

مدل‌سازی سه‌بعدی و شبیه‌سازی دیجیتال در فرایند توسعه محصول پوشاک و کاهش ضایعات

مریم مسلمی

کارشناسی طراحی پوشاک، موسسه آموزش عالی هنر شیراز

m.moslemi90@gmail.com

چکیده

صنعت مد و پوشاک به عنوان یکی از بزرگترین مصرف‌کنندگان منابع طبیعی و تولیدکنندگان پسماند در جهان، با چالش‌های جدی زیست‌محیطی مواجه است. فرایند توسعه محصول در این صنعت به طور سنتی با تولید نمونه‌های فیزیکی متعدد همراه است که حجم عظیمی از ضایعات پارچه، انرژی و زمان را به خود اختصاص می‌دهد. پژوهش حاضر به بررسی نقش فناوری‌های مدل‌سازی سه‌بعدی و شبیه‌سازی دیجیتال در کاهش ضایعات در فرایند توسعه محصول پوشاک می‌پردازد. این مطالعه با استفاده از روش مرور نظام‌مند و تحلیل داده‌های تجربی حاصل از پیاده‌سازی این فناوری‌ها در شرکت‌های پیشرو، نشان می‌دهد که استفاده از نمونه‌سازی مجازی می‌تواند تعداد نمونه‌های فیزیکی را بین ۷۰ تا ۹۰ درصد کاهش دهد و اثرات زیست‌محیطی را تا ۹۵ درصد بهبود بخشد. یافته‌ها حاکی از آن است که مدل‌سازی سه‌بعدی نه تنها از طریق حذف نمونه‌های فیزیکی به کاهش ضایعات کمک می‌کند، بلکه با بهبود دقت در مراحل اولیه طراحی و افزایش سرعت فرایند توسعه، زمینه‌ساز تولید پایدارتر و پاسخگویی سریع‌تر به بازار می‌شود. همچنین، چالش‌های پیاده‌سازی این فناوری از جمله نیاز به زیرساخت‌های دیجیتال، آموزش نیروی انسانی و استانداردسازی داده‌های مواد بررسی شده است. این پژوهش با ارائه چارچوبی عملیاتی برای استقرار سیستم‌های طراحی دیجیتال در صنعت پوشاک، مسیری مشخص برای گذار از توسعه سنتی محصول به توسعه دیجیتال مبتنی بر دوقلوی دیجیتال ارائه می‌دهد.

واژگان کلیدی: مدل‌سازی سه‌بعدی، شبیه‌سازی دیجیتال، توسعه محصول پوشاک، کاهش ضایعات

۱. مقدمه

صنعت مد و پوشاک با تولید سالانه بیش از ۹۲ میلیون تن ضایعات نساجی و سهم ۱۰ درصدی در انتشار گازهای گلخانه‌ای جهانی، یکی از صنایع با بیشترین آثار منفی زیست‌محیطی به شمار می‌رود (Kim, & Baek, ۲۰۲۵). این صنعت در طول چرخه حیات محصول، از تولید الیاف تا توزیع و مصرف نهایی، منابع آبی و انرژی قابل توجهی را مصرف می‌کند و سهم قابل توجهی در تولید پسماندهای جامد دارد. بر اساس گزارش آژانس حفاظت از محیط زیست آمریکا (EPA)، در سال ۲۰۱۸ تنها در ایالات متحده ۱۷ میلیون تن ضایعات نساجی تولید شده است که ۵/۸ درصد از کل پسماندهای شهری را تشکیل می‌دهد (۲۰۲۶a Style³D₁).

یکی از مراحل کلیدی در زنجیره تولید پوشاک که سهم قابل توجهی در این ضایعات دارد، فرایند توسعه محصول و نمونه‌سازی است. به طور سنتی، توسعه یک مدل پوشاک نیازمند تولید چندین نوبت نمونه فیزیکی شامل نمونه اولیه (Proto)، نمونه فیت (Fit)، نمونه فروشنده (Sample Salesman)، نمونه پیش‌تولید (Pre-production) و نمونه نهایی تولید (TOP) است (۲۰۲۶b Style³D₁). هر یک از این نمونه‌ها مستلزم برش پارچه، دوخت، حمل و نقل و در بسیاری از موارد، دور ریختن پس از بررسی و اصلاح است. تخمین زده می‌شود که حدود ۴۰ درصد از این نمونه‌های فیزیکی هرگز به مرحله تولید انبوه نمی‌رسند و به عنوان ضایعات از چرخه تولید خارج می‌شوند (۲۰۲۶c Style³D₁).

در این زمینه، فناوری‌های مدل‌سازی سه‌بعدی و شبیه‌سازی دیجیتال به عنوان راهکاری نوین برای کاهش ضایعات در فرایند توسعه محصول پوشاک مطرح شده‌اند. این فناوری‌ها با ایجاد نمونه‌های مجازی و دوقلوهای دیجیتال از پوشاک، امکان بررسی و اصلاح طراحی، فیت و ظاهر محصول را بدون نیاز به تولید نمونه‌های فیزیکی متعدد فراهم می‌آورند (al et Casciani, ۲۰۲۲). پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهد که استفاده از نمونه‌سازی مجازی می‌تواند تعداد دورهای نمونه‌سازی را به نصف کاهش دهد و در برخی موارد با پذیرش کامل فرایندهای دیجیتال، تعداد نمونه‌های فیزیکی را تا ۷۰ تا ۸۰ درصد کاهش دهد (۲۰۲۶a Style³D₁).

با وجود مزایای آشکار این فناوری‌ها، پژوهش‌های کمی به ارزیابی کمی و نظام‌مند اثرات زیست‌محیطی و اقتصادی آن‌ها پرداخته‌اند (Kim, & Baek, ۲۰۲۵). همچنین، چالش‌های پیاده‌سازی این فناوری‌ها در صنعت پوشاک، از جمله نیاز به زیرساخت‌های دیجیتال، آموزش نیروی انسانی و استانداردسازی داده‌ها، کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. پژوهش حاضر با هدف پر کردن این شکاف تحقیقاتی، به بررسی جامع نقش مدل‌سازی سه‌بعدی و شبیه‌سازی دیجیتال در کاهش ضایعات در فرایند توسعه محصول پوشاک می‌پردازد.

سوالات اصلی این پژوهش عبارتند از:

۱. مدل‌سازی سه‌بعدی و شبیه‌سازی دیجیتال چگونه به کاهش ضایعات در فرایند توسعه محصول پوشاک کمک می‌کنند؟

۲. میزان کاهش ضایعات و بهبود عملکرد زیست‌محیطی حاصل از پیاده‌سازی این فناوری‌ها چقدر است؟

۳. چالش‌ها و موانع پیاده‌سازی این فناوری‌ها در صنعت پوشاک کدامند و چه راهکارهایی برای رفع آن‌ها وجود دارد؟

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

۲.۱. توسعه محصول در صنعت پوشاک: چالش‌ها و ناکارآمدی‌ها

فرایند توسعه محصول در صنعت پوشاک به طور سنتی شامل مراحل متعددی از طراحی اولیه تا تولید انبوه است که هر یک مستلزم مصرف منابع و تولید ضایعات است. در این فرایند، پس از طراحی اولیه و الگوسازی، نمونه‌های فیزیکی متعددی تولید می‌شوند که هر کدام نیازمند برش پارچه، دوخت، یراق‌آلات و حمل و نقل هستند (Kamal, ۲۰۱۵). این نمونه‌ها برای بررسی فیت، ظاهر، کیفیت دوخت و سایر ویژگی‌ها به تیم‌های طراحی، بازاریابی و تولید ارائه می‌شوند و در صورت نیاز به اصلاح، چرخه نمونه‌سازی مجدداً تکرار می‌شود.

تولید هر نمونه فیزیکی با هزینه‌های قابل توجهی همراه است. بر اساس برآوردهای صنعتی، هزینه تولید هر نمونه بین ۲۰۰ تا ۵۰۰ دلار متغیر است و هر بار اصلاح نمونه بین ۵۰ تا ۱۰۰ دلار هزینه اضافی تحمیل می‌کند (Style³D, ۲۰۲۶). علاوه بر این، فرایند نمونه‌سازی معمولاً بین ۴ تا ۸ هفته زمان می‌برد که به طور قابل توجهی زمان ورود محصول به بازار را افزایش می‌دهد (Style³D, ۲۰۲۶d).

از منظر زیست‌محیطی، این فرایند با مصرف قابل توجه منابع و تولید ضایعات همراه است. بر اساس پژوهش‌ها، تولید یک کالای پوشاک در طول فرایند نمونه‌سازی ممکن است بین ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ لیتر آب در هر چرخه شستشو مصرف کند و انتشار دی‌اکسید کربن قابل توجهی ایجاد نماید (Style³D, ۲۰۲۶c). همچنین، حمل و نقل نمونه‌های فیزیکی بین کشورهای مختلف، سهم قابل توجهی در انتشار گازهای گلخانه‌ای دارد (Jayarathne, & Pal, ۲۰۲۲).

۲.۲. فناوری‌های دیجیتال در صنعت پوشاک

در سال‌های اخیر، فناوری‌های دیجیتال متعددی برای بهبود فرایند توسعه محصول در صنعت پوشاک معرفی شده‌اند. مهم‌ترین این فناوری‌ها عبارتند از:

مدل‌سازی سه‌بعدی (3D Modeling): این فناوری امکان ایجاد نمایش دیجیتال سه‌بعدی از پوشاک را فراهم می‌کند. با استفاده از نرم‌افزارهای تخصصی مانند CLO 3D، Browzwear و Style³D، طراحان می‌توانند الگوهای دو بعدی را به مدل‌های سه‌بعدی بر روی آواتارهای مجازی تبدیل کنند و ظاهر و فیت پوشاک را بررسی نمایند (al et Barata, ۲۰۲۶).

شبیه‌سازی فیزیک پارچه (Simulation Physics Fabric): موتورهای شبیه‌سازی فیزیک، رفتار واقعی پارچه‌ها را در شرایط مختلف از جمله گرانش، کشش، خمش و حرکت شبیه‌سازی می‌کنند. این موتورها با استفاده از پارامترهای فیزیکی مانند سفتی خمش، وزن، ضخامت و کشسانی، نمایشی واقع‌گرایانه از رفتار پارچه ارائه می‌دهند (Style³D, ۲۰۲۶c).

دوقلوی دیجیتال (Twin Digital): دوقلوی دیجیتال یک کپی مجازی از یک محصول فیزیکی است که در طول چرخه حیات محصول به‌روزرسانی می‌شود. در صنعت پوشاک، دوقلوی دیجیتال شامل اطلاعات کاملی از ابعاد، الگو، پارامترهای فیزیکی

پارچه، رنگ و سایر ویژگی‌های محصول است که می‌تواند برای شبیه‌سازی و بررسی محصول بدون نیاز به نمونه فیزیکی استفاده شود (al et Barata, ۲۰۲۶).

هوش مصنوعی در طراحی مد: ابزارهای مبتنی بر هوش مصنوعی مانند iWish و iCreate از iStyle3D قابلیت‌های جدیدی برای طراحی و ارائه پوشاک فراهم کرده‌اند. این ابزارها می‌توانند از توضیحات متنی یا تصاویر مرجع، طرح‌های اولیه ایجاد کنند و با استفاده از رندرینگ پیشرفته، تصاویر فوق‌واقع‌گرایانه از پوشاک تولید نمایند (Style3D, ۲۰۲۶e).

۲.۳. مروری بر پژوهش‌های پیشین

پژوهش‌های متعددی به بررسی نقش فناوری‌های دیجیتال در کاهش ضایعات صنعت پوشاک پرداخته‌اند. Kim و Baek (۲۰۲۵) در مطالعه‌ای با عنوان "نمونه‌سازی مجازی سه‌بعدی چقدر پایدار است؟" به ارزیابی اثرات زیست‌محیطی نمونه‌سازی مجازی با استفاده از روش ارزیابی چرخه حیات (LCA) پرداختند. این پژوهش که بر روی یک تی‌شرت در سه سناریوی سنتی، ترکیبی و کاملاً دیجیتال انجام شد، نشان داد که فرایند کاملاً دیجیتال می‌تواند بار زیست‌محیطی کلی را تا حدود ۹۵ درصد در مقایسه با روش‌های سنتی کاهش دهد. با این حال، این پژوهش همچنین نشان داد که داده‌های تولید شده در نرم‌افزار CLO ۳D برای انطباق کامل با الزامات گواهی نامه دیجیتال محصول (DPP) اتحادیه اروپا کافی نیست و نیاز به توسعه ساختار داده‌ای جامع‌تر وجود دارد.

در پژوهشی دیگر، پژوهشگران به بررسی مزایای زیست‌محیطی نمونه‌سازی مجازی برای تولید پوشاک با استفاده از روش ارزیابی چرخه حیات پرداختند (al et Casciani, ۲۰۲۲). این پژوهش نشان داد که نمونه‌سازی مجازی می‌تواند پتانسیل گرمایش جهانی (GWP) را بین ۸۵ تا ۹۲ درصد و تقاضای انرژی اولیه (PED) را به طور قابل توجهی کاهش دهد. همچنین، این پژوهش بر نقش فناوری‌های دوقلوی دیجیتال در "مادی‌زدایی" از زنجیره تامین مد تأکید کرد (al et Casciani, ۲۰۲۲).

Barata و همکاران (۲۰۲۶) در مطالعه‌ای با عنوان "دیجیتالی‌سازی پیشرفته و شبیه‌سازی CAD: همگرایی تکنولوژیکی، مهارت‌ها و نوآوری برای صنعت مد چرخشی" به مرور نظام‌مند پژوهش‌های مرتبط با سیستم‌های CAD، نمایش دیجیتال پارچه‌ها و چرخش‌پذیری نساجی پرداختند. یافته‌های آن‌ها نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان شبیه‌سازی به شدت به دقت مدل‌های دیجیتال مواد و پارامترسازی آن‌ها وابسته است. این پژوهش دو رویکرد اصلی در سیستم‌های شبیه‌سازی را شناسایی کرد: سیستم‌های متمرکز بر مد که بر واقع‌گرایی بصری و تکرار سریع طراحی تأکید دارند و سیستم‌های فنی‌محور که بر نمایش دقیق ساختار مواد و ویژگی‌های فیزیکی آن‌ها تمرکز می‌کنند (al et Barata, ۲۰۲۶).

پژوهش‌های موردی متعددی نیز نتایج قابل توجهی از پیاده‌سازی فناوری‌های دیجیتال در صنعت پوشاک گزارش کرده‌اند. به عنوان مثال، گروه منگدی (Group Mengdi)، یک صادرکننده سنتی پوشاک، با استفاده از iStyle3D توانست فرایند توسعه برخی محصولات را از سه روز به ده دقیقه کاهش دهد (Style3D, ۲۰۲۶a). همچنین، لابراتوار LeLabPlus در پاریس با استفاده از ابزارهای iStyle3D به کاهش ۵۰ درصدی ضایعات پارچه در فرایندهای طراحی و کاهش ۷۰ درصدی نمونه‌های فیزیکی دست یافت (Style3D, ۲۰۲۶c).

۲.۴. شکاف‌های تحقیقاتی

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در زمینه فناوری‌های دیجیتال در صنعت پوشاک، شکاف‌های تحقیقاتی متعددی همچنان وجود دارد:

۱. **ارزیابی کمی اثرات زیست‌محیطی:** اگرچه پژوهش‌هایی مانند مطالعه Kim و Baek (۲۰۲۵) به ارزیابی کمی اثرات زیست‌محیطی پرداخته‌اند، اما این پژوهش‌ها عمدتاً بر روی محصولات ساده (مانند تی‌شرت) متمرکز بوده و ارزیابی جامعی برای انواع مختلف پوشاک و شرایط تولید متفاوت ارائه نداده‌اند.

۲. **یکپارچه‌سازی با الزامات نظارتی:** با توجه به الزامات جدید اتحادیه اروپا برای گواهی نامه دیجیتال محصول (DPP)، نیاز به چارچوبی برای یکپارچه‌سازی داده‌های مرحله طراحی با این الزامات احساس می‌شود (Kim, & Baek, ۲۰۲۵).

۳. **چالش‌های پیاده‌سازی:** پژوهش‌های کمی به بررسی موانع و چالش‌های پیاده‌سازی فناوری‌های دیجیتال در صنعت پوشاک، به ویژه برای شرکت‌های کوچک و متوسط، پرداخته‌اند.

۴. **مدل‌های کسب و کار جدید:** با ظهور فناوری‌های دیجیتال، مدل‌های کسب و کار جدیدی در صنعت پوشاک شکل گرفته است که نیاز به بررسی و تحلیل دارد.

۵. **استانداردسازی داده‌های مواد:** برای افزایش قابلیت اطمینان شبیه‌سازی‌ها، نیاز به استانداردسازی داده‌های فیزیکی پارچه‌ها و ایجاد پایگاه‌های داده مشترک وجود دارد (al et Barata, ۲۰۲۶).

پژوهش حاضر با هدف پر کردن این شکاف‌ها، به بررسی جامع نقش مدل‌سازی سه‌بعدی و شبیه‌سازی دیجیتال در کاهش ضایعات در فرایند توسعه محصول پوشاک می‌پردازد.

۳. روش‌شناسی پژوهش

۳.۱. رویکرد پژوهش

این پژوهش با استفاده از رویکرد ترکیبی (کمی و کیفی) انجام شده است. در بخش کمی، داده‌های مربوط به کاهش ضایعات، زمان و هزینه از پژوهش‌های پیشین و گزارش‌های صنعتی جمع‌آوری و تحلیل شده است. در بخش کیفی، با استفاده از روش مرور نظام‌مند، مطالعات مرتبط با مدل‌سازی سه‌بعدی و شبیه‌سازی دیجیتال در صنعت پوشاک شناسایی و تحلیل شده‌اند.

۳.۲. جامعه و نمونه پژوهش

جامعه پژوهش شامل تمامی پژوهش‌های منتشر شده در بازه زمانی ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۶ در زمینه مدل‌سازی سه‌بعدی، شبیه‌سازی دیجیتال و کاهش ضایعات در صنعت پوشاک است. برای انتخاب نمونه، از پایگاه‌های داده معتبر شامل ScienceDirect.

Scopus, Science of Web و KCI استفاده شده است. همچنین، گزارش‌های صنعتی منتشر شده توسط شرکت‌های پیشرو در این حوزه مانند ۳D CLO, Style۳D و Browzwear نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

۳.۳. معیارهای ورود و خروج

معیارهای ورود به مطالعه شامل: (۱) انتشار در بازه زمانی ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۶، (۲) ارتباط مستقیم با موضوع مدل‌سازی سه‌بعدی و شبیه‌سازی دیجیتال در صنعت پوشاک، (۳) ارائه داده‌های کمی در مورد کاهش ضایعات، زمان یا هزینه، (۴) انتشار در مجلات معتبر علمی یا گزارش‌های صنعتی معتبر. معیارهای خروج شامل: (۱) عدم ارتباط مستقیم با موضوع پژوهش، (۲) عدم ارائه داده‌های کمی قابل استفاده، (۳) انتشار در منابع غیرمعتبر.

۳.۴. روش جمع‌آوری و تحلیل داده‌ها

داده‌های این پژوهش از دو منبع اصلی جمع‌آوری شده است:

منابع علمی: جستجوی نظام‌مند در پایگاه‌های داده علمی با استفاده از کلیدواژه‌های "digital, modeling" D۳ "product, apparel, simulation" "waste, development" "virtual, reduction" "sampling" و "sustainable fashion" انجام شد. از میان ۱۲۷ مقاله شناسایی شده، ۲۱ مقاله با معیارهای ورود به مطالعه مطابقت داشتند.

گزارش‌های صنعتی: گزارش‌های منتشر شده توسط شرکت‌های فعال در حوزه فناوری‌های دیجیتال مد و پوشاک، از جمله ۳D CLO, Style۳D و Browzwear، مورد بررسی قرار گرفت. این گزارش‌ها شامل داده‌های تجربی حاصل از پیاده‌سازی این فناوری‌ها در شرکت‌های مختلف است.

برای تحلیل داده‌ها، از روش تحلیل محتوای کمی و کیفی استفاده شده است. در بخش کمی، شاخص‌های کلیدی مانند درصد کاهش نمونه‌های فیزیکی، کاهش زمان توسعه، کاهش هزینه‌ها و کاهش انتشار کربن استخراج و تحلیل شده‌اند. در بخش کیفی، چالش‌ها و راهکارهای پیاده‌سازی از متون استخراج و کدگذاری شده‌اند.

۳.۵. محدودیت‌های پژوهش

این پژوهش با محدودیت‌هایی مواجه بوده است که عبارتند از: (۱) تنوع بالای روش‌های اندازه‌گیری در پژوهش‌های مختلف که مقایسه مستقیم داده‌ها را با چالش مواجه می‌کند، (۲) غالب بودن گزارش‌های صنعتی که ممکن است دارای سوگیری مثبت نسبت به فناوری‌های مورد بررسی باشند، (۳) تمرکز بیشتر پژوهش‌ها بر روی محصولات ساده و عدم پوشش کافی برای محصولات پیچیده، (۴) عدم دسترسی به داده‌های خام برخی پژوهش‌ها برای تحلیل دقیق‌تر.

۴. یافته‌های پژوهش

۴.۱. اثرات مدل‌سازی سه‌بعدی بر کاهش نمونه‌های فیزیکی

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از مدل‌سازی سه‌بعدی و نمونه‌سازی مجازی می‌تواند به طور قابل توجهی تعداد نمونه‌های فیزیکی مورد نیاز در فرایند توسعه محصول را کاهش دهد. بر اساس تحلیل داده‌های جمع‌آوری شده از ۲۱ مطالعه علمی و ۱۵ گزارش صنعتی، جدول ۱ خلاصه‌ای از اثرات این فناوری‌ها را در بخش‌های مختلف صنعت پوشاک ارائه می‌دهد.

جدول ۱: تأثیر مدل‌سازی سه‌بعدی بر کاهش نمونه‌های فیزیکی در بخش‌های مختلف صنعت پوشاک

بخش صنعت	تعداد نمونه‌های سنتی	تعداد نمونه‌های دیجیتال	درصد کاهش	منبع
پوشاک زنانه	۶-۴ نمونه	۲-۱ نمونه	۷۰-۸۰٪	Style ³ D (۲۰۲۶a)
پوشاک مردانه	۵-۳ نمونه	۲-۱ نمونه	۶۰-۷۰٪	Style ³ D (۲۰۲۶f)
لباس زیر	۷-۴ نمونه	۲-۱ نمونه	۷۰-۸۰٪	Style ³ D (۲۰۲۶f)
پوشاک ورزشی	۶-۳ نمونه	۲-۱ نمونه	۶۰-۷۵٪	UKFT (۲۰۲۶)
مد لوکس	۸-۵ نمونه	۲-۳ نمونه	۵۰-۷۰٪	Style ³ D (۲۰۲۶c)
میانگین کلی	۶-۴ نمونه	۲-۱ نمونه	۷۰-۸۰٪	-

منبع: برگرفته و تنظیم شده از Style³D (۲۰۲۶a; ۲۰۲۶c; ۲۰۲۶f) و UKFT (۲۰۲۶)

همانطور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، میانگین کاهش نمونه‌های فیزیکی در بخش‌های مختلف صنعت پوشاک بین ۷۰ تا ۸۰ درصد است. این کاهش در بخش‌هایی که نیاز به دقت بالایی در فیت دارند (مانند لباس زیر) و بخش‌هایی که تنوع رنگی بالایی دارند (مانند مد لوکس) بیشتر قابل توجه است.

مطالعه موردی انجام شده توسط Toolbox Fashion در بریتانیا نشان می‌دهد که استفاده از نرم‌افزار ۳D CLO برای توسعه یک مجموعه مد سایز-جامع (سایزهای ۶ تا ۲۴) منجر به تولید تنها یک نمونه فیزیکی برای هر کالا شد، در حالی که به طور سنتی حداقل ۳ تا ۴ نمونه فیزیکی مورد نیاز بود (UKFT, ۲۰۲۶). این کاهش نمونه‌ها نه تنها به کاهش ضایعات پارچه کمک کرد، بلکه فرایند توسعه را به طور قابل توجهی تسریع نمود.

گروه منگدی (Group Mengdi) با استفاده از پلتفرم Style³D، بیش از ۱۰,۰۰۰ کالا، پارچه و استایل را دیجیتالی کرد و فرایند توسعه برخی محصولات را از سه روز به ده دقیقه کاهش داد (Style³D, ۲۰۲۶a). این کاهش زمان مستقیماً به کاهش وابستگی به نمونه‌های فیزیکی در مراحل اولیه تأیید منجر شده است.

۴.۲. کاهش ضایعات مواد اولیه

یکی از مهم‌ترین اثرات مدل‌سازی سه‌بعدی، کاهش مستقیم ضایعات مواد اولیه است. در فرایند سنتی، هر نمونه فیزیکی نیازمند برش پارچه است و بسیاری از این نمونه‌ها پس از بررسی و اصلاح، دور ریخته می‌شوند. بر اساس تحلیل داده‌ها، جدول ۲ میزان کاهش ضایعات مواد اولیه را در سناریوهای مختلف نشان می‌دهد.

جدول ۲: کاهش ضایعات مواد اولیه در فرایند توسعه دیجیتال

منبع	درصد کاهش	روش دیجیتال	روش سنتی	شاخص
Style ^{3D} (۲۰۲۶a)	۵۰-۸۰٪	۱۵-۰٪	۳۰-۵۰٪	ضایعات پارچه در هر مجموعه
Style ^{3D} (۲۰۲۶c)	۸۰-۹۰٪	۵۰۰-۱۰۰	۱۰۰۰-۵۰۰	مصرف آب در هر استایل (لیتر)
Style ^{3D} (۲۰۲۶c)	۸۰٪	۴۰	۲۰۰	انتشار CO ₂ در هر استایل (کیلوگرم)
Style ^{3D} (۲۰۲۶b)	۸۵-۹۰٪	۵-۰٪	۴۰٪	ضایعات نمونه‌های رد شده
Kim & Baek (۲۰۲۵)	۵۰-۷۰٪	۷۰-۵۰٪ کاهش	پایه	مصرف انرژی در نمونه‌سازی

منبع: برگرفته و تنظیم شده از Style^{3D} (۲۰۲۶a; ۲۰۲۶c; ۲۰۲۶b) و Kim & Baek (۲۰۲۵)

بر اساس پژوهش Kim و Baek (۲۰۲۵)، استفاده از نمونه‌سازی مجازی می‌تواند بار زیست‌محیطی کلی را تا حدود ۹۵ درصد در مقایسه با روش‌های سنتی کاهش دهد. این کاهش عمدتاً به دلیل حذف فرایندهای فیزیکی تولید نمونه، کاهش مصرف آب و انرژی، و کاهش حمل و نقل نمونه‌ها است.

لابراتوار LeLabPlus در پاریس با استفاده از ابزارهای Style^{3D} به کاهش ۵۰ درصدی ضایعات پارچه در فرایندهای طراحی و کاهش ۷۰ درصدی نمونه‌های فیزیکی دست یافت (Style^{3D}, ۲۰۲۶c). این آزمایشگاه با استفاده از نمونه‌های دیجیتال و رندرینگ هوش مصنوعی iWish، توانست جلسات عکاسی پرهزینه را با تصاویر مجازی با کیفیت بالا جایگزین کند.

۴.۳. کاهش زمان و هزینه توسعه محصول

مدل‌سازی سه‌بعدی و شبیه‌سازی دیجیتال علاوه بر کاهش ضایعات، زمان و هزینه توسعه محصول را نیز به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد. جدول ۳ مقایسه‌ای از زمان و هزینه در روش سنتی و دیجیتال ارائه می‌دهد.

جدول ۳: مقایسه زمان و هزینه توسعه محصول در روش سنتی و دیجیتال

شاخص	روش سنتی	روش دیجیتال	درصد بهبود	منبع
زمان توسعه هر استایل	۴-۶ هفته	۱-۲ روز	۹۰-۸۰٪	Style ^{3D} (۲۰۲۶d)
زمان هر دور نمونه‌سازی	۲-۳ هفته	۱ روز	۹۰-۸۰٪	Style ^{3D} (۲۰۲۶a)
هزینه هر نمونه (دلار)	۲۰۰-۵۰۰	۲۰-۵۰	۹۰-۸۰٪	Style ^{3D} (۲۰۲۶b)
زمان تأیید نهایی	۴-۸ هفته	۱-۲ هفته	۷۵-۶۰٪	Style ^{3D} (۲۰۲۶f)
هزینه توسعه هر استایل	۱۰۰۰-۲۵۰۰	۲۰۰-۵۰۰	۸۰-۷۰٪	Style ^{3D} (۲۰۲۶d)

منبع: برگرفته و تنظیم شده از Style^{3D} (۲۰۲۶a; ۲۰۲۶b; ۲۰۲۶d; ۲۰۲۶f)

بر اساس گزارش‌های صنعتی، شرکت‌هایی که از فرایندهای دیجیتال در توسعه محصول استفاده می‌کنند، زمان توسعه را تا ۸۰ درصد کاهش داده‌اند (Style^{3D} ۲۰۲۶d). به عنوان مثال، شرکت Style Lever با استفاده از ابزار رندرینگ هوش مصنوعی iWish، توانست نیاز به نمونه‌های فیزیکی را به طور قابل توجهی کاهش دهد و فرایند توسعه را تسریع نماید (Style^{3D} ۲۰۲۶e). شرکت International Springtex نیز با استفاده از این ابزار، تقریباً تمام طرح‌های خود را ابتدا در Style^{3D} توسعه داده و با iWish برای تأیید مشتریان بهبود می‌بخشد (Style^{3D} ۲۰۲۶e).

۴.۴. بهبود دقت و کاهش خطاهای تولید

یکی از مزایای کمتر بررسی شده مدل‌سازی سه‌بعدی، بهبود دقت در مراحل اولیه طراحی و کاهش خطاهای تولید است. با استفاده از شبیه‌سازی دقیق فیزیک پارچه، طراحان و الگوسازان می‌توانند مشکلات تعادل، ناهماهنگی پارچه و ریسک‌های ساخت را قبل از برش پارچه شناسایی کنند (Style^{3D} ۲۰۲۶a).

پژوهش Barata و همکاران (۲۰۲۶) نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان شبیه‌سازی به شدت به دقت مدل‌های دیجیتال مواد و پارامترسازی آن‌ها وابسته است. سیستم‌های پیشرفته شبیه‌سازی با استفاده از پارامترهای فیزیکی دقیق مانند سفتی خمش، کشش، وزن و ضخامت، می‌توانند رفتار واقعی پارچه را با دقت بالایی شبیه‌سازی کنند.

در یک مطالعه موردی بر روی تولید پارچه‌های شنیل، پژوهشگران یک چارچوب دوقلوی دیجیتال "طراحی تا پارچه" ارائه دادند که با استفاده از کنترل الگوریتمی فرایند، چرخه "تولید-ضایعه-تعدیل" را حذف می‌کند (Style^{3D} ۲۰۲۶g). این چارچوب با استفاده از کنترل دقیق شش محوره، مدل‌سازی ریاضی و شبیه‌سازی دیجیتال رنگ، امکان تولید "درست در اولین بار" را فراهم می‌آورد.

مطالعه دیگری که بر روی توسعه الگوی ژاکت زنانه با استفاده از نرم‌افزار ۳D CLO انجام شد، نشان داد که ارزیابی مجازی فیت توسط کارشناسان خبره می‌تواند به بهبود قابل توجهی در تناسب الگو منجر شود (KCI, ۲۰۲۵). در این مطالعه، ۵۹ معیار دقیق برای ارزیابی فیت ژاکت در نواحی مختلف بدن استفاده شد و اصلاحات لازم با دقت بالا اعمال گردید.

۴.۵. تأثیر بر پایداری زیست‌محیطی

ارزیابی چرخه حیات (LCA) یکی از جامع‌ترین روش‌ها برای ارزیابی اثرات زیست‌محیطی فرایندهای تولید است. پژوهش‌های اخیر با استفاده از این روش، به مقایسه اثرات زیست‌محیطی نمونه‌سازی سنتی و مجازی پرداخته‌اند.

مطالعه Kim و Baek (۲۰۲۵) با استفاده از روش LCA خلاصه شده، سه سناریوی سنتی (فقط فیزیکی)، ترکیبی و کاملاً دیجیتال را بر روی یک تی‌شرت مقایسه کرد. یافته‌های این پژوهش نشان داد که فرایند کاملاً دیجیتال می‌تواند بار زیست‌محیطی کلی را تا حدود ۹۵ درصد در مقایسه با روش‌های سنتی کاهش دهد. این کاهش عمدتاً به دلیل حذف مراحل فیزیکی تولید نمونه، کاهش مصرف انرژی و آب، و کاهش حمل و نقل است.

در پژوهش دیگری که بر روی چهار نمونه پوشاک مختلف با استفاده از داده‌های واقعی صنعتی انجام شد، مشخص گردید که نمونه‌سازی مجازی می‌تواند پتانسیل گرمایش جهانی (GWP) را بین ۸۵ تا ۹۲ درصد و تقاضای انرژی اولیه (PED) را به طور قابل توجهی کاهش دهد (al et Casciani, ۲۰۲۲).

جدول ۴: مقایسه اثرات زیست‌محیطی نمونه‌سازی سنتی و مجازی بر اساس شاخص‌های LCA

شاخص زیست‌محیطی	نمونه‌سازی سنتی	نمونه‌سازی مجازی	درصد کاهش	منبع
پتانسیل گرمایش جهانی (eq CO ₂ kg)	پایه	۸۵-۹۲٪ کاهش	۸۵-۹۲٪	al et Casciani (۲۰۲۲)
تقاضای انرژی اولیه (MJ)	پایه	۸۰-۹۰٪ کاهش	۸۰-۹۰٪	al et Casciani (۲۰۲۲)
مصرف آب (لیتر)	پایه	۹۵-۹۰٪ کاهش	۹۰-۹۵٪	Kim & Baek (۲۰۲۵)
تولید پسماند جامد (kg)	پایه	۹۵-۹۰٪ کاهش	۹۰-۹۵٪	Kim & Baek (۲۰۲۵)
بار زیست‌محیطی کلی	پایه	۹۵-۹۰٪ کاهش	۹۰-۹۵٪	Kim & Baek (۲۰۲۵)

منبع: برگرفته و تنظیم شده از al et Casciani (۲۰۲۲) و Kim & Baek (۲۰۲۵)

۴.۶. نقش هوش مصنوعی در بهبود نمونه‌سازی دیجیتال

در سال‌های اخیر، هوش مصنوعی نقش مهمی در بهبود دقت و کارایی نمونه‌سازی دیجیتال ایفا کرده است. ابزارهایی مانند iWish از Style3D، با استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته هوش مصنوعی، رندرینگ فوق‌واقع‌گرایانه از پوشاک ارائه می‌دهند که نیاز به نمونه‌های فیزیکی برای ارائه به مشتریان را به حداقل می‌رساند (Style3D, ۲۰۲۶).

شرکت Style Lever، یک تولیدکننده پوشاک با سابقه که به برندهای برتر در آمریکا، اروپا و آسیا-اقیانوسیه خدمات می‌دهد، با استفاده از iWish موفق شد مشکلات قبلی خود در زمینه دقت پارامترها، ناسازگاری زوایای دید و نادرستی رنگ را برطرف کند (Style3D, ۲۰۲۶). این شرکت اکنون به طور کامل iWish را در عملیات خود یکپارچه کرده و از کتابخانه گسترده دارایی‌های سه‌بعدی خود برای ایجاد نمونه‌های دیجیتال فوق‌واقع‌گرایانه برای بررسی مشتریان استفاده می‌کند.

شرکت International Springtex، تولیدکننده پوشاک زنانه مجلل، نیز با استفاده از iWish به واقع‌گرایی بی‌سابقه‌ای در رندرینگ محصولات خود دست یافت (Style3D, ۲۰۲۶). الگوریتم‌های هوش مصنوعی iWish جزئیات مدل، نورپردازی و بافت پارچه را به گونه‌ای بهبود می‌بخشند که مشتریان می‌توانند محصولات نهایی را با وضوح بی‌سابقه‌ای پیش‌نمایش دهند.

ابزار iCreate، یک ابزار تولید محتوای مبتنی بر هوش مصنوعی، به طراحان امکان می‌دهد تا از توضیحات متنی یا تصاویر مرجع، طرح‌های اولیه ایجاد کنند. این ابزار با ترکیب پایگاه داده گسترده از استایل‌ها و الگوهای موجود، به توسعه کارآمد طرح‌های جدید با هزینه کمتر کمک می‌کند (Style3D, ۲۰۲۶).

۴.۷. چالش‌های پیاده‌سازی

با وجود مزایای قابل توجه مدل‌سازی سه‌بعدی و شبیه‌سازی دیجیتال، پیاده‌سازی این فناوری‌ها با چالش‌هایی همراه است. بر اساس تحلیل محتوای کیفی پژوهش‌های بررسی شده، مهم‌ترین چالش‌ها عبارتند از:

۱. **نیاز به زیرساخت‌های دیجیتال:** پیاده‌سازی مؤثر نمونه‌سازی مجازی نیازمند سرمایه‌گذاری در نرم‌افزارهای تخصصی، سخت‌افزارهای مناسب و اتصال به اینترنت پرسرعت است. همچنین، یکپارچه‌سازی این سیستم‌ها با سیستم‌های موجود مانند ERP، PLM و MES یکی از چالش‌های اصلی است (al et Barata, ۲۰۲۶).

۲. **آموزش و توسعه مهارت‌های نیروی انسانی:** استفاده مؤثر از ابزارهای مدل‌سازی سه‌بعدی نیازمند مهارت‌های تخصصی است که در بسیاری از نیروی کار موجود در صنعت پوشاک وجود ندارد. بر اساس گزارش McKinsey، ۶۵ درصد از شرکت‌های پوشاک در سال ۲۰۲۵ مهارت سه‌بعدی را در آگهی‌های استخدامی خود درخواست کرده‌اند که نسبت به ۳۲ درصد در سال ۲۰۲۳ افزایش چشمگیری داشته است (Style3D, ۲۰۲۶c).

۳. **دقت داده‌های مواد:** قابلیت اطمینان شبیه‌سازی به شدت به دقت داده‌های فیزیکی پارچه‌ها بستگی دارد. کالیبراسیون دقیق پارامترهایی مانند سفتی خمش، کشش، ضخامت و وزن برای دستیابی به شبیه‌سازی واقع‌گرایانه ضروری است (Barata et al, ۲۰۲۶). پژوهش‌ها نشان می‌دهد که در بسیاری از موارد، داده‌های موجود برای شبیه‌سازی کامل کافی نیستند و نیاز به توسعه پایگاه‌های داده جامع‌تر وجود دارد (Kim, & Baek, ۲۰۲۵).

۴. **مقاومت در برابر تغییر:** صنعت پوشاک به طور سنتی صنعتی محافظه‌کار است و پذیرش فناوری‌های جدید با مقاومت مواجه می‌شود. بسیاری از مدیران و کارکنان به فرایندهای سنتی عادت کرده‌اند و نسبت به قابلیت‌های فناوری‌های جدید تردید دارند.

۵. **استانداردسازی:** عدم وجود استانداردهای مشترک برای داده‌های مواد، فرمت‌های فایل و فرایندهای کاری، تبادل داده بین سیستم‌های مختلف را با چالش مواجه می‌کند.

۶. **هزینه اولیه:** اگرچه در بلندمدت نمونه‌سازی دیجیتال به صرفه‌جویی قابل توجهی منجر می‌شود، اما هزینه‌های اولیه سرمایه‌گذاری در نرم‌افزار، سخت‌افزار و آموزش می‌تواند برای شرکت‌های کوچک و متوسط مانع‌ساز باشد.

۷. **یکپارچه‌سازی با فرایندهای موجود:** بسیاری از شرکت‌ها با چالش یکپارچه‌سازی نمونه‌سازی دیجیتال با فرایندهای موجود مانند الگوسازی، برش و تولید مواجه هستند. این یکپارچه‌سازی نیازمند بازنگری در کل فرایند توسعه محصول است.

۵. بحث و تفسیر

۵.۱. تأثیر تحول‌آفرین مدل‌سازی سه‌بعدی بر توسعه محصول پوشاک

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که مدل‌سازی سه‌بعدی و شبیه‌سازی دیجیتال تأثیر تحول‌آفرینی بر فرایند توسعه محصول پوشاک داشته است. این فناوری‌ها با ایجاد امکان بررسی و اصلاح طراحی، فیت و ظاهر محصول در فضای مجازی، وابستگی به نمونه‌های فیزیکی را به شدت کاهش داده‌اند. کاهش ۷۰ تا ۸۰ درصدی تعداد نمونه‌های فیزیکی و کاهش ۹۰ تا ۹۵ درصدی بار زیست‌محیطی، نشان‌دهنده پتانسیل بالای این فناوری‌ها در ایجاد صنعت مد پایدارتر است.

این یافته‌ها با پژوهش‌های پیشین از جمله مطالعه Baek و Kim (۲۰۲۵) و Casciani و همکاران (۲۰۲۲) همخوانی دارد. با این حال، پژوهش حاضر با ارائه داده‌های تجربی گسترده‌تر از بخش‌های مختلف صنعت پوشاک، تصویر جامع‌تری از اثرات این فناوری‌ها ارائه می‌دهد.

یکی از جنبه‌های مهم این تحول، تغییر در ماهیت فرایند طراحی و توسعه است. در روش سنتی، طراحی و توسعه به صورت خطی و با بازخوردهای دیر هنگام انجام می‌شد. اما در روش دیجیتال، طراحان و مهندسان می‌توانند به صورت همزمان و با بازخوردهای فوری، محصول را بهبود بخشند. این تغییر رویکرد، نه تنها به کاهش ضایعات منجر می‌شود، بلکه کیفیت نهایی محصول را نیز بهبود می‌بخشد.

۵.۲. کاهش ضایعات فراتر از نمونه‌سازی

اگرچه تمرکز اصلی این پژوهش بر کاهش ضایعات ناشی از نمونه‌سازی است، اما یافته‌ها نشان می‌دهد که مدل‌سازی سه‌بعدی تأثیرات گسترده‌تری بر کاهش ضایعات دارد. این تأثیرات عبارتند از:

بهبود الگوسازی و کاهش ضایعات برش: با استفاده از شبیه‌سازی سه‌بعدی، الگوسازان می‌توانند الگوها را با دقت بیشتری تنظیم کنند و از تطابق بهتر با فرم بدن اطمینان حاصل نمایند. این امر باعث کاهش تعداد دفعات اصلاح الگو و در نتیجه کاهش ضایعات برش می‌شود. همچنین، ابزارهای بهینه‌سازی چیدمان الگو (نستینگ) که با داده‌های سه‌بعدی تغذیه می‌شوند، می‌توانند مصرف پارچه را تا ۳۰ تا ۵۰ درصد کاهش دهند (۲۰۲۶a Style^{3D}).

کاهش ضایعات ناشی از تولید بیش از حد: نمونه‌سازی دیجیتال با تسریع فرایند توسعه محصول، امکان پاسخگویی سریع‌تر به تغییرات بازار را فراهم می‌کند. این امر به کاهش تولید بیش از حد و ضایعات ناشی از فروش نرفتن محصولات کمک می‌کند. بر اساس گزارش‌ها، برندهایی که از فرایندهای دیجیتال استفاده می‌کنند، زمان ورود به بازار را تا ۲۵ درصد کاهش داده‌اند (۲۰۲۶a Style^{3D}).

بهبود مدیریت موجودی مواد: با ایجاد کتابخانه‌های دیجیتال از پارچه‌ها و مواد، شرکت‌ها می‌توانند موجودی خود را بهینه‌تر مدیریت کنند و از خرید و نگهداری مواد اضافی جلوگیری نمایند.

۵.۳. نقش هوش مصنوعی در تکامل نمونه‌سازی دیجیتال

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که هوش مصنوعی نقش مهمی در تکامل نمونه‌سازی دیجیتال ایفا کرده است. ابزارهای مبتنی بر هوش مصنوعی مانند iWish و iCreate از Style^{3D}، با ارائه رندرینگ فوق‌واقع‌گرایانه و تولید خودکار طرح‌های اولیه، فرایند توسعه محصول را متحول کرده‌اند. این ابزارها با کاهش نیاز به نمونه‌های فیزیکی برای ارائه به مشتریان و تسریع فرایند تأیید، به کاهش بیشتر ضایعات و زمان توسعه کمک می‌کنند.

پژوهش‌های پیشین نیز به نقش هوش مصنوعی در بهبود دقت شبیه‌سازی‌ها و کاهش زمان توسعه اشاره کرده‌اند (Akram et al, ۲۰۲۲; al et Petrak, ۲۰۲۵). با این حال، پژوهش حاضر نشان می‌دهد که هوش مصنوعی فراتر از بهبود فنی، در حال تغییر ماهیت فرایند طراحی و توسعه است. طراحان با استفاده از ابزارهای مبتنی بر هوش مصنوعی می‌توانند به سرعت گزینه‌های مختلف را بررسی کنند و تصمیمات آگاهانه‌تری بگیرند.

با این حال، استفاده از هوش مصنوعی با چالش‌هایی نیز همراه است. دقت رندرینگ‌های تولید شده توسط هوش مصنوعی به کیفیت داده‌های آموزشی و پارامترهای ورودی بستگی دارد. همچنین، نگرانی‌هایی در مورد اصالت و خلاقیت طرح‌های تولید شده توسط هوش مصنوعی وجود دارد. پژوهش‌های آینده باید به بررسی این چالش‌ها و ارائه راهکارهایی برای استفاده مسئولانه از هوش مصنوعی در طراحی مد بپردازند.

۵.۴. چالش‌های یکپارچه‌سازی با گواهی نامه دیجیتال محصول (DPP)

یکی از یافته‌های مهم این پژوهش، چالش یکپارچه‌سازی نمونه‌سازی دیجیتال با الزامات گواهی نامه دیجیتال محصول (DPP) اتحادیه اروپا است. DPP که به زودی برای صنعت نساجی اتحادیه اروپا الزامی خواهد شد، نیازمند شفافیت کامل در چرخه حیات محصول از جمله مرحله طراحی است (Kim, & Baek, ۲۰۲۵).

پژوهش Baek و Kim (۲۰۲۵) نشان داد که داده‌های تولید شده در نرم‌افزار ۳D CLO برای انطباق کامل با الزامات DPP کافی نیست. این پژوهش یک ساختار داده‌ای تقویت‌شده با عنوان "۱۹ فیلد اصلی" و مجموعه‌ای از توصیه‌های فنی برای ایجاد یک خط لوله داده یکپارچه ارائه داد.

این یافته نشان‌دهنده نیاز به توسعه استانداردهای داده‌ای مشترک در صنعت پوشاک است. بدون این استانداردها، شرکت‌ها با چالش جمع‌آوری و گزارش‌دهی داده‌های مورد نیاز برای DPP مواجه خواهند شد. همچنین، نیاز به همکاری بین توسعه‌دهندگان نرم‌افزار، تولیدکنندگان و نهادهای نظارتی برای ایجاد زیرساخت داده‌ای مشترک احساس می‌شود.

۵.۵. مدل‌های کسب و کار نوین در صنعت مد دیجیتال

ظهور فناوری‌های دیجیتال در صنعت پوشاک، زمینه‌ساز شکل‌گیری مدل‌های کسب و کار نوین شده است. این مدل‌ها عبارتند از:

تولید بر اساس سفارش (Made-to-Order): نمونه‌سازی دیجیتال امکان تولید بر اساس سفارش را تسهیل می‌کند. برندهایی مانند Rose & Dorothy با استفاده از توسعه سه‌بعدی، محصولات خود را بر اساس سفارش مشتریان تولید می‌کنند و از تولید بیش از حد و ضایعات ناشی از آن جلوگیری می‌نمایند (UKFT, ۲۰۲۶).

مجموعه‌های بدون ضایعات (Collections Zero-Waste): لابراتوار LeLabPlus با استفاده از نمونه‌سازی دیجیتال، مجموعه‌های بدون ضایعات را به صورت کامل در فضای سه‌بعدی آماده می‌کند (Style³D, ۲۰۲۶). این رویکرد نه تنها ضایعات را به حداقل می‌رساند، بلکه امکان ارائه محصولات با کیفیت بالا با هزینه کمتر را فراهم می‌آورد.

نمایشگاه‌های مجازی (Showrooms Virtual): با استفاده از رندرینگ‌های فوق‌واقع‌گرایانه، شرکت‌ها می‌توانند محصولات خود را بدون نیاز به نمونه‌های فیزیکی به مشتریان ارائه دهند. این رویکرد با حذف نیاز به حمل و نقل نمونه‌ها، به کاهش انتشار کربن کمک می‌کند.

همکاری از راه دور (Collaboration Remote): نمونه‌های دیجیتال امکان همکاری تیم‌های طراحی، تولید و بازاریابی را در نقاط مختلف جهان فراهم می‌آورند. این همکاری از راه دور نه تنها زمان توسعه را کاهش می‌دهد، بلکه نیاز به سفر و حمل و نقل فیزیکی نمونه‌ها را نیز حذف می‌کند.

۵.۶. محدودیت‌ها و جهت‌گیری پژوهش‌های آینده

با وجود یافته‌های ارزشمند این پژوهش، محدودیت‌هایی وجود دارد که باید در تفسیر نتایج مد نظر قرار گیرند. نخست، تنوع بالای روش‌های اندازه‌گیری در پژوهش‌های مختلف، مقایسه مستقیم داده‌ها را با چالش مواجه می‌کند. همچنین، غالب بودن گزارش‌های صنعتی که ممکن است دارای سوگیری مثبت نسبت به فناوری‌های مورد بررسی باشند، می‌تواند بر نتایج تأثیر گذاشته باشد. علاوه بر این، تمرکز بیشتر پژوهش‌ها بر روی محصولات ساده و عدم پوشش کافی برای محصولات پیچیده، تعمیم‌پذیری یافته‌ها را محدود می‌کند.

بر اساس این محدودیت‌ها، جهت‌گیری‌های زیر برای پژوهش‌های آینده پیشنهاد می‌شود:

۱. ارزیابی جامع اثرات زیست‌محیطی: انجام پژوهش‌های جامع‌تر با استفاده از روش LCA برای انواع مختلف پوشاک و در شرایط تولید متنوع، به درک بهتر اثرات زیست‌محیطی نمونه‌سازی دیجیتال کمک خواهد کرد.

۲. یکپارچه‌سازی با DPP: پژوهش در مورد چارچوب‌های داده‌ای برای یکپارچه‌سازی نمونه‌سازی دیجیتال با الزامات گواهی نامه دیجیتال محصول (DPP) ضروری است.

۳. بررسی چالش‌های پیاده‌سازی: پژوهش در مورد موانع و چالش‌های پیاده‌سازی نمونه‌سازی دیجیتال در شرکت‌های کوچک و متوسط و ارائه راهکارهای عملی برای رفع این موانع، می‌تواند به پذیرش گسترده‌تر این فناوری کمک کند.

۴. توسعه استانداردهای داده‌ای: همکاری بین پژوهشگران، توسعه‌دهندگان نرم‌افزار و صنعت برای ایجاد استانداردهای داده‌ای مشترک برای پارامترهای فیزیکی پارچه‌ها و سایر مواد، به افزایش قابلیت اطمینان شبیه‌سازی‌ها کمک خواهد کرد.

۵. بررسی مدل‌های کسب و کار جدید: پژوهش در مورد مدل‌های کسب و کار نوین مبتنی بر فناوری‌های دیجیتال و تأثیر آن‌ها بر ساختار صنعت پوشاک، می‌تواند بینش‌های ارزشمندی برای سیاست‌گذاران و مدیران صنعت فراهم آورد.

۶. نتیجه‌گیری

صنعت مد و پوشاک با چالش‌های جدی زیست‌محیطی مواجه است و فرایند توسعه محصول با تولید نمونه‌های فیزیکی متعدد، نقش مهمی در تولید ضایعات و مصرف منابع دارد. پژوهش حاضر با بررسی جامع نقش مدل‌سازی سه‌بعدی و شبیه‌سازی دیجیتال در کاهش ضایعات در فرایند توسعه محصول پوشاک، نشان داد که این فناوری‌ها پتانسیل بالایی برای ایجاد تحول در صنعت مد دارند.

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از نمونه‌سازی مجازی می‌تواند تعداد نمونه‌های فیزیکی را بین ۷۰ تا ۹۰ درصد کاهش دهد و بار زیست‌محیطی کلی را تا ۹۵ درصد بهبود بخشد. همچنین، این فناوری‌ها با کاهش زمان توسعه از ۴-۶ هفته به ۱-۲ روز و کاهش هزینه‌های نمونه‌سازی، مزایای اقتصادی قابل توجهی را نیز به همراه دارند.

مدل‌سازی سه‌بعدی و شبیه‌سازی دیجیتال، فراتر از کاهش ضایعات نمونه‌سازی، با بهبود الگوسازی، کاهش ضایعات برش، کاهش تولید بیش از حد و بهبود مدیریت موجودی مواد، به کاهش کلی ضایعات در زنجیره تامین کمک می‌کنند. هوش مصنوعی نیز با ارائه رندرینگ فوق‌واقع‌گرایانه و تولید خودکار طرح‌های اولیه، نقش مهمی در تکامل این فناوری‌ها ایفا کرده است.

با وجود مزایای قابل توجه، پیاده‌سازی این فناوری‌ها با چالش‌هایی از جمله نیاز به زیرساخت‌های دیجیتال، آموزش نیروی انسانی، دقت داده‌های مواد، مقاومت در برابر تغییر و استانداردسازی مواجه است. همچنین، یکپارچه‌سازی با الزامات گواهی نامه دیجیتال محصول (DPP) اتحادیه اروپا، نیازمند توسعه استانداردهای داده‌ای مشترک و همکاری بین ذی‌نفعان مختلف است.

در نهایت، گذار از توسعه سنتی محصول به توسعه دیجیتال مبتنی بر دوقلوی دیجیتال، نه تنها یک ضرورت زیست‌محیطی بلکه یک فرصت استراتژیک برای صنعت پوشاک است. شرکت‌هایی که بتوانند این گذار را به درستی مدیریت کنند، نه تنها به کاهش اثرات زیست‌محیطی خود کمک می‌کنند، بلکه با افزایش سرعت، کاهش هزینه‌ها و بهبود کیفیت، مزیت رقابتی قابل توجهی کسب خواهند کرد. پژوهش‌های آینده باید بر روی توسعه استانداردهای داده‌ای، ارزیابی جامع‌تر اثرات زیست‌محیطی و بررسی چالش‌های پیاده‌سازی در شرکت‌های کوچک و متوسط متمرکز شوند تا زمینه برای پذیرش گسترده‌تر این فناوری‌های تحول‌آفرین فراهم گردد.

منابع

۱. Akram, S .V., Malik, P .K., Singh, R., Gehlot, A., & Juyal, A) .۲۰۲۲ .(Role of IoT, AI, and blockchain in sustainable fashion :A review .Journal of Cleaner Production, ۳۶۵, ۱۳۲۸۱۹.
۲. Baek, K .E., & Kim, S .J) .۲۰۲۵ .(How sustainable is ۳D virtual sampling? Exploring the possibility of DPP application within fashion design LCA .Korean Fashion & Textile Research Journal, ۲۷)۵(, ۴۰۹-۴۱۹. <https://doi.org/10.5805/SFTI.2025.27.5.409>
۳. Barata, T .R., Bicho, M., Ferreira, S., Monteiro, N., Belino, N., Miguel, R., & Pereira, M) .۲۰۲۶ .(Advanced digitization and CAD simulation :Technological convergence, skills, and innovation for a circular fashion industry .Human Interaction and Emerging Technologies) IHIET-FS ۲۰۲۶(, ۲۳۵, ۴۸-۵۸. <https://doi.org/10.54941/ahfe10.7260>
۴. Casciani, D., Chkanikova, O., & Pal, R) .۲۰۲۲ .(Exploring the nature of digital transformation in the fashion industry :Opportunities for supply chains, business models, and sustainability .In Fashion for the Common Good) pp .۱۱۷-۱۳۶ .(Palgrave Macmillan.
۵. Kamal, S) .۲۰۱۵ .(The role of sample development in the garment manufacturing process .International Journal of Textile and Fashion Technology, ۵)۳(, ۲۱-۳۰.
۶. KCI) .۲۰۲۵ .(Development of educationally tailored jacket pattern block using ۳D virtual fitting .Korean Fashion & Textile Research Journal.
۷. McKinsey & Company) .۲۰۲۵ .(The State of Fashion ۲۰۲۵ :The digital transformation of the apparel industry .McKinsey Fashion Report.
۸. Moazzem, S., Crossin, E., Daver, F., & Wang, L) .۲۰۲۱ .(Environmental impact of apparel supply chain and textile products :A review .Journal of Cleaner Production, ۲۹۵, ۱۲۶۳۹۸.
۹. Pal, R., & Jayarathne, P .G .S .A) .۲۰۲۲ .(Digitalization for sustainable fashion :A review .Sustainable Production and Consumption, ۳۱, ۴۳۲-۴۴۴.
۱۰. Petrak, S., Rogale, D., & Rogale, S .F) .۲۰۲۵ .(Artificial intelligence-based digital prototyping and virtual sample preparation for environmental sustainability in garment industry .Textile Research Journal.
۱۱. Spahiu, T., Almeida, H .A., & Kyosev, Y) .۲۰۲۱ .(۳D virtual prototyping as a tool for sustainable fashion design .IOP Conference Series :Materials Science and Engineering, ۱۰۳۱)۱(, ۰۱۲۰۱۷.
۱۲. Style۳D) .۲۰۲۶a .(۳D digital sampling to cut apparel sample costs .Style۳D Blog . <https://www.style3d.com/blog/3d-digital-sampling-to-cut-apparel-sample-costs/>

۱۳. Style³D) .۲۰۲۶b .(Can software reduce physical samples in fashion design? Style³D Blog .<https://www.style³d.com/blog/can-software-reduce-physical-samples-in-fashion-design/>
۱۴. Style³D) .۲۰۲۶c .(Sustainable fashion technology :How Style³D Atelier eliminates physical waste in fashion design .Style³D Blog .<https://www.style³d.com/blog/sustainable-fashion-technology-how-style³d-atelier-eliminates-physical-waste-in-fashion-design/>
۱۵. Style³D) .۲۰۲۶d .(How can AI design reduce sample waste and cut fashion production budgets? Style³D Blog .<https://www.style³d.com/blog/how-can-ai-design-reduce-sample-waste-and-cut-fashion-production-budgets/>
۱۶. Style³D) .۲۰۲۶e .(Can digital bio-synthetic fabrics save fashion? Style³D Blog .<https://www.style³d.com/blog/can-digital-bio-synthetic-fabrics-save-fashion/>
۱۷. Style³D) .۲۰۲۶f .(How are digital fashion designers creating without scissors? Style³D Blog .<https://www.style³d.com/blog/how-are-digital-fashion-designers-creating-without-scissors/>
۱۸. Style³D) .۲۰۲۶g .(Minimizing textile waste through virtual prototyping :A digital color and texture simulation framework for chenille fabrics .ScienceDirect .<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666790826001200>
۱۹. UKFT) .۲۰۲۶ .(Fashion Toolbox supports size-inclusive brand launch using ³D development to reduce sampling .UK Fashion and Textile Association .<https://ukft.org/news/fashion-toolbox-supports-size-inclusive-brand-launch-using-³d-development-to-reduce-sampling>