چرخه تولید پایدار در صنعت فرش: مروری جامع بر مواد اولیه، فرآیندها و اقتصاد چرخشی

سعیده رفیعی

استادیار، گروه فرش، دانشکده هنرهای صناعی، دانشگاه هنر شیراز، شیراز، فارس

S_rafiei@shirazartu.ac.ir

تاریخ ارسال: ۱۴۰۴/۰۹/۱۵ تاریخ پذیرش:۱۴۰۴/۱۱/۱۳

چکیده

صنعت فرش به دلیل مصرف بالای آب و انرژی، استفاده گسترده از مواد شیمیایی و تولید پساب‌های آلوده، از چالش‌برانگیزترین بخش‌های صنعت نساجی از منظر پایداری زیست‌محیطی محسوب می‌شود. این مقاله مروری با تمرکز ویژه بر فرش ماشینی، چرخه تولید پایدار را در چارچوب رویکرد چرخه حیات و اقتصاد چرخشی به‌صورت تحلیلی و انتقادی بررسی می‌کند. تحلیل پژوهش بر سه محور اصلی استوار است: انتخاب مواد اولیه پایدار از طریق جایگزینی الیاف مصنوعی بکر با الیاف بازیافتی حاصل از بطری‌های پلاستیکی و ضایعات فرش، بهره‌گیری از پشم با مدیریت مسئولانه زنجیره تأمین، و به‌کارگیری فرآیندهای تولید سبز. در این راستا، فناوری‌هایی مانند رنگرزی بدون آب با سیال فوق‌بحرانی دی‌اکسید کربن، چاپ دیجیتال و تکمیل آنزیمی به‌عنوان راهکارهایی مؤثر برای کاهش مصرف آب، انرژی و مواد شیمیایی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. همچنین راهبردهای اقتصاد چرخشی، از جمله طراحی برای بازیافت، بازیافت فرش به فرش و برنامه‌های بازپس‌گیری محصولات پایان‌عمر، به‌عنوان اجزای کلیدی گذار به تولید پایدار تحلیل شده‌اند. نتایج مرور منابع نشان می‌دهد که ادغام این راهبردها می‌تواند به کاهش چشمگیر انتشار کربن، حذف پساب صنعتی و افزایش کارایی منابع منجر شود. در شرایط ایران، هرچند محدودیت زیرساخت‌های بازیافت و لجستیک معکوس چالش‌برانگیز است، اما پیاده‌سازی یکپارچه این رویکرد می‌تواند نقش مهمی در ارتقای رقابت‌پذیری، توسعه صادرات سبز و دستیابی به رشد پایدار در صنعت فرش ماشینی ایفا کند.

کلیدواژه‌ها: فرش ماشینی، تولید پایدار، الیاف بازیافتی، رنگرزی سبز، اقتصاد چرخشی

Sustainable production cycle in the carpet industry: A comprehensive overview of raw materials, processes and circular economy

Saeedeh Rafiei,
Assistant Professor, Department of Carpet, Faculty of applied Arts, Shiraz University of Arts, Shiraz, Fars.

S_rafiei@shirazartu.ac.ir

Abstract

The carpet industry is regarded as one of the most environmentally challenging sectors of the textile industry due to its high consumption of water and energy, extensive use of chemical substances, and the generation of polluted effluents. This review article, with a particular focus on machine-made carpets, critically and analytically examines the sustainable production cycle within the frameworks of life-cycle thinking and the circular economy. The analysis is structured around three main axes: the selection of sustainable raw materials through the substitution of virgin synthetic fibers with recycled fibers derived from plastic bottles and carpet waste, the utilization of wool sourced through responsibly managed supply chains, and the implementation of green manufacturing processes. In this context, technologies such as waterless dyeing using supercritical carbon dioxide, digital printing, and enzymatic finishing are investigated as effective solutions for reducing water, energy, and chemical consumption. Furthermore, circular-economy strategies, including design for recycling, carpet-to-carpet recycling, and end-of-life product take-back programs, are analyzed as key components of the transition toward sustainable production. The findings of the literature review indicate that integrating these strategies can lead to substantial reductions in carbon emissions, the elimination of industrial wastewater, and improved resource efficiency. In the context of Iran, although limitations in recycling infrastructure and reverse-logistics systems pose significant challenges, the integrated implementation of this approach can play a crucial role in enhancing competitiveness, developing green exports, and achieving sustainable growth in the machine-made carpet industry.

Keywords: Machine-made carpet, sustainable production, recycled fibers, green dyeing, circular economy

۱- مقدمه

صنعت فرش، به عنوان یکی از قدیمی‌ترین و مهم‌ترین بخش‌های صنعت نساجی، نه تنها یک میراث فرهنگی و هنری غنی در بسیاری از جوامع، به‌ویژه ایران، به شمار می‌رود، بلکه از نظر اقتصادی نیز نقش قابل توجهی در اشتغال‌زایی و صادرات ایفا می‌کند. با این حال، همانند بسیاری از صنایع تولیدی، فرآیندهای سنتی تولید فرش با چالش‌های زیست‌محیطی متعددی روبرو است [۱]. مصرف بالای آب و انرژی، استفاده گسترده از مواد شیمیایی و رنگ‌های مصنوعی در مراحل رنگرزی و تکمیل، و تولید حجم قابل توجهی از پسماند و فاضلاب صنعتی، اثرات منفی چشمگیری بر اکوسیستم‌ها بر جای گذاشته است [۲]. علاوه بر این، پایان عمر فرش‌های فرسوده و چالش دفن آن‌ها که به دلیل حجم زیاد و تجزیه‌ناپذیری مواد مصنوعی به یک معضل جدی تبدیل شده، ضرورت بازنگری در الگوهای تولید و مصرف را بیش از پیش آشکار می‌سازد.

در پاسخ به این چالش‌ها، مفهوم «تولید پایدار»[1] به عنوان یک پارادایم کلیدی در صنعت نساجی و فرش ظهور کرده است. تولید پایدار به معنای طراحی و ساخت محصولاتی است که در سراسر چرخه حیات خود[2] - از تأمین مواد اولیه تا تولید، مصرف و پایان عمر - کمترین اثرات نامطلوب زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی را داشته باشند. در دهه‌های اخیر، پژوهشگران و فعالان صنعتی تلاش‌های گسترده‌ای را برای پیاده‌سازی اصول پایداری در صنعت فرش آغاز کرده‌اند که این تلاش‌ها عمدتاً بر چند محور اصلی متمرکز بوده است. این مقاله صرفاً بر ایجاد چرخه تولید پایدار در صنعت فرش تمرکز دارد و سه محور عملیاتی را واکاوی می‌کند: ۱) مواد اولیه پایدار، ۲) فرآیندهای سبز، ۳) مدیریت چرخشی پایان عمر.

پیشینه تحقیق نشان می‌دهد که یکی از اصلی‌ترین حوزه‌های تمرکز، مواد اولیه بوده است. در حالی که الیاف طبیعی مانند پشم و پنبه به دلیل تجزیه‌پذیری مورد توجه هستند، تولید آن‌ها نیز بدون اثرات زیست‌محیطی نیست. پرورش گوسفند برای تولید پشم مسئول انتشار قابل توجه گازهای گلخانه‌ای است، در حالی که کشت پنبه به شدت وابسته به آب و آفت‌کش‌هاست [۲-۴]. این محدودیت‌ها محققان را به سمت بررسی جایگزین‌های نوآورانه سوق داده است. استفاده از الیاف بازیافتی، به‌ویژه پلی‌استر حاصل از بطری‌های پلاستیکی و نایلون بازیافتی از تورهای ماهیگیری و ضایعات فرش، به یک راهکار برجسته تبدیل شده است. برای مثال، شرکت آکوافیل[3] با تولید نایلون اکونیل[4] نشان داد که می‌توان از ضایعات، ماده اولیه‌ای با کیفیت برابر با مواد نو تولید کرد و همزمان انتشار کربن را به شدت کاهش داد [۵]. همچنین، الیاف زیست‌پایه مانند پلی‌لاکتیک اسید

[1] Sustainable Production
[2] Life Cycle
[3] Aquafil
[4] ECONYL

که از منابع تجدیدپذیر تولید می‌شوند و لیوسل با فرآیند تولید حلقه‌بسته که توانایی بازیافت بالای حلال را دارد، به عنوان گزینه‌های دیگر در حال بررسی و توسعه هستند[۶،۷].

محور دوم تحقیقات، فرآیندهای تولید سبز است. پژوهش‌های متعددی بر کاهش مصرف منابع و انرژی متمرکز شده‌اند، چرا که صنعت نساجی مسئول بخش قابل توجهی از پساب‌های صنعتی جهان است [۸]. یکی از نوآورانه‌ترین دستاوردها در این زمینه، فناوری رنگرزی با سیال فوق‌بحرانی دی‌اکسید کربن است که فرآیند رنگرزی را کاملاً بدون نیاز به آب انجام می‌دهد و از تولید پساب‌های سمی جلوگیری می‌کند، هرچند هنوز به دلیل هزینه‌های سرمایه‌گذاری بالا محدود به کاربردهای خاص است [۹]. در زمینه رنگرزی با رنگ‌های طبیعی، مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از این رنگ‌ها با فرآیندهای بهینه‌شده می‌تواند آلودگی آب را به طور قابل توجهی کاهش دهد [۳،۱۰]. رنگرزی دیجیتال نیز به عنوان جایگزین چاپ سنتی، مصرف آب و انرژی را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد [۱۲]. بهینه‌سازی مصرف انرژی از طریق ماشین‌آلات مدرن و استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر نیز بخش دیگری از این رویکرد است [۱۳]. شرکت‌هایی مانند اینترفیس[1]. با استفاده از انرژی تجدیدپذیر و بهینه‌سازی فرآیندها توانسته‌اند انتشار کربن خود را به شدت کاهش دهند [۱۱].

محور سوم و بسیار حیاتی، مدیریت پایان عمر محصول و حرکت به سمت اقتصاد چرخشی است. بر خلاف مدل خطی "تولید-مصرف-دورریز"، اقتصاد چرخشی بر حفظ ارزش مواد و محصولات تا حد امکان از طریق بازطراحی، استفاده مجدد، تعمیر و بازیافت تأکید دارد [۷]. در صنعت فرش، این مفهوم از طریق طراحی برای بازیافت، ایجاد برنامه‌های بازپس‌گیری توسط تولیدکنندگان، و توسعه فناوری‌های بازیافت فرش به فرش در حال پیاده‌سازی است. استفاده از مواد تک‌جنسی به جای ترکیبات چندلایه پیچیده، فرآیند بازیافت را ساده‌تر می‌کند [۱۰]. برنامه‌های بازپس‌گیری شرکت‌های پیشرو توانسته‌اند حجم قابل توجهی از فرش‌های استفاده‌شده را جمع‌آوری و بازیافت کنند [۱۱]. مطالعات ارزیابی چرخه حیات نشان داده‌اند که بازیافت فرش می‌تواند به طور قابل توجهی اثرات زیست‌محیطی آن را در مقایسه با دفن یا سوزاندن کاهش دهد، به طوری که انتشار گازهای گلخانه‌ای، مصرف انرژی و حجم دفن زباله به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد [۱۲].

با این حال، پیاده‌سازی این راهکارها با چالش‌هایی همراه است. هزینه اولیه بالای فناوری‌های سبز برای تولیدکنندگان کوچک و متوسط دشوار است[۱۳]. فقدان زیرساخت بازیافت در بسیاری از کشورها یکی دیگر از موانع مهم است که سازمان حفاظت محیط زیست ایالات متحده نیز بر آن تأکید کرده است [۱۴]. همچنین، تحقیقات نشان داده‌اند که آگاهی و تمایل مصرف‌کنندگان به پرداخت هزینه بیشتر

[1] Interface Inc

برای محصولات پایدار هنوز محدود است [۱۵]. علیرغم این چالش‌ها، اثرات مثبت پایداری بر عملکرد سازمانی و فرآیندها به خوبی مستند شده است [۱۶]، که نشان می‌دهد سرمایه‌گذاری در این حوزه می‌تواند در بلندمدت سودآور باشد.

در ادامه این مقاله، ابتدا به تفصیل مواد اولیه پایدار شامل الیاف طبیعی، بازیافتی و زیست‌پایه مورد بررسی قرار خواهند گرفت. سپس، فرآیندهای تولید دوستدار محیط زیست و فناوری‌های نوین رنگرزی تحلیل می‌شوند. در بخش بعد، به موضوع حیاتی مدیریت پایان عمر محصول و مدل‌های اقتصاد چرخشی پرداخته شده و در نهایت با ارائه یک جمع‌بندی، چالش‌های موجود و جهت‌گیری‌های پژوهشی آینده برای دستیابی به یک صنعت فرش کاملاً پایدار ترسیم خواهد شد.

۲- روش‌شناسی

این پژوهش با رویکرد مرور نظام‌مند ادبیات و هدف تحلیل و ترکیب یافته‌های علمی در حوزه تولید پایدار فرش طراحی شد. گردآوری منابع به صورت جامع در پایگاه‌های اطلاعاتی بین‌المللی اسکوپوس، وب آو ساینس، گوگل اسکالر، ساینس‌دایرکت و اسپرینگرلینک، و نیز پایگاه‌های ملی مگیران، پورتال جامع علوم انسانی و سیویلیکا انجام گرفت. واژگان کلیدی جستجو شامل عبارات فارسی «تولید پایدار فرش»، «اقتصاد چرخشی»، «الیاف بازیافتی»، «رنگرزی زیست‌سازگار»، «ارزیابی چرخه حیات»، «پلیمرهای زیستی»، و معادل‌های بین‌المللی آن‌ها بودند.

ملاک‌های پذیرش منابع عبارت بودند از: مقالات علمی-پژوهشی منتشرشده در نشریات با ضریب تأثیر بالا (با اولویت ربع اول و دوم)، گزارش‌های فنی نهادهای بین‌المللی معتبر، و پژوهش‌های مرتبط با مواد اولیه، فرآیندهای تولید، و مدیریت پایان عمر مفید محصول در دوره زمانی ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۵. مطالعات فاقد ارزیابی همتایان، منابع با محوریت خارج از پایداری و صنعت فرش، و موارد با محدودیت دسترسی از چرخه بررسی حذف شدند.

در گام نخست، ۹۸ منبع شناسایی شد که پس از حذف موارد تکراری و غربالگری بر اساس عنوان و چکیده، ۸۳ منبع برای بررسی متن کامل برگزیده شدند. در نهایت، ۴۰ منبع که معیارهای کیفی و ارتباط محتوایی را برآورده می‌کردند، در تحلیل نهایی وارد شدند. یافته‌های استخراج‌شده بر مبنای سه محور اساسی طبقه‌بندی و تحلیل گردیدند: (۱) مواد اولیه پایدار از جمله الیاف طبیعی با مدیریت مسئولانه، الیاف بازیافتی و الیاف زیست‌مبنا؛ (۲) فرآیندهای تولید سبز شامل فناوری‌های پیشرفته رنگرزی، تکمیل و بهینه‌سازی مصرف انرژی؛ و (۳) راهبردهای مدیریت پایان عمر مفید و اقتصاد دایره‌ای نظیر بازیافت، بازپس‌گیری محصول و ارزیابی چرخه حیات. برای شناسایی

روندهای غالب، شکاف‌های پژوهشی و فرصت‌های آتی، تحلیل انتقادی و ترکیب روایی یافته‌ها به کار گرفته شد.

۳- ابعاد و راهکارهای کلیدی در تولید پایدار فرش

این بخش به کالبدشکافی مفهوم چندوجهی «پایداری» در زنجیره ارزش صنعت فرش می‌پردازد. هدف، گذار از کلیات و ارائه یک چارچوب تحلیلی و عملیاتی است که راهکارهای مشخص را در هر مرحله از چرخه حیات محصول مورد بررسی قرار می‌دهد. در این راستا، مداخلات استراتژیک در پنج حوزه بنیادین واکاوی می‌شوند: انتخاب مواد اولیه پایدار، بهینه‌سازی فرآیندهای تولید، به‌کارگیری فناوری‌های نوین در رنگرزی و تکمیل، پیاده‌سازی مدل‌های اقتصاد چرخشی برای مدیریت پایان عمر محصول، و در نهایت، نقش استانداردها و گواهینامه‌ها به عنوان اهرم‌های تضمین و شفافیت.

۳-۱- مواد اولیه پایدار[1]

تمرکز بر پایداری مواد اولیه در صنعت فرش، با توجه به ساختار فنی منحصربه‌فرد این محصول، با چالش‌های خاصی روبروست. بر خلاف منسوجات تک‌لایه، فرش‌های ماشینی از ترکیب پیچیده‌ای شامل الیاف رویه (پرز)، بکینگ اولیه و ثانویه، و همچنین رزین‌های اتصال‌دهنده (مانند لاتکس‌های سنتتیک) تشکیل شده‌اند. این ترکیب چندماده‌ای[2] نه تنها تفکیک و دستیابی به مواد اولیه خالص جهت بازیافت را به شدت دشوار می‌سازد، بلکه نیازمند استراتژی‌های اختصاصی برای ارزیابی چرخه حیات و مدیریت مسئولانه مواد خام است. بنابراین، راهکارهای پایدار در این حوزه باید به طور خاص به روش‌های تفکیک مؤثر لایه‌ها و تأمین الیاف بازیافتی با خلوص بالا برای کاربرد مجدد در پرز فرش بپردازند.

انتخاب ماده اولیه به مثابه نقطه‌ی اهرمی بنیادین در معماری پایداری یک فرش عمل می‌کند. این تصمیم اولیه، یک اثر موجی[3] در سرتاسر چرخه حیات محصول، از بالادست (استخراج و فرآوری) تا پایین‌دست (مصرف، نگهداری و مدیریت پایان عمر) ایجاد می‌کند اثرات زیست‌محیطی یک فرش—شامل انتشار کربن، مصرف آب، پتانسیل تخریب اکوسیستم و تولید پسماند—به شدت تحت تأثیر ماهیت شیمیایی و منشأ تولید الیاف آن قرار دارد. در دهه‌های اخیر، یک تغییر پارادایم استراتژیک در صنعت فرش در حال وقوع است که شاهد گذار از اتکای صرف به الیاف سنتی (که اثرات زیست‌محیطی پنهان آن‌ها به تدریج آشکار شده) به سمت یک سبد متنوع از گزینه‌های نوآورانه و پایدارتر است. این گزینه‌ها عمدتاً در سه دسته اصلی طبقه‌بندی می‌شوند: الیاف طبیعی که با رویکردهای

[1] Sustainable Raw Materials

[2] Multi-material composition

[3] Ripple Effect

کشاورزی مسئولانه تولید شده‌اند، الیاف بازیافتی که اصول اقتصاد چرخشی را محقق می‌سازند، و الیاف زیست‌پایه که وابستگی به منابع فسیلی را کاهش می‌دهند. در ادامه این بخش، هر یک از این دسته‌ها با نگاهی انتقادی و تحلیلی، مزایا و چالش‌های ذاتی آن‌ها مورد واکاوی قرار می‌گیرد.

جدول ۱ : مقایسه شاخص‌های زیست‌محیطی الیاف مورد استفاده در صنعت فرش

نوع الیاف	انتشار کربن	مصرف آب	تجدیدپذیری	زیست‌تخریب‌پذیری	قابلیت بازیافت	دوام و عملکرد
پلی‌استر بکر	بالا [۱۷،۱۸]	متوسط [۱۹]	پایین [۲۰].	پایین [۲۱].	پایین [۱۹].	بالا [۲۲].
پشم	متوسط [۲۲، ۲۳]	بالا [۲۴]	متوسط [۲۵]	بالا [۲۵]	متوسط [۱۹]	بالا [۲۲]
پنبه ارگانیک	متوسط [۲۶]	بالا[۲۶،۲۷]	بالا [۲۵]	بالا [۲۵]	متوسط [۱۹]	متوسط [۲۶]
پلی‌استر بازیافتی	متوسط[۱۹، ۲۸]	پایین [۱۹]	پایین [۲۰]	بالا [۲۹، ۳۰]	بالا [۱۹]	بالا [۲۲]
نایلون بازیافتی	متوسط[۱۹، ۳۱]	پایین [۱۹]	پایین [۲۰]	بالا [۲۹]	بالا [۱۹]	بالا [۲۲]
الیاف زیست‌پایه	متوسط[۳۰، ۳۲]	متوسط [۳۰]	بالا [۳۰]	متوسط [۳۳]	متوسط [۳۳]	بالا [۳۰]

۳-۱-۱- الیاف طبیعی: بازنگری در پایداری سنتی

الیاف طبیعی، که از منابع گیاهی یا حیوانی به دست می‌آیند، به دلیل منشأ تجدیدپذیر و قابلیت تجزیه زیستی کامل، به طور سنتی به عنوان گزینه‌هایی ذاتاً پایدار در نظر گرفته شده‌اند. با این حال، یک ارزیابی چرخه حیات[1] جامع و علمی نشان می‌دهد که فرآیندهای کشاورزی و دامپروری صنعتی مدرن می‌توانند اثرات زیست‌محیطی قابل توجهی داشته باشند که این تصور ساده‌انگارانه را به چالش می‌کشد.

پشم[2] به واسطه مجموعه‌ای از ویژگی‌های عملکردی برجسته، از جمله دوام استثنایی، مقاومت طبیعی در برابر شعله و لکه، قابلیت ارتجاعی بالا و توانایی در تنظیم رطوبت، به عنوان یک لیف کلاسیک و ممتاز برای فرش‌های دستباف و ماشینی باکیفیت شناخته می‌شود. ماهیت تجدیدپذیر و زیست‌تخریب‌پذیر آن، پشم را در چارچوب پایداری قرار می‌دهد. با این وجود، تولید پشم در مقیاس صنعتی با دو چالش زیست‌محیطی عمده روبروست. اول، انتشار گاز متان[3]، یک گاز گلخانه‌ای قدرتمند که عمدتاً از فرآیند تخمیر روده‌ای[4] در دام‌ها منتشر می‌شود و سهم قابل توجهی در پتانسیل گرمایش جهانی[5] این صنعت دارد. دوم، فرآیند شستشوی پشم خام برای حذف چربی طبیعی (لانولین)، گرد و غبار و سایر ناخالصی‌ها، فرآیندی بسیار انرژی‌بر و آب‌بر است که پساب‌هایی با بار آلی بالا[6] تولید می‌کند [۳۳-۳۵]. در پاسخ به این چالش‌ها، جنبش‌هایی به سمت دامپروری پایدار شکل گرفته است. رویکردهایی نظیر کشاورزی احیاکننده[7] که بر بهبود سلامت خاک و ترسیب

[1] Life Cycle Assessment - LCA
[2] Wool
[3] CH_4
[4] Enteric Fermentation
[5] GWP
[6] High Organic Load
[7] Regenerative Agriculture

کربن در مراتع تمرکز دارد، و استانداردهای معتبری مانند استاندارد پشم مسئولانه[1]که با تضمین رفاه حیوانات و مدیریت پایدار زمین، یک چارچوب قابل راستی‌آزمایی برای تولید پشم با اثرات زیست‌محیطی کاهش‌یافته ارائه می‌دهند، مسیر را برای مصرف‌کنندگان و تولیدکنندگان آگاه هموار ساخته‌اند.

پنبه نیز به دلیل نرمی، قابلیت تنفس و پذیرش عالی رنگ، به طور گسترده در تولید فرش‌های ماشینی، به‌ویژه در بخش تافتینگ، کاربرد دارد. با این حال، پنبه کشت‌شده به روش مرسوم به عنوان یکی از پرمصرف‌ترین و آلاینده‌ترین محصولات کشاورزی در جهان شناخته می‌شود. مصرف آب این محصول بسیار بالاست؛ به طوری که تولید تنها یک کیلوگرم پنبه می‌تواند به طور متوسط تا ۱۰،۰۰۰ لیتر آب، عمدتاً برای آبیاری، نیاز داشته باشد[۳۶-۳۷]. علاوه بر این، کشت سنتی پنبه به شدت به آفت‌کش‌ها و کودهای شیمیایی مصنوعی وابسته است که استفاده بی‌رویه از آن‌ها منجر به تخریب ساختار و حاصلخیزی خاک، آلودگی منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی و پدیده مغذی‌شدن[2] و همچنین تهدید تنوع زیستی و سلامت کشاورزان می‌شود. در مقابل، پنبه ارگانیک به عنوان یک جایگزین پایدار و مسئولانه مطرح می‌شود. در کشت ارگانیک، استفاده از هرگونه آفت‌کش و کود شیمیایی مصنوعی ممنوع بوده و کشاورزان از روش‌های طبیعی مانند تناوب زراعی، کمپوست و کنترل بیولوژیکی آفات بهره می‌برند. این رویکرد نه تنها سلامت اکوسیستم را حفظ می‌کند، بلکه اغلب با تکنیک‌های مدیریت بهینه آب همراه است که مصرف آب محصول را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد [۳۸-۳۹].

در این میان، الیافی مانند جوت[3] و سیسال[4] که عمدتاً برای تولید لایه پشتیبان[5] در فرش‌های تافتینگ یا به عنوان الیاف اصلی در گلیم‌ها و فرش‌های با ظاهر طبیعی به کار می‌روند، ذاتاً از مزایای پایداری قابل توجهی برخوردارند. این گیاهان به سرعت رشد می‌کنند، در برابر آفات مقاوم هستند و برای رشد به حداقل میزان کود و آفت‌کش (و در بسیاری موارد هیچ) نیاز دارند [۴۰]. این ویژگی‌ها، در کنار قابلیت تجزیه زیستی کامل و سریع، چتایی و سیسال را به گزینه‌هایی با تاثیرات زیست‌محیطی بسیار پایین در میان خانواده الیاف طبیعی تبدیل کرده است.

۳-۱-۲- الیاف بازیافتی: ستون فقرات اقتصاد چرخشی

گذار از یک مدل اقتصادی خطی (تولید-مصرف-دفع) به یک اقتصاد چرخشی در صنعت فرش، به طور جدایی‌ناپذیری به توسعه و پذیرش الیاف بازیافتی وابسته است. این رویکرد، پسماندها را نه به عنوان یک معضل، بلکه به عنوان یک منبع

[1] Responsible Wool Standard - RWS
[2] Eutrophication
[3] Jute
[4] Sisal
[5] Backing

ارزشمند بازتعریف می‌کند. استفاده از این الیاف، یک استراتژی چندوجهی است که به طور همزمان به چندین چالش زیست‌محیطی پاسخ می‌دهد: انحراف حجم عظیمی از پسماندهای پلیمری از محل‌های دفن زباله و اکوسیستم‌های آبی، کاهش وابستگی به منابع نفتی تجدیدناپذیر برای تولید پلیمرهای نو[1]، و صرفه‌جویی چشمگیر در مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای مرتبط با فرآیندهای پتروشیمی.

در میان الیاف بازیافتی، پلی‌استر بازیافتی[2]، که عمدتاً از بطری‌های پلاستیکی پلی‌اتیلن ترفتالات مصرف‌شده استحصال می‌شود، به دلیل دسترسی گسترده به ماده اولیه و فرآیند بازیافت نسبتاً تثبیت‌شده، به بلوغ تجاری رسیده است. فرآیند غالب برای تولید پلی‌اتیلن ترفتالات بازیافتی، بازیافت مکانیکی است که شامل مجموعه‌ای از عملیات فیزیکی از جمله جمع‌آوری، تفکیک، خردایش مکانیکی بطری‌ها به پرک[3]، شستشوی داغ برای حذف آلودگی‌ها و در نهایت، ذوب و اکستروژن مجدد برای تولید چیپس پلیمری یا الیاف است. اهمیت زیست‌محیطی این فرآیند توسط مطالعات متعدد ارزیابی چرخه حیات به اثبات رسیده است. به عنوان مثال، شن و همکاران (۲۰۱۰) نشان دادند که تولید پلی‌اتیلن ترفتالات بازیافتی در مقایسه با پلی‌استر ویرجین، به حدود ۵۹٪ انرژی کمتر نیاز داشته و پتانسیل گرمایش جهانی را بیش از ۳۰٪ کاهش می‌دهد[۴۱]. این مزایای قابل توجه، در کنار هزینه رقابتی، پلی‌اتیلن ترفتالات را به گزینه‌ای فراگیر برای تولید فرش‌های مسکونی و تجاری سبک تبدیل کرده است. با این حال، باید توجه داشت که بازیافت مکانیکی غالباً با کاهش جزئی[4] در خواص مکانیکی پلیمر همراه است که می‌تواند تعداد چرخه‌های بازیافت ممکن را محدود کند.

نمونه برجسته دیگر، و شاید از نظر فنی پیشرفته‌تر، نایلون بازیافتی[5] است. نایلون (پلی‌آمید ۶ یا پلی‌آمید ۶,۶) به دلیل خواص مکانیکی فوق‌العاده نظیر استحکام کششی بالا، مقاومت سایشی عالی و قابلیت ارتجاعی، به عنوان لیف استاندارد طلایی برای فرش‌های تجاری پرتردد[6] شناخته می‌شود. اما تولید نایلون ویرجین، فرآیندی بسیار انرژی‌بر و با انتشار کربن قابل توجه است. نوآوری کلیدی در این حوزه، توسعه سیستم‌های بازیافت پیشرفته برای ضایعات نایلونی پس از مصرف (مانند تورهای ماهیگیری رها شده در اقیانوس‌ها و فرش‌های فرسوده) و ضایعات پس از تولید صنعتی است[۴۲، ۴۳]. شرکت ایتالیایی آکوافیل با معرفی محصول "اکونویل" ، پیشگام یک سیستم حلقه-بسته واقعی در این صنعت است. برخلاف بازیافت مکانیکی، این شرکت از یک فرآیند بازیافت شیمیایی موسوم به دپلیمریزاسیون[7] استفاده می‌کند. در این فرآیند، زنجیره‌های پلیمری نایلون ۶ به مونومر سازنده خود، یعنی کاپرولاکتام، شکسته می‌شوند.

[1] Virgin
[2] rPET
[3] Flakes
[4] Downcycling
[5] Recycled Nylon
[6] High-traffic commercial carpets
[7] Depolymerization

این مونومر پس از خالص‌سازی، کیفیتی معادل و غیرقابل تمایز از کاپرولاکتام ویرجین تولید شده از نفت خام دارد و می‌تواند مجدداً برای تولید نایلون ۶ جدید پلیمریزه شود. این فناوری انقلابی، امکان بازیافت بی‌نهایت نظری را بدون افت کیفیت فراهم می‌آورد و ضایعات را به طور کامل به چرخه تولید بازمی‌گرداند [۴۳،۴۴]. بر اساس گزارش‌های این شرکت، این فرآیند حلقه-بسته، پتانسیل گرمایش جهانی را در مقایسه با تولید نایلون از منابع فسیلی تا ۹۰٪ کاهش می‌دهد و نمونه‌ای بارز از تحقق اصول از گهواره تا گهواره در صنعت است[۵]. جدول۲ اثرات زیست محیطی الیاف مختلف در تولید فرش را مقایسه میکند.

جدول ۲: مقایسه اثرات زیست‌محیطی الیاف مختلف در تولید فرش[۲، ۵]

نوع الیاف	انتشار دی‌اکسید کربن (کیلوگرم به ازای هر کیلوگرم الیاف)	مصرف آب (لیتر به ازای هر کیلوگرم)	مصرف انرژی (MJ/kg)
پلی‌استر نو	۷٫۰–۵٫۵	۲–۱	۱۰۹
پلی‌اتیلن ترفتالات بازیافتی	۳٫۰–۲٫۰	۱٫۰–۰٫۵	۵۵
نایلون نو	۸٫۰–۶٫۵	۱۵۰–۱۳۰	۱۲۰
نایلون بازیافتی (اکونیل)	۳٫۵–۲٫۵	۹۰–۷۰	۶۰

۳-۱-۳- الیاف زیست‌پایه: جایگزین‌های تجدیدپذیر برای پلیمرهای نفتی

همزمان با تلاش برای چرخشی کردن جریان‌های پسماند، یک جبهه تحقیقاتی و صنعتی دیگر بر جایگزینی خود منبع اولیه، یعنی نفت خام، با منابع زیستی تجدیدپذیر[1] متمرکز است. الیاف زیست‌پایه[2] پلیمرهایی هستند که به طور کامل یا جزئی از مواد اولیه بیولوژیکی مانند نشاسته ذرت، نیشکر، یا روغن‌های گیاهی مشتق می‌شوند. این الیاف پتانسیل قابل توجهی برای کاهش وابستگی استراتژیک صنعت به سوخت‌های فسیلی و کاهش انتشار کربن اولیه محصول دارند.

پلی‌لاکتیک اسید[3] یکی از شناخته‌شده‌ترین پلیمرهای کاملاً زیست‌پایه است که معمولاً از طریق تخمیر قند استخراج‌شده از نشاسته ذرت به دست می‌آید. از منظر چرخه حیات، تولید پلی‌لاکتیک اسید در مقایسه با پلیمرهای نفتی متداول، نیازمند انرژی فسیلی کمتری است و انتشار خالص گازهای گلخانه‌ای پایین‌تری دارد. ویژگی منحصربه‌فردی که اغلب برای پلی‌لاکتیک اسید مطرح می‌شود، قابلیت تجزیه زیستی[4] آن است. با این حال، این ویژگی نیازمند درک دقیق و فنی است : پلی‌لاکتیک اسید تنها در شرایط کنترل‌شده و خاص کمپوست صنعتی (دمای بالای ۵۵-۶۰ درجه سانتی‌گراد،

[1] Renewable Biomass
[2] Bio-based Fibers
[3] PLA
[4] Biodegradability

رطوبت بالا و حضور میکروارگانیسم‌های خاص) به طور موثر تجزیه می‌شود و در محیط‌های طبیعی مانند خاک، آب یا محل‌های دفن زباله معمولی، پایداری بالایی داشته و به سادگی تجزیه نمی‌گردد[۴۵]. این محدودیت، در کنار چالش‌های اخلاقی و اقتصادی مرتبط با "رقابت غذا در برابر مواد[1]"و تخصیص زمین‌های کشاورزی برای تولید مواد اولیه صنعتی، موانعی جدی بر سر راه پذیرش گسترده آن در کاربردهای بادوام مانند فرش بوده‌اند.

با وجود این محدودیت‌ها، پلی‌لاکتیک اسید در صنعت فرش کاربردهای خاصی یافته است. این پلیمر عمدتاً در فرش‌های کم‌ترافیک مسکونی و کفپوش‌های موقت به کار می‌رود. در فرآیند تولید فرش، الیاف پلی‌لاکتیک اسید می‌توانند در مرحله ریسندگی به عنوان نخ پرز[2] یا در ساختار پشتی فرش استفاده شوند [۳۲, ۴۶]. برخی تولیدکنندگان از پلی‌لاکتیک اسید در ترکیب با الیاف طبیعی مانن پشم یا پنبه برای بهبود خواص مکانیکی و افزایش محتوای تجدیدپذیر محصول نهایی بهره می‌برند. از دیگر کاربردهای نوظهور پلی‌لاکتیک اسید، استفاده در چسب‌های حساس به حرارت[3]برای اتصال لایه‌های مختلف فرش است که امکان جداسازی آسان‌تر اجزا در پایان عمر محصول را فراهم می‌آورد [۲۹, ۴۶]. با این حال، محدودیت‌های عملکردی پلی‌لاکتیک اسید شامل مقاومت حرارتی پایین (نقطه ذوب حدود ۱۵۰-۱۶۰ درجه سانتی‌گراد)، مقاومت سایشی نامناسب در مقایسه با نایلون یا پلی‌استر، و هزینه بالاتر، مانع از پذیرش گسترده آن در فرش‌های تجاری پرتردد شده است [۳۰, ۳۲].

پلی‌تری‌متیلن ترفتالات زیست‌پایه[4] (Bio-PTT) ، که با نام تجاری سورنا[5] توسط شرکت دوپونت[6] به بازار عرضه شده، نمونه‌ای برجسته از این دسته است. این ماده با فرمول شیمیایی ($C_{13}H_{14}O_4$) یک پلی‌استر ترموپلاستیک است که در ساختار این پلیمر، یکی از دو مونومر اصلی، یعنی پروپان‌دی‌ال (PDO)، از طریق تخمیر گلوکز ذرت تولید می‌شود که در نتیجه، حدود ۳۷٪ از وزن نهایی پلیمر منشأ تجدیدپذیر دارد [۴۷].

پلی‌تری‌متیلن ترفتالات زیست‌پایه ترکیبی مطلوب از ویژگی‌های عملکردی شامل نرمی استثنایی، دوام بالا و مقاومت ذاتی در برابر لکه (بدون نیاز به افزودنی‌های شیمیایی) را ارائه می‌دهد که آن را به گزینه‌ای بسیار جذاب برای صنعت فرش، به ویژه فرش‌های مسکونی لوکس، تبدیل کرده است. از منظر زیست‌محیطی، فرآیند تولید سورنا در مقایسه با تولید نایلون ۶، به طور قابل توجهی انرژی کمتری مصرف کرده و انتشار گازهای گلخانه‌ای پایین‌تری دارد، ضمن اینکه وابستگی به منابع نفتی را کاهش می‌دهد [۴۷، ۴۶]. این پلیمرها نشان‌دهنده یک گام تکاملی مهم در جهت

[1] Food vs. Material debate
[2] pile yarn
[3] hot-melt adhesives
[4] Bio-based Polytrimethylene Terephthalate
[5] Sorona
[6] DuPont

کاهش تدریجی تاثیرات فسیلی صنعت، بدون به خطر انداختن عملکرد فنی محصول نهایی هستند.

۳-۲- فرآیندهای تولید سبز[1]

فراتر از ماهیت ذاتی مواد اولیه، پایداری یک محصول نهایی به شدت به کارایی و مسئولیت‌پذیری فرآیندهای تبدیلی آن وابسته است. در صنعت فرش، عملیات کارخانه‌ای—از ریسندگی و بافت تا تکمیل نهایی—به‌مثابه کانون اصلی مصرف منابع و تولید پسماند عمل می‌کند. فرآیندهای تولید سنتی، که غالباً برای حداکثرسازی خروجی بدون توجه کافی به بهای زیست‌محیطی طراحی شده‌اند، به دلیل مصرف بالای انرژی و آب و تولید ضایعات قابل توجه، اثرات اکولوژیکی سنگینی بر جای می‌گذارند. در مقابل، پارادایم تولید سبز به دنبال یک بازمهندسی بنیادین در عملیات تولید است که هدف آن بهینه‌سازی سیستماتیک فرآیندها، کاهش مصرف منابع در هر واحد تولید و به حداقل رساندن کلیه خروجی‌های غیرمحصول (ضایعات و آلاینده‌ها) می‌باشد. این رویکرد یک گذار استراتژیک از مدیریت انتهای خط[2] به سمت پیشگیری از آلودگی در مبدأ است.

یکی از محوری‌ترین چالش‌ها در این زمینه، مدیریت مصرف انرژی است. صنعت نساجی به طور کلی، و صنعت فرش به طور خاص، به دلیل وجود فرآیندهای حرارتی متعدد (مانند خشک کردن پس از رنگرزی و پختِ لایه‌های پشتیبان) و همچنین نیاز به نیروی محرکه الکتریکی برای ماشین‌آلات سنگین (مانند دستگاه‌های تافتینگ، بافندگی و خطوط تکمیل)، یکی از بخش‌های انرژی‌بر در صنعت محسوب می‌شود. استراتژی‌های کاهش مصرف انرژی در این صنعت بر دو جبهه اصلی متمرکز است. جبهه اول، بهینه‌سازی بهره‌وری تجهیزات موجود است. به عنوان مثال، جایگزینی موتورهای الکتریکی استاندارد با موتورهای با راندمان بالا که به درایوهای فرکانس متغیر[3] مجهز شده‌اند، یک اقدام کلیدی است. درایوهای فرکانس متغیر با تطبیق دقیق سرعت موتور با بار لحظه‌ای مورد نیاز، از اتلاف شدید انرژی در زمان‌های کارکرد با بار کم جلوگیری می‌کنند و می‌توانند مصرف برق موتورها را به شکل چشمگیری کاهش دهند[۱۳]. در کنار این، اقداماتی نظیر بازیابی حرارت از جریان‌های داغ خروجی (مانند پساب و هوای اگزوز خشک‌کن‌ها) و عایق‌بندی جامع تجهیزات حرارتی، به طور هم‌افزا به کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی کمک می‌کنند. جبهه دوم، گذار به سمت انرژی‌های تجدیدپذیر است. شرکت‌های پیشرو با نصب پنل‌های خورشیدی فتوولتائیک در مقیاس وسیع بر روی سقف کارخانه‌ها و سایت‌های تولیدی، بخشی از نیاز الکتریکی خود را به صورت پاک تأمین می‌کنند. این اقدام نه تنها انتشار کربن عملیات را مستقیماً کاهش می‌دهد، بلکه با کاهش وابستگی به شبکه

[1] Green Production Processes
[2] End-of-pipe
[3] Variable Frequency Drives - VFDs

برق مبتنی بر سوخت‌های فسیلی، پایداری مالی و تاب‌آوری سازمان را در برابر نوسانات قیمت انرژی افزایش می‌دهد. شرکت اینترفیس، به عنوان یکی از پیشگامان این حوزه، از دهه‌ها پیش سرمایه‌گذاری‌های گسترده‌ای را بر روی بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر در زنجیره تأمین جهانی خود آغاز کرده است [۱۱].

به موازات انرژی، مدیریت منابع آب و پساب چالشی حیاتی و پیچیده است. صنعت فرش، خصوصاً در مراحل شستشوی الیاف، رنگرزی و تکمیل، صنعتی ذاتاً آب‌بر است. این چالش ابعادی دوگانه دارد: کاهش مصرف آب شیرین ورودی به فرآیند و تصفیه موثر پساب بسیار آلوده خروجی. برای کاهش مصرف، استفاده از ماشین‌آلات مدرن رنگرزی با نسبت مایع به کالا[1] پایین، که می‌توانند مصرف آب را تا ۵۰٪ یا بیشتر کاهش دهند، امری ضروری است. علاوه بر این، بهینه‌سازی چرخه‌های شستشو و پیاده‌سازی سیستم‌های بازچرخانی آب در بخش‌های غیرحساس (مانند شستشوهای اولیه)، به کاهش کلی مصرف آب (ردپای آب)[2] محصول کمک شایانی می‌کند. در سمت دیگر، پساب خروجی این صنعت به دلیل دارا بودن غلظت بالای رنگ‌های مصرف‌نشده، مواد شیمیایی کمکی، سورفکتانت‌ها، فلزات سنگین (در صورت استفاده از دندانه‌ها یا رنگ‌های خاص) و همچنین پارامترهایی مانند دمای بالا و pH خارج از محدوده استاندارد، یک تهدید جدی برای اکوسیستم‌های آبی محسوب می‌شود. از این رو، استقرار سیستم‌های تصفیه پساب پیشرفته[3] که ترکیبی پیچیده از فرآیندهای فیزیکی (ته‌نشینی، فیلتراسیون)، شیمیایی (انعقاد، لخته‌سازی) و بیولوژیکی (لجن فعال) را به کار می‌گیرند، یک الزام قانونی و اخلاقی است. فناوری‌های نوینی مانند راکتورهای بیولوژیکی غشایی[4] و فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته[5] نیز برای تجزیه آلاینده‌های آلی مقاوم به تجزیه بیولوژیکی[6] به کار گرفته می‌شوند. اما هدف غایی و آرمان‌گرایانه در این حوزه، دستیابی به سیستم تخلیه مایع صفر[7] است؛ یک سیستم حلقه-بسته که در آن کل پساب از طریق فرآیندهای غشایی پیشرفته مانند اسمز معکوس[8] و تبخیرکننده‌ها، به آب پاک قابل استفاده مجدد و پسماند جامد غلیظ تبدیل می‌شود و هیچ‌گونه پساب مایعی از کارخانه خارج نمی‌گردد [۸].

در نهایت، به حداقل رساندن ضایعات تولید، رکن سوم فرآیندهای تولید سبز است. در طول فرآیند تولید فرش، ضایعات جامد در نقاط مختلفی از جمله ضایعات نخ در مراحل ریسندگی و بافت، ضایعات لبه[9] در دستگاه‌های بافندگی عریض، و به طور خاص، ضایعات حاصل از برش رول‌های فرش برای تولید تایل، ایجاد می‌شوند. به کارگیری

[1] Liquor Ratio
[2] Water Footprint

[3] Advanced Effluent Treatment Plants - ETPs
[4] Membrane Bioreactors - MBR
[5] Advanced Oxidation Processes - AOPs
[6] Recalcitrant
[7] Zero Liquid Discharge - ZLD
[8] RO
[9] Selvedge

اصول تولید ناب[1]، که بر شناسایی و حذف سیستماتیک هرگونه اتلاف[2] در فرآیندها تمرکز دارد، چارچوب مدیریتی موثری برای کاهش این ضایعات فراهم [۴۸]. در کاربردهای عملی، به ویژه در تولید تایل فرش، استفاده از الگوریتم‌های کامپیوتری بهینه‌سازی برش می‌تواند با چیدمان هوشمندانه و فشرده الگوهای برش بر روی رول اصلی، میزان ضایعات برش را به حداقل ممکن برساند. مهم‌تر از آن، این ضایعات نباید به عنوان زباله تلقی شوند، بلکه با تفکیک صحیح در مبدأ، می‌توانند به عنوان یک منبع ارزشمند به چرخه اقتصادی بازگردند و به عنوان ماده اولیه برای تولید محصولاتی نظیر نمد صنعتی، عایق‌های صوتی، یا کامپوزیت‌های پلیمری مورد استفاده قرار گیرند و بدین ترتیب، گامی دیگر در جهت تحقق اقتصاد چرخشی برداشته شود.

۳-۳- رنگرزی و تکمیل دوستدار محیط زیست[3]

فرآیندهای «تر»[4]، شامل مراحل رنگرزی و تکمیل، به طور تاریخی به عنوان یکی از کانون‌های اصلی اثرات زیست‌محیطی در کل زنجیره ارزش نساجی و فرش شناخته می‌شوند. این مراحل به دلیل مصرف بالای آب، انرژی و استفاده گسترده از مواد شیمیایی، پتانسیل بالایی برای آلودگی آب، خاک و هوا دارند. بنابراین، هرگونه استراتژی جامع برای تولید پایدار در صنعت فرش، لزوماً باید شامل یک بازنگری بنیادین و نوآورانه در این بخش باشد. این بازنگری بر سه محور اصلی استوار است: جایگزینی مواد شیمیایی سنتی با جایگزین‌های ایمن‌تر، توسعه فناوری‌های فرآیندی با کارایی بالا و اثرات زیست محیطی پایین، و بهینه‌سازی کلی فرآیندها.

یک مسیر جذاب در جستجوی پایداری، بازگشت به استفاده از رنگ‌های طبیعی است که از منابع تجدیدپذیر گیاهی، حیوانی و معدنی استخراج می‌شوند. جذابیت اصلی این رنگ‌ها در ماهیت زیست‌تخریب‌پذیر و هماهنگی آن‌ها با اکوسیستم‌های طبیعی نهفته است. با این حال، همانطور که سامانتا و همکاران در تحلیل خود اشاره می‌کنند[۴۹]، تجاری‌سازی و مقیاس‌پذیری صنعتی این رنگ‌ها با مجموعه‌ای از چالش‌های فنی و اقتصادی روبروست. یکی از موانع اصلی، ثبات عملکردی پایین‌تر آن‌ها، به ویژه ثبات نوری[5] و شستشویی[6]، در مقایسه با همتایان مصنوعی است. برای بهبود این ثبات، استفاده از دندانه‌ها[7]، که اغلب نمک‌های فلزی مانند آلومینیوم، آهن یا مس هستند، ضروری است. این مواد خود می‌توانند به عنوان آلاینده‌های جدید وارد پساب شوند و اثرات مثبت استفاده از رنگ طبیعی را خنثی کنند. با این حال، امروزه به جای دندانه‌های فلزی سنتی، از مواد تجزیه‌پذیر زیست‌محیطی

[1] Lean Manufacturing
[2] Muda
[3] Eco-friendly Dyeing & Finishing
[4] Wet Processes

[55] Light Fastness
[6] Wash Fastness
[7] Mordants

مانند آنزیم‌ها استفاده می‌شود. به ویژه، آنزیم لاکاز قابلیت اکسیداسیون و تثبیت رنگ‌های طبیعی را بدون تولید پساب سمی فراهم کرده و ثبات نوری و شستشویی را بهبود می‌بخشد [۵۰,۵۱]. این رویکرد، چالش‌های زیست‌محیطی دندانه‌ها را برطرف نموده و با یافته‌های سامانتا و همکاران[۴۹] در بهینه‌سازی رنگ‌های طبیعی همخوانی دارد.

علاوه بر این، موانع اقتصادی مانند بازدهی پایین استخراج رنگ از منابع طبیعی، نیاز به تخصیص زمین‌های کشاورزی قابل توجه برای کشت گیاهان رنگ‌زا، و چالش در تکرارپذیری دقیق سایه رنگ در بچ‌های مختلف تولید، پذیرش گسترده آن‌ها در صنعت فرش مدرن را محدود کرده است.

با توجه به محدودیت‌های رنگ‌های طبیعی، یک رویکرد عمل‌گرایانه‌تر و رایج‌تر در صنعت، تمرکز بر توسعه و استفاده از رنگ‌های شیمیایی کم‌اثر[1] است[۵۲]. این رویکرد به جای حذف کامل مواد شیمیایی، بر طراحی هوشمندانه مولکول‌های رنگزا با هدف به حداقل رساندن خطرات برای انسان و محیط زیست متمرکز است. یکی از مهم‌ترین پیشرفت‌ها در این زمینه، حذف کامل رنگ‌های آزو[2] است که پتانسیل شکسته شدن و آزادسازی آمین‌های آروماتیک سرطان‌زا را تحت شرایط احیایی دارند [۵۳]. امروزه، استفاده از رنگ‌های فاقد ترکیبات آزوی ممنوعه[3] به یک الزام در استانداردهای معتبر جهانی مانند OEKO-TEX تبدیل شده است[۵۴]. به موازات آن، حذف فلزات سنگین سمی مانند کروم، کبالت و سرب از ساختار رنگزاها، گام مهم دیگری در جهت ایمن‌سازی این مواد بوده است [۵۵]. علاوه بر این، توسعه رنگ‌های با راندمان بالا[4] مانند نسل‌های جدید رنگ‌های راکتیو، که درصد بیشتری از مولکول‌های رنگ را به طور شیمیایی با لیف پیوند می‌دهند، به طور قابل توجهی میزان رنگ باقیمانده در پساب[5] را کاهش داده و نیاز به مراحل شستشوی مکرر و پرمصرف آب را به حداقل می‌رساند [۵۶].

فراتر از بهینه‌سازی مواد شیمیایی، نوآوری‌های تحول‌آفرین در فناوری‌های فرآیندی، پتانسیل بازتعریف کامل فرآیند رنگرزی را فراهم آورده‌اند. در خط مقدم این نوآوری‌ها، رنگرزی با سیال فوق بحرانی دی‌اکسید کربن قرار دارد؛ یک فناوری انقلابی که آب را به طور کامل از فرآیند حذف می‌کند. در این سیستم بسته، دی‌اکسید کربن تحت فشار و دمای مشخص (بالاتر از نقطه بحرانی ۳۱/۱°C و ۳۷/۸ بار) به حالت سیال فوق بحرانی در می‌آید. در این حالت، دی‌اکسید کربن خواصی مابین مایع و گاز از خود نشان می‌دهد و به عنوان یک حلال غیرقطبی عمل کرده،

[1] Low-Impact Synthetic Dyes
[2] Azo Dyes
[3] Azo-free
[4] High-Exhaustion Dyes
[5] Effluent

رنگزاهای دیسپرس[1] را در خود حل می‌کند و آن‌ها را به عمق ساختار الیاف پلیمری مصنوعی (به ویژه پلی‌استر) منتقل می‌نماید. پس از پایان فرآیند، با کاهش فشار، دی‌اکسید کربن به حالت گاز بازگشته، از الیاف و رنگ اضافی جدا شده و تقریباً به طور کامل برای استفاده در بچ بعدی جمع‌آوری می‌شود. این فرآیند کاملاً خشک، بدون تولید پساب و حذف نیاز به خشک‌کن‌های انرژی‌بر، یک جهش کوانتومی در جهت پایداری محسوب می‌شود [۹]. فناوری دیگری که به سرعت در حال گسترش است، چاپ دیجیتال[2] است که با استفاده از تکنولوژی اینک‌جت، رنگ را با دقتی میکروسکوپی مستقیماً بر روی سطح فرش اعمال می‌کند. این روش در مقایسه با روش‌های سنتی چاپ، مصرف آب، رنگ و انرژی را به شدت (تا ۹۰٪) کاهش می‌دهد و علاوه بر مزایای زیست‌محیطی، انعطاف‌پذیری بی‌نظیری در طراحی و امکان سفارشی‌سازی انبوه فراهم می‌آورد [۵۷].

در نهایت، فرآیندهای تکمیل سبز[3] نیز نقش مهمی در کاهش تاثیرات شیمیایی محصول نهایی دارند. مواد شیمیایی سنتی مورد استفاده برای ایجاد خواصی مانند مقاومت در برابر لکه و آتش، اغلب نگرانی‌های جدی زیست‌محیطی و بهداشتی ایجاد کرده‌اند[۵۸].

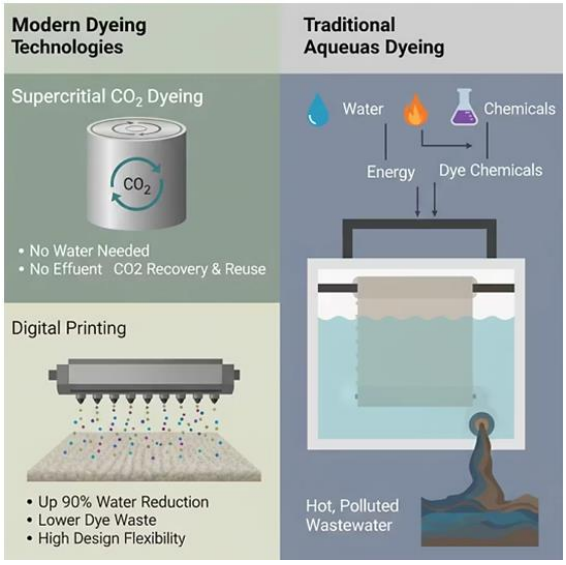
به عنوان مثال، ترکیبات پرفلورینه[4] با زنجیره بلند (C8) که به طور گسترده برای ایجاد خاصیت آب‌گریزی و ضد لک استفاده می‌شدند، به دلیل پایداری بسیار بالا در محیط زیست و سمیت، از چرخه تولید حذف شده‌اند. جایگزین‌های سبزتر شامل ترکیبات فلوئوروکربنی با زنجیره کوتاه‌تر (C6) و به طور ایده‌آل، مواد تکمیل کاملاً فاقد فلوئور[5] مبتنی بر فناوری‌هایی نظیر سیلیکون، پلی‌اورتان و پلیمرهای دندریمر هستند [۶۰، ۵۹]. به همین ترتیب، بازدارنده‌های شعله هالوژنه[6] به دلیل نگرانی از سمیت و تجمع زیستی، به سرعت در حال جایگزینی با ترکیبات کم‌خطرتر مبتنی بر فسفر هستند که کارایی لازم را با اثرات زیست‌محیطی به مراتب کمتر فراهم می‌کنند [۶]. در این راستا، آنزیم‌ها نقش کلیدی در تکمیل سبز ایفا می‌کنند. آنزیم‌هایی مانند لاکاز و لیپاز، سطح الیاف را اصلاح نموده و خواص آب‌گریزی یا ضدلکه را بدون مواد سمی مانند ترکیبات پرفلورینه ایجاد می‌کنند. این بیوکاتالیست‌ها فرآیند را در شرایط ملایم دما و pHانجام داده، مصرف انرژی را کاهش داده و پساب بی‌خطر تولید می‌نمایند [۶۱،۶۲]، که مکمل جایگزینی‌های هوشمندانه گزارش‌شده[۵۸، ۵۹] است.

فرآیندهای تولید در صنعت فرش ماشینی، به‌ویژه در عملیات رنگرزی و تکمیل، به دلیل مقیاس تولید (تولید رول‌های بزرگ متراژ بالا) و نیازهای عملکردی محصول، از

[1] Disperse Dyes
[2] Digital Printing
[3] Green Finishing

[4] PFCs
[5] PFC-free
[6] Halogenated Flame Retardants

سایر بخش‌های نساجی متمایز هستند. نیاز به رنگرزی توده‌ای[1] الیاف قبل از بافت یا رنگرزی مستقیم محصول با ثبات رنگی بسیار بالا، ایجاب می‌کند که فناوری‌های سبز، کارایی خود را در این مقیاس حفظ کنند. از سوی دیگر، تکمیل فرش به‌شدت وابسته به مواد شیمیایی تخصصی مانند بازدارنده‌های شعله هالوژنه و ضدلک‌های پرفلوئوروآلکیل [2]است که برای اطمینان از استانداردهای ایمنی و بهداشتی به‌ویژه در فرش‌های تجاری به کار می‌روند. لذا، یک رویکرد پایدار باید به جایگزینی این مواد سمی و حذف پساب حجیم ناشی از عملیات شست‌وشو و آماده‌سازی الیاف بپردازد.



شکل ۱ : مقایسه شماتیکی از فرایندهای رنگرزی سنتی و مدرن از دیدگاه تاثیرات زیست محیطی (نویسنده)

این جایگزینی‌های هوشمندانه در مرحله تکمیل، تضمین می‌کند که عملکرد فنی محصول، با بهای به خطر انداختن سلامت انسان و محیط زیست به دست نیاید.

۳-۴- پایان عمر محصول و اقتصاد چرخشی[3]

مدل اقتصاد چرخشی در صنعت فرش اساساً بر مفهوم بازیافت فرش به فرش [4]متمرکز است که هدف آن حفظ حداکثری ارزش مواد و جلوگیری از تنزل کیفیت [5]است. این رویکرد، به دلیل حجم و وزن بالای زباله‌های فرش فرسوده و ماهیت حجیم بودن آن، نیازمند توسعه سیستم‌های لجستیک معکوس[6] کارآمد و متمرکز است که فرآیندهای جمع‌آوری و حمل‌ونقل ضایعات را بهینه سازد. علاوه بر این، موفقیت این مدل به طور مستقیم به توانایی در اجرای فناوری‌های پیشرفته‌ای نظیر واپلیمریزاسیون شیمیایی[7] وابسته است، که امکان بازیابی مونومرهای باکیفیت از الیاف نایلون ۶ موجود در فرش‌های فرسوده را فراهم می‌کند و مزیت رقابتی خاصی برای این صنعت ایجاد می‌نماید.

[1] Bulk Dyeing
[2] PFCs

[3] End-of-Life **&** Circular Economy
[4] Carpet-to-Carpet
[5] Downcycling
[6] Reverse Logistics
[7] Depolymerization

جدول ۳: مقایسه کمی مصرف منابع و اثرات زیست‌محیطی روش‌های مختلف رنگرزی

سطح سمیت پساب	CO_2 انتشار (کیلوگرم)	مصرف انرژی (کیلوگرم/MJ)	(مصرف آب (لیتر/کیلوگرم	فناوری
بالا	۲۰-۱۵	۸۰-۱۲۰	۱۵۰-۱۰۰	[۵۳، ۵۶] رنگرزی سنتی
بسیار پایین	۸-۵	۶۰-۴۰	۱۰-۵	[۴، ۹] فوق‌بحرانی CO_2رنگرزی با
پایین	۱۲-۸	۵۰-۳۰	۸۰-۵۰	[۳، ۵۲] رنگرزی با رنگزاهای طبیعی
بسیار پایین	۶-۳	۴۰-۲۵	۵-۲	[۵۷، ۵۸]رنگرزی دیجیتال

گذار از مدل اقتصادی خطی سنتی (استخراج-تولید-مصرف-دفع) به سمت پارادایم اقتصاد چرخشی، یکی از حیاتی‌ترین تحولات در مسیر پایداری صنعت فرش محسوب می‌شود. در مدل خطی، چرخه حیات محصول با دفع آن به پایان می‌رسد، اما در واقعیت، در همین نقطه است که بخش بزرگی از چالش‌های زیست‌محیطی آن آغاز می‌گردد. اقتصاد چرخشی، در مقابل، با هدف حذف سیستماتیک ضایعات و حفظ مستمر ارزش مواد و محصولات در چرخه اقتصادی، یک بازنگری بنیادین در مدیریت پایان عمر محصول ارائه می‌دهد. این رویکرد نیازمند استراتژی‌های جامعی است که از مرحله طراحی محصول آغاز شده و تا فرآیندهای پیچیده بازیافت و استفاده مجدد امتداد می‌یابد[۶۴، ۶۳].

چالش مدیریت فرش‌های فرسوده، معضلی چشمگیر برای سیستم‌های مدیریت پسماند شهری و صنعتی است. ماهیت فیزیکی و شیمیایی این محصولات—به‌ویژه حجم بالا، وزن زیاد و ساختار کامپوزیتی و چندماده‌ای آن‌ها که غالباً شامل الیاف رویه (مانند نایلون یا پلی‌پروپیلن)، لایه پشتیبان (از جنس پلی‌پروپیلن یا پلی وینیل الکل) و چسب‌های اتصال‌دهنده (معمولاً لاتکس استایرن-بوتادین) است— فرآیندهای استاندارد بازیافت را به شدت دشوار و غیراقتصادی می‌سازد. بر اساس گزارش آژانس حفاظت از محیط زیست ایالات متحده ، سالانه میلیون‌ها تن فرش به محل‌های دفن زباله[1] سرازیر می‌شود. در این محیط‌های بی‌هوازی، الیاف طبیعی طی فرآیند تجزیه، گاز متان که یک گاز گلخانه‌ای قوی است تولید می‌کنند، در حالی که پلیمرهای مصنوعی نظیر نایلون و پلی‌استر برای صدها سال بدون تغییر باقی مانده و فضای ارزشمند دفن را اشغال می‌کنند و پتانسیل آلودگی خاک و آب‌های زیرزمینی را به همراه دارند.

در پاسخ به این معضل، یکی از موثرترین و بنیادین‌ترین استراتژی‌ها، ادغام اصول طراحی برای بازیافت[2] در همان مراحل اولیه توسعه محصول است. این رویکرد پیشگیرانه، که از ارکان فلسفه گهواره تا گهواره نیز به شمار می‌رود [۶۵]، بر طراحی محصولاتی تمرکز دارد که در پایان عمر

[1] Landfills
[2] Design for Recycling - DfR

خود به سادگی قابل جداسازی و بازیافت باشند. تولید فرش‌های تک‌ماده[1] نمونه‌ای بارز از این استراتژی است. در این محصولات، الیاف رویه و لایه پشتیبان هر دو از یک نوع پلیمر (مانند پلی‌اتیلن ترفتالات یا پلی‌پروپیلن) ساخته می‌شوند. این همگنی مواد، نیاز به فرآیند جداسازی پرهزینه و پیچیده فنی لایه‌ها را از بین برده و مسیر را برای بازیافت حلقه-بسته[2] کارآمد و با کیفیت بالا هموار می‌سازد.

همزمان با نوآوری در طراحی، شرکت‌های پیشرو در صنعت فرش با پذیرش مسئولیت توسعه‌یافته تولیدکننده[3]، از طریق برنامه‌های بازپس‌گیری[4]، مسئولیت محصولات خود را در فاز پس از مصرف نیز بر عهده گرفته‌اند. این برنامه‌ها زیرساخت لجستیکی لازم برای جمع‌آوری فرش‌های فرسوده از مشتریان (عمدتاً در بخش‌های تجاری و قراردادی) و هدایت آن‌ها به مراکز تخصصی تفکیک و بازیافت را فراهم می‌کنند. برنامه ری اینتری[5] که توسط شرکت اینترفیس اجرا می‌شود، یک نمونه برجسته در این زمینه است. این برنامه نه تنها محصولات خود شرکت، بلکه فرش‌های سایر تولیدکنندگان را نیز جمع‌آوری کرده و پس از تفکیک دقیق بر اساس نوع مواد، آن‌ها را به مناسب‌ترین مسیر بازیافت یا تغییر کاربری هدایت می‌کند [۱۱]. این مدل، گامی اساسی در جهت بستن حلقه مواد و جلوگیری از دفن ضایعات است.

اوج استراتژی‌های اقتصاد چرخشی در بازیافت فرش به فرش[6] تجلی می‌یابد، که خود به دو مسیر اصلی تقسیم می‌شود. بازیافت مکانیکی، یک فرآیند فیزیکی است که در آن فرش‌های تفکیک‌شده خرد، شسته، ذوب و مجدداً به شکل گرانول‌های پلیمری درمی‌آیند. این روش برای فرش‌های تک‌ماده بسیار مؤثر است اما در صورت وجود ناخالصی یا در چرخه‌های متوالی، ممکن است منجر به کاهش کیفیت پلیمر[7] شود. در مقابل، بازیافت شیمیایی یا دپلیمریزاسیون[8] یک رویکرد تحول‌آفرین است که زنجیره‌های پلیمری را به مونومرهای سازنده خود تجزیه می‌کند. همانطور که پیشتر اشاره شد، فرآیند احیای اکونیل برای نایلون ۶، با استفاده از فرش‌های کهنه به عنوان ماده اولیه، نمونه بارز این فناوری است که مونومر کاپرولاکتام را با کیفیتی معادل محصول بکر تولید می‌کند[۵]. این تکنولوژی، پتانسیل بازیافت بی‌نهایت را بدون افت کیفیت فراهم کرده و یک حلقه بسته واقعی را محقق می‌سازد.

البته، بر اساس هرم مدیریت پسماند، گزینه‌های استفاده مجدد[9] و تغییر کاربری[10] بر بازیافت ارجحیت دارند. تایل‌های فرش تجاری که هنوز از نظر فنی سالم هستند، می‌توانند پس از تمیز کردن و بازسازی، مجدداً در پروژه‌های ساختمانی دیگر به کار روند و عمر مفیدشان افزایش یابد.

[1] Mono-material
[2] Closed-loop
[3] Extended Producer Responsibility - EPR
[4] Take-back Programs
[5] ReEntry

[6] Carpet-to-Carpet Recycling
[7] Downcycling
[8] Depolymerization
[9] Reuse
[10] Upcycling

برای فرش‌هایی که دیگر به عنوان کفپوش قابل استفاده نیستند، تغییر کاربری به محصولاتی با ارزش متفاوت— مانند تولید مواد عایق صوتی برای صنعت خودرو و ساختمان، پرکننده در کامپوزیت‌های پلاستیکی، یا حتی مواد اولیه برای تولیدات هنری از دفن آن‌ها جلوگیری کرده و ارزش اقتصادی نهفته در آن‌ها را حفظ می‌کند.

جدول ۴: تحلیل مقایسه‌ای راندمان و اقتصاد فناوری‌های بازیافت نساجی

مقیاس صنعتی	هزینه نسبی	کیفیت محصول نهایی	راندمان بازیافت (درصد)	روش بازیافت
موجود	پایین	متوسط	۶۰–۷۵	[۱۹،۴۲] بازیافت مکانیکی
نوظهور	متوسط	بالا	۸۵–۹۵	[۴۴،۴۶] بازیافت شیمیایی (حلال‌محور)
نوظهور	بالا	متوسط تا بالا	۷۰–۸۰	[۵،۳۱] تجزیه حرارتی[1]
تحقیقاتی	بالا	بسیار بالا	۹۰–۹۸	[۴۵]دپلیمریزاسیون

۳-۵- استانداردها و گواهینامه‌های سبز[2]

در بازار پیچیده و رو به رشد محصولات پایدار، استانداردها و گواهینامه‌های شخص ثالث به عنوان مکانیسم‌های حیاتی برای اعتبارسنجی و حاکمیت عمل می‌کنند. این چارچوب‌ها با ایجاد یک زبان فنی مشترک و معیارهای قابل اندازه‌گیری، نقشی دوگانه ایفا می‌کنند: از یک سو، به معماران، طراحان، و مصرف‌کنندگان نهایی ابزارهای لازم برای تصمیم‌گیری آگاهانه و تمایز میان ادعاهای معتبر زیست‌محیطی و پدیده سبزنمایی[3] را ارائه می‌دهند؛ از سوی دیگر، به تولیدکنندگان یک نقشه راه ساختاریافته برای بهبود عملکرد، نوآوری و بنچمارکینگ در برابر بهترین شیوه‌های صنعتی ارائه می‌دهند. این استانداردها را می‌توان بر اساس دامنه و تمرکزشان به چند دسته اصلی تقسیم کرد: از چارچوب‌های جامع طراحی چرخشی گرفته تا استانداردهای متمرکز بر ایمنی شیمیایی، سیستم‌های رتبه‌بندی ساختمانی و پروتکل‌های مدیریت سازمانی.

در رأس استانداردهای محصول‌محور که فلسفه اقتصاد چرخشی را به‌طور کامل در بر می‌گیرند، گواهینامه «گهواره تا گهواره»[4] قرار دارد؛ چارچوبی که توسط «مک‌دانو» و «براونگارت» صورت‌بندی و تئوریزه شده است[۶۵]، فراتر از رویکرد سنتی "کاهش اثرات منفی[5]" رفته و پارادایم "طراحی برای ایجاد اثرات مثبت"[6] را ترویج می‌کند [۶۶]. این گواهینامه محصولات را بر اساس پنج معیار کلیدی و سختگیرانه ارزیابی می‌کند: سلامت مواد[7]، که تضمین‌کننده عدم وجود مواد شیمیایی سمی و مضر برای انسان و محیط زیست است؛ قابلیت استفاده مجدد مواد[8]، که تضمین می‌کند تمامی اجزای محصول پس از پایان عمر می‌توانند به عنوان "ماده مغذی بیولوژیکی" به طور ایمن به طبیعت بازگردند یا به عنوان "ماده مغذی فنی" در چرخه‌های

[1] Pyrolysis
[2] Green Standards **&** Certifications
[3] Greenwashing
[4] C2C
[5] Eco-efficiency
[6] Eco-effectiveness
[7] Material Health
[8] Material Reutilization

صنعتی با کیفیت بالا بازیافت شوند [۶۷]؛ انرژی تجدیدپذیر و مدیریت کربن[1] و مدیریت آب[2][۶۸]. دریافت این گواهینامه برای یک محصول فرش، نشان‌دهنده تعهد عمیق تولیدکننده به اصول طراحی چرخشی و مسئولیت‌پذیری جامع در کل زنجیره ارزش است.

در حالی که C2C یک دیدگاه کل‌نگر ارائه می‌دهد، مجموعه استانداردهای OEKO-TEX، به ویژه گواهینامه STANDARD 100، بر یک جنبه حیاتی دیگر تمرکز دارد: ایمنی شیمیایی و سلامت انسان. این استاندارد به عنوان یک سیستم جهانی یکپارچه برای آزمایش و صدور گواهی برای مواد نساجی عمل می‌کند و تضمین می‌دهد که هر جزء از محصول نهایی—از الیاف و نخ گرفته تا رنگ‌ها، لایه‌های پشتیبان و چسب‌ها—در برابر فهرستی جامع از بیش از صد ماده شیمیایی مضر شناخته‌شده (شامل ترکیبات سرطان‌زا، آلرژی‌زا، فلزات سنگین و آفت‌کش‌ها) مورد آزمایش قرار گرفته است. این برچسب به مصرف‌کنندگان و متخصصان اطمینان می‌دهد که محصول، از منظر سلامت بوم‌شناختی انسانی[3] ایمن بوده و در محیط‌های داخلی، به‌ویژه فضاهایی مانند مدارس، بیمارستان‌ها و منازل، تهدیدی برای سلامت ساکنان ایجاد نمی‌کند.

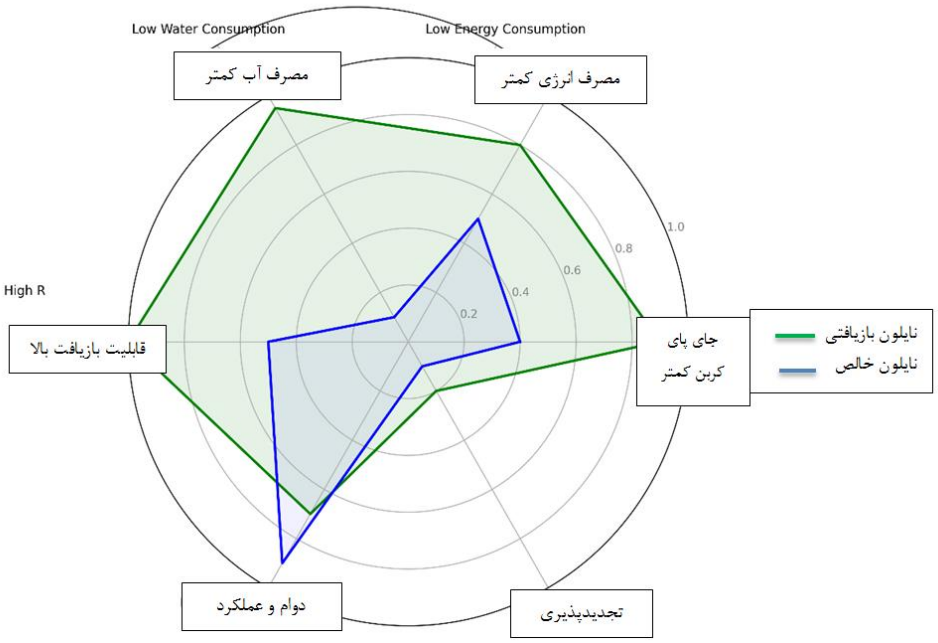
تأثیر این گواهینامه‌های محصول‌محور، توسط سیستم‌های رتبه‌بندی ساختمان سبز به شدت تقویت می‌شود. چارچوب‌های پیشرو مانند لیید [4] در آمریکای شمالی و بریام[5] در اروپا، مستقیماً به خود محصول فرش گواهی نمی‌دهند، بلکه به عنوان مکانیزم‌های قدرتمند محرک بازار عمل می‌کنند. این سیستم‌ها با تخصیص امتیاز به پروژه‌های ساختمانی برای استفاده از مصالح و محصولاتی که ویژگی‌های پایدار خاصی دارند، تقاضای تجاری برای فرش‌های سبز را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهند. در بخش "مصالح و منابع"[6] این استانداردها، امتیازاتی به مواردی مانند استفاده از محصولات با محتوای بازیافتی بالا، دارا بودن گواهینامه‌های معتبر (نظیر C2C)، انتشار کم ترکیبات آلی فرار[7] برای حفظ کیفیت هوای داخل، و شفافیت در زنجیره تأمین از طریق اعلامیه‌های زیست‌محیطی محصول (EPDs) تعلق می‌گیرد. در نتیجه، این سیستم‌ها یک انگیزه اقتصادی قوی برای تولیدکنندگان فرش ایجاد می‌کنند تا در تحقیق، توسعه و صدور گواهی برای محصولات پایدار سرمایه‌گذاری کنند [۶۹].

در نهایت، در سطحی متفاوت از استانداردهای محصول یا سیستم، استاندارد ISO 14001 پایداری را در سطح فرآیندها و مدیریت سازمانی هدف قرار می‌دهد. ISO 14001 چارچوب یک سیستم مدیریت زیست‌محیطی[8] را مشخص می‌کند. شرکتی که این گواهینامه را دریافت می‌کند، نشان

[1] Renewable Energy & Carbon Management
[2] Water Stewardship
[3] Human-Ecological Safety

[4] Leadership in Energy and Environmental Design
[5] Building Research Establishment Environmental Assessment Method
[6] Materials and Resources
[7] Low-VOCs
[8] Environmental Management System - EMS

می‌دهد که یک ساختار مدیریتی نظام‌مند برای شناسایی، کنترل، اندازه‌گیری و بهبود مستمر تأثیرات زیست‌محیطی فعالیت‌ها، محصولات و خدمات خود ایجاد کرده است. برخلاف گواهی‌های دیگر، ISO 14001 عملکرد زیست‌محیطی یک محصول خاص را تأیید نمی‌کند، بلکه تعهد سازمان به رعایت قوانین، پیشگیری از آلودگی و بهبود مداوم در عملکرد زیست‌محیطی خود را به اثبات می‌رساند. این استاندارد، نشان‌دهنده بلوغ یک سازمان در ادغام ملاحظات زیست‌محیطی در استراتژی‌ها و عملیات اصلی کسب‌وکار خود است.



شکل ۲: نمودار نمودار عنکبوتی برای مقایسه چند بعدی الیاف. (گردآوری نویسنده بر اساس [۶۶، ۶۵، ۱۰].)

۴. بحث و جهت‌گیری‌های آینده[1]

تحلیل و ترکیب ادبیات پژوهشی موجود، بیانگر یک تغییر پارادایم اساسی در صنعت فرش است؛ یک گذار نظام‌مند از مدل اقتصادی خطی مبتنی بر استخراج و دفع، به سمت یک مدل اقتصاد چرخشی که بر حفظ ارزش و حذف ضایعات استوار است. این تحول، خود را در سه حوزه محوری نمایان می‌سازد: اول، یک گذار استراتژیک در تأمین مواد اولیه که در آن الیاف بازیافتی با کارایی بالا نظیر نایلون احیاشده و rپلی‌اتیلن ترفتالات، از جایگاهی حاشیه‌ای به متن اصلی صنعت راه یافته‌اند. دوم، پیشرفت‌های تحول‌آفرین در فناوری‌های فرآیندی، مانند رنگرزی بدون آب با سیال فوق

[1] Discussion and Future Perspectives

بحرانی CO_2 و چاپ دیجیتال، که پتانسیل کاهش چشمگیر مصرف آب و انرژی صنعت را فراهم آورده‌اند. و سوم، بازتعریف مسئولیت‌پذیری تولیدکننده که از طریق برنامه‌های بازپس‌گیری محصول[1] و به‌کارگیری اصول طراحی برای بازیافت[2] ، چرخه عمر محصول را از یک مسیر یک‌طرفه به یک حلقه بسته تبدیل می‌کند. این روندهای هم‌گرا، مجموعاً نشان می‌دهند که صنعت فرش در حال حرکت به سوی یک اکوسیستم تولیدی تاب‌آورتر و پایدارتر است.

۴-۱- رویکردی دوگانه: تفکیک پایداری هنری-کارگاهی و صنعتی-انبوه

تحلیل جامع پایداری در صنعت فرش مستلزم آن است که از یک نگاه یکپارچه و یکسان‌انگارانه فراتر رویم و دوگانگی بنیادین حاکم بر این صنعت را به رسمیت بشناسیم: دوگانگی میان تولید صنعتی-انبوه (فرش ماشینی) و تولید هنری-کارگاهی (فرش دستباف). این دو بخش، با وجود اشتراک در نام «فرش»، دارای فلسفه‌های تولید، زنجیره‌های ارزش، مقیاس‌های عملیاتی، و زمینه‌های اجتماعی-اقتصادی کاملاً متفاوتی هستند. در نتیجه، چالش‌ها و اولویت‌های پایداری برای هر یک نه تنها متفاوت، بلکه گاهی در تضاد با یکدیگر قرار می‌گیرند. هرگونه بحث معنادار در مورد موانع و جهت‌گیری‌های آینده، باید بر پایه این تفکیک استوار باشد تا از ارائه راهکارهای ناکارآمد یا نامتناسب پرهیز شود[۷۱-۷۳،۴۹].

پایداری در صنعت فرش ماشینی یک چالش تکنولوژیکی-صنعتی و لجستیکی در مقیاس کلان است. این بخش که بر پایه اقتصاد مقیاس[3]، سرعت تولید و استفاده گسترده از الیاف مصنوعی بنا شده، با معضلات کلاسیک صنعتی شدن روبروست. مصرف بسیار بالای انرژی در فرآیندهای تافتینگ، رنگرزی پیوسته و خطوط تکمیل لاتکس، انتشار کربنی سنگین بر جای می‌گذارد[۱۳]. تولید حجم انبوهی از پساب‌های صنعتی با بار شیمیایی بالا و چالش مدیریت میلیون‌ها تن فرش فرسوده که به دلیل ساختار کامپوزیتی و استفاده از مواد پتروشیمی، چرخه حیات خطی «گهواره تا گور» را طی می‌کنند، مهم‌ترین موانع زیست‌محیطی هستند[۷۰]. در اینجا، راهکارهای پایداری لزوماً باید ماهیت سیستمی و فناورانه داشته باشند: سرمایه‌گذاری سنگین در بازیافت شیمیایی برای بستن حلقه مواد (مانند مدل اکونیل)، طراحی برای جداسازی، بهینه‌سازی رادیکال مصرف انرژی، و ایجاد زیرساخت‌های پیچیده لجستیک معکوس برای بازپس‌گیری محصولات در پایان عمر (مانند برنامه ری اینتری شرکت اینترفیس).

بنابراین، مسیر آینده پژوهش و توسعه در صنعت فرش ماشینی باید بر نوآوری در علم پلیمر، مهندسی فرآیند و

[1] Take-back Programs
[2] Design for Recycling
[3] Economies of Scale

مدل‌های کسب‌وکار چرخشی مانند «محصول به عنوان خدمت» متمرکز شود. درک این نیازها به سیاست‌گذاران، محققان و فعالان صنعتی اجازه می‌دهد تا استراتژی‌های خود را به‌طور مؤثرتری تنظیم کنند. برای مثال، نوآوری در رنگ‌های طبیعی ایمن در مقیاس صنعتی می‌تواند انتشار کربن را کاهش دهد و اقتصاد چرخشی را تقویت کند. این رویکرد فناورانه برای تحقق گذار پایدار در صنعت فرش ماشینی، امری اجتناب‌ناپذیر است گرد[۷۴].

۴-۲- بومی‌سازی چالش‌ها و فرصت‌ها: مطالعه موردی صنعت فرش ایران

با توجه به ویژگی‌های ساختاری، نهادی و تاریخی صنعت فرش ایران، بومی‌سازی راهبردهای تأمین مواد اولیه ماهیتی عمدتاً زمینه‌ای–تحلیلی دارد و الزاماً متکی بر داده‌های آماری یکپارچه و به‌روز در مقیاس ملی نیست. محدودیت دسترسی به آمار منسجم در حوزه تولید، توزیع و مصرف مواد اولیه، به‌ویژه در سطح استانی، سبب شده است که تحلیل‌ها بر ترکیبی از شواهد میدانی، اسناد سیاستی موجود و دیدگاه خبرگان استوار باشد. ازاین‌رو، این بخش با هدف تبیین شرایط خاص جغرافیایی، نهادی و زنجیره تأمین صنعت فرش ایران ارائه شده و به‌عنوان چارچوبی مفهومی برای درک الزامات بومی‌سازی و امکان‌سنجی راهکارهای پیشنهادی عمل می‌کند، نه به‌عنوان تحلیلی آماری با قابلیت تعمیم در سطح ملی. اعمال این چارچوب بر بافتار منحصربه‌فرد ایران—به‌عنوان خاستگاه تاریخی فرش و هم‌زمان یکی از تولیدکنندگان عمده صنعتی آن—ابعاد راهبردی ویژه‌ای را آشکار می‌سازد. مواجهه کشور با بحران فزاینده منابع آب، سرمایه‌گذاری در فناوری‌هایی نظیر رنگرزی بدون آب با سیال فوق‌بحرانی دی‌اکسید کربن و استقرار سامانه‌های تخلیه مایع صفر در صنعت فرش ماشینی را از سطح یک انتخاب زیست‌محیطی فراتر برده و به ضرورتی ساختاری برای تداوم فعالیت صنعتی بدل می‌کند. همچنین، با درنظرگرفتن روندهای جهانی و چشم‌انداز اصلاح سیاست‌های انرژی، بهینه‌سازی بنیادین مصرف انرژی در واحدهای تولیدی فرش ماشینی به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های کلیدی حفظ مزیت رقابتی و توسعه صادرات در بازارهای بین‌المللی مطرح می‌شود.

۴-۳- موانع و چالش‌های کلیدی در گذار به پایداری

با وجود این مسیر امیدوارکننده، تبدیل کامل اصول پایداری به هنجار صنعتی با مجموعه‌ای از موانع پیچیده و چندوجهی روبرو است. در سطح اقتصادی، سرمایه‌گذاری اولیه کلان مورد نیاز برای استقرار فناوری‌های پیشرفته سبز، مانند خطوط بازیافت شیمیایی یا سیستم‌های تخلیه مایع صفر، یک مانع قابل توجه، به‌ویژه برای بازیگران کوچک و متوسط، محسوب می‌شود. در سطح فنی و زیرساختی، تنگناهای لجستیکی مانند نبود شبکه‌های لجستیک معکوس کارآمد برای جمع‌آوری و تفکیک فرش‌های مستعمل، چالش

عمده‌ای برای بستن حلقه مواد به شمار می‌رود. علاوه بر این، در سطح اجتماعی-رفتاری، شکاف میان آگاهی و عمل مصرف‌کننده، همانطور که توسط رحمان و همکاران [۱۵] نیز اشاره شده، یک مانع کلیدی است. همچنین، پدیده مخرب سبزنمایی[1] با ارائه ادعاهای زیست‌محیطی مبهم، اعتماد مصرف‌کننده را تضعیف کرده و تلاش‌های صادقانه در این زمینه را بی‌اثر می‌سازد.

۴-۴- شکاف‌های پژوهشی و پرسش‌های پیش رو

موانع ذکر شده، شکاف‌های حیاتی در بدنه تحقیقات کنونی را برجسته می‌سازند که برای پیشبرد دانش و عمل در این حوزه باید مورد توجه قرار گیرند. نخست، فقدان مطالعات جامع و تطبیقی ارزیابی چرخه حیات که بتواند مسیرهای مختلف پایداری (برای مثال، الیاف پشمی با گواهی استاندارد پشم مسئولانه در برابر نایلون بازیافتی اکونیل) را مقایسه کند، به شدت محسوس است. دوم، کمبود تحقیقات تجربی در زمینه مدل‌های کسب‌وکار چرخشی، مانند «محصول به عنوان خدمت»[2]، در صنعت فرش وجود دارد. سوم، سرنوشت و تأثیر الیاف زیست‌پایه (مانند پلی‌لاکتیک اسید) در پایان عمر و اثرات بالقوه آن‌ها بر زیرساخت‌های بازیافت موجود نیازمند تحقیقات عمیق‌تری است. در نهایت، با وجود جذابیت رنگ‌های طبیعی، پژوهش برای غلبه بر چالش‌های مقیاس‌پذیری، هزینه اثربخشی و دستیابی به استانداردهای عملکرد صنعتی برای ثبات رنگ، همچنان در مراحل اولیه باقی مانده است.

۴-۵- دستور کار تحقیقات آتی: ترسیم نقشه راه برای اقتصاد چرخشی

برای پر کردن این شکاف‌ها و تسریع گذار صنعت به سمت یک آینده کاملاً چرخشی، تحقیقات آتی باید بر چند محور کلیدی متمرکز شوند. اولویت اول، توسعه و ارزیابی اقتصادی-فنی مدل‌های لجستیک معکوس برای جمع‌آوری و تفکیک فرش‌های فرسوده در مقیاس شهری و صنعتی است. اولویت دوم، تحلیل عمیق عوامل تعیین‌کننده رفتار مصرف‌کننده در قبال فرش‌های سبز و تدوین استراتژی‌های ارتباطی مؤثر برای مقابله با سبزنمایی است. همزمان، تحقیقات کاربردی برای بهبود عملکرد و قابلیت صنعتی‌سازی فناوری‌های نوظهور، به‌ویژه افزایش ثبات رنگ‌های طبیعی با استفاده از تکنیک‌های نوین مانند دندانه‌های زیست‌سازگار و اصلاح سطح با پلاسما و استفاده از پسماند های قابل استفاده در تولید رنگزا باید ادامه یابد [۷۵،۷۶]. پرداختن به این پرسش‌های پژوهشی، شالوده تجربی لازم برای غلبه بر موانع موجود را فراهم آورده و به صنعت فرش کمک خواهد کرد تا پتانسیل کامل یک اقتصاد چرخشی و احیاگر را محقق سازد[۷۷].

[1] Greenwashing
[2] Product-as-a-Service

جدول ۵: چالش‌ها و راهکارهای انتقال به نساجی پایدار[۵، ۷، ۱۳،۱۹،۱۶،۱۵].

زمان اجرا	راهکار پیشنهادی	چالش اصلی	حوزه
کوتاه‌مدت (۵-۲ سال)	[۵،۱۹] توسعه فناوری‌های واپلیمرش	کیفیت پایین الیاف بازیافتی	فنی
میان‌مدت (۱۰-۵ سال)	[۱۳،۱۶] مشوق‌های دولتی و صرفه‌جویی مقیاس	هزینه بالای فرآیندهای سبز	اقتصادی
کوتاه‌مدت (۳-۱ سال)	[۱۵، ۷۴] کمپین‌های آموزشی و برچسب‌گذاری	آگاهی پایین مصرف‌کننده	اجتماعی
میان‌مدت (۷-۳ سال)	[۵،۷] سیستم‌های take-back و لجستیک معکوس	نبود زیرساخت جمع‌آوری	زنجیره تأمین

۴-۶- ابعاد اجتماعی و اقتصادی پایداری: فراتر از ملاحظات زیست‌محیطی

یک رویکرد جامع به پایداری نمی‌تواند تنها به شاخص‌های زیست‌محیطی محدود شود. چارچوب نظری غالب در مطالعات پایداری، مدل «سه رکن اصلی»[1] است که بر لزوم یکپارچه‌سازی و توازن میان عملکرد زیست‌محیطی[2] ، مسئولیت اجتماعی[3] و قابلیت دوام اقتصادی[4] تأکید دارد [۷۸]. در صنعت فرش، غفلت از ابعاد اجتماعی و اقتصادی نه تنها درک ما را از پایداری ناقص می‌سازد، بلکه می‌تواند به اجرای سیاست‌هایی منجر شود که با وجود ظاهر سبز، در عمل نابرابری‌های اجتماعی را تشدید کرده یا از نظر اقتصادی ناپایدار باشند. بنابراین، یک تحلیل کامل نیازمند واکاوی چالش‌ها و فرصت‌های موجود در این دو حوزه حیاتی است که به طور تنگاتنگی با پایداری زیست‌محیطی در هم تنیده‌اند.

از منظر پایداری اجتماعی در صنعت فرش ماشینی، تمرکز بر ایجاد اشتغال پایدار، آموزش نیروی کار و بهبود شرایط کاری در کارخانه‌های بزرگ ضروری است. این صنعت با نیروی کار صنعتی گسترده روبرو است که نیازمند برنامه‌های آموزشی پیشرفته در فناوری‌های سبز، ایمنی کار و توسعه مهارت‌های دیجیتال می‌باشد. از این رو، پایداری اجتماعی مستلزم گواهینامه‌های مسئولیت اجتماعی مانند SA8000 و برنامه‌های توانمندسازی کارکنان است[۶۵].

علاوه بر رفاه کارکنان، نوآوری اجتماعی در فرش ماشینی از طریق دیجیتالی‌سازی فرآیندها و مشارکت جامعه محلی محقق می‌شود. این صنعت می‌تواند با ایجاد مراکز آموزشی فناوری، برنامه‌های کارآموزی و پلتفرم‌های دیجیتال فروش، اشتغال محلی را تقویت کند. برای مثال، همکاری با جوامع محلی برای تأمین مواد اولیه بازیافتی، تاب‌آوری اقتصادی ایجاد می‌کند [۷۸]. این رویکرد، پایداری اجتماعی را با رشد صنعتی هم‌راستا می‌سازد.

[1] Triple Bottom Line
[2] Planet
[3] People
[4] Profit

در نهایت، پایداری اقتصادی، رکن سوم این مدل، به دنبال پاسخ به این پرسش است که چگونه می‌توان گذار به شیوه‌های تولید سبز را از نظر مالی امکان‌پذیر و سودآور ساخت. اگرچه سرمایه‌گذاری اولیه در فناوری‌های پاک (مانند سیستم‌های ZLD یا خطوط بازیافت شیمیایی) ممکن است بالا باشد، اما تحلیل‌های بلندمدت نشان‌دهنده یک «مورد تجاری»[1] قوی برای پایداری است. این مزایا شامل کاهش هزینه‌های عملیاتی از طریق صرفه‌جویی در مصرف انرژی، آب و مواد اولیه، کاهش ریسک‌های نظارتی و قانونی مرتبط با مقررات زیست‌محیطی سخت‌گیرانه‌تر، ارتقای شهرت برند و جذب مشتریان وفادار، و دسترسی به بازارهای جدید مانند ساختمان‌های سبز (LEED/BREEAM) است. تحقیقات معتبر نشان داده‌اند شرکت‌هایی که به طور جدی در استراتژی‌های پایداری سرمایه‌گذاری می‌کنند، در بلندمدت عملکرد مالی بهتری نسبت به رقبای خود دارند، زیرا نوآوری و کارایی بیشتری در مدیریت منابع از خود نشان می‌دهند [۸۳-۸۰]. بنابراین، پایداری اقتصادی به معنای یافتن مدل‌های کسب‌وکاری است که در آن، سودآوری و مسئولیت‌پذیری زیست‌محیطی و اجتماعی، به جای تضاد، یکدیگر را تقویت می‌کنند.

۵- نتیجه‌گیری

این مقاله مروری، تحولات و رویکردهای نوین در راستای استقرار تولید پایدار در صنعت فرش را به طور جامع مورد تحلیل و بررسی قرار داد. یافته‌های کلیدی نشان می‌دهند که صنعت فرش در یک نقطه عطف تاریخی قرار گرفته است و در حال گذار از یک مدل اقتصادی خطی و پرمصرف به سمت یک الگوی چرخشی و مسئولانه در قبال محیط زیست است. این گذار صرفاً یک انتخاب اخلاقی نیست، بلکه یک ضرورت استراتژیک برای بقا و رشد در بازاری است که به طور فزاینده‌ای تحت تأثیر مقررات زیست‌محیطی، تقاضای مصرف‌کنندگان آگاه و محدودیت منابع قرار دارد.

تحلیل سه حوزه اصلی مواد اولیه، فرآیندهای تولید، و مدیریت پایان عمر، یک نقشه راه روشن برای آینده‌ای پایدارتر را ترسیم می‌کند. در حوزه مواد اولیه، حرکت از الیاف ویرجین با انتشار کربن و آب بالا (مانند پلی‌استر و پنبه سنتی) به سمت جایگزین‌های هوشمندانه، یک روند غالب است. الیاف بازیافتی، به‌ویژه نایلون احیاشده از طریق بازیافت شیمیایی (مانند اکونیل) و پلی‌اتیلن ترفتالات بازیافتی حاصل از بطری‌های پلاستیکی، نمونه‌های برجسته‌ای از تحقق اقتصاد چرخشی هستند که ضمن کاهش وابستگی به منابع فسیلی، مشکل زباله‌های پلاستیکی را نیز هدف قرار می‌دهند. به موازات آن، استفاده مسئولانه از الیاف طبیعی با گواهینامه‌هایی نظیر استاندارد

[1] Business Case

پشم مسئولانه[1] و توسعه الیاف زیست‌پایه، سبد مواد اولیه پایدار را تکمیل می‌کنند.

در بخش فرآیندهای تولید، نوآوری‌های فناورانه نقشی دگرگون‌کننده ایفا می‌کنند. فناوری‌هایی مانند رنگرزی با سیال فوق بحرانی دی‌اکسید کربن و چاپ دیجیتال، پتانسیل حذف تقریباً کامل مصرف آب از مراحل رنگرزی و تکمیل را دارند که به طور سنتی یکی از آلاینده‌ترین بخش‌های صنعت نساجی بوده است. این پیشرفت‌ها، همراه با بهینه‌سازی مصرف انرژی از طریق تجهیزات مدرن و روی آوردن به انرژی‌های تجدیدپذیر، نشان می‌دهند که می‌توان کیفیت و زیبایی محصول نهایی را بدون تحمیل هزینه‌های سنگین زیست‌محیطی حفظ کرد.

شاید مهم‌ترین تغییر پارادایم، در نگرش به پایان عمر محصول نهفته باشد. صنعت فرش به تدریج مسئولیت محصولات خود را از «گهواره تا گور»[2] به «گهواره تا گهواره»[3] تغییر می‌دهد. طراحی برای بازیافت از طریق تولید فرش‌های تک‌ماده، ایجاد زیرساخت‌های لجستیک معکوس از طریق برنامه‌های بازپس‌گیری[4] و سرمایه‌گذاری در فناوری‌های بازیافت فرش به فرش، ارکان اصلی این تحول هستند. این رویکرد چرخشی نه تنها از انباشت میلیون‌ها تن زباله در محل‌های دفن جلوگیری می‌کند، بلکه مواد باارزش را برای استفاده مجدد در چرخه‌های تولید حفظ کرده و یک مدل کسب‌وکار انعطاف‌پذیر و پایدار را خلق می‌کند.

در نهایت، این مرور جامع تأیید می‌کند که تولید پایدار در صنعت فرش دیگر یک چشم‌انداز دوردست نیست، بلکه یک واقعیت در حال تکوین است که توسط شرکت‌های پیشرو، نوآوران فناوری و استانداردهای معتبر بین‌المللی هدایت می‌شود. با این حال، چالش‌های اقتصادی، فنی و فرهنگی همچنان پابرجا هستند. غلبه بر این موانع نیازمند تلاش هماهنگ کل زنجیره ارزش، از تولیدکنندگان مواد اولیه و ماشین‌آلات گرفته تا طراحان، سیاست‌گذاران و مصرف‌کنندگان نهایی است. آینده صنعت فرش نه در کاهش اثرات منفی، بلکه در طراحی و ایجاد یک سیستم تولیدی ذاتاً مثبت و احیاگر نهفته است که در آن هر فرش جدید، بخشی از راه‌حل برای یک سیاره سالم‌تر باشد.

۶- فهرست منابع

1. Rafiei, S. (2025) ‘Evaluation of Natural Date Pit and Olive Pomace Adsorbents for Simultaneous Removal of Industrial Dyes and Heavy Metals from Carpet Dyeing Wastewater: Kinetic and Equilibrium Studies’, Journal of Studies in Color World. doi: 10.30509/jscw.2025.167603.1247.
2. Muthu, S.S. (ed.) (2020) Environmental implications of the textile industry. Woodhead Publishing.
3. Al-Ghouti, M.A., Al-Absi, R.S. and Al-Kaabi, M.A. (2021) ‘Recent advances and challenges in the removal of dyes from wastewater using

[1] RWS
[2] Cradle-to-Grave
[3] Cradle-to-Cradle
[4] Take-back Programs

agricultural wastes: A review', Journal of Environmental Management, 298, p. 113438. doi: 10.1016/j.jenvman.2021.113438.

4. Van der Velden, N.M., Patel, M.K. and Vogtländer, J.G. (2014) 'LCA-based assessment of sustainability: The eco-costs/value ratio (EVR)', in Muthu, S.S. (ed.) Handbook of sustainable apparel production. CRC Press, pp. 393–424.
5. Paletto, G., Lamedica, R. and Ruggieri, M. (2019) 'The ECONYL regeneration system: A case study of a circular economy paradigm in the textile industry', in Muthu, S.S. (ed.) Circular economy in textiles and apparel. Woodhead Publishing, pp. 245–267. doi: 10.1016/B978-0-08-102630-4.00010-0.
6. Wang, X., Song, L., Yang, H., Xing, W. and Hu, Y. (2021) 'Bio-based flame retardants: A review of recent advances and future perspectives', ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 9(33), pp. 11019–11041. doi: 10.1021/acssuschemeng.1c03417.
7. Ellen MacArthur Foundation (2017) A new textiles economy: Redesigning fashion's future. Available at:https://www.ellenmacarthurfoundation.org/publications/a-new-textiles-economy-redesigning fashions-future.
8. Holkar, C.R., Jadhav, A.J., Pinjari, D.V., Mahamuni, N.M. and Pandit, A.B. (2016) 'A critical review on textile wastewater treatments: Possible approaches', Journal of Environmental Management, 182, pp. 351–366. doi: 10.1016/j.jenvman.2016.07.090.
9. Long, J. (2011) 'Supercritical fluid dyeing of textiles and polymers: A review', The Journal of Supercritical Fluids, 57(2), pp. 85–102. doi: 10.1016/j.supflu.2011.02.010.
10. Braungart, M., McDonough, W. and Bollinger, A. (2007) 'Cradle-to-cradle design: creating healthy emissions–a strategy for eco-effective product and system design', Journal of Cleaner Production, 15(13-14), pp. 1337-1348.
11. Interface Inc. (2020) 2020 Environmental social governance report. Available at: https://www.interface.com/US/en-US/sustainability/esg-report-2020.html.
12. Bicer, Y., Dincer, I. and Vezina, G. (2016) 'Life cycle assessment of a carpet tile product', Journal of Cleaner Production, 133, pp. 451–460. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.05.158.
13. Hasanbeigi, A. and Price, L. (2012) A technical review of emerging technologies for energy and water efficiency and pollution reduction in the textile industry. Lawrence Berkeley National Laboratory. doi: 10.2172/1055013.
14. Environmental Protection Agency (2018) Facts and figures about materials, waste and recycling: Textiles: Material-specific data. Available at: https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/textiles-material-specific-data.
15. Joshi, Y. and Rahman, Z. (2015) 'Factors affecting green purchase behaviour and future research directions', Marketing Intelligence & Planning, 33(2), pp. 128–143. doi: 10.1108/MIP-04-2014-0081.
16. Eccles, R.G., Ioannou, I. and Serafeim, G. (2014) 'The impact of corporate sustainability on organizational processes and performance', Management Science, 60(11), pp. 2835–2857. doi: 10.1287/mnsc.2014.1984.
17. Muthu, S.S. (2014) Assessing the Environmental Impact of Textiles and the Clothing Supply Chain. Woodhead Publishing.

18. van der Velden, N.M., Patel, M.K. and Vogtlander, J.G. (2014) 'LCA benchmarking study on textiles made of cotton, polyester, nylon, acryl or elastane', The International Journal of Life Cycle Assessment, 19(9), pp. 331–356. https://doi.org/10.1007/s11367-013-0626-9
19. Sandin, G. and Peters, G.M. (2018) 'Environmental impact of textile reuse and recycling – A review', Journal of Cleaner Production, 184, pp. 353–365. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.266
20. Finnveden, G., Hauschild, M.Z., Ekvall, T., Guinee, J., Heijungs, R., Hellweg, S., Koehler, A., Pennington, D. and Suh, S. (2009) 'Recent developments in life cycle assessment', Journal of Environmental Management, 91(1), pp. 1–21. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.06.018
21. Stegmann, P., Daioglou, V., Londo, M., van Vuuren, D.P. and Junginger, M. (2020) 'Plastic futures and their CO_2 emissions', Nature, 612, pp. 272–276. https://doi.org/10.1038/s41586-022-05422-5
22. Baydar, G., Ciliz, N. and Mammadov, A. (2015) 'Life cycle assessment of cotton textile products in Turkey', Resources, Conservation and Recycling, 104(A), pp. 213–223. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.08.007
23. Wheeler, A.C., Rowe, J.B. and Wiedemann, S.G. (2016) 'A life cycle assessment of the production of wool in Australia', Journal of Cleaner Production, 127, pp. 308–318. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.111)
24. Mekonnen, M.M. and Hoekstra, A.Y. (2011) 'The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products', Hydrology and Earth System Sciences, 15(5), pp. 1577–1600. https://doi.org/10.5194/hess-15-1577-2011
25. Fletcher, K. (2008) Sustainable Fashion and Textiles: Design Journeys. London: Earthscan.
26. Chapagain, A.K., Hoekstra, A.Y., Savenije, H.H.G. and Gautam, R. (2006) 'The water footprint of cotton consumption: An assessment of the impact of worldwide consumption of cotton products on the water resources in the cotton producing countries', Ecological Economics, 60(1), pp. 186–203. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2005.11.027
27. Pfister, S., Koehler, A. and Hellweg, S. (2009) 'Assessing the environmental impacts of freshwater consumption in LCA', Environmental Science & Technology, 43(11), pp. 4098–4104. https://doi.org/10.1021/es802423e
28. Shen, L., Worrell, E. and Patel, M.K. (2010) 'Open-loop recycling: A LCA case study of PET bottle-to-fibre recycling', Resources, Conservation and Recycling, 55(1), pp. 34–52. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.06.014
29. Kale, G., Auras, R., Singh, S.P. and Narayan, R. (2007) 'Biodegradability of polylactide bottles in real and simulated composting conditions', Polymer Testing, 26(8), pp. 1049–1061. https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2007.07.00
30. Shen, L., Haufe, J. and Patel, M.K. (2009) Product Overview and Market Projection of Emerging Bio-based Plastics. Utrecht: Utrecht University, Copernicus Institute for Sustainable Development.
31. Aquafil (2022) ECONYL® Regeneration System: Environmental Impact Assessment. Aquafil Group Sustainability Report.
32. Vink, E.T.H., Rábago, K.R., Glassner, D.A. and Gruber, P.R. (2003) 'Applications of life cycle assessment to NatureWorks™ polylactide (PLA) production', Polymer Degradation and Stability, 80(3), pp. 403–419. https://doi.org/10.1016/S0141-3910(02)00372-5

33. Lunt, J. (1998) ‘Large-scale production, properties and commercial applications of polylactic acid polymers’, Polymer Degradation and Stability, 59(1–3), pp. 145–152. https://doi.org/10.1016/S0141-3910(97)00148-1
34. Wiedemann, S., Yan, M.J., Murphy, C. and Welch, P. (2016) ‘Energy and greenhouse gas emissions from wool production’, Animal Production Science, 56(9), pp. 1526-1534.
35. Cottle, D.J. and Cowie, A.L. (2016) ‘Allocation of greenhouse gas production between wool and meat in the life cycle assessment of Australian sheep production’, The International Journal of Life Cycle Assessment, 21(6), pp. 820-830.
36. Russell, I.M. (2009) ‘Sustainable wool production and processing’, in Blackburn, R.S. (ed.) Sustainable Textiles: Life Cycle and Environmental Impact. Woodhead Publishing, pp. 63-87.
37. Bhardwaj, N. and Chakraborty, S. (2020) ‘Sustainable production of natural fibers: Life cycle assessment and environmental implications’, in Muthu, S.S. (ed.) Sustainable Innovations in Textile Fibres. Springer, pp. 1-22.
38. Chapagain, A.K., Hoekstra, A.Y., Savenije, H.H.G. and Gautam, R. (2006) ‘The water footprint of cotton consumption: An assessment of the impact of worldwide consumption of cotton products on the water resources in the cotton producing countries’, Ecological Economics, 60(1), pp. 186-203.
39. Kooistra, K., Termorshuizen, A. and Pyburn, R. (2006) ‘The sustainability of cotton: Consequences for man and environment’, Biological Agriculture & Horticulture, 23(4), pp. 347-362.
40. Lal, R. (2015) ‘Restoring soil quality to mitigate soil degradation’, Sustainability, 7(5), pp. 5875-5895.
41. Wakelyn, P.J. and Chaudhry, M.R. (2010) ‘Organic cotton’, in Blackburn, R.S. (ed.) Sustainable Textiles: Life Cycle and Environmental Impact. Woodhead Publishing, pp. 33-62.
42. Shen, L., Worrell, E. and Patel, M.K. (2010) ‘Open-loop recycling: A LCA case study of PET bottle-to-fibre recycling’, Resources, Conservation and Recycling, 55(1), pp. 34-52.
43. Geyer, R., Jambeck, J.R. and Law, K.L. (2017) ‘Production, use, and fate of all plastics ever made’, Science Advances, 3(7), e1700782.
44. Ügdüler, S., Van Geem, K.M., Denolf, R., Roosen, M., Mys, N., Ragaert, K. and De Meester, S. (2020) ‘Towards closed-loop recycling of multilayer and coloured PET plastic waste by alkaline hydrolysis’, Green Chemistry, 22(16), pp. 5376-5394.
45. Zięba-Palus, J. and Kościelniak, P. (2016) ‘Differentiation and evaluation of evidence value of styrene acrylic urethane topcoat car paints analyzed by pyrolysis-gas chromatography’, Journal of Chromatography A, 1179(1), pp. 47-58.
46. Hatti-Kaul, R., Nilsson, L.J., Zhang, B., Rehnberg, N. and Lundmark, S. (2020) ‘Designing biobased recyclable polymers for plastics’, Trends in Biotechnology, 38(1), pp. 50–67. doi: 10.1016/j.tibtech.2019.04.011.
47. Kurian, J.V. (2005) ‘A new polymer platform for the future - Sorona from corn derived 1,3-propanediol’, Journal of Polymers and the Environment, 13(2), pp. 159-167.
48. Yao, K. and Tang, C. (2013) ‘Controlled polymerization of next-generation renewable monomers and beyond’, Macromolecules, 46(5), pp. 1689-1712.
49. Islam, M.M. (2021) ‘Waste generation and management in the textile industry’, in Muthu, S.S.

(ed.) Sustainable innovations in recycled textiles. Springer, pp. 1–24.

50. Sheikh, J., et al. (2019). Laccase-mediated dyeing of natural dyes on wool using ultrasound energy. *Journal of Cleaner Production*, 225, 684-690. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.278
51. Nidhi, et al. (2021). Enzymatic mordanting with laccase for natural dyeing: A sustainable approach. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 22, 100456. https://doi.org/10.1016/j.scp.2021.100456
52. Samanta, A.K. and Konar, A. (2011) 'Dyeing of textiles with natural dyes', in Gardetti, M.A. and Muthu, S.S. (eds.) Natural dyes. IntechOpen, pp. 37–81. doi: 10.5772/19717.
53. Yaseen, D.A. and Scholz, M. (2019) 'Textile dye wastewater characteristics and constituents of synthetic effluents: a critical review', International Journal of Environmental Science and Technology, 16(2), pp. 1193-1226.
54. Bafana, A., Devi, S.S. and Chakrabarti, T. (2011) 'Azo dyes: Past, present and the future', Environmental Reviews, 19, pp. 350–371. doi: 10.1139/a11-018.
55. Patel, Y. and Desai, C. (2018) 'Sustainable approach for dyeing of textile materials using natural dyes and eco-friendly chemicals', Sustainable Chemistry and Pharmacy, 9, pp. 1-7.
56. Kant, R. (2012) 'Textile dyeing industry an environmental hazard', Natural Science, 4(1), pp. 22-26.
57. Christie, R.M. (2015) Colour Chemistry. 2nd edn. Royal Society of Chemistry.
58. Han, S., Lee, D. and Kim, J. (2017) 'Environmental and economic assessment of digital textile printing: A comparison with conventional screen printing', Journal of Cleaner Production, 163, pp. 297–306. doi: 10.1016/j.jclepro.2015.12.037.
59. Holmquist, H., Schellenberger, S., van der Veen, I., Peters, G.M., Leonards, P.E. and Cousins, I.T. (2016) 'Properties, performance and associated hazards of state-of-the-art durable water repellent (DWR) chemistry', Environment International, 91, pp. 251-264.
60. Liu, Z. and Wang, Y. (2020) 'Sustainable chemical finishing of textiles using plasma treatment: A review', Polymers, 12(6), p. 1256.
61. Aslan, S., et al. (2016). Enzymatic surface modification of wool for green finishing. Textile Research Journal, 86(12), 1250-1260. https://doi.org/10.1177/0040517515592809
62. Azevedo, A.M., et al. (2020). Laccase immobilization for sustainable textile finishing. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 28, 101752. https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101752
63. Salmeia, K.A., Gaan, S. and Malucelli, G. (2016) 'Recent advances for flame retardancy of textiles based on phosphorus chemistry', Polymers, 8(9), p. 319.
64. Delmas, M.A. and Burbano, V.C. (2011) 'The drivers of greenwashing', California Management Review, 54(1), pp. 64-87.
65. Hahn, R. and Weidtmann, C. (2016) 'Transnational governance, deliberative democracy, and the legitimacy of ISO 26000: Analyzing the case of a global multi-stakeholder process', Business & Society, 55(1), pp. 90-129.
66. McDonough, W. and Braungart, M. (2010) Cradle to cradle: Remaking the way we make things. North Point Press.
67. Goedkoop, M., Effting, S. and Collignon, M. (2000) The Eco-indicator 99: A damage oriented method for life cycle impact assessment. Methodology Report. 3rd edn. Amersfoort: PRé Consultants.

Damascene Mill Residue Obtained from Kashan Rose Extract. *Kashan Shenasi*, *16*(2), 79-102. doi: 10.22052/kashan.2024.253621.1094

77. Rafiei,S. and Valipour,P. (2025). Application of SWOT Analysis in Developing Strategies for Machine-Made Carpet Industry Development in Domestic and Global Markets. *Journal of Textile Science and Technology*, *14*(2), 68-91. doi: 10.22034/jtst.2025.514245.1493
78. Schot, J. and Geels, F.W. (2008) 'Strategic niche management and sustainable innovation journeys: theory, findings, research agenda, and policy', Technology Analysis & Strategic Management, 20(5), pp. 537-554.
79. Amini, M. and Biersack, J. (2012) 'A review of the triple bottom line and its evolution', in Proceedings of the 2012 International Conference on Business and Management.
80. De Beukelaer, C. and O'Connor, J. (2018) '"Cultural and creative ecosystems" and the field of cultural production', International Journal of Cultural Policy, 24(5), pp. 553–566. doi: 10.1080/10286632.2018.1507316.
81. Ambec, S. and Lanoie, P. (2008) 'Does it pay to be green? A systematic overview', Academy of Management Perspectives, 22(4), pp. 45-62.
82. Eccles, R.G., Ioannou, I. and Serafeim, G. (2014) 'The impact of corporate sustainability on organizational processes and performance', Management Science, 60(11), pp. 2835-2857.
83. Porter, M.E. and van der Linde, C. (1995) 'Toward a new conception of the environment-competitiveness relationship', Journal of Economic Perspectives, 9(4), pp. 97-118.
68. Fowler, K.M. and Rauch, E.M. (2006) Sustainable building rating systems: Summary. Pacific Northwest National Laboratory (PNNL), PNNL-15858.
69. Gonzalez-Benito, J. and Gonzalez-Benito, O. (2005) 'Environmental proactivity and business performance: an empirical analysis', Omega, 33(1), pp. 1-15.
70. Sampaio, P., Saraiva, P. and Domingues, P. (2012) 'Management systems: integration or addition?', International Journal of Quality & Reliability Management, 29(4), pp. 402-424.
71. Rafiei, S. (2020). Optimization and Production of Polyacrylonitrile Based Activated Carbon Nanofibers for Dye Wastewater Treatment. Journal of Color Science and Technology, 14(4), 281-294.
72. Rafiei, S., Jahantab, M. Advancements in Natural Dyeing: Leveraging Rose Petal Residues for Antibacterial Properties in Silk and Wool for Handwoven Carpets. *Fibers Polym* **26**, 4373–4384 (2025). https://doi.org/10.1007/s12221-025-01098-
73. Rafiei, S. (2026). Enhanced Antibacterial and Sustainable Wool Textiles Using Plant-Derived Indigo Dyes and Silver Nanoparticles. *Progress in Color, Colorants and Coatings*, *19*(2), 207-230. doi: 10.30509/pccc.2025.167618.1426
74. Posner, S. (2014) The big stitch: The story of the movement to end child slavery in the handmade rug industry. GoodWeave International.
75. Rafiei,S. (2022). Dyeing of silk fibers with natural dye extracted from different parts of Ficus Johannis Boiss plant. Journal of Textile Science and Technology, 11(2), 1-17.
76. Rafiei, S. (2024). Investigating the Antibacterial Properties of Woolen Yarn Dyed with Rosa