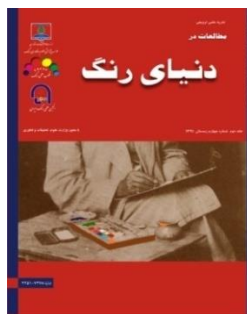


مقاله پذیرفته شده



مروری بر خواص نوری فرش: رویکردی مبتنی بر مدل سازی

انیس زیدآبادی نژاد، علی شمس ناتری

مقاله پژوهشی

JSCW-2512-1274

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴-۰۹-۲۸

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۵-۰۳-۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵-۰۷-۰۵

خواهشمند است این مقاله به صورت زیر در مراجع قید شود:

الف. زیدآبادی نژاد، ع. شمس ناتری "مروری بر خواص نوری فرش: رویکردی مبتنی بر مدل سازی"، نشریه علمی مطالعات در دنیای

رنگ JSCW-2512-1274 این فایل PDF مقاله ویرایش نشده است که برای چاپ پذیرفته شده است. مکت مقاله توسط دفتر

نشریه مطالعات در دنیای رنگ تهیه شده و قبل از چاپ ویرایش نهایی به نویسنده مسئول مقاله ارسال می شود.

مروری بر خواص نوری فرش: رویکردی مبتنی بر مدل سازی

انیس زیدآبادی نژاد^۱، علی شمس ناتری^{۲*}

۲- دانشجوی دکترا، گروه مهندسی نساجی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران، کد پستی: ۴۱۹۹۶۱۳۷۷۶

۱- استاد، گروه مهندسی نساجی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران، کد پستی: ۴۱۹۹۶۱۳۷۷۶

* a_shams@guilan.ac.ir

چکیده:

خواص نوری و ظاهری فرش‌ها تحت تاثیر عوامل مختلف می‌تواند بر تصمیمات خرید مصرف‌کنندگان، تولیدکنندگان و طراحان داخلی تأثیر بگذارد. تاکنون، مرور جامع و مدل‌سازی صحیحی برای ویژگی‌های نوری فرش صورت نگرفته است. سیر تکامل مدل‌سازی خواص نوری آنها از رویکردهای ساده فیزیکی به سیستم‌های هوشمند گسترش یافته است. ساختار خاص فرش نشان می‌دهد که مدل‌های ساده نمی‌توانند پاسخگوی مناسبی جهت توصیف خواص نوری آنها باشند. کارایی هر یک از مدل‌های به کار رفته نیز متفاوت است. از این رو، محققین از روش‌های جدید و پیشرفته مدل‌سازی برای بررسی همه جانبه خواص نوری فرش استفاده کردند. عوامل مختلف ظاهری، پارامترهای ساختاری فرش، الیاف و پارامترهای نوری محیط همگی بر خواص نوری فرش تأثیر گذارند و باید برای ارائه مدلی کامل‌تر مورد بررسی بیش‌تر قرار گیرند. در این راستا، با کمک یک مدل جامع و با استفاده از ترکیب تحلیل خواص نوری، پردازش تصویر و هوش مصنوعی، کنترل کیفیت و پیش‌بینی ظاهر محصول نهایی در صنعت فرش می‌تواند تحول یابد.

کلمات کلیدی: خواص نوری، فرش، مدل‌سازی، رنگ، پردازش تصویر، هوش مصنوعی.



A Review of Carpet Optical Properties: A Modeling-Oriented Approach

Anis Zeydabadinezhad¹, Ali Shams Nateri^{2*}

¹ Department of Textile Engineering, University of Guilan, P. O. Code: 4199613776, Rasht, Iran.

^{2*} Department of Textile Engineering, University of Guilan, P. O. Code: 4199613776, Rasht, Iran.

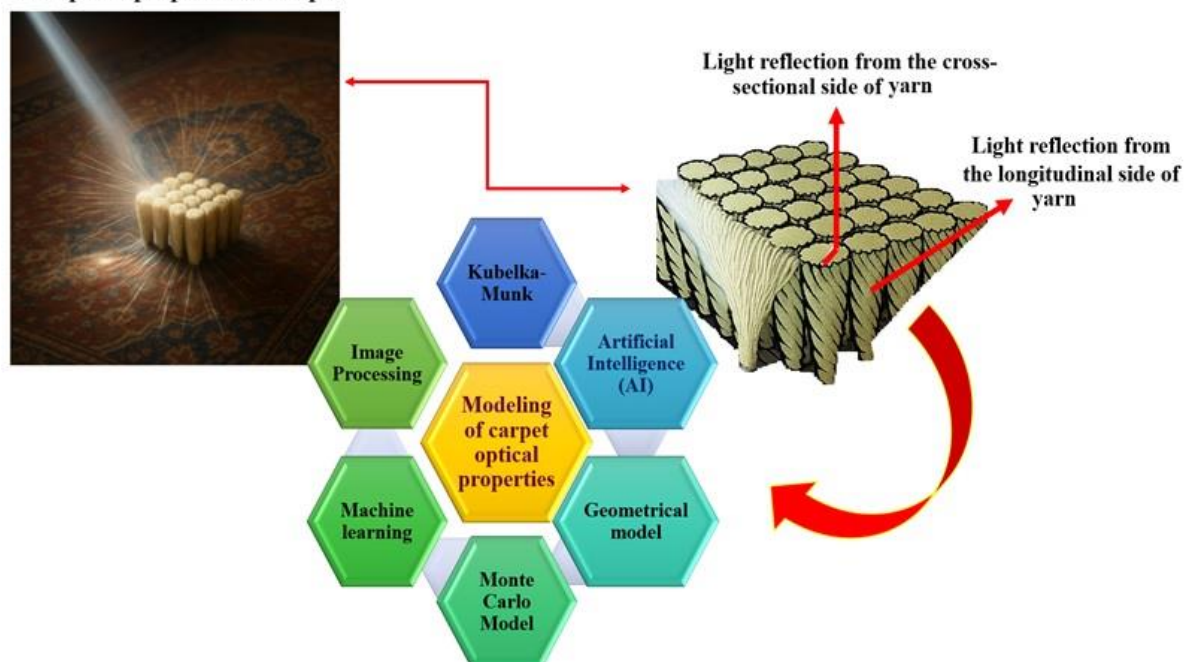
* a_shams@guilan.ac.ir

Abstract:

The optical and appearance properties of carpets can influence the purchasing decisions of consumers, manufacturers, and interior designers under the influence of various factors. So far, a comprehensive review and proper modeling of the optical properties of carpet has not been conducted. The evolution of modeling these optical properties has expanded from simple physical approaches to intelligent systems. The three-dimensional structure of carpets indicates that simple models cannot adequately describe their optical properties. Moreover, the effectiveness of each modeling approach varies. Consequently, researchers have used new and advanced modeling methods to thoroughly investigate the optical properties of carpets. Various appearance and constructional factors, including the structural parameters of the carpet, fibers characteristics, and environmental optical parameters, all affect the optical properties of carpets and require further investigation to develop a more comprehensive model. In this regard, quality control and prediction of the final product's appearance in the carpet industry can be enhanced through the development of a comprehensive model that integrates optical property analysis, image processing, and artificial intelligence.

Keywords: Optical properties, Carpet, Modeling, Color, Image processing, Artificial intelligence.

The optical properties of carpet



۱- مقدمه

خواص نوری فرش نه تنها بر برداشت ذهنی خریدار اثر گذار است بلکه در فرآیندهای کنترل کیفیت، طراحی محصول، بازاریابی و فروش آن نیز نقش محوری دارد. در دهه‌های اخیر، با گسترش رقابت جهانی در هنر صنعت فرش و افزایش حساسیت مشتریان نسبت به کیفیت بصری، روش‌های ارزیابی خواص نوری فرش به ابزارهایی استراتژیک برای تولیدکنندگان و طراحان تبدیل شده‌اند. این ارزیابی‌ها می‌توانند با اندازه‌گیری دقیق و مدل‌سازی پیشرفته پیش از تولید انبوه، ظاهر نهایی محصول را پیش‌بینی کرده و امکان بهینه‌سازی طراحی را فراهم کنند. شناخت علمی و مدل‌سازی دقیق اثر پارامترهای فنی و ساختاری در طراحی دیجیتال و تجارت آنلاین نیز اهمیت فزاینده‌ای یافته است. با این وجود، هنوز شکاف‌های پژوهشی قابل توجهی در این حوزه وجود دارد. کمبودهایی در مطالعات جامع که به طور همزمان به تاثیر پارامترهای ساختاری فرش،

مقاله پذیرفته شده

ویژگی‌های نوری مواد اولیه و تکنیک‌های مدل‌سازی نوین بپردازند حس می‌شود. از دیدگاه مدل‌سازی نیز، بررسی مدل‌های نوری قبلی نشان می‌دهند که معمولاً برای سطوح صاف پارچه‌ها طراحی شده‌اند و برای فرش به عنوان یک سطح ناهمگن، مناسب نیستند. زیرا مدل جامعی که تمامی عوامل مانند ساختار سه بعدی، سایه‌اندازی بین پرزها، بازتاب‌های داخلی و جذب در الیاف رنگی با توجه به ساختارهای مختلف الیاف را در نظر بگیرد، ارائه نشده است. همچنین، بسیاری از مطالعات فقط نوع الیاف را بررسی کرده و توپوگرافی سطح الیاف در حالت میکروسکوپی را نادیده می‌گیرند در حالی که این عامل نقش بسیار مهمی در پراکندگی نور دارد. بنابراین، توسعه مدل‌های فیزیکی پیشرفته‌تر همچنان یک نیاز پژوهشی اساسی محسوب می‌شود (۱،۲).

رنگ‌ها در فرش ایرانی نقش محوری در بیان مفاهیم دارند. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که ترکیب رنگ در فرش ایرانی از یک منطق رنگ‌شناختی برآمده است که نشأت گرفته از اقلیم، سلیقه منطقه‌ای و کاربرد آن است. بر اساس مقاله‌ای که توسط کیانمهر و همکاران نوشته شده است، یکی از عوامل زیبایی‌شناسی فرش ترکیب نظم هندسی طرح‌های به کار رفته در فرش همراه با انتخاب گزینشی و هوشمندانه رنگ است که به ایجاد هماهنگی و تکرار بصری و آرامش در نگاه مخاطبان منجر می‌شود (۳-۵).

رنگ به عنوان عاملی مهم در ارائه خواص نوری، اغلب برای موفقیت تجاری محصول حیاتی است. رنگ یک جسم به عوامل زیادی مانند نورپردازی، اندازه نمونه و رنگ‌های پس‌زمینه و اطراف بستگی دارد. مهم‌تر از همه، رنگ یک پدیده ذهنی است و به مشاهده کننده بستگی دارد. اندازه‌گیری رنگ روی سطوح مات (مثل منسوجات) با اندازه‌گیری درصد بازتاب سطوح انجام می‌شود و مقادیر بازتاب اندازه‌گیری شده برای محاسبه پارامترهای رنگی و سایر خواص مرتبط با رنگ، به نرم‌افزار محاسبات رنگ منتقل می‌شوند. وقتی خواص ساختاری منسوجات در رابطه با رنگ آن‌ها در نظر گرفته می‌شود، مشخص می‌شود که رنگ می‌تواند با توجه به تأثیر خواص ساختاری بر ظاهر نمونه‌ها تغییر کند. در این شرایط، خواص ظاهری ساختارهای منسوج اهمیت پیدا می‌کنند. بسیاری از کارهای تحقیقاتی نشان داده‌اند که ساختار فیزیکی نمونه‌های پارچه به شدت بر اندازه‌گیری‌های بازتاب و رنگ حاصله تأثیر می‌گذارد. پدیده پیچیده رنگ هنگامی که با ساختارهای فیزیکی مختلف در منسوج تغییر می‌کند، دلالت بر این دارد که رنگ می‌تواند به عنوان زیرگروهی از ظاهر در نظر گرفته شود. ممکن است در اندازه‌گیری رنگ به قوانین سختگیرانه‌تری نیاز باشد تا از وابستگی بیش‌تر نتایج به ساختار فیزیکی جلوگیری شود و نتایج دقیق‌تری به دست آید. همچنین می‌توان اصطلاح "اندازه‌گیری ظاهر" را برای اندازه‌گیری خواص بازتاب منسوجات با ساختار پیچیده پیشنهاد کرد (۶). خواص نوری منسوجات، به طور مستقیم تحت تأثیر عوامل ساختاری متعدد مانند نوع الیاف، ساختار نخ، نوع بافت، مواد مصرفی برای رنگرزی و تکمیل قرار می‌گیرند (۱، ۲). این خواص، شامل مجموعه‌ای از ویژگی‌هاست که تعیین می‌کنند چگونه نور در برخورد با سطح فرش رفتار می‌کند و در نهایت، ظاهر بصری آن توسط مشاهده کننده چگونه درک می‌شود. هنگامی که هیچ تفاوت فضایی در یک نمونه منسوج وجود نداشته باشد، مشاهده کننده آن را در شرایط خالص ارزیابی دو بعدی تشخیص می‌دهد. با این حال، بافت، در پارچه و فرش، حالت‌های ظاهری متفاوتی به آن می‌دهد. اندازه‌گیری رنگ و ظاهر پارچه‌های تخت آسان است. این در حالی است که به دلیل انعکاس خاص، شبیه‌سازی رنگ در پارچه‌های پرزدار و فرش مشکل است. هنگامی که نور به صورت عمودی و یکنواخت بر روی سطح فرش تابیده شود، بخشی از نور از سطح لیف منعکس و بخش دیگر وارد لیف می‌شود. نور وارد شده به داخل الیاف جذب و یا به دلیل پدیده انتشار انعکاس پیدا می‌کند (۶). ساختار متفاوت فرش به علت داشتن پرز، بازتاب نور از سطح آن را کاملاً وابسته به جهت نخ پرز، زاویه نور تابیده شده و زاویه مشاهده کرده است (۷). این پدیده در اصطلاح به عنوان شید دوگانه^۱ شناخته می‌شود که در فرش‌های دستباف به علت نحوه پرداخت (روگیری) فرش پس از اتمام بافت، بارزتر است (۸).

پراکندگی نور در فرش‌ها در مقایسه با پارچه‌های تخت، بیش‌تر است و ایجاد پدیده‌هایی مانند درخشندگی و براقیت^۲ موضعی و ناهمسانی رنگ در جهت‌های مختلف روی آن مشاهده می‌شود. در این راستا، تحقیقات متعددی صورت گرفته است. خواص اسپکتروفتومتری و رنگ‌سنجی نخ و فرش توسط محققان مقایسه شده است. آن‌ها دریافتند که بازتاب فرش، صرف نظر از

¹ Dual Shade Effect

² Gloss

مقدار غلظت رنگزای مورد استفاده، همیشه کم‌تر از بازتاب نخ است. شناسایی فرش از طریق پردازش تصویر با استفاده از اجزای الگوها، پیکسل‌های رنگ و خطوط مرزی توسعه داده شده است. همچنین، محققان بررسی کردند که چگونه سایش مکانیکی پرز فرش بر رنگ ظاهری فرش تأثیر می‌گذارد (۷). در بخش‌های مختلف مطالعه حاضر، به هر یک از این پژوهش‌ها بیش‌تر پرداخته خواهد شد. با این حال، این مطالعات به طور جامع، تغییرات در روشنایی و همچنین شکل‌گیری متنوع ساختارهای فرش را که بر مدل‌سازی خواص آن به طور قابل توجهی تأثیرگذار هستند، در نظر نگرفته‌اند. این مقاله، با هدف حذف بخشی از این شکاف علمی، به مرور و بررسی تحقیقات اخیر محققان در زمینه خواص نوری فرش و پارامترهای تأثیرگذار بر آن، روش‌های ارزیابی و اندازه‌گیری خواص از روش‌های کلاسیک تا مدرن و مدل‌سازی خواص نوری می‌پردازد.

۲- مشخصات ساختاری و ظاهری فرش

۲-۱- مشخصات ساختاری

فرش منسوجی برای پوشش کف است که از الیاف مختلفی مانند پشم، پنبه، ابریشم یا الیاف مصنوعی به صورت دستی یا ماشینی تولید می‌شود. فرش دستباف بر اساس منطقه‌ای که در آن تولید می‌شود، انواع مختلفی مانند فارسی، ترکی، قفقازی و غیره دارد که با روش‌های سنتی بر روی دار بافندگی تولید می‌شوند. این پوشش‌ها به صورت تخت بافته^۱ یا بدون پرز و پرزدار^۲ بافته می‌شوند (۹). الیاف پشمی، پرکاربردترین لیف در فرش‌های دستباف هستند (۱۰). از سوی دیگر، فرش‌های ماشینی در حجم انبوه و با استفاده از ماشین‌آلات مدرن تولید می‌شوند که امکان ایجاد طرح‌های متنوع با هزینه کم‌تر را فراهم می‌آورند (۹). از لحاظ ساختاری، فرش دارای سه بخش کلیدی شامل تار، پود و پرز است (۹، ۱۰).

ارتفاع پرز بسته به نوع و استفاده فرش بین ۵ تا ۲۵ میلی‌متر متغیر است. در این میان، فرش‌هایی مانند گبه معمولاً پرز بلندتری دارند که جلوه‌ای نرم و لطیف ایجاد می‌کنند. مقاومت فشاری و بازگشت پرز نیز از ویژگی‌های کیفی مهم‌اند که با آزمایش‌های استاتیک و دینامیک تحت تأثیر تراکم گره و کیفیت الیاف بررسی می‌شوند (۹). از انواع رایج گره در فرش، گره فارسی^۳ و گره ترکی^۴ می‌باشند. گره ترکی از دوام بیش‌تری برخوردار است و برای مناطق پر تردد مناسب‌تر است. این در حالی است که گره فارسی، امکان ایجاد نقوش ظریف‌تر را فراهم می‌آورد. کیفیت و وضوح طرح فرش نیز با تراکم گره^۵ در اینچ مربع، مشخص می‌شود که یکی از مولفه‌های اصلی کیفیت فرش است. این مولفه، با واحد KPSI^۶ (گره در اینچ مربع) اندازه‌گیری می‌شود؛ هرچه تراکم بیش‌تر باشد، جزئیات طرح و دوام فرش افزایش می‌یابد. مقدار بالاتر از ۱۲۰ KPSI، کیفیت متوسط رو به بالا به شمار می‌رود و مقدار بیش از ۳۳۰ KPSI نشان‌دهنده کیفیت بسیار بالا و نمونه‌های لوکس است (۹). تراکم الیاف در یک ساختار معین تأثیر مستقیمی بر سطح مقطع کل و در نتیجه بر میزان تعامل با نور دارد. الیاف نازک‌تر (چگالی کم‌تر)، با تعداد بیش‌تری در واحد حجم، سطح تماس با نور را افزایش می‌دهند که می‌تواند منجر به بازتاب پراکنده بیش‌تر و جلوه‌ای مات شود. ساختار فشرده‌تر یا متراکم‌تر سطح تماس نور با الیاف را تغییر داده و گاهی باعث تغییر در درخشندگی یا ایجاد بافت بصری متفاوتی می‌شود. به عبارت دیگر، افزایش تراکم گره باعث افزایش تراکم سطح پرز و یکنواختی بازتاب نور می‌شود. تراکم بیش‌تر به معنای کاهش فضای خالی بین پرزها و در نتیجه کاهش نایکنواختی خواص نوری است (۱۱، ۱۲). با این حال، اگر جهت خاب پرزها نامنظم باشد، این می‌تواند باعث اثر سایه روشن و تغییر ظاهر رنگ در تابش نورهای مختلف شود. همچنین، ارتفاع پرز تأثیر مستقیمی بر زاویه بازتاب نور دارد. پرزهای بلندتر پراکندگی نور بیش‌تری ایجاد می‌کنند در حالی که پرزهای کوتاه‌تر بازتاب مستقیم‌تری دارند و درخشندگی بیش‌تری ایجاد می‌کنند (۷).

۲-۲- مشخصات ظاهری

¹ Flat-woven

² Tufted

³ Senneh

⁴ Ghiordes

⁵ Knot density

⁶ Measured in knots per square inch

مقاله پذیرفته شده

رنگ و طرح به عنوان مشخصات ظاهری فرش، نه تنها از عناصر زیبایی شناختی محسوب می‌شوند بلکه می‌توانند حامل پیام‌هایی از فرهنگ و اجتماع در هر دوره‌ای باشند. رنگ با ایجاد حس اولیه در مخاطب و القای معنا، و طرح با ساختاردهی و روایت بصری از کار، به طور همزمان ارزش هنری و پسند بازار فرش را تعیین می‌کنند. به عنوان نمونه، سادگی، نظم و هماهنگی در طرح‌های هندسی و هماهنگی در رنگ‌ها با ساختار طرح دو عامل کلیدی در ماندگاری و جذابیت این نوع فرش‌ها هستند. هماهنگی یا تضاد رنگ‌ها با ساختار طرح می‌تواند بر درک خواص ظاهری فرش تاثیرگذار باشد. هماهنگی میان نقش‌ها و رنگ‌ها و ایجاد کنتراست مناسب می‌تواند بهای فرش را نیز به طور چشم‌گیری افزایش دهد. استفاده موفق از طرح‌ها هنگامی به دست خواهد آمد که انتخاب رنگ‌ها با ساختار طرح هماهنگ باشد. به طور مثال، در طرح لچک ترنج، استفاده از رنگ متضاد در ترنج است که منجر به برجسته‌تر شدن مرکز می‌شود. مثال دیگر در فرش‌های سنتی نمود پیدا می‌کند، به طوری که معمولاً طراح از یک رنگ غالب در زمینه استفاده کرده که با رنگ‌های مکمل در حاشیه ترکیب شده است. در مجموع، انتخاب رنگ بر طبق هماهنگی، تضاد و توازن بصری انجام می‌گیرد. با این وجود، اقلیم، سنت‌ها، باورهای قومی و محلی و نیز میزان دسترسی به مواد رنگزا در شکل‌گیری پالت‌های رنگی در هر منطقه‌ای برای تولید فرش موثر بوده است (۵-۳). رنگ در ارزیابی کیفیت، جایگاهی کلیدی دارد و نخستین عامل جلب توجه مشاهده‌کننده در فرش است. رنگزاهای مورد استفاده در فرش، به طور کلی به دو دسته اصلی رنگزاهای طبیعی و شیمیایی تقسیم می‌شوند. طبق تحقیقات محققین، یکی از عوامل تاثیرگذار بر خواص نوری و ظاهری فرش، ترکیب شیمیایی رنگزاهای به کار رفته و ساختار الیاف است (۱۳). شناخت این ساختارها به طراحان فرش و متخصصان رنگرزی کمک می‌کند تا با کنترل دقیق خواص نوری جلوه‌های بصری هدفمند ایجاد کنند.

ترکیب و سازماندهی عناصر بصری شامل نقوش هندسی، گیاهی، جانوری یا نمادین در چارچوب کلی فرش، طرح آن را تشکیل می‌دهند. طرح، دومین عامل مهم در ارزیابی قالی پس از رنگ است. طرح‌های هندسی شامل اشکال ساده و منظم مانند مربع، لوزی، چند ضلعی یا ستاره‌ای هستند و بیش‌تر در بافته‌های عشایری دیده می‌شوند. این طرح‌ها حس هماهنگی و تقارن و استحکام بصری ایجاد می‌کنند و حتی در فاصله‌های دور نیز وضوح و بافت منسجم بالایی دارند. الگوهای هندسی با جزئیات زیاد به ویژه در زوایای مختلف نور جلوه‌ای دینامیک ایجاد می‌کنند. طرح‌هایی مانند قاب‌ها می‌توانند پراکندگی نور را تحت تاثیر قرار داده و عمق بصری بیش‌تری ایجاد کنند (۵، ۱۴، ۱۵). طرح‌های متقارن و منظم باعث می‌شوند چشم بیننده با نظم هندسی فرش هماهنگ شود و برداشت منظم‌تری از قالب‌بندی فرش داشته باشد (۱۵). قالب‌بندی رایج در طرح یک فرش نیز ممکن است به صورت‌های مختلفی انجام شود. این قالب‌بندی می‌تواند به صورت لچک و ترنج، باغی، محرابی، گل تمام، واگیره‌ای، راه‌راه یا قاب‌قابی باشد. به عنوان مثال، در قالب‌بندی لچک ترنج، ترنج در کانون و مرکز فرش قرار می‌گیرد و چهار لچک در هر یک از چهار گوشه یک فرش چهار ضلعی می‌باشند که به ایجاد تقارن و تمرکز در نگاه مخاطب نیز کمک می‌کند (۱۴).

۳- خواص نوری منسوجات و فرش

خواص نوری به نحوه تعامل ماده با نور گفته می‌شود و شامل مجموعه‌ای از پدیده‌هایی است که هنگام تابش پرتو الکترومغناطیسی (معمولاً در ناحیه مرئی، ماورای بنفش و مادون قرمز) بر سطح یک ماده رخ می‌دهد. مهم‌ترین این ویژگی‌ها عبارتند از انعکاس، جذب، عبور، شکست و پراکندگی (۱۶). هنگامی که نور به ماده می‌تابد، بخشی از آن توسط ماده جذب می‌شود که این میزان جذب به ساختار شیمیایی ماده، ضخامت و غلظت مواد رنگزا بستگی دارد (۱۷). پدیده دیگری که در برخورد نور به ماده رخ می‌دهد بازتاب یا انعکاس است. انعکاس به پدیده‌ای گفته می‌شود که در آن پرتوهای نوری پس از برخورد به سطح جسم باز می‌گردند. میزان و نوع بازتاب نور، یکی از مهم‌ترین مولفه‌های تعیین‌کننده ویژگی‌های بصری منسوجات به ویژه فرش است. بازتاب در فرش‌ها تحت تاثیر ساختار پرز، نوع الیاف، زبری سطح، میزان چرخش الیاف، تراکم، مواد شیمیایی، رنگزای استفاده شده و زاویه تابش نور قرار دارد. در فرش‌های پرزدار مانند فرش دستباف پشمی، سطح ناهموار و چند جهته نخ‌ها باعث می‌شود که بازتاب نور به صورت پراکنده باشد که موجب کاهش درخشندگی ولی افزایش یکنواختی بصری می‌شود. مطالعات نشان می‌دهند که جهت خاب پرز تاثیر زیادی بر شدت و زاویه بازتاب دارد. زمانی که پرزها در جهت منبع نور خم شده باشند، بازتاب بیش‌تری به سمت مشاهده‌کننده برگشت می‌کند که باعث درخشش سطح در یک زاویه خاص می‌شود (۱۸، ۱۱، ۹). این پدیده در تشخیص کیفیت و اصالت فرش‌های دستباف نیز کاربرد دارد. در برخی مطالعات، نشان داده شده که افزایش زاویه برخورد نور به سطح نخ،

مقاله پذیرفته شده

میزان بازتاب جهت‌دار را افزایش می‌دهد. فرمول‌هایی بر پایه قوانین فیزیکی همچون قانون اسنل^۱، فرسnel^۲ و مدل کیوبلکا-مانک^۳ برای مدل‌سازی این نوع بازتاب در منسوجات مورد استفاده قرار گرفته‌اند (۲۳-۱۸). گزارش شده است که در فرش‌هایی که از الیاف براق (مثل ویسکوز یا الیاف با مقطع سه پره‌ای) در تولید آن‌ها استفاده شده است، میزان بازتاب سطحی و درخشندگی بیش‌تر است. اما در الیاف پشم، بازتاب کم‌تر بوده و ظاهر مات‌تری ایجاد می‌شود. از طرفی افزایش تراکم گره موجب انسجام بیش‌تر سطح شده و بازتاب منظم‌تری در زوایای مشخص ایجاد می‌کند (۲۶-۲۴). لو و همکارانش، اثرات ساختار سطح منسوج را بر ویژگی‌های رنگی مانند روشنایی، خلوص و فام بررسی کردند. آن‌ها تأثیر قابل توجه سطح پارچه را بر مقادیر روشنایی شناسایی کردند. همچنین، چندین مقیاس اندازه‌گیری رنگ و بازتاب مورد مطالعه قرار گرفت و مدل‌هایی را توسعه دادند تا به طور مؤثر تأثیر بافت پارچه بر اندازه‌گیری‌های رنگ را کاهش دهند تا مقادیر و مقایسات دقیق‌تری انجام گیرد (۲۷). ظاهر، درخشندگی، براقیت و برخی تغییرات بافتی سطح فرش را می‌توان با اندازه‌گیری بازتاب نور در طیف وسیعی از زوایای مشاهده به وسیله ابزارهای دستگاهی و طیف‌سنجی مورد بررسی قرار داد. به عنوان مثال، در مورد تغییر ظاهر فرش، با تمرکز بر اندازه‌گیری‌های ساختاری پرز فرش، مطالعاتی صورت گرفته است. در این مطالعات از تکنیک‌هایی شامل آنالیز تصویر، گونیو-فوتومتري و چگالی‌سنجی استفاده شده است. هر دو دسته نمونه‌های کنترل و هم نمونه‌های پاختورده در معرض ۶۰۰۰ قدم تردد، مورد آزمایش قرار گرفتند. در بخش اول این مجموعه، نتایج گونیو-فوتومتري، یعنی بازتاب‌سنجی زاویه متغیر، گزارش شده است. تکنیک‌هایی برای تولید منحنی‌های بازتاب گونیو-فوتومتري ارائه شده است که می‌توانند برای تعیین جهت قرارگیری پرز در فرش مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرند. این تکنیک‌ها به طور مؤثری در توصیف تغییرات خاص در سایه‌اندازی میان پرزها و الگوهای سایش، چه در فرش‌های پاختورده و چه در فرش‌های نو، موفقیت‌آمیز عمل کردند (۲۸).

در نگاه جزئی‌تر، شکل سطح مقطع لیف نیز، تأثیر زیادی بر میزان نور منعکس شده دارد. اگرچه بازتاب جهت طولی در اندازه‌گیری رنگ و ظاهر منسوجات مهم‌ترین است، اما در منسوجات پرزدار، ارزیابی بازتاب از سطح مقطع نیز در درک بهتر ظاهر آن‌ها تأثیرگذار است. الیافی با سطح مقطع سه ضلعی به علت لبه‌های زاویه‌دار، شدت بازتاب و درخشندگی بالاتری نسبت به الیاف با سطح مقطع دایره‌ای شکل دارند. این ویژگی در فرش باعث جلوه‌ای براق‌تر و جذاب‌تر از سطح می‌شود. به عنوان مثال، در الیاف مصنوعی با تغییر شکل سطح مقطع می‌توان براقیت را افزایش داد و یا با افزودن نانوذرات به سطح پلیمر، رفتار نوری آن را مهندسی کرد. الیاف با سطح صاف و چند ضلعی نور را به صورت گسترده‌تر منعکس کرده و باعث بالا رفتن میزان بازتاب می‌شوند؛ از این رو ظاهر روشن‌تری به فرش می‌دهند. همچنین، الیاف توخالی پراکندگی داخلی نور و روشنایی بیش‌تری در برابر چشم مشاهده‌کننده دارند. این ویژگی‌ها می‌توانند باعث جذب نور به صورت متفاوت شوند و جلوه‌ای متمایز در فرش ایجاد کنند. در برخی مطالعات جدید گزارش شده است که، الیاف با سطح مقطع مثلثی بازتاب نور بیش‌تری دارند. جلای الیاف نیز بیش‌تر به سطح مقطع آن مربوط می‌شود. شکل مقطع الیاف طبیعی به جز ابریشم نامنظم است و بنابراین ویژگی‌های درخشندگی هر لیف طبیعی با توجه به شکل سطح مقطع آن منحصر به فرد است. در یک مطالعه روی الیاف پلی‌استر، به عنوان نخ خاب، جلای فرش اندازه‌گیری شد. از الیاف با ظرافت مختلف و سطح مقاطع به شکل دایره، سه پره و هشت پره استفاده شد. جلای فرش‌ها در دو زاویه تابش ۲۰ و ۶۰ درجه در جهات تار و پود، عمود بر فرش و مایل به دستگاه مینی گلاس (مدل FC-268 برای اندازه‌گیری جلا) اندازه‌گیری شد. از نتایج این کار این‌گونه دریافت شد که چنانچه جلای فرش تولیدی در جهات مختلف به صورت یکسان مورد انتخاب باشد، باید از الیاف سه پره جهت نخ خاب استفاده شود. برای داشتن بیش‌ترین جلا در جهات مختلف، تولید فرش با استفاده از نخ خاب سه پره و گرد توصیه می‌شود. همچنین، در اندازه کم ظرافت کاهش قابل توجه جلا در زاویه کم رخ می‌دهد و مجموعاً نمره ۳/۲ دنیبر برای الیاف جهت دریافت بیش‌ترین جلا معرفی می‌شود. در همین راستا، عنوان شد که الیاف با سطح مقطع هشت پره کم‌ترین جلا را نشان دادند. محققین در پژوهشی دیگر، خواص انعکاسی و رنگی متفاوت بین جهت طولی و مقطعی را مطالعه کرده‌اند. آنان دریافتند که رنگ جهت مقطع عرضی نخ تیره‌تر از جهت طولی آن است. همچنین، نتایج به‌دست‌آمده از تحقیقات نشان می‌دهد که با افزایش تراکم الیاف، بازتاب و درخشندگی در جهت مقطع عرضی، افزایش می‌یابد (۲۹، ۱۹).

¹ Snell's Law

² Fresnel

³ Kubelka-Munk

از نظر بصری، تأثیر براقیت و جهت پرز در منسوجات پرزدار مثل فرش زیاد است بطوری که تغییر فقط در جهت خاب پرز می تواند رنگ فرش را از روشن به تیره تغییر دهد بدون اینکه مقدار رنگزا تغییر کرده باشد. براقیت، که توانایی سطح الیاف یا فرش در بازتاب نور به صورت جهت دار است، باعث ایجاد درخشندگی، جلای بصری و زیبایی در محصول نهایی می شود. در الیاف طبیعی مانند ابریشم، براقیت ذاتی و ناشی از ساختار سه-ضلعی یا چند وجهی سطح الیاف است؛ در حالی که در الیاف مصنوعی همان طور که اشاره شد، با کنترل پارامترهایی مانند سطح مقطع و صافی سطح می توان براقیت را تنظیم کرد. منسوجات براق همیشه سطح نسبتاً صافی دارند، در حالی که منسوجات مات سطوح نامنظمتری دارند. یکی از عوامل موثر بر براقیت، ضریب شکست ماده است. اختلاف بیش تر بین ضریب شکست الیاف و محیط اطراف (معمولاً هوا) منجر به افزایش بازتاب و در نتیجه براقیت بالاتر می شود. زاویه پرزهای فرش نیز تأثیر مستقیمی بر براقیت دارد، به طوری که فرش در جهت خاب دارای براقیت بیش تری نسبت به خلاف جهت خاب است. این منجر به ایجاد اثر سایه رنگ^۱ در فرش می شود که در درک کیفیت بصری آن نقش مهمی دارد. سطح مقطع الیاف نیز عامل مهمی است؛ الیاف با سطح مقطع مثلثی یا چند وجهی بازتاب نوری بیش تری داشته و در نتیجه ظاهر براق تر نسبت به الیاف با سطح مقطع گرد دارد. برای اندازه گیری براقیت، معمولاً از گونیوفتومتر استفاده می شود که شدت بازتاب نور را در زوایای مختلف ثبت می کند. همچنین، دستگاه های برق سنج^۲ در استانداردهای ایزو و ASTM، برای مقایسه درخشندگی بین نمونه ها استفاده می شوند. در قالی ها به عنوان منسوجات پرزدار، علاوه بر جنس و آرایش ملکولی لیف، جهت گیری پرزها^۳ نیز رفتار نوری و براقیت را به شدت تحت تأثیر قرار می دهد. تغییر خاب پرز باعث سایه شده و تفاوت محسوسی در روشنایی (L^*) و براقیت ایجاد می کند. مطالعات کلاسیک در مورد ظاهر قالی و کارهای جدید روی رنگ ظاهری تحت منابع نوری مختلف در راستای کمی سازی این اثر انجام شده است. به طوری که در مطالعه خواص نوری آن ها غالباً رنگ منسوج تحت هندسه اندازه گیری ۴۵/۰ اندازه گیری می شود. الگوی تغییرات روشنایی (L^*) در زوایای چرخش منسوج با استفاده از سیستم گونیو اسپکتروفوتومتر^۴ به این صورت است که از L^* به عنوان یک مقدار مشخصه نوری استفاده می شود و تغییرات L^* در طول چرخش منسوج اندازه گیری می شود. هندسه اندازه گیری برای تعیین شرایط بهینه روشنایی و مشاهده برای تشخیص تغییرات روشنایی (L^*) هنگام چرخش پارچه در نظر گرفته شده است. براساس الگوی روشنایی (L^*)، زاویه چرخش، مناسب ترین پارامتر برای بررسی تغییرات در روشنایی از نمونه براق به مات در ارزیابی بصری پارچه تشخیص داده شده است. مطابق مطالعات صورت گرفته، تراکم نخ، ارتفاع پرز و نوع رنگرزی نیز می توانند براقیت فرش را تحت تأثیر قرار دهند. فرش های با پرزهای کوتاه تر و با تراکم بالاتر معمولاً براق تر دیده می شوند، به ویژه زمانی که از نخ های براق مانند ویسکوز یا ابریشم استفاده شده باشد. براقیت در کنار ویژگی هایی مثل روشنایی و یکنواختی رنگ^۵ سه مولفه اصلی در تحلیل بصری فرش ها به شمار می روند و تأثیر مستقیمی بر ادراک مصرف کننده دارند (۳۲-۳۰، ۷).

۳-۲- تأثیر ساختار الیاف و نخ

محققان، به مطالعه تطبیقی امکان تغییر و توسعه مشخصات ظاهری در فرش دستباف و ماشینی پرداخته اند. در این تحقیقات، هشت ویژگی ظاهری از جمله طرح، رنگ، ارتفاع پرز، تراکم، ابعاد، نوع گره، نمره و تاب نخ پرز و دوام لایه زیرین مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان داد که برخی از این ویژگی ها در فرش های دستباف و ماشینی قابل تغییر هستند در حالی که برخی دیگر کم تر تحت تأثیر قرار می گیرند (۳۳). برخی مشخصات ساختاری نخ نظیر تاب نخ، مقطع عرضی و درصد خلا داخلی بر رفتار نوری آن تأثیرگذار است. برای مثال، نخ هایی با تاب بالا نور را در جهت های مختلف پراکنده می کنند و ظاهر مات تری ایجاد می کنند (۳۶-۳۴). اکریلیک یکی از الیافی است که معمولاً در تولید فرش های ماشینی استفاده می شود. الیاف اکریلیک، دارای سطح یکنواخت تر نسبت به پشم می باشند. این سطح یکنواخت تر موجب افزایش بازتاب منظم نور و در نتیجه

¹ Shading effect

² Gloss meter

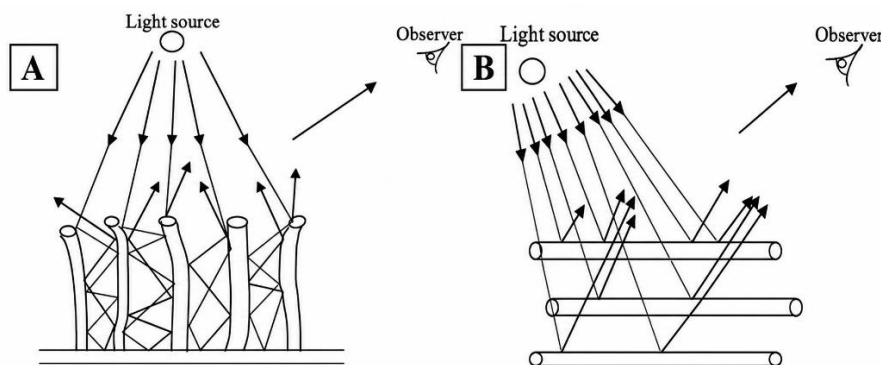
³ Pile lay orientation

⁴ Lightness

⁵ Color Uniformity

درخشندگی بیش تر می شود. همچنین، ضریب شکست نسبتا بالای اکریلیک باعث افزایش انعکاس سطحی نور شده و رنگ آن را زنده تر نشان می دهد (۳۷-۳۹).

بررسی های طیف سنجی فرش های دستباف نشان می دهد که خواص بازتابی نخ در طرف سطح جانبی با بازتاب از سطح مقطع عرضی متفاوت است. نخ از سمت جانبی روشن تر، ولی از سمت مقطع عرضی دارای عمق رنگ بالاتر است (۴۰-۴۲). به عبارتی، ساختار پرزدار فرش باعث تغییر در درک رنگ نهایی می شود، که تحت تأثیر بازتاب های داخلی، زوایای پرز، و جذب نور است (۴۲). شکل ۱، چگونگی بازتاب نور از سطح جانبی نخ و از سطح فرش دستباف را به صورت شماتیک نشان می دهد.



شکل ۱. تصویر شماتیک بازتاب نور از سطح مقطع طولی (A) فرش دستباف و (B) سطح مقطع جانبی نخ خاب (۱۹).

Figure 1. Schematic illustration of light reflection from longitudinal direction (A) a hand-woven carpet and (B) the longitudinal surface of the pile yarn (19).

۳-۳- تأثیر رنگ و طرح

رنگ، یک فاکتور چند بعدی در طراحی و کیفیت بصری فرش است و باید با دقت علمی و مهندسی در فرآیند انتخاب و اعمال آن در نظر گرفته شود.

همان طور که در بخش ۲-۲ اشاره شد، اصول استفاده از رنگ در فرش با تأثیر از اقلیم و فرهنگ در هر منطقه ای فرق دارد. عموماً از یک رنگ غالب در زمینه و رنگ های مکمل در حاشیه به خصوص در فرش های بافت شهری استفاده می شود. کنتراست رنگی برای برجسته کردن بخش های خاص و نقاط کانونی طرح مثل ترنج به کار می رود. همچنین، هماهنگی در رنگ ها به جهت ایجاد آرامش بصری به دقت توسط طراحان لحاظ می شود. رنگ های روشن مثل زرد و نارنجی بازتاب نور بیش تری دارند و فضای داخلی را روشن تر جلوه می دهند در حالی که رنگ های تیره مثل سرمه ای یا قهوه ای نور را بیش تر جذب کرده و فضا را گرم تر و تاریک تر نشان می دهند. ترکیب رنگ های گرم در مرکز نیز با رنگ های سرد در حاشیه می تواند توجه ناظر را به مرکز جلب نموده و نحوه درک رنگ و نور را تغییر دهد. فرش ها، بسته به نوع رنگزایی به کار رفته (طبیعی یا شیمیایی)، عمق رنگ و ساختار زیرلایه، رفتار نوری متفاوتی از خود نشان می دهند (۴۳-۴۵، ۵). برای مثال، رنگ های تیره معمولاً جذب نور بیش تر و بازتاب کم تری دارند، در حالی که همان طور که اشاره شد این مورد برای رنگ های روشن برعکس است و این گونه رنگ ها، بازتاب نور بیش تری دارند (۴۳). رنگ های روشن مانند سفید، کرم یا زرد نور را بیش تر منعکس می کنند بنابراین، در فضاهای کم نور استفاده از فرش دارای رنگ های روشن می تواند مطلوب تر باشد (۴۳، ۷). ساختار ملکولی رنگزا نیز می تواند بر ضریب جذب نوری و بازتاب سطحی تأثیر بگذارد، به ویژه زمانی که رنگزا با الیاف تعامل شیمیایی دارد (۱۳). انتخاب نوع رنگزا و شیوه رنگزایی به خصوص در فرش دستباف پشمی، مستقیماً بر خواص و ویژگی های نوری نهایی تأثیرگذار است زیرا برخی رنگزاها با ایجاد پوشش سطحی خاص زاویه بازتاب نور را تغییر می دهند. در مطالعات تجربی، نشان داده شده است که رنگ های آبی و سبز در عمق های بالاتر بیش ترین اختلاف در بازتاب بین جهت طولی و عرضی پرز را به وجود می آورند. این مورد، ناشی از رفتار نوری ناهمسان سطح مقطع الیاف و زاویه تابش است. همچنین در فرش های چند رنگ ترکیب رنگ می تواند موجب شکل گیری تغییر ظاهری رنگ در زوایای مختلف شود (۴۶-۴۹). تکنیک های مدرن، همچون پردازش تصویر و اندازه گیری طیفی به پژوهشگران این امکان را می دهند که تفاوت های در رنگ

ناشی از بافت، زاویه تابش و عمق رنگ را با دقت بالا تحلیل کنند. این اندازه‌گیری‌ها معمولاً در فضای رنگی CIELab انجام می‌گیرند (۵۰). ترکیب رنگ همچنین می‌تواند ظاهر پارچه را روشن‌تر، تیره‌تر، گرم‌تر یا سردتر جلوه دهد و حتی بر درخشندگی، عمق رنگ و کنتراست نوری تاثیر بگذارد (۵۱). هنگامی که رنگ‌های تیره و روشن در کنار هم قرار می‌گیرند، کنتراست نوری افزایش می‌یابد. این موضوع باعث می‌شود روشنایی نواحی روشن بیش‌تر به نظر برسد و نواحی تیره تیره‌تر جلوه کنند که منجر به بروز پدیده کنتراست همزمان می‌شود (۵۲). در فرش‌ها یا پارچه‌هایی با ترکیب رنگ پیچیده، درک عمق و حجم سه بعدی به شدت به هم‌نشینی رنگ‌ها که به مجاورت رنگ‌ها و تاثیر متقابل آن‌ها بر ادراک بصری و بازتاب نور اشاره دارد وابسته است. رنگ‌های هم‌نشین می‌توانند ویژگی بازتاب طیفی یکدیگر را تحت تاثیر قرار دهند. به عنوان مثال، قرار گرفتن رنگ‌های با بازتاب بالا مانند سفید یا زرد، در کنار رنگ‌های با جذب بالا مانند مشکی یا سورمه‌ای باعث افزایش خطای اندازه‌گیری بازتاب می‌شود. وجود الگوهای رنگی با هم‌نشینی متضاد ممکن است درخشش ناهمگون در پارچه ایجاد کند. به ویژه در فرش‌هایی که بافت نامنظم دارند، این موضوع منجر به درک درخشندگی موضعی می‌شود. به طور کلی، رنگ‌های سرد در کنار گرم، یا تیره در کنار روشن، بافت بصری برجسته‌تری به وجود می‌آورند. در طراحی فرش، از هم‌نشینی هدفمند رنگ‌ها برای ایجاد عمق بصری، الگوهای سنتی یا مدرن و برجسته‌سازی بافت‌ها استفاده می‌شود. پژوهش‌ها نشان می‌دهند که در فرش‌های دستباف ترکیب رنگ‌ها قرمز، آبی و کرم می‌تواند درک فضایی و روشنایی را تغییر دهد. همچنین، در قالی‌های ایرانی جایگاه هر رنگ در نقشامیه‌ها و بخش‌های مختلف علاوه بر ایجاد جلوه بصری، به صورت نمادین نیز بوده است. به عنوان مثال، استفاده از رنگ سبز در حاشیه قالی‌های محرابی به عنوان نمادینی از حضور انسان در بهشت تلقی می‌شود و علت کاربرد آن در حاشیه قالی پرهیز از زیر پا آمدن این بخش است (۶۱-۵۳).

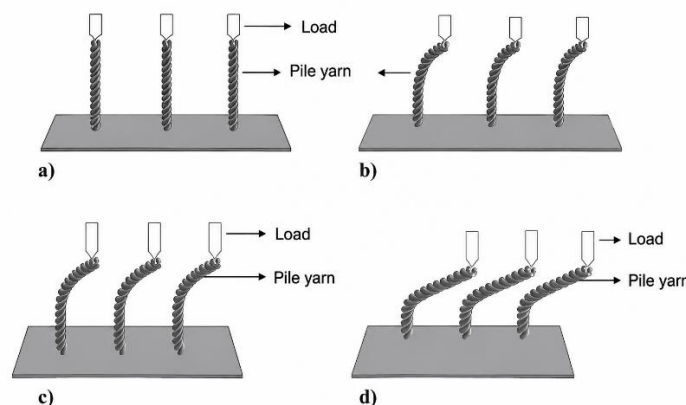
ارتباط میان طرح و رنگ نیز می‌تواند بر درک بصری تاثیر گذار باشد. اگر طرحی ساده باشد ولی از رنگ‌های متضاد قوی استفاده کند، چشم به سمت کانون‌های رنگی جذب می‌شود. در مقابل، طرح‌های پیچیده با رنگ‌های هماهنگ ممکن است جلوه‌ای یکپارچه‌تر ایجاد کنند. رنگ‌ها و الگوهای تکرار شونده می‌توانند موجب تغییر برداشت انسان از عمق، براقیت، اندازه، نور و حتی دمای محیط شوند (۴۳، ۷). در مجموع، می‌توان پارامترهای موثر بر خواص نوری فرش را در ادامه به صورت جدول ۱ دسته‌بندی کرد و هریک را مورد بررسی بیش‌تر قرار داد.

۳-۴- پاختوردگی^۱ و تاثیر آن بر خواص نوری فرش

پاختوردگی فرش که ناشی از تردد و فشار مکرر روی سطح فرش است، باعث تغییر ساختار پرها و ایجاد ناهمگونی در ظاهر فرش می‌شود. این تغییرات ساختاری در نهایت به تغییر در بازتاب طیفی، کاهش یکنواختی نور و تغییر رنگ ظاهری منجر می‌شود. مطالعات نشان داده است که اندازه‌گیری شاخص‌های بازتاب سطح فرش پس از دوره استفاده به طور قابل‌توجهی می‌تواند سطح واقعی پاختوردگی را آشکار کند. تغییرات حاصله از پاختوردگی به راحتی قابل اندازه‌گیری هستند و می‌توان از آن‌ها برای تشخیص دقیق میزان فرسایش استفاده کرد. کاربرد این اندازه‌گیری‌ها می‌تواند در استفاده صنعتی جهت کنترل کیفیت و نظارت بر پوشش فرش در اماکن پر تردد مانند هتل‌ها یا هواپیماها، ارزیابی دوام و دوره عمر فرش جهت بررسی زود هنگام تغییرات بصری، نوری و همچنین کاربرد برای مدل‌سازی تاثیر ساختار نخ و تراکم بر یکنواختی نوری عنوان شود. بررسی رنگ فرش‌ها دارای پاختوردگی نشان داد که پاختوردگی مکانیکی پرها منجر به تغییر رنگ فرش در نگاه مخاطب می‌شود؛ به طوری که روشنایی (L^*) افزایش و خلوص رنگ (C^*) کاهش می‌یابد. مطالعات روی ارتباط میان ساختار فیزیکی فرش (مثل ارتفاع پرز، تراکم، نوع پرز، و روشنایی ظاهری نشان داد که پس از پاختوردگی، افزایش تعداد نخ‌های خوابیده بر سطح باعث کاهش روشنایی (L^*) و درخشندگی کلی فرش می‌شود. در این راستا، مشخص شد که ساختار پرها صاف شده با عبور نور در زاویه‌های ناهمسان باعث ظاهر مات‌تر می‌شود. همچنین، با بررسی تاثیرات بارگذاری روی فرش، خصوصیات ساختمانی و فیزیکی از جمله پرز فرش دریافت شد که هر چه ضخامت فرش افزایش می‌یابد، مقدار برگشت‌پذیری فرش نیز بعد از بارگذاری افزایش پیدا می‌کند. فرش‌های با تراکم بالاتر، مقدار برگشت‌پذیری کم‌تری پس از بارگذاری از خود نشان دادند. تغییرات دیگر پس از بارگذاری، نشان داد که فرش‌های با پرز بلندتر، میزان برگشت‌پذیری کم‌تری دارند. نظر محققان بر

¹ Wearing

این است که فرش دارای پرز بسیار کوتاه اما متراکم تر است و از نظر کیفی مشابه پارچه مخملی عمل می کند؛ اما تغییر خمش اساسی، در بار بسیار بالاتر روی پارچه مخملی رخ می دهد (۶۹-۶۲). شکل ۲ نحوه تغییر در حالت و جهت پرز فرش را بعد از اعمال بار و به مرور زمان نشان می دهد. در اینجا، بار همان رفت و آمدها، پاخوردگی و اثاثیه ای می باشند که بر روی فرش نیرو وارد می کنند و منجر به اعمال بار روی پرزها شده و در نهایت در طول زمان، جهت آن ها را تغییر می دهند.



شکل ۲. اعمال بار روی فرش (a) فرش نو؛ (b) فرش پا خورده؛ (c) انحراف نخ پرز؛ (d) تغییر شکل نخ پرز که منجر به انحراف و فشردگی نخ شده است (۱۷).

Figure 2. Application of load a) New carpet; b) Worn carpet; c) pile deflection; d) pile deformation causing jamming (17).

اثرات پاخوردگی را می توان با بافت و تفاوت رنگ به ویژه پدیده هایی مانند صاف شدن پرزها، کاهش شفافیت ریشه نخ، سایه، کثیف شدن و از دست دادن رنگ نیز مشخص کرد. به عنوان مثال، درجه کثیفی ظاهری به خواص نوری لیف و همچنین به ساختار نخ و پارچه و رنگ آن بستگی دارد. توانایی مقاومت در برابر این تغییرات بین فرش ها به دلیل تعداد زیاد متغیرها متفاوت است. از این متغیرها، می توان به ترکیب الیاف، مسیر پردازش نخ، ساختار فرش، مورفولوژی ریشه نخ و ابعاد پرز اشاره کرد (۶۴). تغییر در درخشندگی ناشی از سایش که ویژگی عملکردی مهمی است در حال حاضر به صورت ذهنی، اغلب به کمک کارتهای مرجع خاکستری ارزیابی می شود (۷۰). به طور کلی، پاخوردگی باعث صاف شدن پرزها می شود که منجر به افزایش بازتاب خواهد شد (۴۰). جدول ۱ نشان دهنده موارد موثر بر خواص نوری فرش و ویژگی های هر یک از آنهاست.

جدول ۱. برخی ویژگی های فرش و تاثیر آن ها بر خواص نوری

Table 1. Some characteristics of carpet and their effect on optical properties

Structural Characteristic	Effect on the Optical and Visual Properties of Carpets	Ref.
Fiber type (wool, acrylic, polyester, etc.)	Directly affects lightness, gloss, absorption, and light reflection. Brighter fibers reflect more light.	(5, 6)
Refractive index of fibers	A higher refractive index results in greater luster. Silk and polyester have higher refractive indices than wool	(7, 30-32)
Fiber cross-sectional shape	Triangular or multilobal fibers reflect light in a more concentrated manner, resulting in increased luster. In addition, different cross-sectional shapes exhibit different reflection characteristics	(19,29)
Knot type (Farsi knot, Turkish knot, etc.)	Knot type affects the angle of the pile and the way light is refracted. Different knot types result in differences in visual appearance	(33)
Pile height	Longer pile results in greater light scattering and a more matte appearance, whereas shorter pile results in greater reflection and a glossier appearance	(7, 9)
Knot density (number of pile yarns per unit area)	Higher pile density results in greater optical uniformity; however, if the pile is irregularly distributed, it can lead to visual non-uniformity. Higher density also produces a more uniform surface and,	(9, 11, 12, 24-26)

	consequently, more uniform light reflection	
Pile orientation	Unidirectional pile orientation causes a dual shade effect, resulting in different visual appearances of the carpet when viewed from different directions	(7, 8)
Surface roughness of fibers and yarns	Greater surface roughness results in increased light scattering, which reduces luster and enhances the matte appearance	(9, 11, 18)
Background color and pile color	Color contrast between the background and pile colors enhances the visual effect and influences the spectral absorption and reflection of light	(1-3, 7, 43, 53-61)
Chemical substances and dyes	The use of dyes and chemical treatments can alter the light reflection characteristics of carpets. Dyes modify the angle of light reflection by forming specific surface layers. For example, blue and green colors exhibit the greatest difference in reflectance between the longitudinal and cross-sectional directions at greater color depths. In addition, different finishing treatments can significantly influence the apparent color and visual appearance of textile materials.	(5, 6, 17)
Wearing	It results in a reduction in overall reflectance and an increase in heterogeneous light scattering, leading to a decrease in the reflectance coefficient and consequently affecting the apparent color of the carpet.	(62-69)

۴- مدل سازی خواص نوری فرش

جهت بررسی رفتار نوری منسوجات در شرایط مختلف، مدل های مختلفی از سوی محققین ارائه شده است (۷۱). مدل سازی دقیق ظاهر بصری منسوجات نیازمند تلفیق تئوری های فیزیکی با داده های تجربی است. تحلیل داده های تجربی و مقایسه با پیش بینی مدل ها، نشان دهنده توانایی بالا در طراحی سیستم های هوشمند ارزیابی ظاهر فرش است.

منسوجات پرزدار مانند فرش، به دلیل بافت پیچیده ای که دارند مسیر عبور نور را بسیار پیچیده می کنند. مدل های ساده مانند قانون بیر-لامبرت^۱ که تنها در محیط های نازک نوری و بدون پراکندگی و انتشار کاربرد دارند در حوزه فرش پاسخگو نیستند و باید به سراغ مدل های پیشرفته تر رفت. به طور خاص، تئوری می^۲ به عنوان ابزاری برای تحلیل پراکندگی نور در محیط های دارای ذرات کوچک (مانند رنگدانه ها) معرفی می شود (۸۰-۷۲، ۷۰، ۶۴، ۶۳، ۵۰، ۱۹). سیر تکامل مدل سازی خواص نوری فرش از رویکردهای ساده فیزیکی به سیستم های هوشمند مبتنی بر تصویر و یادگیری ماشین گسترش یافته است. اکنون صنعت نساجی و فرش از ترکیب تحلیل نوری، پردازش داده و هوش مصنوعی برای کنترل کیفیت، طراحی مجازی و پیش بینی ظاهر محصول نهایی بهره می گیرد. این پیشرفت ها نقش کلیدی در دیجیتالی سازی ارزیابی بصری فرش داشته اند. در ادامه مروری بر مدل سازی خواص نوری فرش از نظریه های کلاسیک تا الگوریتم های هوشمند آورده شده است. با این حال، همان طور که پیش تر هم اشاره شد هنوز مدل سازی دقیقی برای خواص نوری و ظاهری فرش انجام نگرفته است و مدلی که بتواند همه جوانب خواص نوری را در این منسوج سه بعدی در نظر بگیرد، یک نیاز پژوهشی محسوب می شود.

۴-۱- نظریه های فیزیکی کلاسیک

نخستین تلاش ها برای مدل سازی خواص نوری منسوجات و به ویژه سطوحی مانند فرش، بر پایه نظریه جذب و بازتاب نور کیوبلکا-مانک^۳ انجام شد. این مدل با استفاده از ضرایب جذب و انتشار، ظاهر رنگ مواد نیمه شفاف را پیش بینی می کرد و پایه ای برای مدل سازی رنگ در منسوجات شد. در این دوره، فرضیات ساده ای مانند سطح صاف و نازک بودن ماده حاکم بود و پیچیدگی ساختار پرزدار فرش ها به سختی قابل مدل سازی بود. مدل نیمه تجربی کیوبلکا-مانک برای مواد نیمه شفاف مانند پارچه ها یا کاغذ مناسب است. رابطه میان جذب و انتشار، که در این مدل ارائه می شود (معادله ۱)، امکان تعیین ویژگی رنگی

¹ Beer-Lambert

² Mie theory

³ Kubelka-Munk

مقاله پذیرفته شده

از روی مقادیر بازتابی را فراهم می‌کند. کاربرد اصلی آن در رنگرزی و کنترل کیفیت بصری رنگ در منسوجات است. همواره یکی از ارزیابی‌های مهم در مورد نمونه‌های رنگی، اندازه‌گیری رنگ و بررسی اختلاف رنگ نمونه‌هاست (۸۱). نمونه‌های پشت پوش یکی از مهم‌ترین نمونه‌ها در بررسی‌های مربوط به فرمولاسیون رنگ هستند. روش فرمولاسیون رنگ برای آن‌ها شبیه نمونه‌های شفاف می‌باشد با این تفاوت که معادلات ریاضی پیچیده‌تری دارند.

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

معادله ۱:

این معادله نشان می‌دهد که میزان بازتاب یک نمونه پشت‌پوش به نسبت ضریب جذب (K) بر ضریب انتشار (S) و نه به مقدار مطلق هر یک از آن‌ها بستگی دارد. علاوه بر این، هر کجا که مقایسه رنگ منسوجات مشابه در برابر کاهش یا افزایش غلظت رنگزا نیاز باشد، K/S می‌تواند یک معیار مهم برای اندازه‌گیری عمق رنگی آن‌ها باشد (۷۷، ۵۰). در بررسی‌های طیفی، تفاوت K/S در طول موج‌های خاص (λ_{max}) برای تحلیل تغییرات عمق رنگ بین نمونه‌ها استفاده می‌شود. این شاخص همچنین برای ارزیابی یکنواختی رنگ و کارایی رنگرزی در فرش‌های پشمی به کار می‌رود.

در یک مطالعه تحقیقاتی، برنارد و همکاران، رنگ مقطع عرضی و رنگ سطح جانبی نخ‌های رنگرزی شده با داشتن رنگ‌های تیره تا روشن را بررسی کردند. آنان در کار خود از نسبت ضریب جذب به انتشار کیوبلکا-مانک (K/S) استفاده کردند. فرضیات آن‌ها بر یکی بودن غلظت و مشابهت رنگ‌های استفاده شده منجر به ثابت در نظر گرفتن ضریب جذب برای مقطع عرضی و سطح جانبی نخ شد که با معرفی $(K/S)_{MCS}^1$ برای مقطع عرضی نخ و $(K/S)_{MYS}^2$ برای سطح جانبی نخ، همراه بود. بدین ترتیب، رابطه زیر برقرار است:

$$\frac{\left(\frac{K}{S}\right)_{MCS}}{\left(\frac{K}{S}\right)_{MYS}} = \frac{S_{MYS}}{S_{MCS}} = \frac{\text{The diffusion coefficient of the lateral surface of fiber}}{\text{The diffusion coefficient of the cross section of fiber}}$$

معادله ۲:

در ادامه با توجه به این نکته که ضریب انتشار مقطع عرضی و سطح جانبی ثابت است، از این رو، نسبت این دو نیز ثابت در نظر گرفته شد و معادله زیر به دست آمد:

$$\frac{\left(\frac{K}{S}\right)_{MCS}}{\left(\frac{K}{S}\right)_{MYS}} = \text{Constant } t(\infty)$$

معادله ۳:

در بررسی‌های بیش‌تر توسط برنارد و همکارانش، آن‌ها دریافتند که نمونه‌های تیره در مقایسه با نمونه‌های روشن‌تر، نتایج متفاوتی را به علت تیره بودن ارائه می‌دهند اما برای نمونه‌های روشن‌تر، نتایج مشابهی با یکدیگر به دست آمد. در این راستا، با توجه به نتایج به دست آمده آنان، برای به دست آوردن K/S سطح مقطع نخ‌ها، با فراهم بودن اطلاعات مربوط به مقادیر ثابت و بازتاب سطح جانبی $(K/S)_{MYS}$ ، رابطه زیر را پیشنهاد دادند (۷۵):

$$\left(\frac{K}{S}\right)_{MCS} = \infty \times \left(\frac{K}{S}\right)_{MYS}$$

معادله ۴:

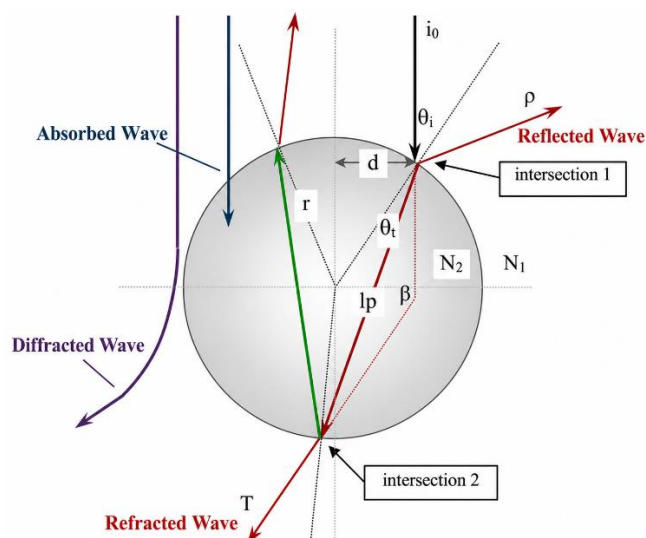
به جهت شناسایی رنگ‌های موجود به کار رفته در یک نمونه قالی عمواغلی، از مقادیر اندازه‌گیری شده در محدوده مرئی و پس از سه بار اندازه‌گیری، به صورت میانگین گزارش شد. نمونه‌های مورد آزمون، از جهت طولی و در راستای خاب فرش، از

¹ K/S defined for Kubelka-Munk coefficients. M, stands for the resulting mixture; CS, defined for cross-sectional.
² K/S defined for Kubelka-Munk coefficients. M, stands for the resulting mixture; YS, defined for yarn side.

مکان‌های مختلف فرش و به صورت تصادفی انتخاب شدند. مقدار جذب طیفی با استفاده از معادله کیوبلکا-مانک گزارش شد. سه فام از رنگ قرمز استخراج شد. اختلاف رنگ نیز براساس معادله اختلاف رنگ CIE به دست آمد. ارائه نسخه رنگی برای رنگ همانندی با عکاسی از نمونه‌ها این کار را سهل‌تر کرد. قبل از گزارش نسخه نهایی عملیات کهنه‌نما کردن روی نخ رنگری شده با استفاده از تابش فرابنفش انجام گرفت تا نسخه همانندی ارائه شده به نمونه واقعی و قدیمی، نزدیک‌تر باشد (۸۲).

۴-۲- کاربرد مدل‌های هندسی

در دهه‌های بعد، تلاش‌هایی برای مدل‌سازی دقیق‌تر ظاهر منسوجات با استفاده از مدل‌های هندسی بازتاب نور صورت گرفت. این مدل‌ها از مفاهیمی مانند تابع توزیع دو جهته بازتاب ($BRDF^1$) استفاده کردند تا رفتار نور در سطوح با بافت‌های پیچیده مانند نخ و پرز فرش را توصیف کنند (۸۳). مدل هندسی توسط آلن و گلدفینگر در اوایل دهه ۱۹۷۰ میلادی پیشنهاد شد. مدل پیشنهادی، مشابهت‌هایی با مدل کیوبلکا-مانک نیز دارد اما با در نظر گرفتن رفتار نوری و هندسی مواد، ارائه بهتری خواهد داشت. در این دوره، در زمینه اندازه‌گیری ظاهر فرش، مطالعات متعددی برای ارزیابی برخورد نور به سطح و مطالعه خواص انعکاسی آن شده است که به سوی استفاده از مدل هندسی برای دقت بیشتر در تعیین خواص متفاوت رنگی و انعکاسی در مقاطع مختلف الیاف و پارچه پیش رفته است. مدل مذکور، منسوج مورد نظر را تشکیل شده از گروهی از لایه‌های الیاف استوانه‌ای جداگانه، با قطر برابر، ساختار و رنگ ایزوتروپیک در نظر می‌گیرد. تغییر در منسوجات، مانند اعمال یک عملیات تکمیل نیز، می‌تواند روی ظاهر رنگ منسوجات اثرگذار باشد. نظریه‌های پیشین، نقص‌هایی مانند در نظر نگرفتن اثر قطر الیاف را داشتند که می‌تواند روی رنگ ظاهری منسوج تاثیر به سزایی داشته باشد. این مورد در نظریه کیوبلکا-مانک نیز در نظر گرفته نشده است، لذا مدل هندسی توسط محققین برای ارزیابی‌های دقیق‌تر پیشنهاد شده است. همچنین، به علت تغییرات در ضریب شکست منسوجات مدل هندسی می‌تواند در بررسی بهتر ظاهر رنگ الیاف تکمیل شده موثر باشد. از یافته‌های محققان می‌توان نتیجه‌گیری کرد که مدل هندسی برای منسوجات با عمق رنگ تیره‌تر، مناسب‌تر می‌باشد. همچنین مدل هندسی با در نظر گرفتن ضریب شکست محیط‌های مختلف می‌تواند ارائه بهتری از رفتار انعکاسی منسوجات در حالت مرطوب هستند، داشته باشد (۸۴-۸۶، ۱، ۲). نور منعکس شده از نخ و پارچه، بر اساس انعکاس سطحی، جذب و انتقال و با در نظر گرفتن ضرایب شکست محیط و لیف در زاویه‌های مختلف در مدل هندسی (شکل ۳) می‌تواند مورد تجزیه و تحلیل بهتری قرار گیرد. در شکل ۳، شعاع i_0 ، پرتو تابیده شده به ذره، θ_i ، زاویه نور تابیده شده با سطح، d ، فاصله نقطه برخورد از عمود به زاویه صفر درجه، ρ ، پرتو در جهت بالا و T ، پرتویی که در جهت رو به پایین است، l_p طول مسیر نوری که پیش از شکست طی شده است، N_1 ، ضریب شکست محیط و N_2 ضریب شکست ذره می‌باشند و همچنین، θ_t و β زوایای داخلی هستند. به عنوان مثال، امکان پیشگویی مقدار انعکاس الیاف اکریلیک در مقاطع عرضی و طولی و همچنین، تخمین زدن برای تغییر انعکاس با تغییر ضخامت و ظرافت الیاف با این روش وجود دارد. به علت محاسبات پیشرفته و پیچیده این مدل، امروزه از رایانه و برنامه‌های کاربردی آن جهت محاسبات مدل هندسی استفاده می‌شود (۸۷، ۸۶).



شکل ۳. تصویر شماتیک از برهمکنش تابش نور فرودی با یک ذره منفرد (۸۷).

Figure 4. Schematic illustration of the interaction of incident light radiation with a single particle (87).

مدل چهار پرتویی شامل دو پرتو به سمت پایین و دو پرتو به سمت بالا است. مدل چهار پرتویی نسبت به مدل کیوبلکا-مانک واقعی تر است. این مدل به دلیل وجود ضرایب بیش تر پیچیده تر نیز می باشد؛ اما به کمک رایانه می توان محاسبات مربوط به آن را به راحتی انجام داد. در ادامه، مدل چند پرتویی قرار دارد. اساس کار مدل چند پرتویی که مدل های قبلی یعنی قانون بیر، دو پرتوی (قانون کیوبلکا-مانک) و چهار پرتوی همگی زیرمجموعه آن هستند، بر طبق تقسیم فضا به مناطق مختلف می باشد. در این مدل، نور تابیده شده و منعکس شده هرکدام در زوایای خاصی در این فضای بخش بندی شده قابل توصیف هستند. این مدل آن چنان کاربردی نمی باشد زیرا ضرایب بی شماری از جذب و انتشار، در آن را باید محاسبه کرد (۸۸، ۸۹).

در یک کار تحقیقاتی، شبیه سازی مونت کارلو و تئوری پراکندگی می، برای تخمین طیف انعکاسی پارچه پوشیده شده با نانو رنگدانه های دی اکسید تیتانیوم با قطرها و غلظت های مختلف به کار برده شد. در این کار از تکنیک پردازش تصویر که در ادامه در ارتباط با آن بیش تر بحث خواهد شد، استفاده شده است و داده های تجربی برای ارزیابی عملکرد شبیه سازی مونت کارلو جمع آوری شد. انعکاس پارچه بر اساس شبیه سازی مونت کارلو با روش اختلاط جزئی^۱ و تئوری می محاسبه شد. با توجه به نتایج تجربی و شبیه سازی، انعکاس نمونه های پوشش داده شده با افزایش غلظت و تعداد نانوذرات دی اکسید تیتانیوم افزایش یافت. بین نتایج شبیه سازی مونت کارلو و نتایج تجربی تطابق خوبی وجود داشت. نتایج حاکی از آن بود که عملکرد روش مونت کارلو و می، از روش مونت کارلو و روش اختلاط بخشی بهتر است (۷۴).

۴-۳- مدل سازی آماری و تحلیل تصویر

تحول مهم دیگر، استفاده از پردازش تصویر دیجیتال برای تخمین خواص ظاهری و نوری فرش ها بود. ویژگی هایی مانند درخشندگی، یکنواختی، پراکندگی رنگ از روی تصاویر سطح فرش تحلیل شدند. تجزیه و تحلیل تصویر تکنیکی است که به استخراج اندازه گیری های مفید، داده ها یا سایر اطلاعات از یک تصویر مربوط می شود. نتایج تجزیه و تحلیل محتوای تصویر معمولاً به صورت عددی یا به صورت توضیحات کمی از محتوای تصویر بیان می شود. اما تصویر اصلی همیشه در شکل مناسبی برای تجزیه و تحلیل قرار ندارد. اغلب باید برای بهبود ظاهر آن، آماده شود یا به شکلی تبدیل شود که برای تجزیه و تحلیل انسانی یا ابزاری مناسب تر باشد. چنین رویه های بهبود یا تبدیلی را پردازش تصویر می نامند (۴۰). یکی از مهم ترین و جذاب ترین حوزه های تحقیقاتی، پردازش تصویر، بهبود و ارزیابی رایانه ای است. بنا به ضرورت های موجود، در بخش های مختلف ارزیابی فرش به خصوص پاختورده گی نیز از تکنیک پردازش تصویر استفاده شده است (۲۳، ۱۶). در این تکنیک، ظاهر سطحی نمونه های فرش با روش های تصویربرداری با استفاده از دوربین دیجیتال به صورت بصری بررسی می شود. دامنه وسیعی از تکنیک تحلیل تصاویر برای بررسی ویژگی های ظاهری فرش وجود دارد. پارامترهای حاصل از تصاویر دیجیتالی شده از نمونه های فرش را می توان با استفاده از یک کامپیوتر با الگوریتم های مناسب ارزیابی کرد. پارامترهای تصویر می توانند تغییر ظاهر فرش را مشخص کنند (۱۷). علاوه بر این، معمولاً چندین رنگ در تصاویر رنگی دقیق فرش ها استفاده می شود. نمایش، ذخیره، انتقال و پردازش این تصاویر دشوار است. در نتیجه، کمی سازی رنگ اغلب به عنوان یک مرحله پیش پردازش برای تصاویر مختلف استفاده می شود. بخش بندی، فشردگی، شناسایی طرح، تجزیه و تحلیل بافت و رنگ و بازایی بر اساس محتوا همگی از کاربردهای کمی سازی رنگ در پردازش تصویر هستند (۲۳).

در مطالعه ای، کاربرد تحلیل تصویر برای ارزیابی تغییر ظاهر در فرش ها با استفاده از خصوصیات پرز بررسی شد، زیرا ویژگی های دسته پرزها مانند هندسه، جهت گیری و آرایش فضایی از عوامل کلیدی در ارزیابی بصری و بنابراین در تحلیل تصویری ظاهر فرش هستند. تأکید این مقالات بر جنبه های عملی است. پارامترهای مختلفی که برای توصیف کامل ویژگی های بافت فرش های نو و فرسوده ضروری تلقی می شوند، مورد بحث قرار گرفته اند. پارامترهای بافت شامل پرز، زبری، جهت گیری، انسجام، یکنواختی اندازه پرز و تراکم نقاط است. اهمیت نسبی این پارامترها در توصیف بافت اولیه فرش و تغییرات بافت ناشی از سایش به نوع فرش مورد اندازه گیری بستگی دارد. به گفته محققان، کاربردهای بالقوه فناوری تحلیل

¹ partitive mixing method

مقاله پذیرفته شده

تصویر در کنترل کیفیت در تولید فرش اکنون با همکاری بخش صنعتی نیز در حال بررسی است. روش‌های فعلی ارزیابی ظاهر برای اهداف درجه‌بندی فرش ماشینی مبتنی بر ارزیابی ذهنی هستند. محققان نشان دادند که ارتباط دادن درجه‌بندی‌های ذهنی به نتایج عینی، زمانی که انواع مختلف فرش ماشینی در نظر گرفته می‌شوند، دشوار است. علاوه بر این، هنگام تفسیر داده‌های اندازه‌گیری شده بصری، باید هم به رنگ پرز و هم به ساختار آن توجه شود. در نتیجه، تدوین قوانین کلی کافی که بتوان بر اساس آن‌ها یک سیستم عینی برای درجه‌بندی خودکار فرش‌ها ایجاد کرد، کاری بسیار چالش‌برانگیزتر از کاربرد کنترل کیفیت در تولید فرش است. گروهی از تکنیک‌های پیش‌پردازش تصویر، مانند فیلتر کردن به عنوان ابزاری مؤثر برای استخراج پرزها از پس‌زمینه تصویر نشان داده شد. همچنین، تکنیک‌های شکل، جهت‌گیری و تحلیل الگوهای فضایی برای اندازه‌گیری جامع ویژگی‌های پرز استفاده شدند. هندسه‌ی پرز، که با توصیف‌گرهای اندازه و شکل مشخص می‌شود، می‌تواند برای تشخیص تفاوت‌های بافتی بین فرش‌هایی با سطوح سایش متفاوت یا ساختارهای مختلف مورد استفاده قرار گیرد. تغییرات در جهت‌گیری پرز به دلیل سایش را می‌توان از نقشه‌های جهت‌گیری و منحنی‌های پراکندگی شناسایی کرد. چیدمان فضایی پرز را می‌توان با شاخص تجمع و تراکم جمعیت پرز بر اساس نقشه مرکز ثقل^۱ تعیین کرد. آزمایش‌ها روی نمونه‌های فرش، اعتبار این تکنیک‌ها را برای ارزیابی حفظ ظاهر فرش تأیید می‌کند. این روش‌ها را می‌توان به راحتی برای ارزیابی ظاهر پارچه‌های مسطح و اندازه‌گیری ویژگی‌های منافذ در پارچه‌های بی‌بافت گسترش داد (۷۹، ۷۰). همچنین محققان شبکه‌های عصبی و تجزیه و تحلیل تصویر را به عنوان ابزارهایی برای ارزیابی ظاهری فرش به ویژه بر روی فرش‌های پرزدار، دانسته‌اند (۸۰). در یکی از تکنیک‌های پردازش تصویر برای اندازه‌گیری تغییر ظاهر فرش، عملیات مختلف پردازش تصویر به سه دسته به ترتیب زیر تقسیم‌بندی شد:

الف) عملیات نقطه‌ای^۲: این عملیات تنها با استفاده از اطلاعات مربوط به هر پیکسل بر روی پیکسل‌های جداگانه به کار می‌رود؛

ب) عملیات همسایگی^۳: این عملیات مقدار یک پیکسل را نسبت به پیکسل‌های همسایه‌اش تنظیم می‌کند؛

ج) عملیات سراسری^۴: این عملیات مقدار تمام پیکسل‌های تصویر را تنظیم می‌کند (۱۷).

رویکرد رایج در پردازش تصویر دیجیتال، شناسایی پارامترهایی است که به طور مداوم بافت‌های متفاوت فرش را به دلیل سطوح مختلف پاختورده‌گی متمایز می‌کنند. در ادامه کارهای تحقیقاتی، محققان پارامترهای مختلفی از فرش (مانند تعیین پرز، هندسه پرز، قرارگیری پرز، تناوب، بافت، جهت‌گیری پرز، و زبری) را مورد بررسی قرار دادند و از روش‌های مختلف تحلیل تصویر (مانند تغییرات شدت موضعی، تجزیه و تحلیل شکل تصویر، یکنواختی دسته‌یالیاف، اندازه‌گیری فاصله، چگالی فضایی، تبدیل فوری دو بعدی، کوواریانس تصویر، و غیره) برای تجزیه و تحلیل ظاهر نمونه‌های فرش استفاده کرده‌اند (۱۷).

جزئیات تکنیک‌های جدید بهبود تصویر برای ارزیابی هندسه‌ی گره‌ها و تغییرات ظاهری همزمان در فرش‌های نو و پاختورده‌ی مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از الگوریتم‌های بهبودیافته و هندسه‌ی گره‌های پیشرفته‌تر، فرش‌های پرزدار ساکسونی^۵ از نخ‌های نایلون و پلی‌استر می‌توانند به طور گسترده از نظر بافت و تغییرات ظاهری مشخص شوند. الگوریتم‌های جدید توسعه‌یافته نشان دادند که چگونه توزیع اندازه گره، تعداد گره‌ها، یکنواختی توزیع فضایی گره، و نسبت ابعاد (ضریب شکل) گره‌ها را می‌توان اندازه‌گیری کرد. تجزیه و تحلیل آماری تأیید کرد که سطوح سایش (پاختورده‌گی) و تغییر ظاهر بصری آن‌ها در فرش را می‌توان با این تکنیک‌های جدید جدا و به درستی گروه‌بندی کرد. برخی از محدودیت‌های این تکنیک‌ها و سایر تکنیک‌های تحلیل تصویر حساس به بافت نیز بررسی گردید. بررسی‌ها نشان داد که تجزیه و تحلیل تصویر قادر است اندازه‌گیری‌های دقیق و قابل اعتمادی از ویژگی‌های بافتی ساختمان و ظاهر فرش ارائه دهد (۴۰).

محققان سعی کردند تا اجزای بافت را در فرش‌های پشمی به منظور ارزیابی اثرات سایشی بر بافت فرش توسط عملیات پردازش تصویر مورد مطالعه قرار دهند. بافت ممکن است با توجه به ویژگی‌های کلی یک تصویر یا واحدهای تکراری تشکیل دهنده آن تعریف شود. به عبارتی بافت به عنوان هر الگوی فضایی تکرارشونده از شدت سطح خاکستری نمونه‌برداری شده

^۱ The gravity center map

^۲ Point operations

^۳ Neighbourhood operations

^۴ Global operations

^۵ سبک خاصی از فرش با پرز حلقه‌ای برش خورده است. با توجه به پرز بلند و نوع پیچیده شدن پرز در پایه، این نوع فرش نرمی و لطافت زیادی زیر پا دارد.

تعریف می‌شود. محققان بررسی را به ویژگی‌های بافتی محدود کردند که منعکس کننده ویژگی‌های فیزیکی مجموعه دسته الیاف فرش هستند. محققان بحث خود را به جزء سایش تخریب فرش محدود کردند و کشی، لکه شدن، تخریب نوری و غیره را نادیده گرفتند. فرش‌ها معمولاً ساختارهای برش خورده یا حلقه‌ای دارند، با نخ‌هایی که به صورت حلقه‌های برجسته یا حلقه‌های برآمده بریده شده‌اند. نمونه‌های مورد بررسی آنان، شامل چهار نوع فرش پشمی دولایه با بافت‌های مختلف بود که به نمونه‌های پاخورده کنترل، سبک و سنگین تقسیم می‌شدند. تصاویر ویدئویی با بزرگنمایی‌های متعدد ضبط شدند. فایل‌های تصویری با ۲۵۶ سطح خاکستری با استفاده از برابری هیستوگرام به ۳۲ سطح تبدیل شدند. ویژگی‌های بافت، با محاسبه تفاوت‌های سطح خاکستری و آمار سطح خاکستری مرتبه دوم ارزیابی شدند. نتایج کلی حاصله مشخص می‌کند که ویژگی‌های متناوب تصاویر فرش، شاخص‌های قوی برای تعریف بافت هستند. همچنین، روند کلی به عنوان تابعی از تغییرات در سطوح خاکستری ناشی از سایش نشان می‌دهد که کنتراست، درخشندگی و یکپارچگی واحد تکراری ممکن است به خوبی تفاوت‌های عمده بین فرش‌های فرسوده و پاخورده را نشان دهد (۸۹). در مجموع، بررسی‌ها نشان داده‌اند که پردازش تصویر قادر است اندازه‌گیری‌های عینی و قابل اعتمادی از ویژگی‌های بافت ساختاری و ظاهر فرش‌ها ارائه دهد (۹۰، ۴۰).

از آنجایی که ظاهر بافت فرش ذاتاً متغیر است، باید دقت بیشتری به روش‌های نمونه‌برداری از جمله تعداد بیشتری از نمونه‌های فرش و تصاویر تکراری، روش‌های استاندارد برس زدن پرزها قبل از گرفتن تصاویر و ثبات در کنترل فرآیندهایی مثل پاخورده‌گی شود (۴۰). با استفاده از تحلیل تصاویر دیجیتال، در تحلیل پوشش و نقش ساختار سطح فرش، نشان داده شد که با پاخورده‌گی فرش ناهمگونی‌های ظاهری بافت کاهش یافته و سطح پرزها صاف‌تر و یکپارچه‌تر می‌شود؛ اما این صاف شدن سطح اغلب باعث افزایش بازتاب نور در برخی زوایا و کاهش درخشندگی کلی می‌شود. با استفاده از روش‌هایی مانند ماتریس‌های سطح خاکستری همزمان (GLCM) دریافت شد که با افزایش پاخورده‌گی، ضریب تصادفی بودن بافت کاهش می‌یابد و الگوهای تصویری ظاهر بصری یکنواخت‌تری ایجاد می‌شود (۸۹).

به طور کلی پردازش تصویر برای فرش در دو زمینه بیشتر به کار رفته است: یکی در مطالعات مربوط به نقشه فرش شامل نقشه، عناصر و آرایه‌های به کار رفته در آن و کاهش رنگ (۹۱، ۲۳)، و دیگری در دریافت مشخصات و ارزیابی ظاهر آن. به عنوان مثال کاهش کیفیت و تغییر رنگ فرش که به مرور زمان و با برخورد نور به آن اتفاق می‌افتد، منجر به افزایش تعداد رنگ فرش نسبت به نسخه اصلی و اولیه خود می‌شود. در این مورد پردازش تصویر روشی است که می‌تواند به طور مفیدی به کاهش تعداد رنگ‌ها در فرش مذکور کمک کند تا تحلیل دقیق‌تری نسبت به نقشه و رنگ‌های به کار رفته در آن صورت بگیرد. با این وجود، هیچ پارامتر واحدی قادر به توصیف متمایز بودن ظاهر به طور کامل برای هر نوع فرشی نیست (۹۱، ۱۷).

کاربرد سنجش رایانه‌ای در اندازه‌گیری رنگ، تبدیل تصویر رنگی و رنگ، پردازش تصویر دیجیتال، کاربردهای تکنیک‌های کامپیوتری (یعنی اندازه‌گیری رنگ با استفاده از دوربین و پویش‌گر دیجیتال)، مشخص‌سازی و کالیبراسیون دوربین و پویش‌گر دیجیتال و روش‌های محاسباتی برای درک تصویر در زمینه ارزیابی‌های رایانه‌ای از سوی محققان طی دهه‌های اخیر ارائه شده است (۹۲).

کاربرد روش‌های تحلیل تصویر به ابزاری مفید برای ارزیابی کیفیت بافت فرش نیز تبدیل شده‌اند؛ به طوری که با تجزیه و تحلیل طیف‌های توان فوری تصاویر فرش‌های کنترل (پانخورده) و پاخورده نیز می‌توان مطالعات مربوط به اثر پاخورده‌گی را در این حوزه دنبال کرد (۹۳).

۴-۴- استفاده از هوش مصنوعی و یادگیری ماشین

در سال‌های اخیر، از مدل‌های یادگیری عمیق^۲ و شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN^۳) برای پیش‌بینی ظاهر فرش از روی داده‌های ساختاری (مانند تراکم گره، ارتفاع پرز و نوع نخ) و یا حتی جهت فرمولاسیون رنگ، استفاده شده است. برنامه‌های شبکه عصبی مصنوعی، رویکرد متفاوتی را برای حل مسئله نشان می‌دهند که شباهت‌های زیادی با نحوه عملکرد مغز انسان

^۱ Gray Level Co-occurrence Matrix

^۲ Deep learning

^۳ Artificial neural networks

مقاله پذیرفته شده

دارد. مغز یاد می‌گیرد که به مشکلات واکنش نشان دهد (به دست آوردن تجربه). با اصلاح سیگنال‌های اطلاعاتی دریافت شده در سیناپس‌ها (اتصالات) بین نورون‌ها، به مرور زمان ساختار مغز تغییر می‌کند تا بتواند وظایف خاصی را انجام دهد. برخلاف یک برنامه کامپیوتری معمولی، یک شبکه عصبی برای تطبیق و کسب دانش در طول زمان به منظور تکمیل یک کار خاص طراحی شده است. انواع مختلفی از شبکه‌های عصبی مصنوعی وجود دارد (۷۲).

مدل‌هایی مانند شبکه عصبی کانولوشن (CNN)^۱، نیز، با استفاده از دیتاست‌های تصویری فرش، توانسته‌اند طبقه‌بندی نوری و پیش‌بینی درخشندگی، وضوح بافت و جلوه رنگ را با دقت بالایی انجام دهند. علاوه بر این، ترکیب روش‌های سنتی فیزیکی با الگوریتم‌های یادگیری ترکیبی، مسیر نوینی برای مدل‌سازی ترکیبی فراهم کرده است.

با رشد سریع فناوری‌های یادگیری و بینایی ماشین^۲ امکان تحلیل و پیش‌بینی خواص بصری پیچیده منسوجات از جمله فرش، بدون نیاز به ابزارهای گران‌قیمت آپتیک و طیف‌سنجی فراهم شده است. در این راستا، مدل‌های هوش مصنوعی نظیر شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN)، شبکه‌های عصبی کانولوشن (CNN)، و الگوریتم‌های یادگیری عمیق برای تخمین ویژگی‌های نوری مانند درخشندگی، یکنواختی، تفاوت رنگ و جهت‌پذیری بازتاب نور استفاده شده‌اند. از کاربردهای اصلی هوش مصنوعی در تحلیل نوری فرش می‌توان به پیش‌بینی یکنواختی و درخشندگی سطح فرش با استفاده از شبکه‌های عصبی کانولوشن نام برد. در یک مطالعه توسط ژو و همکاران، از تصاویر RGB با وضوح بالا برای استخراج ویژگی‌های بافت سطحی استفاده شد. این تصاویر وارد شبکه‌های عصبی کانولوشن شدند که قادر به یادگیری الگوهای بصری مرتبط با یکنواختی و درخشندگی سطح فرش بودند. خروجی مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده به کمک گونیوفتومتر مقایسه شد و دقت بالای مدل را تایید کرد. ترکیب بین داده‌های طیفی و تصویری برای مدل‌سازی ظاهری از دیگر کاربردهای هوش مصنوعی در حوزه بررسی خواص نوری فرش است که توسط محققان در مطالعه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. ترکیب داده‌های طیف انعکاسی با ویژگی‌های سطحی باعث شد مدل‌های ترکیبی^۳ ایجاد شوند که دقت پیش‌بینی خواص ظاهری را به طور چشمگیری افزایش دادند. این رویکرد مخصوصاً برای فرش‌های با بافت‌های پیچیده و ساختار پرزدار بسیار موثر بود. همچنین، کاربرد شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی درخشندگی براساس پارامترهای فیزیکی فرش گزارش شده است. شبکه‌های عصبی مصنوعی با استفاده از داده‌هایی مثل ارتفاع پرز، تراکم گره، زاویه تابش، نوع نخ و بافت آموزش داده شدند تا درخشندگی نهایی فرش را پیش‌بینی کنند. مطابق تحقیقات محققین، این مدل‌ها قادر بودند با دقت بیش از ۹۰٪ ظاهر فرش را قبل از تولید پیش‌بینی کنند (۹۴-۹۶، ۷).

در بررسی دو روش خودکار برای تعیین جهت خاب پرز فرش^۴، در فرآیند ساخت تابلوهای نمونه‌فرش به منظور افزایش سرعت تولید و کاهش وابستگی به اپراتور انسانی از شبکه عصبی کانولوشن (CNN) استفاده شد. روش بینایی ماشین با استفاده از شبکه عصبی کانولوشن برای شبیه‌سازی روش بصری اپراتورها برای تشخیص جهت خاب پرز فرش بود. حدود هزار نمونه فرش در سبک‌های مختلف توسط یک اپراتور ماهر از پشت نمونه‌ها برچسب گذاری شدند. از هر نمونه پنج عکس به ترتیب زیر گرفته شد.

- یک عکس از پشت فرش (جهت تشخیص محور پرز^۵)
- و چهار عکس از کناره‌های فرش (برای تشخیص جهت پرز^۶).

مرحله اول، تشخیص محور پرز^۷ بود. به این ترتیب از تصویر پشت فرش استفاده شد که جهت تار و پود را تشخیص می‌دهد. معمولاً تارها موازی با محور پرز هستند به طوری که در تصویر، تارها به صورت نوارهای عمودی یا افقی مشخص‌اند. در ادامه از

¹ Convolutional Neural Network

² Computer vision

³ Multimodal models

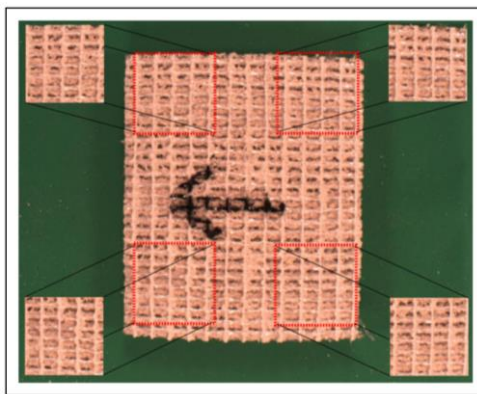
⁴ Pile direction

⁵ Pile axis

⁶ Pile direction

⁷ Pile axis orientation CNN

۱۰۸۹ تصویری که از پشت نمونه‌ها گرفته شده بود، چهار کادر ۲۲۴×۲۲۴ پیکسلی برای افزایش داده‌ها استخراج شد (مطابق شکل ۴). تقسیم داده‌ها به صورت ۷۵٪ آموزش، ۲۵٪ اعتبار سنجی و دقت در صد در صد در تشخیص محور پرز (افقی یا عمودی بودن) گزارش شد. در مرحله بعد تشخیص جهت پرز^۱، پس از تعیین محور پرز صورت گرفت. از شبکه عصبی کانولوشن (CNN) برای مشخص کردن جهت پرز استفاده گردید. دقت نهایی گزارش شده برای این ارزیابی، $93 \pm 3\%$ بود. ترکیب دو شبکه عصبی کانولوشن (CNN) برای تشخیص جهت و محور پرز روشی سریع، دقیق و موثر است. روش الکترومکانیکی ساده‌تر است اما دقت پایین‌تری به خصوص بدون کمک بصری دارد. برای فرش‌های با تراکم بالا مثل فرش‌های ساکسونی، هم انسان و هم ماشین عملکرد ضعیف‌تری دارند که راه حل پیشنهادی برای محیط‌های صنعتی، استفاده از شبکه عصبی کانولوشن (CNN) و یا ترکیب آن با حسگر مکانیکی در صورت عدم امکان تصویربرداری است. در مواقعی که عکس گرفتن از کناره‌های فرش ممکن نباشد، می‌توان از شبکه عصبی کانولوشن (CNN) برای تشخیص محور پرز و از دستگاه برای تعیین جهت آن استفاده کرد. این ترکیب به دقت تا حد ۹۰٪ می‌رسد و می‌تواند تا حدودی جایگزین اپراتور انسانی شود. (۹۷).



شکل ۴. تصویر از پشت نمونه فرش، نمایش چهار کادر برش خورده (۹۷)

Figure 4. Image from the back of the carpet sample, showing four cropped squares (97)

طبق گزارش محققان در زمینه کاهش تعداد رنگ‌های یک فرش قدیمی، تعداد رنگ‌ها از ۱۶ میلیون رنگ به ۵ رنگ کاهش یافت. از الگوریتم‌های به کار رفته در آن می‌توان به الگوریتم سیستم طراحی فرش و شبکه عصبی اشاره کرد. از مقایسه نتایج حاصله این‌گونه بر می‌آید که بهترین روش برای انجام این کار، روش الگوریتم شبکه عصبی است که یک روش کمی‌سازی می‌باشد و کاهش رنگ را برای کاربر ساده‌تر می‌کند (۹۱). یکی دیگر از تحقیقات پژوهشگران در سال‌های اخیر، استفاده از الگوریتم ژنتیک است که عملکرد بسیار قابل قبولی در حوزه رنگ، طراحی مد، پارچه و فرش داشته است. الگوریتم ژنتیک (GA)^۲ به عنوان یک روش تکاملی طبقه‌بندی می‌شود که مشابه فرآیندهای ژنتیکی طبیعی عمل می‌کند و مبتنی بر بقای نسل شایسته‌تر است. الگوریتم ژنتیک به طور گسترده برای جستجو و حل مسائل بهینه‌سازی استفاده می‌شود. تولید جمعیت اولیه با مجموعه‌ای تصادفی از کروموزوم‌ها اولین گام در GA است. نسل بعدی بر اساس بقای کروموزوم‌های شایسته‌تر تشکیل می‌شود. شایستگی هر کروموزوم توسط یک تابع شایستگی ریاضی محاسبه می‌شود. به عنوان مثال در یک کار تحقیقاتی، در ابتدا، مجموعه بزرگی از الگوهای فرش جمع‌آوری و به دو گروه طبقه‌بندی شدند. هر الگوی فرش به تعدادی از نقوش پایه تجزیه و تحلیل می‌شود. دو نوع الگوی فرش به همراه نقوش پایه آن‌ها به ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده‌اند.

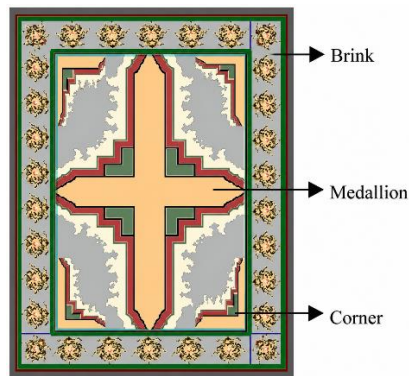


شکل ۵. نمونه‌ای از الگوی تکراری (۹۸)

Figure 5. An example of repetative pattern (98)

¹ Pile direction CNN

^۲ Genetic Algorithm (GA)



شکل ۶. نمونه‌ای از الگوی ربعی (۹۸)

Figure 6. An example of quarter pattern (98)

همان‌طور که در این شکل‌ها نشان داده شده است، نقوش حاشیه‌ای به طور متناوب در اطراف پیش‌زمینه تکرار می‌شوند و به سمت مرکز فرش هدایت می‌شوند. الگوی پیش‌زمینه را می‌توان به دو شکل تزئین کرد. پیش‌زمینه ربعی توسط نقوش ترنج و لچک تشکیل می‌شود. نقوش ترنج یک الگوی متقارن در مرکز فرش است و نقوش لچک یک الگوی مثلثی است که در هر گوشه پیش‌زمینه قرار می‌گیرد. پیش‌زمینه تکراری توسط نقوش پایه که به صورت عمودی، افقی و مورب یا با تکرار همان نقوش تراز شده‌اند، تزئین می‌شود. با استفاده از این روش، یک پایگاه داده از نقوش پایه تهیه و به صورت اعداد دودویی کدگذاری می‌شود. در کدگذاری دودویی، هر کروموزوم توسط رشته‌ای از اعداد تعریف می‌شود که نشان‌دهنده ترتیب آن در توالی کدگذاری است. هر الگو توسط یک کروموزوم ارائه می‌شود که شامل هشت ژن است. این ژن‌ها نیز به صورت دودویی کدگذاری شدند. از بیست مشاهده‌گر خواسته شد تا الگوهای تولید شده را ارزیابی کنند. از آن جایی که بسته به تغییر ژن انتخاب شده، تعداد الگوها در فضای جستجوی الگوریتم حدود ۴۴ میلیون محاسبه می‌شود، انتظار می‌رفت الگوریتم ژنتیک بهترین الگوها را بر اساس بازخورد ناظر از هر کروموزوم تولید شده جستجو کند. این شبکه با ۱۰۰ داده آزمایشی شامل انواع مختلف الگوها که توسط کاربران حرفه‌ای امتیازدهی شده‌اند، آموزش داده شد. ویژگی‌های الگو، ورودی شبکه هستند و امتیاز تابع برازش خروجی آن است. در هر اجرا، اندازه جمعیت ۱۲ و تعداد نسل به ۵ محدود شد. عملکرد «تخبه‌گرایی»^۱ یکی از بهترین کروموزوم‌ها را در هر نسل برای نسل بعدی حفظ می‌کند. از دیدگاه ناظران، میزان امتیازدهی در نسل سوم حدود ۶۰٪ و در نسل پنجم ۸۰٪ است. شکل ۷ الگوهای تولید شده پس از ۴ نسل را نشان می‌دهد. به طور کلی، روند سیستم برای همگرایی به سمت الگوهای مطلوب تقریباً رضایت‌بخش است. نتایج نشان داد که الگوریتم ژنتیک در تولید الگوهای طراحی موفق عمل کرده است (۹۸).



شکل ۷. الگوهای تولید شده پس از چهار نسل (۹۸).

Figure 7. Generated patterns after four generations (98).

مزایای این روش، در مقایسه با روش‌های تولید الگوی دستی، به شرح زیر بیان شده است:

- ایجاد الگوهای متنوع و پیش‌بینی نشده،

- امکان مقایسه و انتخاب الگوها توسط کاربران،

- کاهش زمان و هزینه صرف شده برای دستیابی به طرح جدید (۹۸).

محققان به منظور بازآفرینی رنگ‌های استفاده شده در برخی آثار قدیمی (در میراث فرهنگی) از الگوریتم ژنتیک استفاده کردند. این الگوریتم یک مدل شبکه رنگ و یک مدل پیش‌بینی هارمونی رنگ را ترکیب می‌کند. از مجموعه‌ای از ۱۰۷۴۳ نقطه داده رنگ و رتبه‌بندی رنگ برای آموزش ۱۲ مدل پیش‌بینی هارمونی رنگ استفاده شد. برخی اهداف اصلی این تحقیق مطابق زیر گزارش شده است:

1- افزایش سازگاری رنگ همانندی با میراث فرهنگی و آثار قدیمی- استخراج ویژگی‌های رنگی مختص به زمینه‌های

فرهنگی بر اساس مدل شبکه رنگ برای ساخت یک مجموعه ژن رنگی اولیه که با تصاویر رنگی سنتی همسو باشد؛

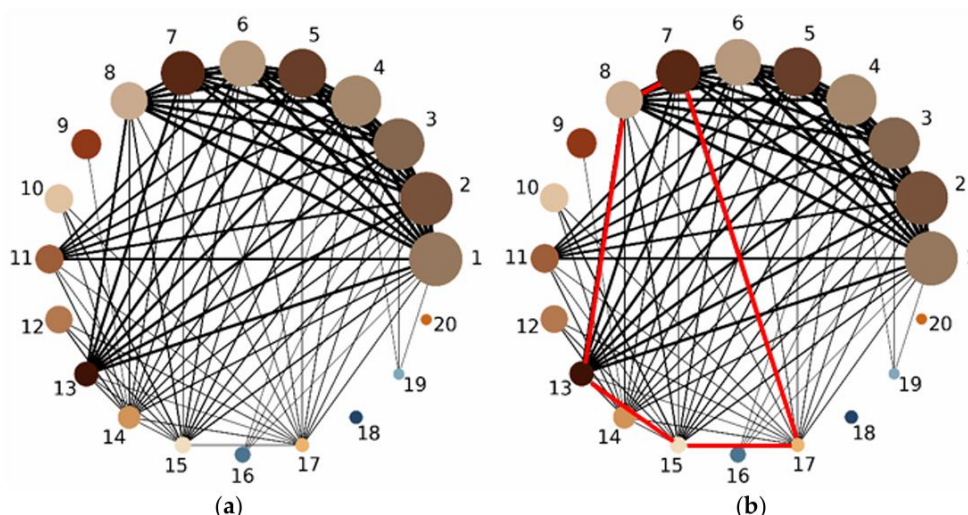
2- بهبود خودکارسازی ارزیابی رنگ - استفاده از یک مدل پیش‌بینی هارمونی رنگ برای جایگزینی نسبی ارزیابی

دستی، که در نتیجه آن کاهش خستگی کاربر و افزایش کارایی بهینه‌سازی را به همراه دارد؛

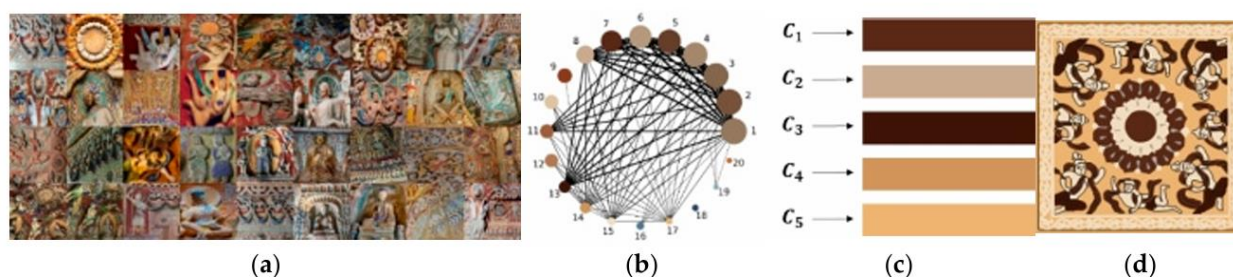
3- توسعه یک سیستم بازسازی رنگ کارآمد - ساخت یک سیستم بهینه‌سازی رنگ مبتنی بر پایتون و انجام مطالعات

موردی و تحلیل‌های مقایسه‌ای با استفاده از همانندی با منبع اصلی برای آزمون (۹۹).

یک سیستم نمونه اولیه برای بازسازی رنگ در پایتون و یک رابط کاربری طراحی شد. تجزیه و تحلیل شبکه با مقایسه با منبع اصلی تصاویر رنگی (مجسمه‌های غار یونگنگ) انجام شد و رنگ‌آمیزی تصویر مورد آزمایش قرار گرفت. روش‌های سنتی تطبیق رنگ اغلب به تجربه طراحان، دایره رنگ و قوانین کنتراست متکی بودند. اگرچه این رویکردها به سادگی قابل اجرا هستند، اما در برخورد با طرح‌های رنگی پیچیده، فاقد روش‌شناسی سیستماتیک و دقت علمی هستند. در مقابل، مدل شبکه رنگ، رویکردی مبتنی بر داده را اتخاذ می‌کند و از تکنیک‌های پردازش تصویر رایانه‌ای برای استخراج ویژگی‌های رنگ از تصاویر استفاده می‌کند و به طور خودکار رنگ‌های غالب و الگوهای همانندی آن‌ها را شناسایی می‌کند. این امر به طراحان، رنگی علمی‌تر، سیستماتیک‌تر و قابل سنجش‌تری ارائه می‌دهد. مدل ارائه شده در این تحقیق، شامل دو مرحله اصلی است: استخراج ویژگی رنگ و نمایش شبکه رنگ. در طول مرحله استخراج ویژگی رنگ، از تکنیک‌های پردازش تصویر برای استخراج ویژگی‌های کلیدی رنگ از نمونه‌ها، از جمله تعداد رنگ‌های مشخصه، مقادیر رنگ آن‌ها و نسبت هر رنگ استفاده می‌شود. در مرحله نمایش شبکه رنگ، رنگ‌های مشخصه استخراج شده به صورت گره (node) های شبکه نمایش داده می‌شوند، که در آن اندازه گره‌ها نسبت هر رنگ را نشان می‌دهد (شکل ۹). روابط بین رنگ‌ها با استفاده از خطوط اتصال نشان داده شده است که یک مدل شبکه رنگ را تشکیل می‌دهد که الگوهای تطبیق بین رنگ‌های مشخصه را تجسم می‌کند. علاوه بر این، این مدل رنگ‌های جفت شده را با خطوط اتصال ضخیم‌تر علامت‌گذاری می‌کند و به طراحان در شناسایی الگوها در ترکیبات رنگی پیچیده، الهام گرفتن و ایجاد پیشرفت‌های نوآورانه کمک می‌کند. با استفاده از ۱۲۰ مجسمه غارهای یونگنگ به عنوان منبع مرجع برای رنگ همانندی، مدل شبکه رنگ استخراج می‌شود و پنج گره، ۷، ۸، ۱۳، ۱۵ و ۱۷، به عنوان ژن‌های رنگ برای الگوریتم ژنتیک انتخاب می‌شوند. طرح رنگ همانندی با استفاده از الگوی مسطح در شکل ۱۰d به عنوان مثال نشان داده شده است (۹۹).



شکل ۸. فرآیند انتخاب ژن رنگ اولیه بر اساس مدل شبکه رنگ: (a) مدل شبکه رنگ؛ (b) انتخاب ژن های رنگ اولیه (۹۹).
Figure 8. The process of primary color gene selection based on the color network model: (a) Color network model; (b) Selection of primary color genes (99).



شکل ۹. تحلیل ژن های رنگ و طرح اولیه در مجسمه های غارهای یونگانگ: (a) مجسمه های غار یونگانگ؛ (b) مدل شبکه رنگ؛ (c) ژن های رنگ؛ (d) طرح رنگ اولیه (۹۹).

Figure 9. Analysis of color genes and primary scheme in Yungang Grottoes statues (a) Yungang Grottoes statues; (b) Color network model; (c) Color genes; (d) Primary color scheme (99).

این تحقیق، یک شبکه روابط رنگی چندلایه را برای مدل سازی دقیق روابط متقابل بین رنگ ها و زمینه های فرهنگی آنها طراحی می کند و پشتیبانی داده ای قوی برای بازسازی رنگ های میراث فرهنگی ارائه می دهد. مدل پیش بینی هارمونی رنگ پیشنهادی نقش کلیدی در فرآیند طراحی ایفا می کند. با آموزش یک مدل یادگیری عمیق روی مجموعه داده های بزرگ، محققان به طور قابل توجهی دقت و کارایی محاسباتی رنگ همانندی را افزایش دادند. نتایج تجربی نشان داد که این روش از نظر حداکثر برازش و میانگین برازش، به طور قابل توجهی از الگوریتم های ژنتیک سنتی بهتر عمل می کند. طرح های رنگی که تولید می کنند نه تنها الزامات سبک میراث فرهنگی را برآورده می کنند، بلکه هماهنگی رنگ بالا و جذابیت بصری را نیز نشان می دهد. همچنین، نتایج آزمایش ها نشان می دهد که با این روش از الگوریتم ژنتیک در مقایسه با روش های سنتی، طرح های رنگی با کیفیت بالاتر در تکرارهای کم تر تولید می شوند و ارزیابی های کاربران عموماً مطلوب است. با این وجود محققان اظهار کردند که مدل فعلی هنوز در مدیریت برخی از ترکیب های رنگی پیچیده محدودیت هایی دارد (۹۹). جدول ۲، در ادامه به مقایسه مدل های مطرح شده می پردازد.

جدول ۲: جدول مقایسه ای از مدل های مطرح شده برای تحلیل و پیش بینی خواص نوری

Table 2: Comparative table of proposed models for analyzing and predicting the optical properties

Theory/ Model type	Type of analysis	Accuracy	Advantages	Limitations	Ref.
Beer-Lambert Law	Classical analysis (light absorption)	Medium	Simple, basic, and easy to understand	Suitable only for transparent and homogeneous media	(19, 50, 63, 64, 70, 72-80)
Kubelka-Munk theory	Scattering and absorption model	Moderate to good	Suitable for semi-transparent	Numerous assumptions and	(81)

			materials; provides an appropriate simplification	low accuracy for complex structures	
Geometrical model	Reflection-path modeling	Good	Suitable for predicting reflectance from the yarn cross-section; enables detailed graphical analysis	Requires accurate cross-sectional data	(86, 87)
Mie theory	Light scattering from spherical particles	Good	Accurate for powdery materials or with spherical particles	Only applicable for specific geometry	(72-80)
Monte Carlo model	Statistical simulation of light propagation	Very good	Capable of analyzing any complex structure	Time-consuming, computationally intensive	(74)
Image processing	Data-driven/visual	Good to excellent	Real analysis of carpet appearance with photos, non-contact	Need for standard lighting	(17, 23, 40, 50, 70, 79, 80, 91, 99)
Artificial Neural Network (ANN)	Data-driven/statistical	Excellent	Ability to model complex nonlinear relationships	Need a lot of data	(7, 72, 94-96)
CNN Networks /Deep Learning	Visual/Deep Learning	Excellent	Ability to extract appearance features	Requires powerful hardware and a robust dataset	(7, 94-97)
Genetic algorithm	Visual/Data-driven/Deep Learning	Excellent	Ability to extract appearance features including color and design	Current functions still have limitations in handling some complex combinations. Requires a lot of data.	(98, 99)

۴-۵- مدل سازی خواص نوری فرش در برخی مطالعات اخیر

دیگر روش های موثر در ارزیابی منسوجات، استفاده از مدل های عددی و ترکیبی با روش های مختلف است. بنابراین، محققین با ورود به این حوزه نیز دستاوردهای خود را در قالب مدل های عددی ارائه کردند. در سال های اخیر، با گسترش روش های شبیه سازی نور در محیط های واقعی (مانند مدل تابع توزیع دو جهته بازتاب ^۱ BRDF یا مونت کارلو^۲)، بررسی اثر عوامل ساختاری بر خواص نوری فرش وارد مرحله ای دقیق و عددی شده است. همچنین، تکنیک های طیف سنجی و گونیوفتومتری این امکان را فراهم کرده اند که تفاوت های ناشی از ساختار بافت به صورت کمی ارزیابی شود. در ادامه برخی از کارهای تحقیقاتی اخیر در این زمینه آورده شده است.

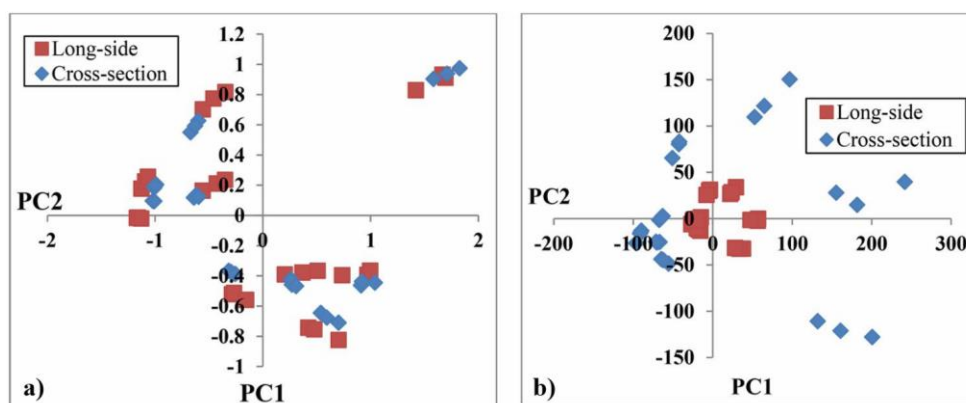
از تحلیل مؤلفه های اصلی (PCA)^۳ به عنوان ابزاری آماری برای مقایسه داده های طیفی بین نخ و فرش استفاده شده است. این تکنیک، امکان نمایش اختلاف طیف های بازتابی را در ابعاد کم تر فراهم کرده و نشان داده که بین نخ (در جهت طولی) و فرش (سطح مقطع عرضی نخ) تفاوت های بنیادی وجود دارد که مدل سازی های خطی قادر به پوشش کامل آن ها نیستند (۴۰، ۴۱). روش تحلیل مؤلفه های اصلی (PCA) یکی از بهترین و قدیمی ترین روش های تحلیل چند متغیره آماری است. این روش، به عنوان یک ابزار آماری قدرتمند برای تحلیل داده ها استفاده می شود. در این روش، الگوها در مجموعه ای از داده ها تعیین می شوند و ابعاد یک مجموعه داده بزرگ با تعداد زیادی متغیر وابسته کاهش می یابد. این کاهش ابعاد، با تبدیل مجموعه داده ها به مجموعه ای جدید از متغیرهای مستقل به عنوان مؤلفه های اصلی انجام می شود. در یک مطالعه، به جهت تعیین شباهت و رابطه بین بازتاب الیاف اکریلیک در جهت های سطح مقطع طولی و سطح مقطع عرضی آن ها از تکنیک PCA

^۱ Bidirectional Reflectance Distribution Function

^۲ Monte Carlo

^۳ Principal Component Analysis

استفاده شد. به منظور ارزیابی مقیاس پذیری داده‌های بازتاب در دو جهت، تکنیک شناخته‌شده به عنوان یک ابزار آماری برای استخراج الگوهای هر گروه پیاده‌سازی شده است. نمودار PCA دو مؤلفه اصلی اول (PC) یعنی بازتاب و تابع (K/S) در جهات مقطع عرضی و سطح مقطع طولی به ترتیب در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل‌ها نشان داده شده، تفاوت معنی‌داری بین مکان‌های نمونه‌های دو جهت وجود دارد. عدم وجود تشابه در جهات مختلف در تابع (K/S) بیش‌تر از طیف‌های بازتاب است. این تفاوت بین مکان‌های نمونه‌ها به دلیل عدم تشابه بازتاب از سطح مقاطع طولی و عرضی است. نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق، نشان داد که دقت پیش‌بینی به تعداد مؤلفه‌های اصلی بستگی دارد و همچنین، دقت پیش‌بینی با استفاده از تابع (K/S) در جهت سطح مقطع طولی کم‌تر از جهت سطح مقطع عرضی است (۳۸).



شکل ۱۰. نمودار PCA مربوط به دو مؤلفه اصلی اول (PC): (a) بازتاب؛ و (b) تابع (K/S) در جهات سطح مقاطع عرضی و طولی (۳۸).
Figure 10. The PCA plot of the first two principal components (PC) of; (a) reflectance; and (b) function function (K/S) in the cross-sectional and longitudinal side directions (38).

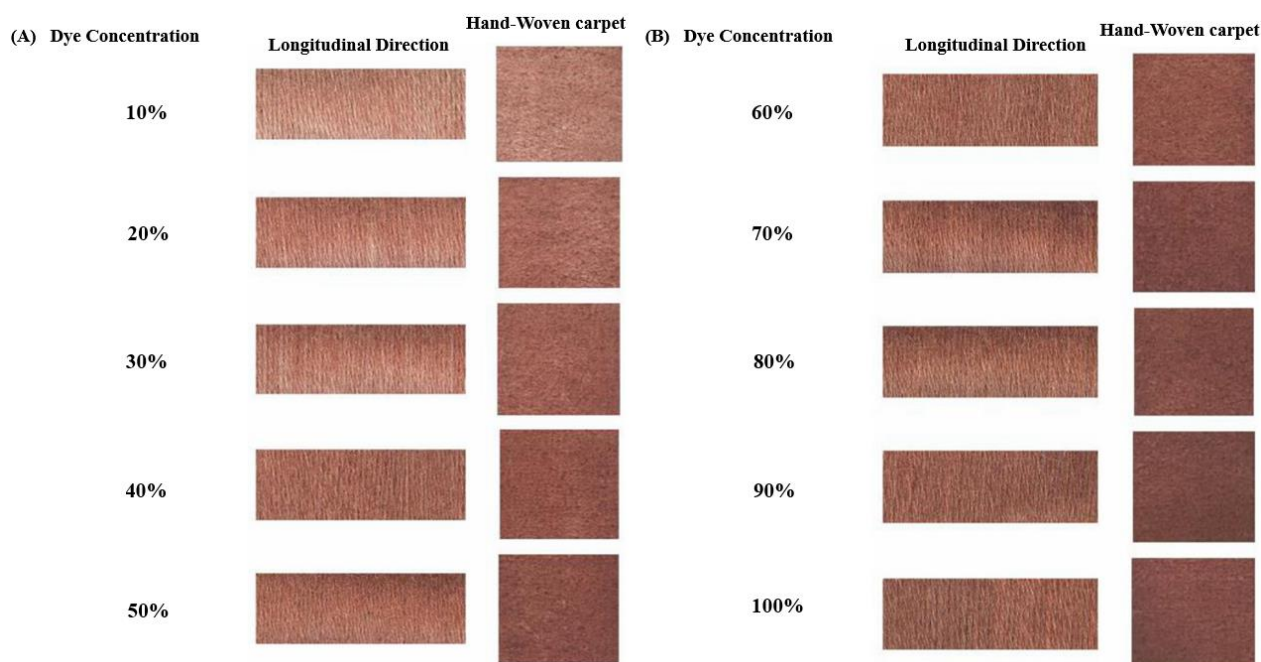
در یک کار پژوهشی دیگر، نخ‌های پشمی با رنگزای طبیعی روناس در غلظت‌های ۱۰ تا ۱۰۰ درصد رنگریزی شدند. سپس، با این نخ‌ها فرش با رجشمار ۳۰ تبریز بافته شد. از تحلیل تابع (K/S)، پارامترهای رنگی سیستم رنگ CIELab و تحلیل مولفه اصلی (PCA) برای بررسی تفاوت‌های نوری بین نخ و فرش استفاده شد. تصاویر فرش‌های دستباف و نخ‌های رنگ‌شده با غلظت ۱۰٪ تا ۱۰۰٪ رنگزای طبیعی روناس در شکل ۱۱ نشان داده شده است. محققان از مدل کیوبلکا-مانک برای محاسبه قدرت رنگی، جذب و پراکندگی نور در نمونه‌ها استفاده کردند. تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) نیز، به عنوان روش آماری برای استخراج مولفه‌های مهم از بین داده‌های بازتابی به کار رفت. نتایج PCA، حاکی از تفاوت بارز میان نخ و فرش بود. همچنین، تغییرات رنگی پیچیده، به کمک این روش ساده‌سازی و قابل درک می‌شود. این پژوهش نشان داد که برای پیش‌بینی دقیق رنگ ظاهری فرش، نمی‌توان تنها به داده‌های نوری نخ در جهت طولی تکیه کرد بلکه، باید ویژگی‌های ساختاری فرش مثل سطح، تراکم، اصطکاک مقطع عرضی نخ و بازتاب ترکیبی را در مدل‌سازی رنگ و نور در نظر گرفت. از این مطالعات روی خواص انعکاسی و رنگی و اختلاف بین جهات طولی و مقطعی الیاف این‌گونه نتیجه می‌شود که رنگ جهت مقطع عرضی نخ تیره‌تر از جهت طولی آن است. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که با افزایش تراکم الیاف، ضریب انعکاس و درخشندگی در جهت مقطع عرضی الیاف، افزایش خواهد یافت. انعکاس بیش‌تر برای نخ در جهت طولی، از روشن‌تر بودن رنگ نخ در این جهت، نمایان می‌شود و به این بدان معناست که مقدار روشنایی آن نسبت به فرش بافته شده بیش‌تر است. همچنین، عمق رنگ در جهت طولی نسبت به فرش بافته شده کم‌تر است. خلوص رنگی فرش بافته شده نسبت به نخ در جهت طولی بیش‌تر می‌باشد. که علت اصلی این تفاوت‌ها، سطح پرزدار، بازتاب پراکنده، زاویه خاب نخ و ترکیب بازتاب طولی و مقطع عرضی در فرش عنوان شده است (۱۹). پارامترهای مختلف نوری حاصل از ارزیابی در این پژوهش میان نخ و فرش بافته شده در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳. مقایسه برخی پارامترهای نوری میان نخ و فرش بافته شده (۱۹)

Table ۳. Comparison of some optical parameters between yarn and woven carpet (19)

Feature	Yarn (longitudinal direction)	Woven carpet
Reflection	More (brighter)	Less (darker)

Color Depth (K/S)	Less	More
Chroma (C*)	Less	More



شکل ۱۱. تصاویر فرش‌های دستباف و نخ‌های رنگ‌شده با غلظت ۱۰٪ تا ۱۰۰٪ رنگزای طبیعی روناس (۱۹).
Figure 11. The images of hand-woven carpets and yarns dyed at 10%–100% concentration of madder natural dye (19).

خواص نوری و ظاهری فرش با تغییر در منبع نوری نیز تغییر می‌کند. در یک مطالعه پیشرفته با استفاده از مدل‌های محاسباتی، نشان داده شد که رنگ ظاهری فرش بسته به نوع منبع نور (مانند D_{65} یا A) قابل پیش‌بینی و شبیه‌سازی است (۱۶). این شبیه‌سازی‌ها با استفاده از داده‌های طیفی نخ و مدل‌های سنجش ظاهر رنگ مانند CIECAM02 قابل انجام است. مدل CIECAM02، در نتیجه تلاش‌های محققان برای ارائه یک مدل واحد در حوزه ظاهر رنگ پس از بهبودهایی بر روی مدل CIECAM97s به دست آمد. این مدل ساده‌تر و موثرتر از مدل قبلی عمل می‌کند. اصلاح مقیاس روشنایی برای محرک‌های کاملاً سیاه و اصلاح مقیاس کروما برای رنگ‌های با کرومای کم، برخی از موارد بهبود یافته در این مدل نسبت به مدل CIECAM97s است. داده‌های ورودی برای CIECAM02 شامل مقادیر نسبی محرک‌های سه‌گانه مورد آزمون (XYZ) و نقطه سفید ($X_wY_wZ_w$)، روشنایی تطبیقی (که اغلب ۲۰٪ از روشنایی یک شیء سفید در صحنه در نظر گرفته می‌شود)، روشنایی نسبی محیط اطراف (تاریک، کم‌نور، متوسط) و تصمیمی در مورد اینکه آیا کاهش روشنایی در حال رخ دادن است یا خیر، می‌باشد (۵۲، ۱۶).

بررسی تغییرات رنگ ظاهر فرش‌های پشمی مورد استفاده برای منازل هنگام مشاهده تحت سه نوع منبع روشنایی رایج (نور روز D_{65} ، نور رشته‌ای A، نور مهتابی سفید سرد $F02$)، انجام گرفت. یک مدل آماری دقیق برای پیش‌بینی رنگ ظاهری فرش‌ها براساس ویژگی‌های فیزیکی فرش و شدت رنگ ارائه شد. برای مدل‌سازی ریاضی، از مدل‌سازی رگرسیون خطی چند متغیره یا MLR^۱، به صورت گام‌به‌گام استفاده شد که می‌توانست مقادیر L^* ، a^* و b^* فرش‌ها را تحت تعاملات مختلف با منابع روشنایی برای رنگ‌ها و سایه‌های مورد نظر پیش‌بینی کند. به این ترتیب، از چهار نمونه فرش با ساختار متفاوت (وزن نخ، ارتفاع پرز، اندازه میان دو گره و رج‌شمار) به عنوان نمونه استفاده شد. هر نوع فرش با دو رنگ (قرمز و سبز) در سه عمق رنگی روشن، متوسط و تیره رنگ‌رزی شد. داده‌های رنگی از فضای CIELab، شامل L^* ، a^* و b^* اندازه‌گیری شدند. نورپردازی با سه منبع روشنایی ذکر شده، روی نمونه‌ها و اندازه‌گیری در سه نقطه تحت هر منبع روشنایی، با دستگاه اسپکتروفتومتر انجام گرفت. تجزیه و تحلیل‌های MLR برای ارزیابی چگونگی تأثیر پارامترهای مهم بر مقادیر L^* ، a^* و b^* انجام شد. مقادیر L^* ، a^* و b^*

b^* به عنوان متغیرهای وابسته در نظر گرفته شدند. متغیرهای مستقل نیز برای تحلیل رگرسیون، ارتفاع پرز، رجشمار، فاصله میان دو گره پشت سر هم و غلظت رنگزا بودند. منابع روشنایی و رنگ‌ها به عنوان شرایط آزمایش به جای متغیرهای مستقل در نظر گرفته شدند، زیرا تعامل بین مولکول‌های رنگ و طول موج منابع روشنایی بسته به الگوی جذب انرژی رنگ‌های مربوطه متفاوت است. از این رو، مجموعه‌ای از ۱۸ معادله رگرسیون ($2 \times 3 \times 3$) برای سه متغیر وابسته (b^* و a^* و L^*) با در نظر گرفتن سه منبع روشنایی مختلف و دو رنگ مختلف توسعه داده شد. معادلات رگرسیون توسعه‌یافته حاصل از تجزیه و تحلیل‌های MLR می‌توانند مقادیر b^* و a^* و L^* را تحت یک منبع روشنایی مشخص با رنگ مشخص تخمین بزنند. برای هر مرحله متوالی از MLR، متغیرهای بی‌معنی از مدل‌ها حذف شدند تا زمانی که همه متغیرهای مستقل معنی‌دار شدند. ضرایب تعیین (R^2) مقادیر b^* و a^* و L^* نیز محاسبه شدند. مقدار R^2 با نزدیکی به ۱ به عنوان یک ارتباط قوی بین متغیرهای وابسته و مستقل مربوطه استنباط شد. در این راستا، ضرایب ویژگی‌های فرش، غلظت رنگ و عرض از مبدا برای توسعه معادلات از طریق رگرسیون خطی چندگانه تعیین شدند. از MLR، دریافت شد که بر اساس الگوی جذب و انعکاس مولکول‌های رنگ مربوطه، دو پارامتر ارتفاع پرز و رجشمار می‌توانند به طور قابل توجهی بر درک رنگ تأثیر بگذارد. تأثیر غلظت رنگ در تمام موارد قابل توجه است و در هر پیش‌بینی از نظر مقادیر کروما و روشنایی نقش مهمی دارد. در نهایت، مقادیر b^* و a^* و L^* بسته به ویژگی‌های فرش و غلظت رنگ، از نظر آماری مدل‌سازی شدند. تفاوت‌های بارز بین نوع منبع روشنایی؛ برای مثال، منبع روشنایی رشته‌ای باعث کاهش محسوس در L^* و تیرگی بیش‌تر ظاهر شد. رنگ ظاهری فرش نیز، تحت منابع روشنایی مختلف تغییر می‌کرد و حتی در صورت یکسان بودن رنگ و غلظت، این تغییر همچنان پایدار بود (۷).

مطالعات نشان می‌دهند که مدل‌های آماری ساده ولی دقیق مانند رگرسیون خطی چند متغیره (MLR) و تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)، می‌توانند به طور موفقیت‌آمیزی رنگ ظاهری فرش را در نورهای مختلف پیش‌بینی کنند. این روش، به طراحان داخلی، فروشندگان و تولیدکنندگان فرش کمک می‌کند تا تفاوت‌های نوری را درک کرده و محصولات را به درستی ارزیابی و عرضه کنند (۱۶، ۷).

۵- نتیجه‌گیری

شناخت جامع و کمی‌سازی رفتار نوری فرش، برای بهبود طراحی محصول و کنترل کیفیت ضروری است. ترکیب علم آپتیک، مدل‌سازی عددی و هوش مصنوعی، چشم‌اندازهای تازه‌ای را برای نوآوری در صنعت فرش دستباف و ماشینی فراهم می‌سازد. این مقاله، بر اساس نظریه‌های نوری، به مطالعه رفتارهای نوری فرش و هر یک از عوامل مرتبط با آن برای ارائه بهتر یک مدل جامع پرداخته شد. برای این منظور خواص ساختاری و ظاهری فرش به عنوان یک منسوج سه بعدی در نظر گرفته شد و سپس عوامل مختلف موثر و رفتار نوری آن مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج تحقیقات نشان داد که چگونه عوامل مهم ساختاری و ظاهری فرش و الیاف مانند زبری، تراکم گره، شکل سطح مقطع و دیگر عوامل همچون پاختردگی و تغییرات نوری محیط می‌توانند موجب تغییر رفتار نوری فرش‌ها شوند. تغییر در هر یک از پارمترها منجر به تغییر در انعکاس و رنگ و در نتیجه آن، تغییر خواص نوری و ظاهری فرش می‌شود. تمامی این موارد در ارائه مدل‌های جدید برای ارزیابی باید مورد بررسی دقیق‌تر قرار گیرند. مدل‌های ساده مانند بیر-لامبرت در این حوزه کارایی ندارند. مدل‌های آماری ساده ولی دقیق مانند رگرسیون خطی چند متغیره (MLR) و تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)، می‌توانند به طور موفقیت‌آمیزی رنگ ظاهری فرش را پیش‌بینی کنند. مدل‌های مختلف دیگر و برنامه‌های نوین مانند مدل مونت کارلو، تئوری می، مدل کیوبلکا-مانک، پردازش تصویر و هوش مصنوعی نیز می‌توانند به بهبود مدل‌های جدیدتر کمک کنند. این مدل‌ها می‌توانند به عنوان یک راهنمای اساسی و نظری برای مطالعه سیستماتیک رفتارهای نوری فرش‌ها ارائه شوند. در این مقاله مشخص شد پردازش تصویر می‌تواند تفسیر جامع‌تری برای بررسی خواص نوری فرش بدهد. ترکیب پردازش تصویر با هوش مصنوعی، روش‌های جدید با توانایی مدل‌سازی روابط پیچیده و قابلیت استخراج ویژگی‌های ظاهری را ارائه می‌دهد. مطالعه حاضر با مرور دستاوردهای مهم در این حوزه از تحقیقات و روش‌های مدل‌سازی، بینش بهتری به مخاطبان در ارتباط با خواص نوری و پارامترهای تأثیر گذار می‌دهد و ارائه مدل‌های نوین با کارایی بالا را آسان‌تر می‌کند. در نهایت، پیشنهاد می‌شود مطالعات آینده به ترکیب روش‌های فیزیکی، عددی و یادگیری ماشین و در نظر گرفتن همه عوامل مرتبط با ویژگی‌های فرش دستباف و ماشینی برای پیش‌بینی ظاهر و دوام نوری فرش در شرایط نزدیک به واقعی بپردازند. ادغام فناوری‌های اندازه‌گیری نوری با هوش مصنوعی و یادگیری ماشین ابزارهای قدرتمندی برای پیش‌بینی و بهینه‌سازی ظاهر نوری فرش فراهم کرده است.

منابع

1. Goldfinger, G., & Wiggs, J. H. The effect of internal scattering on the color of fabrics. *J. Appl. Polym. Sci.* 1978; 22(12), 3459-3468. <https://doi.org/10.1002/app.1978.070221210>
2. Allen, E. H., & Goldfinger, G. The color of absorbing scattering substrates. I. The color of fabrics. *J. Appl. Polym. Sci.* 1972; 16(11), 2973-2982. <https://doi.org/10.1002/app.1972.070161121>
3. Chitsazyan, A., and H. Ayatollahi. "Naturalism and Aesthetics of Iranian Carpets." *Quarterly Scientific-Research. J. Goljaam.* 2005; 16-31. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20082738.1384.1.1.11.5> [In persian].
4. Daryaei, N. The Aesthetic principles of Iranian hand-woven carpets. *J. Goljaam.* 2006; -(4-5), 25-36. SID. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20082738.1385.2.4.15.2> [In persian].
5. Hassabo, A. G., Zayed, M., Bakr, M., & Othman, H. An overview of carpet manufacture: Design, dyeing, printing and finishing. *J. Text. Color. Polym. Sci.* 2022; 19(2), 269-290. <https://doi.org/10.21608/jtcps.2022.150669.1129>
6. Akgun, M., Becerir, B., & Alpay, H. R. (2014). Effect of fabric layers on the relationship between fabric constructional parameters and percentage reflectance values of polyester fabrics. *J. Text.* 2014; (1), 267530. <https://doi.org/10.1155/2014/267530>
7. Mandal, S., Chowdhury, I. Z., Hebert, P. R., Petrova, A., Tushar, S. I., Islam, M. M., & Boorady, L. M. An Approach for Predicting the Apparent Color of Carpets under Different Illuminants. *Appl. Sci.* 2022; 13(1), 500. <https://doi.org/10.3390/app13010500>
8. Gulrajani, M. L. (Ed.). *Colour measurement: principles, advances and industrial applications.* Elsevier; 2010.
9. Whitefoot, D. Carpet types and requirements. *Advances in carpet manufacture*; 2009. 1-16.
10. Ul-Islam, S., & Butola, B. S. (Eds.). *Adv. Text. Eng. Mater.* John Wiley & Sons; 2018.
11. Goswami, K. K. (Ed.). *Advances in carpet manufacture.* Woodhead Publishing; 2017.
12. Shahriyari B, Shanbeh M. Investigation of the effect of warp density, weft density and pile yarn count on mechanical properties and structural changes of machine-made carpet. *Text. Cloth. Sci. Technol.* 2018; Volume 7 (Issue 1, Serial Number 21): 28-23. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.21517162.1397.7.1.3.7> [In persian]
13. Bechtold, T., & Mussak, R. (Eds.). *Handbook of natural colorants (Vol. 8).* John Wiley & Sons; 2009.
14. Arbabi, B., Egharloo, S., & Allame, M. Place of Color and Motif in Evaluating Hand-woven Carpets. *Paykareh.* 2022; 10(26), 67-81. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23224622.1400.10.26.4.9> [In Persian].
15. Dufresne, G. *Geometric Hooked Rugs: Color & Design.* Ampy Publishing, LLC; 2010.
16. Cui, J., Xu, H., & Shi, L. A hybrid method for reduction of size and number of hues in the color images used in a carpet map. *Color Res. Appl.* 2022; 47 (1), 13-26. <https://doi.org/10.1002/col.22707>
17. Gupta, S. K., & Goswami, K. K. Carpet wear performance. In *Advances in Carpet Manufacture.* Woodhead Publishing; 2018. (pp. 443-466). <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101131-7.00017-4>
18. Chakraborty, J. N. (Ed.). *Fundamentals and practices in colouration of textiles.* CRC Press; 2015.

19. Shams-Nateri, A., Hajipour, A., & Veysian, M. The optical properties of hand-woven carpet. J. Text. Inst. 2020; 111(5), 694-700. <https://doi.org/10.1080/00405000.2019.1661063>
20. Mirjalili, S. A., & Sharzehee, M. Influence of Static and Dynamic Loading on the Properties of Handmade Persian Carpet. J. Text. Eng. 2004; 50(3+ 4), 43-50. <https://doi.org/10.4188/jte.49.60>
21. Jianfeng, W., & Euitay, J. The Research on Carpet Design Development as a Homage to William Morris. Psychology. 2024; 14(7), 223-236. doi:10.17265/2159-5542/2024.07.002
22. Pourdehymimi, B., Dent, R., Jerbi, A., Tanaka, S., & Deshpande, A. Measuring fiber orientation in nonwovens part V: real webs. Text. Res. J. 1999; 69(3), 185-192. <https://doi.org/10.1177/004051759906900305>
23. Wang, Y., & Moghaddam, A. G. A new method for reduction of color in a carpet map using a deep belief network. Multimed. Tools Appl. 2023; 1-13. <https://doi.org/10.1007/s11042-023-15186-3>
24. Hecht, E. Optics (5th ed.). Pearson; 2016.
25. Born, M., & Wolf, E. Principles of optics, cambridge university press. New York. 1999; 704.
26. CIE. Colorimetry, 3rd Edition. Vienna: CIE Central Bureau; 2004.
27. Luo, L., Tsang, K. M., Shen, H. L., Shao, S. J., & Xin, J. H. An investigation of how the texture surface of a fabric influences its instrumental color. Color Res. Appl. 2015; 40(5), 472-482. <https://doi.org/10.1002/col.21923>
28. Jose, D. J., Hollies, N. R. S., & Spivak, S. M. Instrumental techniques to quantify textural change in carpet part II: Goniophotometry. Text. Res. J. 1988; 58(4), 185-190. <https://doi.org/10.1177/004051758805800401>
29. Moradzade R, Tavana R, Diyaribidgoli M. The effect of fineness and cross-sectional shape of polyester staple fiber on the gloss of machine-made pile carpets. Proceedings of The Fourth National Conference of Machine-Made Carpet Industry; 2017 February; Esfahan, Kashan, Iran. Kashan: Machine-made Carpet Research Center; ۲۰۱۷.
30. ISO 2813:2014. Paints and varnishes — Determination of gloss value at 20°, 60° and 85°.
31. Pourdehymimi, B., Sobus, J., & Xu, B. Evaluating carpet appearance loss: surface intensity and roughness. Text. Res. J. 1993; 63(9), 523-535. <https://doi.org/10.1177/004051759306300904>
32. McIntyre, J. E., & Daniels, p.N. Textile Terms and Definitions (10th ed). Taylor & Francis; 1995.
33. Xiong, Y., Yuan, L., Gu, Q., Wang, D., Huo, D., & Liu, J. Correlation analysis between fabric structure and color rendering of polyester colored spun woven fabric based on the improved relative discrimination criterion. Text. Res. J. 2022; 92(13-14), 2433-2445. <https://doi.org/10.1177/00405175221079654>
34. Khosravani, P., Ezazshahabi, N., & Latifi, M. Characterization of the effect of fabric structure on the optical properties of woven fabrics. Res. J. Text. Appl. 2019; 23(1), 58-70. <https://doi.org/10.1108/RJTA-03-2018-0025>
35. Akgun, M., Becerir, B., & Alpay, H. R. Assessing the relationship among fabric constructional parameters, fractional reflectances and cover factors of polyester fabrics by experimental and mathematical methods. Fibers Polym. 2010; 11(2), 291-302. <https://doi.org/10.1007/s12221-010-0291-6>
36. Abdelkader, M., Mazari, A., & Zafar, S. Experimental Techniques to Obtain the Cross-Sectional Images of Textile Yarns. Materials. 2022; 15(14), 4726. <https://doi.org/10.3390/ma15144726>

37. Bodmer, M., Phan, N., Gold, M., Loomba, D., Matthews, J. A. J., & Rielage, K. Measurement of optical attenuation in acrylic light guides for a dark matter detector. *J. Instrum.* 2014; 9(02), P02002. DOI 10.1088/1748-0221/9/02/P02002
38. Shams Nateri, A. Using principal component analysis technique to compare the reflectance of acrylic fiber in cross section (CS) and long side (LS) directions. *J. Text. Inst.* 2025; 1-7. <https://doi.org/10.1080/00405000.2025.2499233>
39. Shams Nateri A, Amirshahi H, Latifi M. Using the geometric model method to explain the dual reflective behavior of acrylic yarns in the longitudinal direction and cross-section. *J. Esteghlal.* 2002; 21 (No. 2): 180-167. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.2251600.1381.21.2.13.7> [In Persian].
40. Wu, Y., Pourdeyhimi, B., & Spivak, S. M. Texture evaluation of carpets using image analysis. *Text. Res. J.* 1991; 61(7), 407-419. <https://doi.org/10.1177/004051759106100708>
41. Nateri, A. S., Ebrahimi, F., & Sadeghzade, N. Evaluation of yarn defects by image processing technique. *Optik.* 2014; 125(20), 5998-6002. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2014.06.095>
42. Wang, Y., & Moghaddam, A. G. A new method for reduction of color in a carpet map using a deep belief network. *Multimed. Tools Appl.* 2023; 1-13. <https://doi.org/10.1007/s11042-023-15186-3>
43. Choudhury, A. K. R. Principles of colour and appearance measurement: Object appearance, colour perception and instrumental measurement. Elsevier; 2014.
44. Ji, Z., Huang, W. H., & Lin, M. Design mode innovation of local color cultures: A case study of the traditional female costume of Yi nationality. *Designs.* 2020; 4(4), 56. <https://doi.org/10.3390/designs4040056>
45. Li, H. C., Wang, L. K., Chang, Y. K., & Huang, K. Y. Establishing colour harmony evaluation and recommendation model for clothing colour matching based on machine learning and deep learning. *Fashion Text.* 2025; 12(1), 27. <https://doi.org/10.1186/s40691-025-00433-y>
46. Shahidi, S., & Wiener, J. Improving the Dyeability of Textile Fabrics. *Eco-friendly textile dyeing and finishing.* 2013; 33-52. <http://dx.doi.org/10.5772/53911>
47. Veysian, M., & Shams-Nateri, A. The effect of metal mordant and biomordant on color strength of dyed woolen yarn with natural dyes. *Fibers Polym.* 2023; 24(12), 4337-4355. <https://doi.org/10.1007/s12221-023-00375-6>
48. Bueno, M. A., Durand, B., & Renner, M. Optical characterization of the state of fabric surfaces. *Opt. Eng.* 2000; 39(6), 1697-1703. <https://doi.org/10.1117/1.602547>
49. Kuehni, R. G. Color vision and Technology. Aatcc; 2008.
50. Samanta, P. Matching of Textiles and Apparels. *Colorimetry.* 2022; 105.
51. Westland, S., Ripamonti, C., & Cheung, V. Computational colour science using MATLAB. John Wiley & Sons; 2012.
52. Fairchild, M. D. Color appearance models. John Wiley & Sons; 2013.
53. Kang, H. R. Computational color science using MATLAB. Bellingham, WA: SPIE press. 2006; (pp. 155-157).
54. Shams-Nateri, A. Reusing wastewater of madder natural dye for wool dyeing. *J. Clean. Prod.* 2011; 19(6-7), 775-781. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.12.018>
55. Sinha, P., Crucilla, S., Gandhi, T., Rose, D., Singh, A., Ganesh, S., ... & Bex, P. Mechanisms underlying simultaneous brightness contrast: early and innate. *Vision Res.* 2020; 173, 41-49. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2020.04.012>

56. Radonjić, A., Todorović, D., & Gilchrist, A. Adjacency and surroundedness in the depth effect on lightness. *J. Vision*. 2010; 10(9), 12-12. <https://doi.org/10.1167/10.9.12>
57. O'Shea, R. P., Blackburn, S. G., & Ono, H. Contrast as a depth cue. *Vision Res.* 1994; 34(12), 1595-1604. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(94\)90116-3](https://doi.org/10.1016/0042-6989(94)90116-3)
58. Angelova, R. A., Borisova, E., & Sofronova, D. Advancing Sustainable Textile Metrology: Reflectivity Measurement with Controlled Light Sources. *Appl. Sci.* 2025; 15(10), 5305. <https://doi.org/10.3390/app15105305>
59. Tadayon, M., & Hoseeini Vajari, M. Color Proportion Measurement in Iranian Carpet (Case Study: Safavid Carpet). *Negareh Journal*. 2014; 8(26), 51-60.
60. Shahparvari, M. R., Mirzaamini, S. M. M., Zare Mehrjardi, M., & Sheikh Baglo, O. The Symbolic Color of the Safavid Prayer Carpets. *J. Stud. Color World*. 2017; 7(1), 47-65. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22517278.1396.7.1.5.5> [In Persian].
61. Tsai, C. Y., Veeraraghavan, A., & Sankaranarayanan, A. C. Shape and reflectance from two-bounce light transients. In 2016 IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP). 2016; (pp. 1-10). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICCPHOT.2016.7492882>
62. Erdogan, G., Yucel, S., & Bilisik, K. Textured Polyester Fiber in Three-Dimensional (3D) Carpet Structure Application: Experimental Characterizations under Compression–Bending–Abrasion–Rubbing Loading. *Polymers*. 2023; 15(14), 3006. <https://doi.org/10.3390/polym15143006>
63. Benisek, L. Service Soiling of Wool, Man-Made Fiber, and Blended Carpets. *Text. Res. J.* 1972; 42(8), 490-496. <https://doi.org/10.1177/004051757204200811>
64. Önder, E., & Berkalp, Ö. B. Effects of different structural parameters on carpet physical properties. *Text. Res. J.* 2001; 71(6), 549-555. <https://doi.org/10.1177/004051750107100613>
65. Azami, A. A., Payvandy, P., & Jalili, M. M. Simulation of the compression and recovery behavior of nonwoven fabrics under dynamic loading for automotive floor-covering application. *J. Ind. Text.* 2022; 51(5_suppl), 7900S-7919S. <https://doi.org/10.1177/1528083720944616>
66. Sarioğlu, E., Kaynak, H. K., Çelik, H. İ., & Vuruşkan, D. Effects of structural parameters on compressibility and soiling properties of machine woven carpets. *J. Text. Inst.* 2019; 1263-1270. <https://doi.org/10.1080/00405000.2019.1567975>
67. Korkmaz, Y., & Kocer, S. D. Resilience behaviors of woven acrylic carpets under short-and long-term static loading. *J. Text. Inst.* 2010; 101(3), 236-241. <https://doi.org/10.1080/00405000802376161>
68. Farag, R., Ibrahim, S., & Abd-El-Wahab, A. H. A Study of the Compressional Properties of Tufted Carpets of Different Pile Yarns. *MEJ-Mansoura Eng. J.* 2021; 26(3), 33-45.
69. Dubinskaitė, K., Van Langenhove, L., & Milašius, R. Influence of pile height and density on carpets end–use properties. *Fibres Text. East. Eur.* 2008; 16(3), 47-50.
70. Wood, E. J. Description and measurement of carpet appearance. *Textile research journal*. 1993; 63(10), 580-594. <https://doi.org/10.1177/004051759306301004>
71. Vargas, W. E. Generalized four-flux radiative transfer model. *Appl. Opt.* 1998; 37(13), 2615-2623. <https://doi.org/10.1364/AO.37.002615>
72. McDonald, R. *Colour physics for industry*; 1997.
73. Lynch, L. J., & Thomas, N. Optical diffraction profiles of single fibers. *Text. Res. J.* 1971; 41(7), 568-572. <https://doi.org/10.1177/004051757104100703>

74. Asadi, L., & Nateri, A. S. The use of Monte Carlo simulation to evaluate the optical properties of polyester fabric treated with titanium dioxide nanopigments. *Color. Technol.* 2023; 139(1), 28-44. <https://doi.org/10.1111/cote.12632>
75. Bernard, P., Vanderhaeghen, K., & Kiekens, P. Color measurement of pile fabrics. *Text. Res. J.* 1999; 69(8), 552-558. <https://doi.org/10.1177/004051759906900802>
76. Amirshahi, H., Agian, F. *Computational Color Physics*, Tehran, Arkan Danesh; 2007.
77. Tilley, R. J. *Colour and the optical properties of materials*. John Wiley & Sons; 2020.
78. Awazitani, T., & Sukigara, S. Characterization of optical properties of traditional Japanese fabrics. *Text. Res. J.* 2016; 86(1), 13-23. <https://doi.org/10.1177/0040517514563821>
79. Xu, B. Assessing carpet appearance retention by image analysis. *Text. Res. J.* 1994; 64(12), 697-709. <https://doi.org/10.1177/004051759406401201>
80. Van Steenlandt, W., Collet, D., Sette, S., Bernard, P., Lüning, R., Tezer, L., ... & Schulz, H. J. Automatic assessment of carpet wear using image analysis and neural networks. *Text. Res. J.* 1996; 66(9), 555-561. <https://doi.org/10.1177/004051759606600903>
81. Glogar, M. I., & Parac-Osterman, D. (2010). Black hues matching problem in clothes designing. In *Proceeding of the 22nd International IFATCC Conference; 2010 May 5-7; Stresa, Italy*.
82. Quintero Balbas, D., Lanterna, G., Cirrincione, C., Fontana, R., & Striova, J. Non-invasive identification of textile fibres using near-infrared fibre optics reflectance spectroscopy and multivariate classification techniques. *Eur. Phys. J. Plus.* 2022; 137(1), 85. <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-021-02267-1>
83. United States. National Bureau of Standards, & Nicodemus, F. E. *Geometrical considerations and nomenclature for reflectance*. Washington, DC, USA: US Department of Commerce, National Bureau of Standards; 1977, 1-52.
84. Goldfinger, G., Lau, K. C., & McGregor, R. The effect of the distribution of colorant on the color of fibers. *J. Appl. Polym. Sci.* 1974; 18(6), 1741-1751. <https://doi.org/10.1002/app.1974.070180613>
85. Allen, E. H., & Goldfinger, G. The Change in Color of Textile Samples Upon Immersion in Water. *Text. Chem. Color.* 1971; 3(12).
86. NATERI, A., Amirshahi, S. H., & Latifi, M. Prediction of reflectance values of acrylic fibers along the length and cross section using geometric model. *AMIRKABIR.* 2003; 14(53), 287-304.
87. Piri, N., & Nateri, A. S. An overview of analytical models for thermal/Vis-NIR radiation transfer through nanopigment coated non-metallic materials. *Results. Eng.* 2024; 24, 103198.
88. d'Eon, E., & Irving, G. A quantized-diffusion model for rendering translucent materials. *ACM Trans. Graph (TOG).* 2011; 30(4), 1-14. <https://doi.org/10.1145/2010324.1964951>
89. Gorji, M., Ansari, K., Ameri, F., & Moradian, S. A concise review on color match prediction models. *J. Color. Sci. Technol.* 2014; 8(3), 249-260. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.17358779.1393.8.3.9.9>
90. Sobus, J., Pourdeyhimi, B., Gerde, J., & Ulcay, Y. Assessing changes in texture periodicity due to appearance loss in carpets: Gray level co-occurrence analysis. *Text. Res Journal.* 1991; 61(10), 557-567. <https://doi.org/10.1177/004051759106101001>
91. Doshman Fana, Sarwar, Peyvandi, Pedram, & Vadod. A Review for Application of Machine Vision Systems in Carpet Industry. *Text. Cloth. Sci. Technol.* 2018; 7(3), 39-57. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.21517162.1397.7.3.4.2> [In Persian]

92. Shams-Nateri, A., & Hasanlou, E. Computer vision techniques for measuring and demonstrating color of textile. Appl. Comput. Vis. Fash. Text. Woodhead Publishing. 2018; 189-220.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101217-8.00008-7>
93. Dowgiallo, A. M. Identifying Textiles with Extended-range NIR Spectroscopy [Internet]. 2020 [cited 2020 February 1]. Available from <https://www.spectroscopyonline.com/view/identifying-textiles-with-extended-range-near-infrared-spectroscopy>
94. Li, X., Dong, Y., Peers, P., & Tong, X. Modeling surface appearance from a single photograph using self-augmented convolutional neural networks. ACM Trans. Graph (TOG). 2017; 36(4), 1-11.
<https://doi.org/10.1145/3072959.3073641>
95. Liu, S., Liu, Y. K., Lo, K. Y. C., & Kan, C. W. Intelligent techniques and optimization algorithms in textile colour management: a systematic review of applications and prediction accuracy. Fash. Text. 2024; 11(1), 13. <https://doi.org/10.1186/s40691-024-00375-x>
96. Deeb, R., Van de Weijer, J., Muselet, D., Hebert, M., & Tremeau, A. Deep spectral reflectance and illuminant estimation from self-interreflections. J. Opt. Soc. Am. A. 2018; 36(1), 105-114.
<https://doi.org/10.1364/JOSAA.36.000105>
97. Marshall, M. Neural networks and mechatronics for detecting carpet pile direction. J. Text. Fibrous Mater. 2018; 1, 2515221118769913. <https://doi.org/10.1177/2515221118769913>
98. Zamani, F., Amani-Tehran, M., & Latifi, M. Interactive genetic algorithm-aided generation of carpet pattern. J. Text. Ins. 2009; 100(6), 556-564. <http://dx.doi.org/10.1080/00405000802125055>
99. Jiang, Z., Xia, Q., Wang, Z., Zhu, K., Su, Q., Wang, J., ... & Hong, Y. Cultural Heritage Color Regeneration: Interactive Genetic Algorithm Optimization Based on Color Network and Harmony Models. Appl. Sci. 2025; 15(4), 1720. <https://doi.org/10.3390/app15041720>

مقاله پذیرفته شده