‌سنجی UV-Visible، فلورسانس اشعه ایکس و

[1] Tentori Plicthode Lartide

تکنیک‌های طیف‌سنجی پراکندگی انرژی اشعه ایکس (EDX) مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند (۱۵-۲۰ و ۱۰). این پیشرفت‌ها اهمیتی را که اجداد ما به رنگ می‌دادند، برجسته می‌کند. علاوه بر این، مطالعات رنگزاها در منسوجات باستان‌شناسی می‌تواند الهام‌بخش تحقیقات گیاه‌شناسی، جانورشناسی و شیمیایی و همچنین آزمایش‌های فنی باشد (۲۱). هنرمندان و صنعتگران باستانی، با تسلط بر هنر استخراج و تثبیت این رنگزاها، آثاری بی‌نظیر خلق می‌کردند که پایداری و زیبایی آن‌ها حتی پس از قرن‌ها نیز تحسین‌برانگیز است، نمونهٔ آنها رنگزاهای به‌کار رفته در فرش پازیریک است. با شروع انقلاب صنعتی و توسعه تمدن بشری و افزایش جمعیت، نیاز به رنگزاها و رنگدانه‌ها با توجه به تمایل انسان به رنگزاها در مقدار مورد نیاز و با هزینه کم و دوام بالا افزایش یافته است. استفاده از رنگزاها و رنگدانه‌های طبیعی تا اواسط قرن نوزدهم، پس از سنتز اولین رنگ مصنوعی بنفش یا بنفش آنیلین در سال ۱۸۵۶ توسط ویلیام هنری پرکین، بدون وقفه ادامه داشت. با این حال، در دهه‌های اخیر، به دلیل افزایش آگاهی نسبت به تهدیدات زیست‌محیطی و خطرات سلامتی ناشی از رنگزاهای مصنوعی، علاقه به رنگزاهای طبیعی دوباره اوج گرفته است. رنگرزی طبیعی عنصری از میراث فرهنگی ناملموس است که امروزه اهمیت جدیدی پیدا می‌کند. در سال‌های ۲۰۱۶ و ۲۰۱۷ نظرسنجی‌ای در بین شرکت‌کنندگان در کارگاه‌های رنگرزی در مناطق مختلف لتونی انجام شد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از منابع نوشتاری نقش مهمی در تمرین رنگرزی طبیعی دارد. با فعالیت‌های مختلفی که توسط قوم‌نگاران حرفه‌ای و آماتور، هنرمندان، معلمان صنایع دستی و غیره سازماندهی شده است و همچنین پوشش آن در مطبوعات، رنگرزی طبیعی اهمیت خود را حفظ نماید. متون مکتوب، فعالیت‌های انجام‌شده در زمینه رنگرزی طبیعی را مستند کرده و توسعه بیشتر این سنت را تشویق کرده‌اند. علاوه بر این، از منابع مختلفی برای حفظ و توسعه مهارت‌های رنگرزی، از طریق مشاهده مستقیم-سنت شفاهی و مطالب نوشتاری-بصری، استفاده شده است (۱۹-۲۲). در ایران نیز تحقیقات زیادی جهت شناخت رنگزاهای بومی و ثبت روش‌های سنتی رنگرزی در مناطق محتلف انجام شده است.

۱ ۲ منابع رنگزاهای طبیعی و دسته بندی آنها

در طبیعت، طیف وسیعی از گونه‌های گیاهی، حیوانی و معدنی وجود دارد که هر کدام می‌توانند منبعی غنی برای استخراج رنگزاهای طبیعی باشند. این تنوع، امکان تولید پالت‌های رنگی گسترده و خواص عملکردی منحصر به فردی را فراهم می‌آورد (۲۵-۲۳و ۱۸، ۱۵، ۶). رنگزاهای طبیعی به دسته اصلی گیاهی، حیوانی و معدنی تقسیم می‌شوند که البته در سال‌های اخیر، منابع دیگری نیز یافت شده‌اند.

۱ ۱ ۲ رنگزاهای گیاهی

گسترده‌ترین و متنوع‌ترین منبع رنگزاهای طبیعی، گیاهان هستند. تقریباً تمام قسمت‌های گیاه می‌توانند حاوی

ترکیبات رنگزا باشند (۲۳). برگ‌ها: مانند برگ نیل (برای رنگ آبی) یا برگ انبه (برای رنگ زرد)، میوه‌ها: مانند پوست انار، انواع توت‌ها (برای رنگ‌های قرمز و بنفش) یا هلیله زرد (برای رنگ زرد)، ریشه‌ها: مانند ریشه روناس یا چغندر، (برای رنگ قرمز) یا زردچوبه (برای رنگ زرد)، پوست درختان: مانند پوست درخت بلوط یا گردو (برای رنگ‌های قهوه‌ای و سیاه) یا پوست کاج برای رنگ زرد، گل‌ها: مانند گل همیشه بهار (برای رنگ زرد و نارنجی)، اسپرک برای رنگ زرد، ساقه‌ها و چوب: مانند چوب صندل (برای رنگ قرمز).

۲ ۱ ۲ رنگزاهای حیوانی

اگرچه کمتر از گیاهان، اما برخی از حیوانات نیز منبع رنگزاهای طبیعی هستند. مهم‌ترین نمونه‌ها عبارتند از:

از غدد هایپوبرانشیال نرم‌تنان، حلزون مورکس (حلزون‌های دریایی که منبع رنگ بنفش تیران هستند) ماهی مرکب و صدف ارغوان و حشرات. در مجموع شش گونه حشره متعلق به چهار خانواده از راسته نیم‌بالان[1] وجود دارد که در تولید رنگ قرمز به عنوان یک ماده رنگزای طبیعی حیوانی استفاده می‌شوند (۲۶-۳۰). حشره قرمزدانه[2] که از نوعی حشره به دست می‌آید و رنگ قرمز روشن و ماندگاری تولید می‌کند.

۲ ۱ ۳ رنگزاهای معدنی

برخی از مواد معدنی نیز می‌توانند به عنوان رنگدانه یا رنگزا مورد استفاده قرار گیرند، به دلیل اثرات زیست محیطی و حفظ کیفیت کالای نساجی کاربرد رنگزاهای معدنی کمتر از رنگزاهای گیاهی و رنگزاهای حیوانی است. سولفید جیوه HgS، یا شنگرف که به سینابار معروف است و اکسید هیدراته آهن، Fe_2O_3nH2O (آکر) برای فام‌های قرمز استفاده می‌شد.کربنات کلسیم $CaCO_3$، اکسید روی ZnO و.. به عنوان رنگ سفید برای نقاشی استفاده می‌شد و شامل رنگدانه‌های دندانه‌های بی‌رنگ هستند (۳۱).

۲ ۱ ۴ منابع جدید و نوظهور

پسماندهای کشاورزی و صنعتی، یک رویکرد نوین و پایدار، استفاده از ضایعات کشاورزی و صنایع غذایی به عنوان منابع رنگزا است. نتایج تحقیقات محققین نشان داده که به جای دور ریختن این مواد، می‌توان از آن‌ها برای استخراج رنگزاها استفاده نمود. ترکیبات زیست‌فعال به‌دست‌آمده از محصولات جانبی گیاهان، به دلیل فواید بالقوه‌شان برای سلامتی انسان، به‌عنوان عوامل آنتی‌اکسیدانی، ضدالتهابی و ضدمیکروبی، به‌عنوان مواد تشکیل‌دهنده در داروهای سنتی و صنایع غذایی نیز شناخته می‌شوند. از سوی دیگر، اخیراً طیف گسترده‌ای از رنگزاها از منابع طبیعی در بخش‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند تا اثرات منفی زیست‌محیطی رنگزاهای مصنوعی، به‌ویژه در تولید منسوجات مدرن، کاهش یابد. با

[1] Hemiptera

[2] Cochineal

رویکرد به این موارد، این مقالات ترکیبات شیمیایی مختلف متابولیت‌های ثانویه گیاهی، از جمله فلاونوئیدها، تانن‌ها، اسیدهای فنولیک، روغن‌های ضروری، لاله‌پالین‌ها و عواملی را که بر فرآیند جداسازی تأثیر می‌گذارند، بررسی می‌کند (۳۳-۳۴). محققین از ضایعات، پوست مرکبات، گل محمدی، برگ و پوست انبه که معمولاً دور ریخته می‌شوند برای رنگرزی کالای پشمی و پنبه ای استفاده نمودند. در رنگرزی کالای پشمی با پوست مرکبات علاوه بر دستیابی به فام زرد با ثبات قابل قبول، بوی معطر ماندگار نیز ایجاد شد. پوست پیاز، تفاله قهوه، نیز از جمله این ضایعات هستند (۳۵-۳۶). این رویکرد نه تنها به تولید رنگزا کمک می‌کند، بلکه به کاهش ضایعات و توسعه اقتصاد چرخشی نیز یاری می‌رساند.

رنگزاهای میکروبی[1]، این دسته از رنگزاها نسبتاً جدید و در حال تحقیق هستند. برخی از میکروارگانیسم‌ها (مانند باکتری‌ها و قارچ‌ها) قادر به تولید رنگدانه‌های طبیعی هستند. اساساً دو مرحله برای تولید رنگدانه میکروبی اعمال می‌شود: مرحله اول جستجوی منبعی برای جداسازی میکروارگانیسم‌ها است. مرحله دوم افزایش بازده منبع از قبل شناخته شده از طریق بهینه‌سازی یا بهبود سویه است (۳۶ و ۳۴). باکتری‌های تولیدکننده رنگدانه از زیستگاه‌های اکولوژیکی مختلفی مانند خاک، شن و ماسه بیابان (۳۸)، آب شیرین، نمونه دریایی، خاک اطراف ریشه گیاهان (۴۱)، منطقه نمکی گزارش شده‌اند و همچنین به عنوان گیاهانی که درون گیاهان دیگر رشد می‌کنند (اندوفیت)[2] باقی می‌مانند (۳۹-۴۰). عواملی مانند pH، دما، نور موجود، ترکیب محیط کشت، اکسیژن و آب بر تولید رنگدانه از طریق قارچها تأثیر می‌گذارند (۴۱-۴۲). رنگزاهای میکروبی مزایایی مانند بازده تولید بالا، رنگ‌های روشن و خواص عملکردی منحصر به فرد دارند. استفاده از این منابع می‌تواند به کاهش نیاز به زمین‌های کشاورزی و همچنین کنترل بهتر کیفیت و تولید رنگ کمک کند. این رویکرد پتانسیل زیادی برای آینده صنعت رنگرزی پایدار دارد (۴۳ و ۳۴). در نمودار شکل ۱، انواع رنگزاهای طبیعی با ذکر مثال نشان داده شده اند.

شکل ۱- انواع کاربرد رنگزاهای طبیعی [۴۳]

۲ ۲ ساختار شیمیایی رنگزاهای طبیعی

رنگزاهای موجود در منابع طبیعی، به خصوص با منشأ گیاهی، عمدتاً شامل سه دسته اصلی از ترکیبات شیمیایی هستند که مسئول تولید رنگ‌های مختلف می‌باشند(۴۴-۴۳):

[1] Microbial Dyes

[2] endophytes

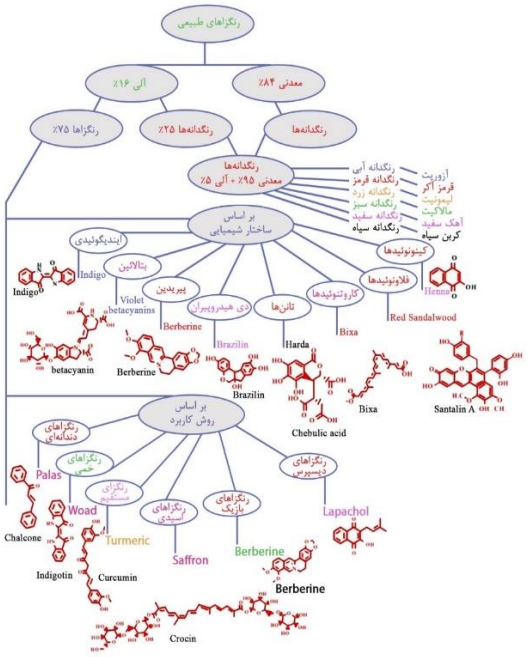
فلاونوئیدها[1]: این ترکیبات یکی از رایج‌ترین گروه‌های رنگزا در گیاهان هستند. فلاونوئیدها خود شامل زیردسته‌هایی مانند فلاونول‌ها، فلاوانون‌ها و آنتوسیانین‌ها می‌شوند. این ترکیبات مسئول طیف وسیعی از سایه‌های قهوه‌ای، زرد و سبز هستند. آنتوسیانین‌ها نیز مسئول رنگ‌های قرمز، آبی و بنفش در بسیاری از گل‌ها و میوه‌ها می‌باشند.

آنتراکینون‌ها[2]: این گروه از ترکیبات، عمدتاً مسئول رنگ‌های قرمز، نارنجی و قهوه‌ای هستند. روناس[3] یکی از شناخته‌شده‌ترین منابع آنتراکینون‌ها است که از دیرباز برای تولید رنگ قرمز استفاده می‌شده است. رنگزای موجود در ریشه روناس دارای ساختار اصلی آنتراکینون بوده که با استخلاف‌های جانبی مختلف، تنوعی از ساختارهای شیمیایی نظیر روبیادین، پورپورین، پزدوپورپورین و از همه مهم‌تر آلیزارین را در خود دارد.

ساختارهای ایندیگوئیدی[4]: مهم‌ترین نمونه در این دسته، نیل[5] است که رنگ آبی پررنگ و محبوبی را تولید می‌کند. ایندیگو از گیاهان مختلفی مانند نیل‌دار[6] و وسمه[7] استخراج می‌شود. ۶ و۶ دی‌بروموایندیگو نیز مسئول رنگ بنفش تیری است (۴۵). در شکل شماره ۲ دسته بندی رنگزاهای طبیعی با ساختار شیمیایی نشان داده شده است. همانطور که "سیوا" (۴۶) و "سامانتا و آگاروال" (۴۷) اشاره می‌کنند، برخلاف رنگزاهای مصنوعی که معمولاً یک ماده شیمیایی منفرد هستند، رنگزاهای طبیعی اغلب حاوی بیش از یک ماده شیمیایی هستند. هر کدام از این ترکیبات، بسته به گروه عملکردی (ترکیب شیمیایی و ساختار) خود، می‌توانند رنگ‌ها و خواص متنوعی را به صورت جداگانه یا در ترکیب با گروه‌های مختلف نشان دهند. این پیچیدگی شیمیایی، به رنگزاهای طبیعی عمق و زیبایی خاصی می‌بخشد که اغلب در رنگزاهای مصنوعی یافت نمی‌شود. همین مساله سبب عدم تکرارپذیری در روش‌های مستقیم رنگرزی با گیاهان است. به طور مثال مادهٔ رنگزای روناس حاوی ترکیبات شیمیایی متعددی است که متاثر از سن و محل جغرافیایی گیاه متغیر است. احمدی و همکاران در رنگرزی کالای پشمی با انواع روناس از مکان‌های جغرافیایی مختلف و یا با سنین متفاوت، به نتایج قابل توجهی دست یافتند. فام رنگی متفاوتی متاثر از محل جغرافیایی کشت گیاه و سن آن ایجاد شد.

در کنار سن گیاه و محل جغرافیایی، نحوه کشت، داشت و برداشت گیاه، مواد کمکی رنگرزی و روش رنگرزی نیز در نتیجه نهایی بسیار موثر است [۴۸-۴۹]. در کاربرد رنگزاهای طبیعی با ساختار شیمیایی آنتوسیانین مشخص شد که حساسیت این گروه از رنگزاها به محیط اسیدی و تغییرات pH آنها را به عنوان شناساگر معرفی نموده است [۵۰].

[1] Flavonoids
[2] Anthraquinones
[3] Madder
[4] Indigoid
[5] Indigo
[6] Indigofera tinctoria
[7] Isatis tinctoria



شکل۲- انواع رنگزاهای طبیعی (۲۴و ۴۵)

۳ ۲ کاربرد رنگزاهای طبیعی در منسوجات

رنگزاهای طبیعی میل ترکیبی بسیار خوبی با ابریشم و پشم دارند. اکثر رنگزاهای گیاهی می‌توانند تحت شرایط ملایم توسط الیاف ابریشم وپشم جذب شوند [۵۱-۵۲] البته برای کالای پنبه ای و حتی سایر الیاف مصنوعی نیز با استفاده از مواد کمکی مناسب، رنگزاهای طبیعی نتایج خوبی را حاصل نموده و کیفیت رنگرزی قابل قبول بوده است [۵۷-۵۶]. بسیاری از رنگزاهای طبیعی به دلیل ترکیب و ساختار خاص خود، مانند پارچه ضداشعه ماوراء بنفش ریواس و پارچه پروتئین سویا، در توسعه منسوجات مدرن کاربردی جدید مورد استفاده قرار می‌گیرند. رنگ روشن و پایداری که از رنگزاهای طبیعی روی کالای نساجی ایجاد شده، باعث زیبایی و عملکرد پارچه می‌شود [۵۹-۶۰]. رنگزاهای طبیعی معمولا پیوندهای مستحکمی با کالا برقرار نمی‌کنند و از این‌رو برای رنگرزی لازم است از دندانه برای افزایش ثبات‌ها استفاده شود. معمولا رنگرزی طبیعی به سه روش رایج پیش دندانه، دندانه رنگ همزمان و پس دندانه انجام می‌گیرد. ثبات‌های معمول رنگرزی شامل ثبات شست و شویی با استاندارد۲۰۱۰ ISO 105-C06 ، ثبات نوری با استاندارد ۲۰۱۴ ISO 105-B02: و ثبات مالشی با استاندارد ۲۰۱۶ ISO 105-X12 اندازه گیری می‌شوند [۶۰]. تحقیقات زیادی برای دستیابی به رنگ‌های ماندگار، درخشان و یکنواخت، به ویژه در مقیاس صنعتی، نیاز به درک عمیق مکانیسم‌های رنگرزی و نقش عوامل کمکی، به خصوص دندانه‌ها[1] است [۵۷ و۵۲، ۳۵، ۳۱، ۲۹، ۲۷، ۲۰، ۱۳-۱۱].

۴ ۲ نقش دندانه‌ها [2]

دندانه‌ها موادی هستند که به عنوان واسطه بین رنگزا و الیاف پارچه عمل می‌کنند. بسیاری از رنگزاهای طبیعی به تنهایی قدرت چسبندگی کافی به الیاف را ندارند و بدون دندانه، رنگ آن‌ها به سرعت با شستشو یا در معرض نور، از بین می‌رود. دندانه‌ها با ایجاد پیوندهای شیمیایی یا فیزیکی بین مولکول‌های رنگزا و الیاف، به تثبیت رنگ بر روی پارچه کمک می‌کنند [۶۱-۶۲].

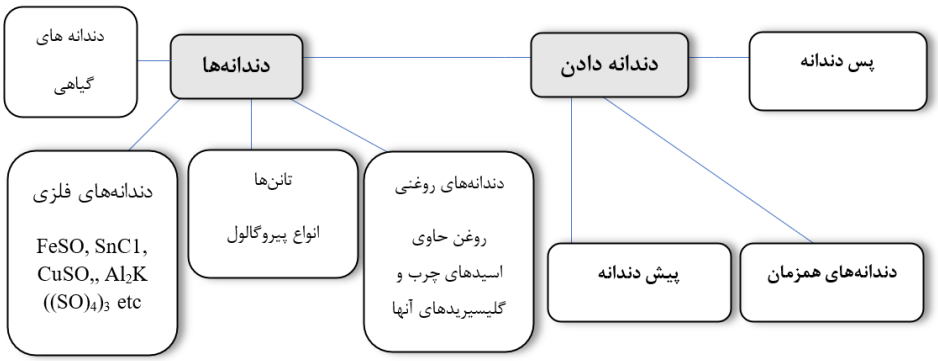
[1] Mordants

۱ ۴ ۲ انواع دندانه‌ها

دندانه های معدنی: به طور سنتی، از نمک‌های فلزی سنگین مانند آلومینیوم (زاج)، آهن، مس و کروم به عنوان دندانه استفاده می‌شده است. هر دندانه می‌تواند نه تنها بر ثبات رنگ، بلکه بر سایه نهایی رنگ نیز تأثیر بگذارد؛ به عنوان مثال، دندانه آهن می‌تواند رنگ‌ها را تیره‌تر کند و از طرف دیگر استفاده زیاد این دندانه منجر به پوسیدگی زودهنگام منسوج می‌شود [۶۳]. غیر از دندانه های معدنی، دندانه های روغنی و یا اسید گالیک، ترکیبات گیاهانی حاوی ترکیبات فنولی نیز به عنوان دندانه استفاده می شود. دندانه های روغنی: روغن قرمز بوقلمون می تواند نقش دندانه را در رنگرزی ایفا کند.، و همچنین از برخی گیاهان تانن دار نظیر پوست گردو، هلیله سیاه و سماق که حاوی اسید تانیک هستند نیز در رنگرزی مانند دندانه عمل می کنند [۶۴].

معایب دندانه‌های معدنی: استفاده از دندانه‌های فلزی سنگین، یکی از بزرگترین چالش‌های زیست‌محیطی در فرآیند رنگرزی با رنگزاهای طبیعی است. این فلزات می‌توانند در پساب‌های رنگرزی باقی بمانند و در صورت عدم تصفیه مناسب، به آلودگی آب و خاک منجر شوند. این تناقض، یعنی استفاده از مواد "طبیعی" با کمک مواد "مصنوعی" مضر، نقطه ضعف اصلی رنگرزی سنتی با رنگزاهای طبیعی محسوب می‌شود. احمدی و همکاران در پژوهش‌های خود ترکیبات گیاهی را به عنوان دندانه‌های زیستی، جایگزین دندانه‌های معدنی نموده و نتایج قابل قبولی مشاهده نمودند. استفاده از گیاهان تانن‌دار به عنوان دندانه به دلیل تاثیری که روی فام نهایی رنگی می‌گذارند، محدود کننده بوده و در ترکیب اغلب رنگزاها غیر قابل استفاده می‌باشند، کاربرد گیاه آلوئه ورا یا کیتوسان در افزایش ثبات‌های عمومی رنگرزی نقش مهمی را ایفا می‌نمایند[۶۸-۶۴]. جستجو برای دندانه‌ها و تثبیت‌کننده‌های زیستی: به دلیل نگرانی‌های فوق، تحقیقات گسترده‌ای بر روی یافتن جایگزین‌های سازگار با محیط زیست برای دندانه‌های فلزی صورت گرفته است. دندانه‌ها و دندانه‌های زیستی[1] که از منابع طبیعی مانند تانن‌های گیاهی، کیتوسان یا پروتئین‌ها به دست می‌آیند، مورد توجه قرار گرفته‌اند. هدف این است که نه تنها رنگرزی با رنگزاهای طبیعی، بلکه کل فرآیند رنگرزی، از نظر زیست‌محیطی پایدار باشد. این تلاش‌ها بر کاهش تأثیر زیست‌محیطی بخش نساجی تمرکز دارند [۶۹-۷۰]. در نمودار شکل ۳، روش کاربرد دندانه در رنگرزی و انواع آن نشان داده شده است.

[1] Biomordants

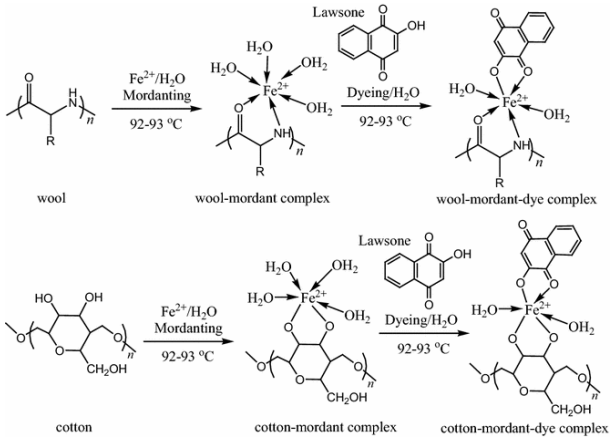


شکل۳- انواع دندانه و روش رنگرزی طبیعی

مکانیسم عملکرد دندانه ها: دندانه‌ها (که اغلب نمک‌های فلزی هستند) ابتدا به الیاف پارچه متصل می‌شوند و سپس با مولکول‌های رنگزا کمپلکس (ترکیبات پایدار) تشکیل می‌دهند. این کمپلکس‌ها به طور محکم‌تری به الیاف می‌چسبند و در نتیجه ثبات رنگزا[1]را در برابر عوامل مختلف مانند شستشو، نور خورشید، تعریق و سایش افزایش می‌دهند. برهم‌کنش محتمل بین کمپلکس الیاف، دندانه و رنگزا در شکل ۴ نشان داده شده است، در این شکل، مولکول لاوسون به عنوان رنگزا در نظر گرفته شد [۶۸ و ۲۳].

۳- پیشرفت‌های اخیر در روش‌های استخراج رنگزاهای طبیعی

در فرآوری رنگزاهای طبیعی، استخراج و خالص‌سازی مهم‌ترین مراحل هستند [۶۹-۷۰]. قبل از شروع فرآیند استخراج، تعیین حلالیت رنگزاهای طبیعی ضروری است زیرا فرآوری رنگزا بسیار پیچیده است. روش جداسازی شیمیایی سنتی معمولاً برای استخراج و جداسازی محصولات طبیعی استفاده می‌شود که هنوز هم مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل۴- برهم کنش شیمیایی بین رنگزا، کالای پشمی و دندانه [۲۳]

این روش عمدتاً بر اساس اصول حلالیت متفاوت اجزای فعال در حلال‌های مختلف طراحی شده است و می‌توان تبلور و سایر روش‌ها را نیز در نظر گرفت. این روش به تجهیزات خاصی نیاز ندارد و کار با آن آسان است. پیشرفت‌ها در تکنیک‌های رنگرزی شامل بهبود روش‌های

[1] Color Fastness

استخراج و خالص‌سازی، توسعه روش‌های دندانه‌دهی کارآمدتر و پیشرفت در تجهیزات رنگرزی و اتوماسیون مورد توجه محققین مختلفی قرار گرفته است [۷۱-۷۲]. این پیشرفت‌ها، امکان کنترل دقیق پارامترهای رنگرزی را فراهم می‌کند که منجر به صرفه‌جویی در مصرف آب و انرژی و تولید نتایج رنگی ثابت‌تر می‌شود. علاوه بر این، محققان بر استفاده از تکنیک‌های اصلاح رنگ برای افزایش پالت رنگی رنگزاهای طبیعی تمرکز کرده‌اند و حصول طیف وسیع‌تری از رنگ‌ها را، از رنگزاهای طبیعی، ممکن می‌سازند. این کار با تغییر پارامترهای موثر در فرایند استخراج یا مخلوط کردن منابع مختلف رنگزا انجام می‌شود که امکان کاربرد مواد رنگزای طبیعی در تجهیزات صنعتی، تکرارپذیری و افزایش فام‌های رنگی را ایجاد می‌کند [۷۳-۷۵]. کاربرد رنگزاهای طبیعی به طور مستقیم به دلیل اشغال حجم زیادی از پاتیل رنگرزی، وجود ناخالصی‌ها، مصرف انرژی و آب زیاد اقتصادی نیست به همین جهت روش‌های مختلف استخراج برای تسهیل کاربرد رنگزاهای طبیعی و افزایش راندمان رنگرزی ایجاد شده است.

۴- روش‌های استخراج و فرآوری رنگزاهای طبیعی

استخراج رنگزاهای طبیعی از منابع زیستی، گامی حیاتی در آماده‌سازی آن‌ها برای کاربردهای مختلف، به ویژه در صنعت نساجی است. انتخاب روش استخراج، تأثیر قابل توجهی بر بازده، کیفیت رنگ، و پایداری فرآیند دارد. با پیشرفت تکنولوژی، روش‌های استخراج نیز دستخوش تحول شده‌اند تا کارایی را افزایش داده و آلودگی‌های زیست‌محیطی را به حداقل برسانند.

۴ ۱ روش‌های سنتی استخراج

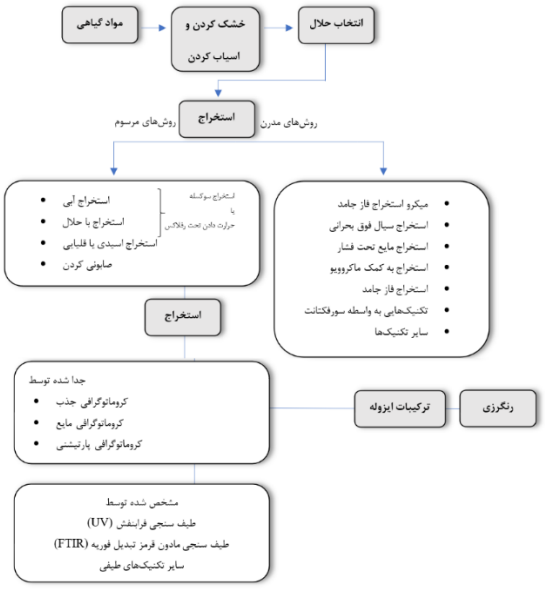
استخراج آبی[۱]: این روش، ساده‌ترین و رایج‌ترین تکنیک استخراج است که از دیرباز مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش، ماده حاوی رنگ (مانند برگ، ریشه یا پوست) در آب (معمولاً گرم یا در حال جوش) خیسانده می‌شود تا ترکیبات رنگزا در آب حل شوند. پس از مدتی، ماده جامد از مایع جدا شده و عصاره رنگی به دست می‌آید. این روش به دلیل سادگی و هزینه پایین، همچنان پرکاربرد است، اما ممکن است بازدهی کمتری نسبت به روش‌های پیشرفته‌تر داشته باشد. به عنوان مثال، در مطالعه‌ای که بر روی برگ و پوست انبه انجام شد، از تکنیک استخراج آبی برای جداسازی رنگزاها استفاده گردید. شاهدی و همکاران، ملا و همکاران نشان دادند که راندمان استخراج مواد رنگزا به روش آبی از کاربرد مستقیم رنگزا بیشتر بوده و کیفیت رنگرزی افزایش می‌یابد [۷۳].

۴ ۲ روش‌های نوین و پیشرفته استخراج

با هدف بهبود راندمان استخراج، کاهش مصرف انرژی و زمان پردازش، و به حداقل رساندن آلودگی های

[۱] Aqueous Extraction

زیست‌محیطی، تکنیک‌های پیشرفته‌ای توسعه یافته‌اند. روش کاربرد و بهینه کردن متغیرهای استخراج در هر روش و برای گیاهان رنگزای مختلف مورد توجه محققین بسیاری بوده است [۲۵ و ۷۷-۷۵] . در نمودار شکل ۵ روش‌های مختلف استخراج مواد رنگزا از منابع طبیعی نشان داده شده است.



شکل شماره ۵- روش‌ها و مراحل استخراج مادهٔ رنگزا از ترکیبات گیاهی [۲۲]

استخراج با کمک امواج فراصوت[1]: در این روش، از امواج فراصوت برای ایجاد حفره‌های ریز [2]در حلال (مانند آب یا اتانول) استفاده می‌شود. این پدیده، دیواره سلولی مواد گیاهی را می‌شکند و آزادسازی ترکیبات رنگزا را تسهیل می‌کند. امواج فراصوت به دلیل افزایش راندمان استخراج و کاهش زمان مورد نیاز، بسیار محبوب شده است. مطالعات نشان داده‌اند [۸۲-۷۸] که این روش می‌تواند بازده استخراج را به طور قابل توجهی بهبود بخشد؛ برای مثال، در استخراج رنگ از چغندر، با استفاده از اولتراسوند نتایج بهتری به دست آمده است. همچنین، استفاده از حالت پالس در اولتراسوند می‌تواند مصرف انرژی را کاهش دهد [۸۳]. استخراج ماده رنگزا از ریشه گیاه روناس را با روش اولتراسونیک مطالعه نموده و روش بهینه را معرفی نمودند.

استخراج با کمک امواج مایکروویو[3]: در امواج مایکروویو، از انرژی مایکروویو برای گرم کردن سریع حلال و ماده خام استفاده می‌شود. این گرمایش سریع، باعث افزایش فشار در سلول‌های گیاهی و در نتیجه شکسته شدن آن‌ها و آزادسازی رنگزاها می‌شود. امواج مایکروویو نیز مانند امواج فراصوت، زمان استخراج را کاهش داده و بازده را بهبود می‌بخشد [۸۴]. استخراج با حلال[4]: در این روش، از حلال‌های آلی مختلف (مانند اتانول، متانول، استون و غیره) برای استخراج ترکیبات رنگزا استفاده می‌شود. انتخاب حلال بستگی به قطبیت و حلالیت ترکیبات رنگزا دارد. این روش می‌تواند برای جداسازی ترکیبات خاصی که در آب محلول نیستند، مؤثر باشد.

استخراج با سیال فوق بحرانی[5]: این یک روش پیشرفته است که از سیالات (معمولاً دی‌اکسید کربن) در حالت فوق بحرانی استفاده می‌کند. در این حالت، سیال خواصی بین گاز و مایع دارد و می‌تواند به طور مؤثر ترکیبات رنگزا را

[1] Ultrasound-Assisted Extraction - UAE
[2] Cavitation
[3] Microwave-Assisted Extraction - MAE
[4] Solvent Extraction
[5] Supercritical Fluid Extraction - SFE

استخراج کند. مزیت اصلی این روش عدم استفاده از حلال‌های سمی و پساب کمتری تولید می‌کند [۵۱].

استخراج آنزیمی و تخمیر[1]: در این روش‌ها، از آنزیم‌ها یا میکروارگانیسم‌ها برای تجزیه دیواره‌های سلولی یا تبدیل پیش‌سازهای رنگزا به فرم فعال آن‌ها استفاده می‌شود. این روش‌ها می‌توانند بازده را افزایش داده و فرآیند را سبزتر کنند [۸۴].

استخراج قلیایی-اسیدی: برخی رنگزاها در محیط‌های قلیایی یا اسیدی حلالیت بیشتری دارند. با تنظیم pH حلال، می‌توان راندمان استخراج را برای این نوع رنگزاها افزایش داد. احمدی و همکاران [۷۵]، صفاپور و همکاران [۸۵]، قرنجیگ و همکاران [۸۳] مطالعات گسترده ای را پیرامون استخراج مواد رنگزا از گیاهان در محیط‌های اسیدی و قلیایی انجام داده‌اند. نتایج مطالعات نشان داده که گیاهان مختلف با توجه به ساختار شیمیایی رنگزای موجود در آنها واکنش‌های مختلفی به محیط اسیدی و قلیایی نشان داده و راندمان استخراج برای گیاهان مختلف متغیر است.

خالص‌سازی و تصفیه: پس از استخراج، ممکن است رنگزاهای خام حاوی ناخالصی‌هایی باشند. نتایج تحقیقات نشان داده که فرآیندهای خالص‌سازی مانند فیلتراسیون، سانتریفیوژ، تبخیر و کروماتوگرافی (مانند کروماتوگرافی ستونی یا لایه نازک) برای جداسازی و تغلیظ رنگزاها موثر بوده و سبب افزایش راندمان استخراج می‌شود [۸۰]. پس از خالص‌سازی، رنگزاهای خالص شده از نظر شیمیایی تصفیه می‌شوند تا ساختار، ترکیب و خواص نوری آن‌ها مشخص شود. این اطلاعات برای بهینه‌سازی لایه حساس‌شده به رنگ در کاربردهایی مانند سلول‌های خورشیدی حساس به رنگ [2]و همچنین برای اطمینان از کیفیت و پایداری رنگ در منسوجات ضروری است [۸۳ و ۸۴]. علاوه بر این لازم است که رنگزای استخراج شده، قابلیت ارائه به بازار و افزایش ماندگاری را داشته باشد. تغلیظ محلول استخراج شده باید به شیوهٔ درست انجام شود تا راندمان رنگرزی تحت تاثیر فرایند تغلیظ کاهش نیابد. قرنجیک و همکاران [۸۳] شیوه مناسبی را برای تغلیظ محلول رنگزای استخراج شده از روناس را ارائه نمودند. احمدی و همکاران رنگزای استخراج شده از گیاه اسپرک را به شیوه تبخیر و فیلتراسیون ارائه نموده‌اند [۷۵].

امروزه، برنامه‌های طراحی‌شده آماری[3] (SDoE) به طور فزاینده‌ای برای بهینه‌سازی و مدل‌سازی فرآیندهای استخراج و رنگرزی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این ابزارها به محققان کمک می‌کنند تا تأثیر متغیرهای مختلف (مانند دما، زمان، نسبت حلال به ماده خام و غیره) را بر بازده و کیفیت رنگ ارزیابی کنند و به شرایط بهینه دست یابند. این رویکرد سیستمی، به تولید پایدارتر و کارآمدتر رنگزاهای طبیعی کمک می‌کند [۸۶ و ۵۸، ۴۴، ۳۱، ۱۶]. به طور کلی، پیشرفت‌ها در تکنیک‌های استخراج، رنگزاهای

[1] Enzymatic and Fermentative Extraction
[2] DSSC
[3] Statistical Design of Experiments

طبیعی را برای تولید در مقیاس بزرگ از نظر تجاری امکان‌پذیرتر نموده و فرایند رنگرزی طبیعی را اقتصادی‌تر نموده و علاوه برآن کیفیت رنگرزی را افزایش می‌دهند [۸۷].

۵- کاربردها و خواص ویژه رنگزاهای طبیعی

رنگزاهای طبیعی، گستره وسیعی از کاربردها را فراتر از صرفاً رنگرزی منسوجات در بر می‌گیرند و به دلیل خواص منحصر به فرد خود، در صنایع مختلفی مورد توجه قرار گرفته‌اند. این ترکیبات طبیعی، علاوه بر زیبایی بصری، می‌توانند ارزش‌های عملکردی و سلامتی نیز به محصولات اضافه کنند [۱-۵].

۵ ۱ رنگرزی منسوجات

این حوزه، سنتی‌ترین و شناخته‌شده‌ترین کاربرد رنگزاهای طبیعی است. همانطور که پیش‌تر بحث شد از زمان‌های بسیار دور، رنگزاهای طبیعی برای رنگرزی الیاف و پارچه‌های مختلف از جمله پنبه، پشم، ابریشم و کتان استفاده می‌شدند. علاوه بر رنگرزی سنتی، از آن‌ها در رنگرزی الیاف مصنوعی و چاپ پارچه نیز بهره می‌روند [۸۶-۹۱]. این کاربرد در دوران مدرن، به دلیل افزایش تقاضا برای محصولات پایدار و سازگار با محیط زیست، رو به رشد است.

۵ ۲ مواد غذایی و نوشیدنی‌ها

رنگزاهای طبیعی به طور گسترده‌ای به عنوان افزودنی‌های غذایی برای بهبود ظاهر و جذابیت محصولات استفاده می‌شوند. بسیاری از رنگزاهای مصنوعی غذایی، با نگرانی‌های بهداشتی (مانند بیش‌فعالی در کودکان) مرتبط هستند، از این رو، رنگزاهای طبیعی مانند آنتوسیانین‌ها (از توت‌ها)، بتاکاروتن (از هویج) و زردچوبه (کورکومین) جایگزین‌های محبوبی هستند. این رنگزاها نه تنها رنگ دلپذیری می‌دهند، بلکه می‌توانند خواص آنتی‌اکسیدانی یا ویتامینی نیز داشته باشند و تأثیرات عملکردی و زیبایی‌شناختی محصولات غذایی و نوشیدنی‌ها را افزایش دهند [۹۳]. مطالعات دانشمندان در صنعت بسته‌بندی هوشمند مواد غذایی نشان داده که استفاده از رنگزاهای طبیعی برای نظارت بر تازگی مواد غذایی سودمند خواهد بود. این رنگزاها می‌توانند به تغییرات pH یا حضور میکروارگانیسم‌های فاسدکننده واکنش نشان داده و با تغییر رنگ، وضعیت تازگی محصول را به مصرف‌کننده نشان دهند. البته، پایداری رنگ در شرایط مختلف برای این کاربرد هنوز نیاز به بررسی دارد.

۵ ۳ لوازم آرایشی

در صنعت لوازم آرایشی، رنگزاهای طبیعی برای رنگ‌آمیزی محصولاتی مانند رژ لب، سایه چشم، لاک ناخن و صابون استفاده می‌شوند. مصرف‌کنندگان به طور فزاینده‌ای به دنبال محصولات "پاک" و "طبیعی" هستند و رنگزاهای طبیعی به دلیل عدم حساسیت‌زایی و ایمنی بالاتر، گزینه‌ای ایده‌آل به شمار می‌آیند [۹۰]. احمدی و همکاران از

رنگزاهای مختلف طبیعی برای رنگ کردن موی سر استفاده نمودند [۹۱].

۵ ۴ چرم

صنعت چرم نیز در حال حرکت به سمت شیوه‌های پایدارتر است. دانشمندان رنگزاهای طبیعی را به عنوان جایگزینی برای رنگزاهای مصنوعی در فرآیند دباغی و رنگرزی چرم معرفی نموده‌اند [۲۷ و ۴۷] تا چرمی سازگار با محیط زیست و غیرسمی تولید شود. این امر به غلبه بر محدودیت‌های استفاده از رنگزاهای طبیعی در این صنعت کمک می‌کند و به دلیل ویژگی‌های بی‌ضرر و زیست تخریب‌پذیر، روندی رو به رشد است.

۵ ۵ داروسازی

برخی از رنگزاهای طبیعی دارای خواص دارویی هستند و در فرمولاسیون‌های دارویی به عنوان عامل رنگ‌آمیزی یا حتی به عنوان ترکیبات فعال زیستی مورد استفاده قرار می‌گیرند. به عنوان مثال، کورکومین از زردچوبه دارای خواص ضد التهابی و آنتی‌اکسیدانی است [۹۳ و ۵۰].

۵ ۶ سلول‌های خورشیدی حساس به رنگ[1]

در سال‌های اخیر سلول‌های خورشیدی حساس به رنگ به عنوان یک فناوری امیدوارکننده برای تبدیل انرژی خورشیدی که مقرون به صرفه و سازگار با محیط زیست هستند، مورد توجه دانشمندان زیادی قرار گرفته است [۸۶-۸۷]. رنگزاهای طبیعی مشتق شده از منابع مختلف گیاهی و میوه‌ای، به عنوان جایگزینی سازگار با محیط زیست برای حساس‌کننده‌های معدنی سمی، گران‌قیمت و کمیاب در سلول‌های خورشیدی حساس به رنگ مورد توجه قرار گرفته‌اند. رنگدانه‌های گیاهی موجود در این رنگزاها، فوتون‌های نور خورشید را جذب کرده و آنها را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. کار پیشگامانه در دانشگاه کالیفرنیا، برکلی در سال ۱۹۹۱، آغازگر تحقیقات گسترده در این زمینه بود. آنتوسیانین‌ها، کلروفیل، بتالائین‌ها و کاروتنوئیدها از جمله رنگزاهای طبیعی هستند که به دلیل خواص نوری منحصر به فرد خود (مانند جذب گسترده در طیف مرئی و ضریب جذب بالا) برای این منظور مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

۶- خواص ویژه [2]

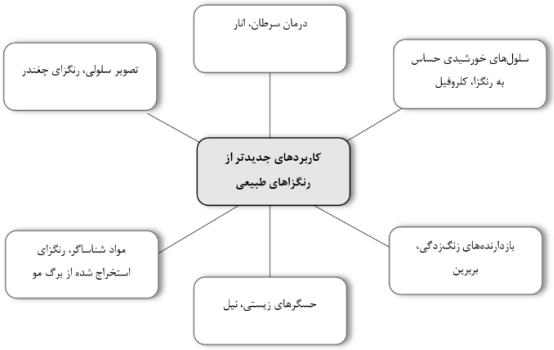
در شکل شماره ۶، گستردگی کاربرد ویژهٔ رنگزاهای طبیعی نمایش داده شده است.

علاوه بر کاربردهای فوق، رنگزاهای طبیعی دارای خواص عملکردی قابل توجهی هستند که آن‌ها را از همتایان مصنوعی متمایز می‌کند. برخی از رنگزاهای طبیعی خواص ضد باکتریایی از خود نشان می‌دهند که می‌تواند به بهبود بهداشت منسوجات کمک کند. احمدی و همکاران در تحقیق خود دریافتند اغلب گیاهان با خاصیت دارویی قابلیت کاربرد به عنوان رنگزا را داشته و خاصیت آنتی

[1] DSSC

[2] Functional Properties

باکتریایی و آنتی میکروبی بسیار خوبی روی نخ‌های پشمی و پنبه ای ایجاد نمودند [۹۵].



شکل شماره ۶-گسترهٔ کاربردهای رنگزاهای طبیعی [۲۷]

همچنین در مطالعه‌ای گیاهان رنگزای مختلف دارای خاصیت آنتی باکتریال را معرفی نمودند. گروهی دیگر از گیاهان رنگزا می‌توانند محافظت در برابر اشعه UV را فراهم آورند که برای لباس‌های تابستانی یا فضای باز بسیار مفید است [۸۵]. این ویژگی‌ها، رنگزاهای طبیعی را به فراتر از یک عامل رنگ‌آمیزی ساده ارتقا می‌دهند و به آن‌ها قابلیت ایجاد "پارچه‌های کاربردی" را می‌بخشند. برخی از گیاهان نقش دندانه زیستی را داشته و جایگزین بسیار مناسبی برای دندانه‌های معدنی به شمار می‌روند [۶۹-۷۰]. گروهی از ویژگی‌های خاص مواد رنگزای طبیعی در ذیل آمده است:

خواص ضد میکروبی و ضد باکتری[1]: برخی از رنگزاهای طبیعی، مانند آن‌هایی که از پوست انار یا زردچوبه به دست می‌آیند، دارای خواص ضد باکتریایی هستند که می‌تواند به پارچه‌ها یا محصولات دیگر، مقاومت در برابر رشد میکروبی ببخشد. در تحقیقی دیگر تاثیر زعفران، چای سبز، زردچوبه، حنا و روناس با دندانه زاج سفید بر خواص آنتی باکتریال پشم بررسی شد. فعالیت ضد باکتری آنها و همچنین خواص رنگرزی از جمله، کالریمتری، ثبات نور و شستشو مورد بررسی قرار گرفت. همانطور که رنگ طبیعی ذاتا پایداری کم دارد، در این پروژه رنگرزی پارچه با استفاده از روش پیش دندانه با سولفات آلومینیوم (زاج سفید، سولفات مضاعف آلومینیوم و پتاسیم است) انجام شد. نتایج نشان داد که تمام این مواد رنگزاهای طبیعی می‌توانند برخی از خاصیت‌های آنتی باکتریالی را در برابر استافیلوکوک اورئوس۲، اشرشیاکلی و سودوموناس[3] و باکتری‌های آئروژینوزا[4] بر روی پارچه پشم ایجاد کنند. علاوه بر این، فرآوری با سولفات آلومینیوم باعث پایداری اثرات ضدباکتری طولانی‌تر شد [۹۶]. همچنین در این پژوهش تاثیر ساختار شیمیایی مواد رنگزا و زاج سفید بر میزان جذب مواد رنگزا و ثبات‌ها و خواص آنتی باکتریال بررسی شد. محققین نشان داده اند که یکی از استانداردهای کمّی مناسب برای آزمایش ضدمیکروبی منسوجات، AATCC 100-2004 (روش کاهش باکتری) است [۳۵]. در این آزمایش، میکروارگانیسم مورد آزمایش با غلظت استاندارد در کشت مایع رشد داده می‌شود. این کشت آماده شده در یک محلول مغذی استریل رقیق می‌شود. نمونه‌های پارچه کنترل و پارچه رنگرزی شده طبیعی با میکروارگانیسم‌ها

[1] Antimicrobial
[2] Staphylococcus aures
[3] Pseudomonas
[4] Aeruginosa

تلقیح می‌شوند. پارچه‌های کنترل و پارچه‌های مورد آزمایش تلقیح شده به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد، در شیشه‌های دربسته انکوبه می‌شوند. پس از انکوباسیون، به مدت ۱ دقیقه تکان دهید؛ سپس غلظت میکروب‌ها مشاهده می‌شود. در نهایت محاسبه می‌شود که چه مقدار میکروارگانیسم در مقایسه با غلظت اولیه کاهش می‌یابد. میزان کاهش رشد باکتری از فرمول شماره ۱ محاسبه می‌شود[۹۲-۱۰۰].

(۱) درصد کاهش باکتری‌ها

$$\text{Reduction percen}=100(B-A)/B$$

که در آن A تعداد باکتری‌های بازیابی شده از نمونه‌های آزمایشی رنگرزی شده در ظرف انکوبه شده در طول دوره تماس مورد نظر است، در حالی که B تعداد باکتری‌های بازیابی شده از نمونه‌های خام در ظرف بلافاصله پس از تلقیح (در زمان تماس "۰") است [۹۸].

در نساجی کیتوسان به عنوان یک بیوپلیمر طبیعی غیرسمی، زیست تخریب پذیر و سازگار با محیط زیست گزینه مناسبی برای استفاده در صنایع نساجی است و علاوه بر این، خاصیت ضدباکتری منسوج فرآوری شده با کیتوسان موجب شده که امروزه از آنها در لباس‌های ورزشی، البسه خانم‌ها، کودکان و لباس‌های ظریف، زیبا، ضدبو و ضدحساسیت استفاده شود [۲۹]. نتایج تحقیقات نشان داد که پارچه‌های پنبه‌ای رنگ شده با عصاره پوست انار، کامالا[1] و مخصوصا مازو [۶۶]، حنا، پوست گردو و زردچوبه و نانو نقره، قرمز دانه و بقم و ریواس [۷۱] دارای ثبات رنگ مطلوب هستند و خواص آنتی باکتریال عالی در مقابل اشرشیا کولی و استافیلوکوکوس اورئوس دارند بشکلی که فعالیت ضدمیکروبی نمونه‌ها تا ده بار شستشو پایدار بوده است و می‌توان جهت البسه بیمارستانی و هتل استفاده کرد. احمدی و همکاران در یک مقاله مروری، گیاهان دارای خاصیت آنتی باکتریایی، روش کاربرد و نقش مواد کمکی در بهبود این ویژگی را ارائه نموده است [۵].

خواص آنتی‌اکسیدان[2]: بسیاری از رنگزاهای طبیعی، به ویژه فلاونوئیدها، دارای خواص آنتی‌اکسیدانی قوی هستند که می‌تواند در کاربردهای غذایی و دارویی مفید باشد [۱۰۱].

محافظت در برابر اشعه UV[3]: انواع مختلف رنگزاهای طبیعی، محافظت در برابر میکروب‌ها و همچنین اشعه ماوراء بنفش را بر روی انواع مختلف پارچه مانند پشم، پنبه و ابریشم فراهم می‌کنند. محققین نشان دادند رنگزاهای طبیعی از عصاره برگ اکالیپتوس با دندانه سولفات آهن می‌توانند خواص محافظت در برابر اشعه ماوراء بنفش را به همراه خواص ضدمیکروبی به پارچه ابریشمی رنگ شده ارائه دهند [۹۹-۱۰۲] همچنین در پژوهش دیگری پارچه پنبه‌ای با عصاره پوست درخت (سدر) رنگرزی شد. در این آزمایش، مقادیر UPF تمام نمونه‌های رنگ شده بالاتر از

[1] یک نمونه رنگزای محلی حاوی تانن

[2] Antioxidant
[3] UV Protection

محدوده ۵۰ به دست آمد. همچنین گزارش شده است که این امر تنها به دلیل استفاده از دندانه‌های فلزی امکان‌پذیر است زیرا به تشکیل کمپلکس تانات کمک می‌کند [۱۰۳]. رنگ‌زاهای طبیعی مانند مرزن‌جوش، چوب وود، درخت رژ لب قهوی، روناس، چوب برزیلی و قرمزدانه می‌توانند محافظت خوبی در برابر اشعه ماوراء بنفش روی پارچه کنف و کتان ایجاد کنند [۱۰۴] فاکتور محافظت در برابر اشعه فرابنفش UPF در جدول شماره۱ زیر شرح داده شده توسط استانداردهای استرالیا/نیوزیلند [1](۱۹۹۶) نشان داده شده است. این روش برای تعیین میزان عبور و جذب اشعه ماوراء بنفش توسط پارچه نساجی استفاده می‌شود. این فاکتور از فرمول شماره (۲) اندازه گیری می‌شود [۱۰۵].

$$UPF=\frac{\sum E\lambda \times S\lambda \times \lambda\Delta}{\sum E\lambda \times S\lambda \times T\lambda \times \Delta\lambda} \qquad (۲)$$

Eλ = اثربخشی سرخی (پوست) طیفی نسبی. Sλ = تابش طیفی خورشیدی. Tλ = میانگین عبور طیفی نمونه (اندازه‌گیری شده). λΔ = فاصله طول موج اندازه‌گیری شده (نانومتر).

جدول شماره۱- درجه محافظت در برابر اشعه ماوراء بنفش با مقادیر UPF [۱۰۵]

درجه محافظت UPF	درجه محافظت	درجه عبور موثر فرابنفش	برچسب UPF
15-24	خوب	4.2-6.7	15,20
25-39	خیلی خوب	2.6-4.1	25, 30, 35
40-50	عالی	≤2.5	40, 45, 50

خواص ضد بید و حشره: بید لباس[2] و سوسک فرش [3]مهم‌ترین آفت الیاف پروتئینی قالی می‌باشد. شرایط مرطوب و تاریک با دمای ۲۵ تا ۳۵ درجه سانتی‌گراد، شرایط مطلوبی برای حمله لارو بید است. مواد تکمیل کننده ضد بید عبارتند از DDT، پرمترین[4]، مشتق پرمترین-هگزاهیدروپیریمیدین، سایهالوترین و غیره. برخی از این مواد شیمیایی ممنوع شده‌اند، در حالی که ترکیبات پرمترین و پیریمیدین کلر به طور گسترده به عنوان یک ماده تکمیل کننده ضد بید برای منسوجات استفاده می‌شوند، اما این مواد بر روی لارو سوسک‌ها کمتر موثر هستند. تقاضا برای جایگزینی پرمترین و سایر مواد ضد بید مصنوعی به دلیل سمیت زیست‌محیطی این مواد ضد بید در حال افزایش است. تقاضا برای مواد ضد بید طبیعی به دلیل آگاهی زیست‌محیطی مصرف‌کنندگان افزایش یافته است [۱۰۶-۱۰۸]. در آزمایش‌های مختلف گزارش شده است که رنگ طبیعی با بیش از حدود ۴۰٪ تانن به عنوان یک عامل ضد بید مؤثر است، به عنوان مثال، رنگ استخراج شده از بلوط نقره‌ای، پوست گردو و پوست انار که به ترتیب ۴۷.۸۷، ۴۴.۳۱ و ۴۵.۲۳٪ تانن دارند، به عنوان یک عامل ضد بید مؤثر عمل می‌کنند [۱۰۹]. نتایج تحقیقات نشان

[1] AS/NZS 4399
[2] Tineola bisselliella
[3] Anthrenus verbasci
[4] permethrin

داده کمدهایی از چوب سدر، لباس‌های پشمی و خز را برای مدت طولانی از بید لباس و سوسک فرش در امان نگه نمی‌دارند. خاصیت ضد بید بودن چوب سدر پس از حدود دو سال از بین می‌رود [۱۱۰]. برای آزمایش خواص ضد بید، نمونه‌های پارچه پشمی رنگرزی شده با رنگزای طبیعی و رنگ نشده در ظروف مخصوص نگهداری شدند. ده سوسک فرش زنده روی هر ظرف قرار داده و در انکوباتور (زمان: ۱۵ روز، دما: ۳۰-۳۵، رطوبت نسبی ۵۰-۶۰٪) نگهداری شدند. کاهش وزن پارچه در اثر حمله بید اندازه‌گیری شد. بررسی بصری پارچه آسیب‌دیده و تعداد بیدهای زنده نیز انجام شد. برای تجزیه و تحلیل مقایسه‌ای، از ایولون (یک ضد بید مصنوعی) نیز استفاده شد [۱۱۰-۱۰۷].

خواص ایجاد بوی معطر در منسوج: ایجاد بوی نامطبوع در منسوج به دلیل رشد باکتری در منسوج اتفاق می‌افتد. محققین نشان داده اند تولید بو در منسوجات به دلیل شرایط مساعد مانند تعریق، توسط کلونی‌های باکتریایی ایجاد می‌شود [۱۱۱]. مطالعات مختلفی در مورد عملکرد بوزدایی رنگزاهای طبیعی گزارش شده است [۱۱۲]. مطالعه‌ای در مورد کارایی بوزدایی پارچه‌های رنگ‌شده با گاردنیا، کاسیا تورا، تفاله قهوه و پوست انار مشاهده شد. نتایج این تحقیق نشان داده حداکثر ظرفیت بوزدایی در انار و پس از آن لجن قهوه [1]، کاسیا تورا و گاردنیا است [۱۱۳]. رنگرزی طبیعی پارچه‌های پنبه‌ای، پشمی و ابریشمی با استفاده از عصاره گالن همچنین عملکرد بوزدایی بهتری در برابر آمونیاک، تری متیل آمین و استالدئید ارائه می‌دهد و مقاومت باکتریایی در برابر استافیلوکوکوس اورئوس و کلبسیلا پنومونیه نشان داد. مشخص شد که جزء اصلی عصاره گالن، گالوتانین است که دلیل این خواص عملکردی است [۱۱۰-۱۱۴]. اندازه‌گیری تاثیر رنگزای گیاهی در بوزدایی و ظرفیت بوزدایی پارچه رنگ‌شده از فرمول شماره ۳ محاسبه شده است.

$$\text{عملکرد بوزدایی (٪)} = (C_b - C_s)/C_b \times 100 \quad (۳)$$

که در آن C_b غلظت گاز (ppm) لوله آزمایش بدون پارچه (حالت خالی) و C_s غلظت لوله حاوی پارچه است [۲۴].

۷- اهمیت رنگزاهای طبیعی: مزایا و چالش‌ها

اهمیت روزافزون رنگزاهای طبیعی در دوران معاصر، ریشه در مزایای چشمگیر و منحصربه‌فرد آن‌ها دارد که در مقابل چالش‌های زیست‌محیطی و بهداشتی ناشی از رنگزاهای مصنوعی خودنمایی می‌کند. برخلاف بسیاری از رنگزاهای مصنوعی که سال‌ها در محیط باقی می‌مانند و به آلودگی آب و خاک کمک می‌کنند، رنگزاهای طبیعی زیست‌تخریب‌پذیر بوده و به راحتی تجزیه می‌شوند و اثرات مخرب کمتری بر اکوسیستم‌ها دارند. این ویژگی آن‌ها را به گزینه‌ای پایدار و سازگار با محیط زیست تبدیل می‌کند. با وجود مزایای فراوان، رنگزاهای طبیعی نیز با چالش‌هایی روبرو هستند که پذیرش گسترده‌تر آن‌ها در صنعت را

[1] Coffea Arabica

محدود می‌کند [۱۱۵-۱۱۶]. در مطالعه ای مشخص شد [۱۱۷] که حدود ۲۰۰۰ رنگزای گیاهی وجود دارد اما فقط ۱۵۰ گونهٔ آن به صورت تجاری درآمده اند و در حال حاضر، رنگزاهای طبیعی تنها حدود ۱٪ از سهم بازار رنگرزی منسوجات را به خود اختصاص داده‌اند. یکی از دلایل اصلی این امر، فقدان فرم‌های استاندارد و آماده استفاده است. کیفیت و شدت رنگ ممکن است بسته به منبع، فصل برداشت و روش‌های استخراج متفاوت باشد که این امر، کنترل کیفیت و تکرارپذیری را در مقیاس صنعتی دشوار می‌سازد. عدم تناسب رنگزاهای طبیعی با ماشین‌آلات صنعتی رنگرزی سبب محدودیت کاربرد آنها شده است. بسیاری از فرآیندهای سنتی رنگرزی با رنگزاهای طبیعی، به زمان و نیروی کار بیشتری نیاز دارند و به راحتی با ماشین‌آلات پیشرفته و خودکار صنایع نساجی مدرن سازگار نیستند. این موضوع، هزینه‌های تولید را افزایش می‌دهد و سرعت تولید را کاهش می‌دهد. در مقایسه با رنگزاهای مصنوعی که می‌توانند طیف وسیعی از رنگ‌های زنده و دقیق را تولید کنند، رنگزاهای طبیعی فام‌های رنگی محدود و غیرقابل تکرار پالت رنگی محدودتری دارند. همچنین، دستیابی به رنگ‌های یکنواخت و قابل تکرار در هر مرحله تولید، می‌تواند چالش‌برانگیز باشد، زیرا عوامل مختلفی مانند نوع آب، دما و دندانه می‌توانند بر نتیجه نهایی تأثیر بگذارند. برای تولید رنگزاهای طبیعی در مقیاس بزرگ، به زمین‌های کشاورزی نیاز است. این امر می‌تواند به رقابت با تولید غذا و خوراک دام منجر شود. علاوه بر این، بهره‌برداری بی‌رویه از منابع طبیعی برای استخراج رنگزاها می‌تواند منجر به جنگل‌زدایی و حتی خطر انقراض گونه‌های گیاهی و جانوری خاص شود. این نگرانی‌ها باعث شده است که سازمان‌هایی مانند استاندارد جهانی منسوجات آلی[1]، (GOTS)، استفاده از رنگزاهای طبیعی مشتق شده از گونه‌های در معرض خطر را ممنوع کنند. یکی از مهم‌ترین چالش‌های کاربرد رنگزاهای طبیعی، نیاز به دندانه‌ها[2] برای تثبیت رنگ بر روی الیاف است. در حالی که دندانه‌های طبیعی نیز وجود دارند، بسیاری از فرآیندهای رنگرزی با رنگزاهای طبیعی، هنوز از دندانه‌های فلزی سنگین مانند کروم، مس یا آلومینیوم استفاده می‌کنند. این دندانه‌ها می‌توانند پساب‌های سمی تولید کنند و در صورت عدم مدیریت صحیح، برای محیط زیست مضر باشند. تحقیقات کنونی بر روی یافتن دندانه‌ها و تثبیت‌کننده‌های زیستی سازگار با محیط زیست تمرکز دارد تا این مشکل برطرف شود. اگرچه پیشرفت‌هایی در بهبود ثبات رنگزاهای طبیعی با استفاده از دندانه‌ها و تکنیک‌های پیشرفته رنگرزی و استخراج رنگزا حاصل شده است، اما هنوز هم در برخی موارد، رنگزاهای طبیعی از نظر ثبات در برابر شستشو، نور، سایش و تعریق، عملکردی ضعیف‌تر از رنگزاهای مصنوعی قوی دارند. این ضعف می‌تواند عمر مفید محصولات رنگ‌شده را کاهش دهد. توسعه روش‌های دندانه‌دهی زیستی[3]و استفاده از روش‌های پیشرفته تثبیت رنگ

[1] Global Organic Textile Standard
[2] Mordants
[3] Bio mordanting -

می‌تواند راه حل مناسبی باشد. فرآیندهای استخراج و فرآوری رنگزاهای طبیعی، به ویژه با استفاده از تکنیک‌های پیشرفته، ممکن است گران‌تر از تولید رنگزاهای مصنوعی باشند. همچنین، نیاز به دندانه‌ها و مصرف آب و انرژی در برخی از فرآیندها می‌تواند به افزایش هزینه‌ها منجر شود. گیان [۱۱۷] در تحقیق خود، مقالات و تحقیقات صورت گرفته در زمینه رنگزاهای طبیعی، طی ۱۵ سال اخیر، را مطالعه نمود. او برای تحلیل آینده پژوهی، موضوع مورد پژوهش مقالات، یافته‌ها، سهم کشورها در تحقیقات، سهم پژوهشگران برتر در این حوزه را مشخص کرده است. نتایج پژوهش او نشان داد در سال‌های اخیر، بیشتر محققین در مورد رنگزاهای طبیعی به کاربردهایی فراتر از رنگرزی توجه نموده‌اند. نتایج تحقیق او هدف گذاری برای پاسخ به چالش‌های موجود در کاربرد رنگزاهای طبیعی را تسهیل نموده است.

۸- نتیجه گیری

مرور تحقیقات صورت گرفته نشان داد طراحی متغیرهای استخراج مواد رنگزا از گیاهان، آنها را قابل استفاده در ماشین آلات رنگرزی نموده است. نتایج مطالعات نشان داد که محققان گسترش طیف رنگ‌های قابل دستیابی با استفاده از رنگزاهای طبیعی، محدودیت فام رنگی را کاهش داده است. اما هنوز کمبودها و شکاف‌های زیادی در مطالعات علمی در مورد اثرات دندانه‌های زیستی مختلف (مانند کمپلکس‌های طبیعی مبتنی بر تانن) و دندانه هایی نظیر اسید گالیک و برهم کنش آنها با رنگزا و منسوج وجود دارد. استانداردسازی و بهینه‌سازی متغیرهای فرآیند رنگرزی، معرفی منابع جدید رنگزاهای طبیعی، و همچنین اثرات ترکیبات مختلف پس از عملیات رنگرزی یا تکمیل مبتنی بر منابع طبیعی/گیاهی برای بهبود ثبات شستشویی و نوری و نیز توسعهٔ روش‌های استخراج مواد رنگزا، به دلیل گستردگی منابع طبیعی رنگزا نیاز به تحقیقات بیشتری دارد. علاوه بر رنگرزی و چاپ انواع منسوجات، تحقیقات در مورد کاربردهای نوآورانهٔ رنگزاهای طبیعی در حوزه‌هایی مانند سلول‌های خورشیدی، پزشکی، بسته‌بندی هوشمند، لوازم آرایشی و چاپ سه بعدی ادامه خواهد یافت. خواص بیولوژیکی و عملکردی این رنگزاها، مانند فعالیت‌های ضدمیکروبی، آنتی‌اکسیدانی و ضد التهابی، محافظت در برابر اشعه UV، فرصت‌های جدیدی را برای توسعه محصولات چند منظوره فراهم می‌آورد. با این حال، باید به خاطر داشت که رنگزاهای طبیعی جایگزین رنگزاهای مصنوعی ساخته دست بشر نیستند. رنگزاهای طبیعی کاربرد خاص خود را دارند. بنابراین، مطالعات بیشتری برای رفع شکاف‌های ذکر شده در بالا برای استفاده از رنگزاها و تکمیل‌های طبیعی روی پارچه‌های نساجی به منظور بهبود خواص سلامتی مانند خواص: ضد باکتری و میکروبی، دفع پشه، ضدبو و مقاومت در برابر اشعه ماوراء بنفش در منسوجات پوشاک مورد نیاز است. با وجود چالش‌ها، آینده رنگزاهای طبیعی به دلیل افزایش تقاضای مصرف‌کننده برای محصولات سازگار با محیط زیست و حمایت دولت از شیوه‌های تجارت سبز، روشن به نظر می‌رسد. محققان امیدوارند با گسترش دانش و استفاده از رنگزاهای طبیعی،

پایداری، خلاقیت و مسئولیت‌پذیری زیست‌محیطی را در بخش نساجی و سایر صنایع ارتقا دهند. مسیرهای تحقیقاتی و نوآوری‌های آینده در استفاده و کاربرد رنگزاهای طبیعی، بر پرداختن به چالش‌های فوق و گسترش کاربردها تمرکز خواهند داشت.

۹- مراجع

1. Affat, S., "Classifications, advantages, disadvantages, toxicity effects of natural and synthetic dyes: A review," UTsci, 8, 130–135, 2021. https://www.researchgate.net/publication/351885086
2. Samanta, A. K., Awwad, N. S., & Algarni, H. M., "In Chemistry and Technology of Natural and Synthetic Dyes and Pigments," London, UK: IntechOpen, 2020. https://doi.org/10.3390/ma14154091
3. Verma, S., "Natural dyes and their applications: a brief review," International Journal of Research and Analytical Reviews, 4, 57–60, 2017. DOI : https://doi.org/10.14445/23497157/IJRES-V7I1P103
4. Shirsath, N. B., More, M., Ahmed, H. S., & Savale, T. S., "Extraction of natural dyes, characterizations, and their eco-friendly applications," International Journal for Multidisciplinary Research (IJFMR), 6(2), 2024. https://doi.org/10.36948/ijfmr.2024.v06i02.16803
5. Samanta, A. K., Awwad, N. S., & Algarni, H. M., "In Chemistry and Technology of Natural and Synthetic Dyes and Pigments," London, UK: IntechOpen, 2020. https://doi.org/10.3390/fermentation8090460
6. Verma, G., & S, "Natural dyes and their applications: a brief review," International Journal of Research and Analytical Reviews, 4, 57–60, 2017. DOI : https://doi.org/10.14445/23497157/IJRES-V7I1P103
7. Shirsath N. B., More M., Ahmed H. S., & Savale T. S., Extraction of Natural Dyes, Characterizations, and their Ecofriendly Application, International Journal for Multidisciplinary Research. 6, Issue 2, March-April 2024. https://doi.org/10.36948/ijfmr.2024.v06i02.16803
8. Křížová, H., Natural dyes: their past, present, future and sustainability. *Recent Developments in Fibrous Material Science.* 59–71. 2015.
9. Yıldırım, F. F. A., Yavaş, A., & Avınç, O., Printing with sustainable natural dyes and pigments, *Sustainable textiles: production, processing, manufacturing & chemistry*, Springer International Publishing, 1-35, 2020.
10. Ahn, C., & Obendorf, S. K., Dyes on archaeological textiles: Analyzing alizarin and its degradation products, Textile Research Journal, 74(11), 949–954, 2004. DOI:10.1177/004051750407401102
11. Saravanan, P., Chandramohan, C. G., Mariajancyrani, J., & Shanmugasundaram, P., Extraction and application of eco-friendly natural dye obtained from leaves of acalypha indica linn on cotton fabric, International Research Journal of Environmental Science, 2(12), 1-5, 2013.
12. Naegel, L. C. A., & Cooksey, C. J., Tyrian purple from marine muricids, especially from Plicopurpura pansa (Gould, 1853), Journal of Shellfish Research, 21(1), 193-200, 2002.
13. Barber, E. J. W., Prehistoric textiles: the development of cloth in the Neolithic and Bronze Ages with special reference to the Aegean, Princeton University Press, 1991.
14. Schweppe, H., Practical Hints on Dyeing with Natural Dyes: Production of Comparative Dyeings for the Identification of Dyes on Historic Textile Materials, Conservation Analytical Laboratory, Smithsonian Institution, 1986.

15. Melo, M. J., History of Natural Dyes in the Ancient Mediterranean World, in Handbook of Natural Colorants, John Wiley & Sons, Ltd, 3–18, 2009. DOI:10.1002/9780470744970.ch1
16. Karlsone, A., Heritage-making: Written Texts in the Transmission of Traditional Knowledge of Natural Dyeing, Martor, 27, 15–27, 2022. DOI:10.57225/martor.2022.27.02
17. Hagan, E., & Poulin, J. A., Statistics of the early synthetic dye industry, Heritage Science, 9, 33, 2021. DOI:10.1186/s40494-021-00493-5
18. Melo, M. J., Nabais, P., Vieira, M., Araújo, R., Otero, V., Lopes, J., et al., Between past and future: Advanced studies of ancient colours to safeguard cultural heritage and new sustainable applications, Dyes and Pigments, 208, 110815, 2023. https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2022.110815
19. Yadav, S., Prajapati, H. C., Sonkar, S. P., Nigam, R. S., Chandravanshi, R., & Gupta, C., Innovations in natural dye production: bridging tradition and modern technology, Frontiers in Plant Science, 15 August 2025. https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1568094
20. Alegbe, E. O., & Uthman, T. O., A review of history, properties, classification, applications and challenges of natural and synthetic dyes, Heliyon, 10, e336-46, 2024. DOI:10.1016/j.heliyon.2024.e33646
21. Cardon, D., Natural dyes, our global heritage of colors, Textile Society of America 13th Biennial Symposium, Lincoln, Nebraska, 6–9 October 2010.
22. Yusuf, M. F. M., Natural colorants: historical, processing and sustainable prospects, Natural Products and Bioprospecting, 7(1), 123–145, 2017. doi: 10.1007/s13659-017-0119-9.
23. Saxena, S., & Raja, A. S. M., "Natural dyes: sources, chemistry, application and sustainability issues," in Textile Science and Clothing Technology, Singapore, Springer Singapore, 37–80, 2014. DOI:10.1007/978-981-287-065-0_2
24. Ahsan, R., et al., "Extraction and application of natural dyes on natural fibers: an eco-friendly perspective," Review of Education & Law, 3, 63–75, 2020. DOI:10.47067/real.v3i1.22
25. Singh, R. S., "Exploration of flower-based natural dyes – a review," Research Journal of Recent Sciences, 4, 6–8, 2015. DOI: https://doi.org/10.47067/real.v3i1.22
26. Bhandari, V., "Plant-based colorants: isolation and application," in Plant biomass derived materials: sources, extractions, and applications, Weinheim, Germany, Wiley-VCH Verlag GmbH, 159–188, 2024.
27. Uddin, M. A., et al., "Textile colouration with natural colourants: a review," Journal of Cleaner Production, 349, 131489, 2022. DOI:10.1016/j.jclepro.2022.131489
28. Samanta, P., "A review on application of natural dyes on textile fabrics and its revival strategy," in Chemistry and Technology of Natural and Synthetic Dyes and Pigments, London, UK, IntechOpen, 1–24, 2020. DOI: 10.5772/intechopen.90038
29. Gokhale, A. K., "A review on sources and application of natural dyes in textiles," International Journal of Textile Science, vol. 8, no. 2, pp. 38–40, 2019. doi:10.5923/j.textile.20190802.02
30. Genc, M., & Aydin, B., "7th new insect species with high potential to be used in the production of a natural red dye: Dactylopius opuntiae (Cockerell, 1896) (Hemiptera: Dactylopiidae)," Textile Research Journal, 94(3-4), 477–483, 2024. DOI:10.3406/bsef.2017.3194
31. Mahmud-Ali, A., Fitz-Binder, C., & Bechtold, T., "Aluminium-based dye lakes from plant extracts for textile coloration," Dyes and Pigments, 94, 533–540, 2012. DOI:10.1016/j.dyepig.2012.03.003
32. Bechtold, T., Mussak, R., Mahmud-Ali, A., Ganglberger, E., & Geissler, S., "Extraction of natural dyes for textile dyeing from coloured plant wastes released from the food and beverage industry," Journal of the

Science of Food and Agriculture, 86(2), 233–242, 2006. DOI:10.1002/jsfa.2360

33. Yusuf, M. (Ed.), Handbook of renewable materials for coloration and finishing, United Kingdom: John Wiley & Sons, 2018.
34. Sohrabi S., Ahmadi Z., Quality of woolen yarn dyed with Madder and Weld in the Presence of Citrus fruit, Science and Technology of Textiles, Vol. 10, No. 4, 1-22, 2021. 20.1001.1.21517162.1400.10.4.1.2
35. Ahmadi, Z., & Gholami Houjeghan, F., "Assessment of Antibacterial, Antimicrobial, and Colorimetric Properties of Cotton and Woolen Yarns Dyed with Some Plant Extracts," Textile & Leather Review, 5, 463–483, 2022. DOI:10.31881/TLR.2022.43
36. Liu, M., Peng, F., Wang, Y., Zhang, K., Chen, G., & Fang, C., "Kineococcus xinjiangensis sp. nov., isolated from desert sand," Int. J. Syst. Evol. Microbiol., 2015, *65*, 3703–3708. https:// doi.org/ 10.3390/microorganisms8101547
37. Mayegowda, S. B., Chikkud, V., Barua, S., & Manjula, N. G., "Plant, animal, and microbial sources of dyes and mordants," book: Advances in Natural Dyes for Environmental Protection, New York, Apple Academic Press, p. 6, 2024.
38. Yadav, S., Tiwari, K. S., Gupta, C., Tiwari, M. K., Khan, A., & Sonkar, S. P., "A brief review on natural dyes, pigments: Recent advances and future perspectives," Results in Chemistry, vol. 5, p. 100733, 2023. https://doi.org/10.1016/j.rechem.2022.100733
39. Franks, A., Haywood, P., Holmström, C., Egan, S., Kjelleberg, S., & Kumar, N., "Isolation and structure elucidation of a novel yellow pigment from the marine bacterium Pseudoalteromonas tunicata," Molecules, 10(10), 1286–1291, 2005. DOI:10.3390/10101286
40. Zhu, H.-H., Guo, J., Yao, Q., Yang, S.-Z., Deng, M.-R., Phuong, L. T. B., Hanh, V. T., & Ryan, M. J., "Streptomyces vietnamensis sp. nov., a streptomycete with violet-blue diffusible pigment isolated from soil in Vietnam," International journal of systematic and evolutionary microbiology, 57(8), 1770–1774, 2007. https://doi.org/10.1002/9781118960608.gbm00191
41. Rao, N., Prabhu, M., Xiao, M., & Li, W. J., "Fungal and bacterial pigments: Secondary metabolites with wide applications," Frontiers in Microbiology, Vol.8, June, 2017. https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01113
42. Mukherjee, G., Mishra, T., & Deshmukh, S. K., "Fungal Pigments: An Overview," in Developments in Fungal Biology and Applied Mycology, Springer, Singapore, pp. 525–541, 2017. DOI:10.1007/978-981-10-4768-8_26
43. Gürses, A., Açıkyıldız, M., Güneş, K., & Gürses, M. S., "Classification of dye and pigments," in Dyes and Pigments, Springer International Publishing, p. 3, 2016.
44. Roy, R., "Eco-friendly colors: a review of recent advances in natural dyes," in Promoting Sustainable Management Through Technological Innovation, IGI Global, Pennsylvania, USA, pp. 203–215, 2023. DOI:10.4018/978-1-6684-9979-5.ch013
45. Mola M., Ahmadi Z., Optimization of Dye Extraction from Indigofera tinctoria & Dyeing Quality Evaluation Advanc Material and New Covers, Vol. 8, No.32, 2332-2320, 2020. doi:amnc.2020.8.32.4
46. Siva, R., "Status of Natural Dyes and Dye-Yielding Plants in India," Current Science, 92, 916–925, 2007. http://indianmedicine.eldoc.ub.rug.nl/id/eprint/52035
47. Samanta, P., "A Review on Application of Natural Dyes on Textile Fabrics and Its Revival Strategy," in Chemistry and Technology of Natural and Synthetic Dyes and Pigments, IntechOpen, 2020. DOI:10.5772/intechopen.90038

48. Ahmadi, Z., & Shayegh Broujeni, N., "Effectual Parameters on the Natural Dyeing Process," Journal of Textile & Polymer, No. 3, 2013.
49. Imani, H., Gharanjig, K., & Ahmadi, Z., "Eco-friendly Single Bath Dyeing of Wool Yarns with Extracted Cochineal Dye: Optimization and Additives Effect," Pigment & Resin Technology, Vol.52, No.4, 2023. https://doi.org/10.1108/PRT-04-2022-0048
50. Ahmadi, Z., & Gholami Houjeghan, F., "Evaluation of Color Sensitivity to Dyeing Parameters in Natural Dyeing with Anthocyanin," Journal of Textile and Polymer, 5(2), 97–102, 2017.
51. Abou Elmaaty, T., Sayed-Ahmed, K., Magdi, M., & Elsisi, H., "An eco-friendly method of extracting alizarin from Rubia tinctorum roots under supercritical carbon dioxide and its application to wool dyeing," Scientific Reports, 13, 30, 2023. DOI:10.1038/s41598-022-27110-0
52. Broadbent, A.D., Basic Principles of Textile Coloration, Bradford, UK: Society of Dyers and Colourists, 2001.
53. Mongkholrattanasit, R., Saiwan, C., Rungruangkitkrai, N., Punrattanasin, N., Sriharuksa, K., Klaichoi, C., & Nakpathom, M., "Ecological dyeing of silk fabric with lac dye by using padding techniques," Journal of the Textile Institute, 106(10), 1106–1114, 2015. DOI:10.1080/00405000.2014.976957
54. Baseri S., Optimization of Wool Dyeing Process with Z. Spina-Christ Root Dye by RSM, JTST, Vol. 14, No. 2, 43-67, 2025, 10.22034/jtst.2025.506547.1489
55. Jiang, H., Hu, X., Meena, B. I., Khan, A., Hussain, M. T., Yao, J., et al., "Extraction of Natural Dyes from the Stem of Caulis spatholobi and Their Application on Wool," Textile Research Journal, 89(23–24), 5209–5217, 2019. https://doi.org/10.1177/0040517519853
56. Ahire, B. B., Kasabe, S. M., Mali, A. B., & Jadhav, V. R., "Development of a Sustainable Dyeing Process for Cotton Fabric Utilizing Natural Dyes from Punica granatum L. and Curcuma longa," Current World Environment, 19(1), 137–145, 2024. DOI: http://dx.doi.org/10.12944/CWE.19.1.12
57. Hannan, M. A., Islam, M. F., & Hoque, M. B., "Improvement of Mahogany Leaf Extract Dye Fixation on Cotton-Modal Blend," Heliyon, 9(10), e20786, 2023. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20786
58. Ayele, M., Tesfaye, T., Alemu, D., Limeneh, M., & Sithole, B., "Natural Dyeing of Cotton Fabric with Extracts from Mango Tree: A Step Towards Sustainable Dyeing," Sustainable Chemistry and Pharmacy, 17, 100293, 2020. https://doi.org/10.1016/j.scp.2020.100293
59. Samanta, P., "Colorimetric Characterisation and Process Standardisation for Application of Natural Dyes on Textiles: A Research Review," in Advances in Colorimetry, London: IntechOpen, 1–39, 2024. DOI:10.5772/intechopen.113219
60. Jabar, J. M., "Classification of Natural Dyes for Sustainable Exploitation," in Sustainable Textiles: Production, Processing, Manufacturing & Chemistry, Cham: Springer Nature Switzerland, pp. 153–191, 2023. DOI:10.1007/978-3-031-47471-2_8
61. Rafiei S., Comparison of colorimetric parameters and antibacterial effect of two dyes, henna and jaft, on silk, JTST, Vol. 13, No. 1, 15-29 , 2024, 10.22034/jtst.2024.191322.
62. Mongkholrattanasit, R., Kryštůfek, J., & Wiener, J., "Dyeing and Fastness Properties of Natural Dyes Extracted from Eucalyptus Leaves Using Padding Techniques," Fibers and Polymers, 11(3), 346–350, 2010. DOI:10.1007/s12221-010-0346-8
63. 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, JTST, Vol.

14, No. 1, 114-133, 2025, 10.22034/jtst.2025.488542.1480
64. Repon, M. R., Dev, B., Rahman, M. A., Jurkonienė, S., Haji, A., Alim, M. A., & Kumpikaitė, E., "Textile Dyeing Using Natural Mordants and Dyes: A Review," Environmental Chemistry Letters, 22(3), 1473–1520, 2024. DOI:10.1007/s10311-024-01716-4
65. Yaminzoda, Z. A., Ikrami, M. B., Cheshkova, A. V., Kozlova, O. V., & Odintsova, O., "Influence of Mordant Compositions on the Color Characteristics of Cotton Fabrics Dyed with Natural Dyes," Russian Journal of General Chemistry, 94(7), 1851–1854, 2024. https://doi.org/10.1134/S1070363224070284
66. Prabhu, K. H., & Bhute, A. S., "Plant Based Natural Dyes and Mordants: A Review," Journal of Natural Product and Plant Resources, 2(6), 649–664, 2012. www.scholarsresearchlibrary.com
67. Cardon, D., "Colour Cultures: Natural Dyes, a Global Intangible Heritage with a Future," Acta Horticulturae, 1361, 1–12, 2023. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2023.1361.1
68. Das, S., Maulik S. R., "Recent Approaches and Advancements in Natural Dyes," in Natural Dyes and Sustainability, vol. 2, Cham, Switzerland: Springer, 63–78, 2024. DOI:10.1007/978-3-031-47471-2_4
69. Pranta, R. M., & Das, A. D., "Extraction of Eco-friendly Natural Dyes and Biomordants for Textile Coloration: A Critical Review," Nano-Structures & Nano-Objects, 39, 101243, 2024. https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2024.101243
70. Ahmadi Z, Effect of Biomordants in natural dyeing of wool with Madder and Weld, Colour Science and Technology, Vol. 2, 41-58, 2020. 20.1001.1.17358779.1400.15.2.2.9
71. Murani, V., Joshi, K., Sharma, K. R., & Dave, A., "A Brief Review On: Extraction of Natural Dyes from Barks of Mangrove and Walnut Tree and their Applications," International Journal of Science and Research (IJSR), 9(11), 669–673, 2020. https://doi.org/10.21275/SR201111110135
72. Singh, R., & Srivastava, S., "A Critical Review on Extraction of Natural Dyes from Leaves," International Journal of Home Science, 3(2), 100–103, 2017.
73. Selvam, M., "Extraction of natural dyes from Curcuma longa, Trigonella foenum graecum and Nerium oleander, plants and their application in antimicrobial fabric," Industrial Crops and Products, 70, 84–90, 2015. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.03.008
74. Merdan N., Eyupoglu S., & Duman M. N., "Ecological and sustainable natural dyes," in Textiles and Clothing Sustainability, Singapore: Springer, 1–41, 2017. DOI:10.1007/978-981-10-2185-5_1.
75. Shahedi R.A., Ahmadi Z., Review on the Dye Extraction of Weld, Studies in colour world, Vol.11, 32-17, 2021. https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22517278.1400.11.2.2.2
76. Borges, M., Tejera, R., Díaz, L., Esparza, P., & Ibáñez, E., "Natural dyes extraction from cochineal (Dactylopius coccus). New extraction methods," Food Chemistry, 132(4), 1855–1860, 2012. DOI:10.1016/j.foodchem.2011.12.018
77. Salauddin Sk, M., Mia, R., Haque, M. A., & Shamim, A. M., "Review on extraction and application of natural Dyes," Textile & Leather Review, 4(4), 218–233, 2021. DOI:10.31881/TLR.2021.09.
78. Shirsath, S., Sonawane, S., & Gogate, P., "Intensification of extraction of natural products using ultrasonic irradiations—A review of current status," Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 53, 10–23, 2012. DOI:10.1016/j.ultsonch.2017.03.040
79. Sivakumar, V., Anna, J. L., Vijayeeswarri, J., & Swaminathan, G., "Ultrasound assisted enhancement in natural dye

overview of extraction, characterization and performance," Nano-Structures & Nano-Objects, 37, 101111, 2024. https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2024.101111

87. Hao, S., Wu, J., Huang, Y., & Lin, J., "Natural dyes as photosensitizers for dye-sensitized solar cell," Solar Energy, 80(2), 209–214, 2006. https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.05.009
88. Pargai, D., Jahan, S., & Gahlot, M., "Functional Properties of Natural Dyed Textiles," in Chemistry and Technology of Natural and Synthetic Dyes and Pigments, January 2020. DOI: 10.5772/intechopen.88933
89. Ebrahim, S. A., Mosaad, M. M., Othman, H. A., & Hassabo, A. G., "A Valuable Observation of Eco-friendly Natural Dyes for Valuable Utilisation in the Textile Industry," Journal of Textile Coloration and Polymers, 19(1), 25–37, 2022. DOI, 10.21608/jtcps.2021.97342.1090
90. Merdan, N., Eyüpoğlu, Ş., & Duman, M. N., "Ecological and Sustainable Natural Dyes," in Textiles and Clothing Sustainability, Singapore, Springer, 1–41, 2017. DOI:10.1007/978-981-10-2185-5_1
91. Repon, M. R., Islam, T., Islam, M. T., Ghorab, A. E., & Rahman, M. M., "Cleaner Pathway for Developing Bioactive Textile Materials Using Natural Dyes: A Review," Environmental Science and Pollution Research, 30(17), 48793–48823, 2023. https://doi.org/10.1007/s11356-023-26131-0
92. Das, S., Bhattacharya, A., & Maulik, S. R., "Isolation and Characterization of Natural Dyes and Pigments," in Renewable Dyes and Pigments, Amsterdam, Elsevier, 37–48, 2024. https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15213-9.00007-7
93. Gopalakrishnan, L., Doriya, K., & Kumar, D. S., "Moringa oleifera: A Review on Nutritive Importance and Its Medicinal Application," Food Science and Human

extraction from beetroot for industrial applications and natural dyeing of leather," Ultrasonics Sonochemistry, 16(6), 782–789, 2009. doi: 10.1016/j.ultsonch.2009.03.009

80. Pizzicato B., Pacifico S., Pacifico S., Cayuela D., Mijas G., and Riba-Moliner M., Advancements in Sustainable Natural Dyes for Textile Applications: A Review, *Molecules* , Vol. *28, No.*16, 1-22, 2023, https://doi.org/10.3390/molecules28165954
81. Sheikh, J., Jagtap, P. S., & Teli, M. D., "Ultrasound assisted extraction of natural dyes and natural mordants vis a vis dyeing," Fibers and Polymers, 17(5), 738–743, 2016. https://doi.org/10.1007/s12221-016-5031-0
82. Rahman, N. A. A., Tumin, S. M., & Tajuddin, R., "Optimization of ultrasonic extraction method of natural dyes from Xylocarpus moluccensis," International Journal of Bioscience, Biochemistry and Bioinformatics, 3(1), 53–55, 2013. https://doi.org/10.7763/IJBBB.2013.V3.162
83. Imani, H., Gharanjig, K., & Ahmadi, Z., "A novel efficient method for eco-friendly deep dyeing of wool yarns by extracted madder dyes in the presence of additives," Industrial Crops and Products, 183, 114970, 2022. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.114970
84. Rani, A., Singh, R., & Sharma, S., "Enzyme-assisted extraction of natural dyes from plant sources: A sustainable approach," Environmental Chemistry Letters, 21, 1123–1135, 2023. DOI: 10.3390/ijms23042359
85. Safapour -S. Rather L. J., Moradnejad J., Shaheen Mir Sh., Functional and Colorful Wool Textiles through Ecological Dyeing with Lemon Balm Bio-Dyes and Mordants, Fibers and Polymers, Vol. 24, No.13, 4357–4370, 2023. https://doi.org/10.1007/s12221-023-00397-0
86. Mahajan, U., Prajapat, K., Dhonde, M., Sahu, K., & Shirage, P. M., "Natural dyes for dye-sensitized solar cells (DSSCs): An

Wellness, 5(2), 49–56, 2016. https://doi.org/10.1016/j.fshw.2016.04.001
94. Naghdi S., Naghdi M., Ahmadi Z., (2024), Feasibility of Natural Dye Application as a hair dye, Iran University of Art.
95. Ahmadi Z., Gholami Houdjeghan F., Review on antibacterial and antimicrobial properties of Natural Dyes, Studies in Colours World, Vol. 9, No.1, 58-41, 2019. https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22517278.1398.9.1.5.9
96. Callewaert, C., De Maeseneire, E., Kerckhof, F.-M., Verliefde, A., Van de Wiele, T., & Boon, N., "Microbial Odor Profile of Polyester and Cotton Clothes after a Fitness Session," Applied and Environmental Microbiology, 80(21), 6611–6619, 2014. https://doi.org/10.1128/AEM.01422-14
97. Kasiri, M. B., & Safapour, S., "Natural Dyes and Antimicrobials for Green Treatment of Textiles," Environmental Chemistry Letters, 12(1), 1–13, 2014. https://doi.org/10.1007/s10311-013-0426-2
98. Nguyen, T. L., Ora, A., Häkkinen, S. T., Ritala, A., Räisänen, R., Kallioinen-Mänttäri, M., & Melin, K., "Innovative Extraction Technologies of Bioactive Compounds from Plant By-Products for Textile Colorants and Antimicrobial Agents," Biomass Conversion and Biorefinery, 14(20), 24973–25002, 2024. https://doi.org/10.1007/s13399-023-04726-4
99. Teli, M. D., Sheikh, J., & Shastrakar, P., "Eco-friendly Antibacterial Printing of Wool Using Natural Dyes," Journal of Textile Science & Engineering, 4(2), 151–155, 2014. DOI: 10.4172/2165-8064.1000151
100. Şapcı, H., Yılmaz, F., Vural, C., Bahtiyari, M. İ., & Benli, H., "Antimicrobial and Antifungal Activity of Fabrics Dyed with Viburnum opulus and Onion Skins," International Journal of Secondary Metabolite, 4(3), 280–284, 2017. https://doi.org/10.21448/ijsm.372225
101. Salem, N., Msaada, K., Elkahoui, S., Mangano, G., Azaeiz, S., Ben Slimen, I., Kefi, S., Pintore, G., Limam, F., & Marzouk, B., "Evaluation of Antibacterial, Antifungal, and Antioxidant Activities of Safflower Natural Dyes during Flowering," BioMed Research International, Article ID 762397, 2014. https://doi.org/10.1155/2014/762397
102. Rahman Liman, M. L., Islam, M. T., Repon, M. R., Hossain, M. M., & Sarker, P., "Comparative dyeing behavior and UV protective characteristics of cotton fabric treated with polyphenols enriched banana and watermelon biowaste," Sustainable Chemistry and Pharmacy, 21,100417, 2021. https://doi.org/10.1016/j.scp.2021.100417
103. Mongkholrattanasit, R., Cholachatpinyo, A., Tubtimthai, N., Nattadon, R., & Mai, C., "An evaluation of UV protection imparted by wool fabric dyed with natural dye from eucalyptus leaf," Chiang Mai Journal of Science, 41(5.2), 1208–1219, 2014. https://www.researchgate.net/publication/287272683
104. Pisitsak, P., Hutakamol, J., Jeenapak, S., Wanmanee, P., Nuammaiphum, J., & Thongcharoen, R., "Natural dyeing of cotton with Xylocarpus granatum bark extract: Dyeing, fastness, and ultraviolet protection properties," Fibers and Polymers, 17(4), 560–568, 2016. https://doi.org/10.1007/s12221-016-5702-x
105. Křížová, H., & Wiener, J., "Comparison of UV protective properties of woollen fabrics dyed with yellow natural dyes from different plant sources," Environmental Sciences, 2(7), 2454–9916, 2016.
106. Bertone, M., Leong M., Bayless K., Malow T., Dunn R., and Trautwein M., Identifying and controlling clothes moths, carpet beetles and silverfish, Agriculture and food, 2016.

107.Basuk, M., Behera, J., A review on woollen cloth's moth and its remedies, Textile Today, March 2018.

108.. Nazari A., Efficient mothproofing of wool through natural dyeing with walnut hull and henna against Dermestes maculatus, The Journal of The Textile Institute, Vol. 108, No.5, 1-11, 2016. https://doi.org/10.1080/00405000.2016.1186340

109.Shakyawar, D. B., Raja, A. S. M., Kumar, A., & Pareek, P. K., "Antimoth finishing treatment for woollens using tannin-containing natural dyes," Indian Journal of Fibre and Textile Research, 40, 200–202, 2015. https://www.researchgate.net/publication/278021187

110. Kumar, A., Pareek, P. K., Kadam, V. V., & Shakyawar, D. B., "Antimoth efficacy of neem (Azadirachta indica A. Juss.) on woollen fabric," Indian Journal of Fibre and Textile Research, 15(2), 272–277, 2016.

111.Lee, Y. H., "Dyeing, fastness, and deodorizing properties of cotton, silk, and wool fabrics dyed with coffee sludge (Coffea arabica L.) extract," Journal of Applied Polymer Science, 103(1), 251–257, 2007. https://doi.org/10.1002/app.25221

112.Lee, Y. H., Hwang, E. K., Baek, Y. M., & Kim, H. D., "Deodorizing function and antibacterial activity of fabrics dyed with gallnut (Galla Chinensis) extract," Textile Research Journal, 85(10), 1045–1054, 2015. https://doi.org/10.1177/0040517514559580

113.Lee, Y., Hwang, E., & Kim, H., "Colorimetric assay and antibacterial activity of cotton, silk, and wool fabrics dyed with peony, pomegranate, clove, Coptis chinensis, and gallnut extracts," Materials, 2(1), 10–21, 2009. https://doi.org/10.3390/ma2010010

114.Hwang, E., Lee, Y., & Kim, H., "Dyeing and deodorizing properties of cotton, silk, and wool fabrics dyed with various natural colorants," Journal of the Korean Society of Dyers and Finishers, 19(6), 12, 2007.

115.Sadeka, A., & Hammash, A., "The environmental and health impact of eco-friendly textiles in the interior space," SVU-International Journal of Engineering Sciences and Applications, 4, 35–40, 2023. https://doi.org/10.21608/svusrc.2022.159112.1069

116.Pandey, A., Tripathi, S., & Pandey, R., "Medicinal plants: Chemistry, biological activities, and therapeutic applications," Natural Product Research, 34, 1970–1983, 2020.

117.Qian, L., Sankaburanurak, A., & Nan, M., "Hot spots and trends of textiles with herbal dyes," Textile and Leather Review, 8, 304–325, 2025. https://doi.org/10.31881/TLR.2025.002