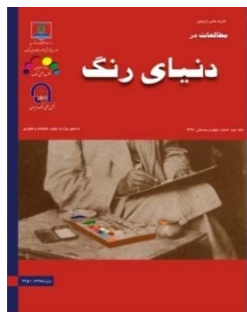


مقاله پذیرفته شده



بررسی رنگ کردن الیاف پشمی با رنگدانه‌های فسفرسنتی برای تهیه فرش دستباف

فاطمه رضائی^۱، کمال الدین قرنجیگ^{۲*}، سیاوش گودرزی^۳

مقاله پژوهشی

JSCW-2601-1279

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴-۱۱-۰۸

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۵-۰۳-۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵-۰۴-۲۰

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

ف. رضائی، ک. قرنجیگ، س. گودرزی "بررسی رنگ کردن الیاف پشمی با رنگدانه‌های فسفرسنتی برای تهیه فرش دستباف

"، نشریه علمی مطالعات در دنیای رنگ JSCW-2601-1279 این فایل PDF مقاله ویرایش نشده است که برای چاپ پذیرفته شده است. ماکت مقاله توسط دفتر نشریه مطالعات در دنیای رنگ تهیه شده و قبل از چاپ ویرایش نهایی به نویسنده مسئول مقاله ارسال می‌شود.

بررسی رنگ کردن الیاف پشمی با رنگدانه‌های فسفرسنتی برای تهیه فرش دستباف

فاطمه رضائی^۱، کمال الدین قرنجیگ^{۲*}، سیاوش گودرزی^۳

۱- کارشناسی ارشد پژوهش هنر، دانشکده هنر، دانشگاه الزهراء، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۹۹۳۸۹۳۹۷۳.

۲- استاد، گروه پژوهشی مواد رنگزای آلی، پژوهشکده مواد رنگزا، پژوهشگاه رنگ، تهران، ایران، صندوق پستی: ۶۵۴-۱۶۷۶۵.

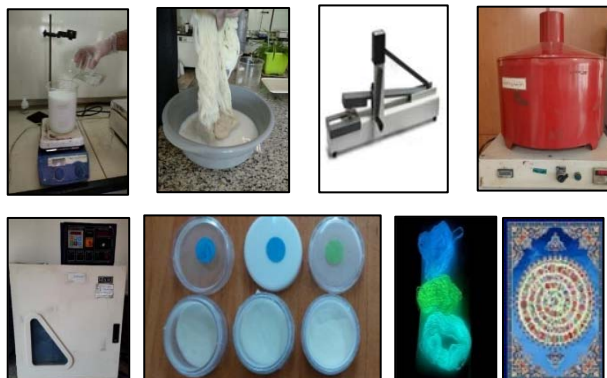
۳- دانشجوی دکتری، گروه پژوهشی مواد رنگزای آلی، پژوهشکده مواد رنگزا، پژوهشگاه رنگ، تهران، ایران، صندوق پستی: ۶۵۴-۱۶۷۶۵.

چکیده

فرش دستباف ایرانی به عنوان نمادی فرهنگی و اقتصادی، مستلزم نوآوری در مواد رنگزا است. هدف این پژوهش، تولید الیاف پشمی پوشش دهی شده به رنگدانه‌های فسفرسنتی و ارزیابی کاربردی آن‌ها در فرش دستباف است. روش تحقیق از نوع آزمایشگاهی و چندمرحله‌ای بوده و بر تثبیت رنگدانه‌های فسفرسنتی با استفاده از رزین استایرن-اکریلیک تمرکز دارد. در این راستا، خواص فیزیکی و پایداری رنگدانه‌ها پس از تثبیت بر روی الیاف پشمی مورد بررسی قرار گرفت. شدت نورتابی با اسپکتروفتورادیومتر در بازه طول موج ۳۸۰ تا ۷۸۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. ثبات‌های شستشویی، نوری و سایشی بر اساس استانداردهای بین‌المللی ایزو ارزیابی گردید. آغشته‌سازی الیاف موجب انتقال مؤثر رنگدانه و ایجاد نورتابی پایدار شد. نتایج نشان داد که کالای تهیه شده از ثبات نوری خوبی برخوردار است؛ اگرچه که شدت نورتابی پس از عملیات شستشویی با افت ۳۰ درصدی مواجه شد. آزمون ثبات مالشی خشک و تر به ترتیب کاهش‌های ۱۷ و ۵۸ درصدی در شدت نورتابی را نشان دادند. در نهایت، نمونه‌ای از فرش دستباف با استفاده از الیاف پشمی فسفرسنتی تولید شد تا قابلیت کاربرد این الیاف در تولید فرش‌های نورتاب ارزیابی گردد. نتایج نشان داد که امکان تولید فرش دستباف با استفاده از رنگدانه‌های تثبیت شده بر روی کلاف‌های پشمی با کیفیت مناسب وجود دارد.

واژه‌های کلیدی: پشم نورتاب - خواص ثباتی - رنگدانه فسفرسنتی - فرش دستباف

چکیده تصویری



Investigation of wool yarns coloration with phosphorescent pigments for the preparation of handwoven carpets

Fatemeh rezaei^{1*}, Kamaladin Gharanjig², Siavash Goudarzi³

1- M.A. in Art Research, Faculty of Art, Alzahra University, Tehran, Iran. P. O. Box:1993893973

2- Professor, Department of Organic Colorants, Institute for Color Science and Technology, Tehran, Iran. P. O. Box. 16765-654

3- Ph.D. Candidate, Department of Organic Colorants, Institute for Color Science and Technology, Tehran, Iran. P. O. Box. 16765-654

Abstract

Iranian handwoven carpets, as cultural and economic symbols, require innovation in coloration materials. The aim of this study was to produce wool fibers coated with phosphorescent pigments and to evaluate their applicability in handwoven carpets. The research methodology was experimental and multi-stage, focusing on the fixation of phosphorescent pigments using a styrene-acrylic resin. Accordingly, The physical properties and pigment stability after fixation onto wool fibers were investigated. Luminance intensity was measured using a spectroradiometer within the wavelength range of 380-780 nm. Washing, light, and rubbing fastness properties were evaluated based on international ISO standards. Fiber impregnation resulted in effective pigment transfer and the formation of stable luminescence. The results indicated that the prepared material exhibited good light fastness; however, the luminescence intensity decreased by approximately 30% after washing. Dry and wet rubbing fastness tests showed reductions of 17% and 58% in luminescence intensity, respectively. Finally, a handwoven carpet sample was produced using phosphorescent wool fibers to assess practical performance. The findings demonstrated that the production of handwoven carpets using phosphorescent pigments fixed onto wool yarns with acceptable quality is feasible.

Keywords: Luminescence wool, Fastness properties, Phosphorescent pigment, hand-made carpet

۱- مقدمه

فرش دستباف به عنوان یکی از کهن ترین و اصیل ترین هنرهای ایرانی، حامل مجموعه ای از ارزش های زیبایی شناختی، اقتصادی و هویتی است و بخش مهمی از میراث فرهنگی کشور را تشکیل می دهد (۱). این هنر صنعت، چه در قالب آثار تزئینی مانند تابلوفرش و چه به صورت کف پوش کاربردی، همواره جایگاهی برجسته در زندگی و سلیقه بصری خانواده های ایرانی داشته است. از منظر اقتصادی نیز طی دهه های اخیر سهم قابل توجهی در صادرات غیرنفتی ایران ایفا کرده است (۲). با وجود این اهمیت، تداوم حضور رقابتی فرش ایران در بازارهای جهانی با چالش هایی چون افزایش رقابت، افت انطباق طرح و رنگ با نیاز بازار، محدودیت های ناشی از تحریم و کاهش نوآوری مواجه است (۳). در این زمینه، بازآفرینی رنگ و ارتقای کیفیت بصری و عملکردی الیاف مبتنی بر فناوری های نوین می تواند مسیر مؤثری برای افزایش ارزش افزوده و رقابت پذیری فراهم کند (۴). مطالعات اخیر در زمینه رنگرزی پشم، به ویژه با بهره گیری از رنگزاهای فلورسنت پایدار و کارکردی، نشان می دهد که نوآوری در سامانه های رنگ کردن می تواند ضمن حفظ اصالت الیاف، کیفیت بصری و دوام فرش دستباف را به طور چشمگیری افزایش دهد. از این رو، توسعه روش های نوین رنگ کردن سازگار با ساختار طبیعی پشم، نقش مهمی در ارتقای کیفیت محصول و تقویت جایگاه صادراتی فرش دستباف ایرانی دارد (۵).

یکی از مواد مصرفی اساسی در تولید فرش دستباف، رنگزاهای هستند که به دو گروه اصلی مصنوعی (نظیر اسیدی، راکتیو، متال کمپلکس و خمی) و طبیعی (مانند روناس، نیل، اسپرک، پوست گردو و پوست انار) تقسیم می شوند که به طور متداول برای رنگرزی الیاف پشم، ابریشم و پنبه مورد استفاده قرار می گیرند (۶). علاوه بر این، مواد رنگزای دیگری با ویژگی های

مقاله پذیرفته شده

منحصر به فرد وجود دارند که از آنها می توان برای رنگ کردن الیاف مورد استفاده در فرش دستباف بهره برد. یکی از مهمترین این مواد، رنگدانه های فسفرسنی هستند. مواد فسفرسنت به موادی گفته می شود که قابلیت جذب انرژی نوری و سپس انتشار نور در تاریکی را دارند. این مواد اساساً شامل بلورهایی هستند که امواج الکترومغناطیس محیط، به ویژه پرتوهای ماورای بنفش، را جذب کرده و پس از قطع تابش، نور ذخیره شده را برای مدت زمان نسبتاً طولانی منتشر می کند. نکته مهم این نشر آن است که برخلاف تابش حرارتی، انرژی برانگیختگی آن به انرژی حرارتی تبدیل نمی شود. بنابراین، نورتابی به عنوان نور سرد تعبیر می شود، نوری که در دماهای معمولی یا پایین تر از منابع انرژی دیگر تولید می شود (۷).

مواد رنگزای فسفرسنی عمدتاً ترکیبات معدنی هستند و کاربردهای متنوعی دارند. مکانیزم عملکرد مواد فسفرسنت بر پایه برانگیختگی الکترون ها و به دام افتادن آن ها در تله های انرژی بلوری است؛ با قطع تابش، الکترون ها به تدریج آزاد شده و در بازگشت به حالت پایه، انرژی را به صورت تابش نوری پایدار آزاد می کنند (۸). این مواد در آب و محیط کاربرد خود حل نمی شوند. بنابراین می توان آنها را به عنوان رنگدانه مورد استفاده قرار داد. برای پوشش الیاف مورد استفاده در فرش دستباف که عمدتاً الیاف پشم است نیاز به رزین، مواد دیسپرس کننده، حلال و غلظت دهنده است تا سامانه پراکنش مناسبی از آنها تهیه شود. این سامانه به طور مستقیم بر روی الیاف بکار برده می شود. پس از اعمال یکنواخت، لازم است کالای آغشته شده در یک محیط گرم قرار گیرد تا رزین بر روی کالا تثبیت شود.

پژوهش های متعددی در زمینه بهبود خواص و یا افزایش جذابیت کالاهای نساجی و فرش دستباف انجام شده است که هدف مشترک آنها بهره گیری از فناوری های نوین به منظور بهینه سازی فرایندهای رنگرزی و افزایش بهره وری است. این مطالعات همچنین با هدف ارتقاء سطح کیفی و توسعه جایگاه هنر-صنعت فرش به عنوان یک حوزه فرهنگی و اقتصادی مهم دنبال شده اند. سیرکوا و همکاران به بررسی ساختار نخ های چندفیلamenti نورتاب فسفرسنت پرداختند و نشان دادند که هندسه ی داخلی و بیرونی نخ و آرایش فیبریل ها (زیررشته های درونی الیاف) نقش مهمی در شدت و پایداری تابش دارند (۹). مالهتیک و همکاران در مطالعه خود به بررسی کاربرد ریزمواد فسفرسنت در محصولات نساجی تجاری پرداخته اند. آنها بیان کردند که منسوجات فسفرسنی به دلیل قابلیت درخشش طولانی مدت پس از قطع منبع نور، عملکرد برتری نسبت به منسوجات فلوئورسنی دارند، هرچند نتایج این تحقیقات از لحاظ توسعه تجاری کمتر پیشرفت کرده اند. در این تحقیق، نمونه های تجاری منسوجات فسفرسنی تحت شرایط نوری متنوع قرار گرفتند و با استفاده از تکنیک های میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، میکروسکوپی نوری با پرتوهای فرابنفش، طیفسنجی فلورسانس و تحلیل پراکندگی انرژی (EDS) مورد بررسی قرار گرفتند. یافته ها نشان می دهند که ریزذرات فسفرسنت موجود عمدتاً شامل آلومینات استرانسیوم دوپ شده (SrAl_2O_4) و سولفید روی (ZnS) هستند؛ به گونه ای که SrAl_2O_4 به دلیل درخشش طولانی تر از نظر عملکردی برتری دارد، اما هزینه بالای آن محدودیت هایی را در کاربردهای تجاری ایجاد می کند. به طور کلی، ریزذرات فسفرسنت به عنوان فناوری نوینی در توسعه منسوجات عملکردی شناخته شده و نقش مهمی در این حوزه ایفا می کنند (۱۰).

مقاله پذیرفته شده

در پژوهشی دیگر از طریق طراحی پوششی مرکب از پلی اورتان و $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ برای منسوجات پنبه‌ای، موفق به دستیابی به نورتایی پایدار در دمای محیط، بهبود چسبندگی و دوام در برابر شست‌وشو و حفظ نشر نوری یکنواخت در حدود ۵۰۰ نانومتر گردیده است (۱۱). همچنین پژوهشی برای تولید منسوجات هوشمند چندمنظوره ارائه شده است. (۱۲) در این مطالعه، الیاف پنبه با استفاده از شیوه‌ی اسپری پوشش‌دهی، با یک نانوکامپوزیت نورتاب فسفرسنت حاوی ذرات استرانسیوم آلومینات دوپ‌شده با لانتانید (RESAO) و بازدارنده شعله‌ی Exolit AP 422 پوشش داده شدند. این ترکیب با استفاده از لاستیک سیلیکونی RTV در دمای محیط تثبیت گردید. این تحقیق نشان داد که می‌توان با استفاده از فرآیندی ساده و سازگار با محیط‌زیست، منسوجاتی با ویژگی‌های نورتایی، ضد میکروبی، ضد حریق و آب‌گریز تولید کرد که قابلیت کاربرد در منسوجات بسته‌بندی و هوشمند را دارند (۱۲).

شارما و همکاران در پژوهشی دیگر به بررسی طراحی، چاپ و کاربرد منسوجات فسفرسنتی در محصولات دکوراسیون داخلی پرداخته‌اند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که بهره‌گیری از این فناوری می‌تواند تلفیقی از کارکردهای ایمنی، نوآوری بصری و جلوه‌های زیبایی‌شناختی دکوراتیو را در طراحی منسوجات فراهم سازد (۱۳). در پژوهشی دیگر، پارچه نورتاب از طریق اعمال پوشش به روش اسپری با استفاده از آلومینات استرانسیوم دوپ‌شده با یون یوروپیم دوز ظرفیتی Eu^{2+} به منظور توسعه منسوجات هوشمند با ویژگی‌های نورتایی هشداردهنده تهیه شده که برای لباس‌های ورزشی و فضای باز قابل استفاده است (۱۴). گروهی از محققان چینی توانسته‌اند با آبریز کردن سطح الیاف پارچه موفق به تولید الیافی نورتاب با پستاب بلندمدت و ضد آب شوند. این ضد آب شدن امکان از بین رفتن مواد نورتاب را در اثر شست‌وشو به حداقل ممکن می‌رساند. در این روش با استفاده از پیش ماده‌های سیلان‌دار، ضمن عامل‌دار نمودن نانوذرات آلومینات استرانسیوم نورتاب، این ترکیبات با عوامل سطحی بر روی الیاف پارچه ترسیب شده و اتصال محکمی را ایجاد نموده است. در واقع بسپارش یک ماده آلی در فصل مشترک نانو ذرات نورتاب و الیاف پارچه صورت گرفته است (۱۵).

شرکت فیلیپس در سال ۲۰۱۵ محصولی نوآورانه به نام فرش‌های نورتاب (Luminous Carpets) را عرضه کرده است که قابلیت نمایش علائم، کلمات و نمادها به صورت نورانی بر سطح موکت را داراست. این موکت‌ها به وسیله پنل‌های LED تعبیه شده در زیر سطح که موکت روی آن گسترده می‌شود، نورپردازی می‌شوند؛ الیاف آنها از نایلون شفاف ساخته شده و با روشن و خاموش شدن LEDها، پیام‌های نورانی قابل مشاهده می‌شوند. در عین حال، این سامانه نیازمند تجهیزات الکترونیکی، منبع تغذیه و مواد غیرطبیعی است که از معایب آن است. به موازات آن، برخی پژوهش‌ها بر روی تولید نخ‌های نورتاب با مواد و رنگدانه‌های آلی و معدنی متمرکز شده که می‌توانند بعنوان لایه‌های امنیتی در فرش‌ها به کار روند، که امکان تغییر ترکیب رنگدانه‌ها به سرمایه‌های نانومتری نیز وجود دارد (۱۶).

یکی دیگر از روش‌های ایجاد خواص نورتابی بر روی الیاف فرش استفاده از جوهرهای چسبنده نورتاب است که حاوی نانوذرات سرامیکی و چسباننده‌های^۱ آلی هستند. این چسباننده‌ها به الیاف فرش آسیب نمی‌رسانند. در پژوهشی که توسط محققان ژاپنی صورت گرفته است از نانوذرات نورتاب پایدار شده در نوعی چسباننده سلولزی در غلظت‌های مختلف استفاده شده است که پس از تولید توسط چاپگرهای مخصوص بر روی کاغذ چاپ شده است و در اثر برانگیختگی با پرتوهای ماورای بنفش نشر آبی فام را در ناحیه ۴۲۰ نانومتر ایجاد می‌کند (۱۷).

در این پژوهش، به کارگیری رنگدانه‌های فسفرسنتی در فرآیند رنگ‌کردن الیاف پشم برای تهیه فرش دستباف مورد بررسی قرار گرفته است. استفاده از این رنگدانه‌ها ضمن حفظ ویژگی‌های اصلی و ساختاری الیاف طبیعی پشم و تأمین ملاحظات زیست محیطی، با بهره‌مندی از خاصیت نورتابی، منجر به ایجاد جلوه‌های بصری ویژه و برجسته سازی نقوش فرش می‌شود. این ویژگی موجب می‌گردد که فراتر از طرح مرسوم قابل مشاهده در نور روز، طرحی متمایز و مستقل در شرایط نوری خاص پدید آید که می‌تواند به افزایش ارزش زیبایی شناسانه و کاربردی فرش‌های دستباف کمک شایانی نماید. در این راستا ابتدا دیسپرسیونی از رنگدانه‌ها در رزین پایه آبی تهیه شده و بر روی نخ پشمی اعمال شده است. رنگدانه‌ها در اثر حرارت بر روی نخ‌ها تثبیت شده و برای تهیه فرش دستباف مورد استفاده قرار گرفته است. ویژگی‌های نورتابی نخ‌های پشمی شامل شدت تابش، دوام نورتابی در تاریکی، و تغییرات شدت قبل و پس از آزمون‌های ثبات شستشویی، نوری و مالشی مورد ارزیابی قرار گرفت تا پایداری عملکرد فسفرسنت در شرایط مختلف کاربردی تعیین گردد.

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد و تجهیزات

مواد اصلی مورد استفاده در این پژوهش شامل نخ پشمی خام مرینوس، نوع دولا و ظریف، مناسب تولید فرش دستباف با تراکم ۵۰ رج بود که از بازار تبریز تأمین گردید. سه نوع رنگدانه فسفرسنتی از شرکت isuochem کشور چین انتخاب و بر اساس شدت تابش و فام رنگی، مناسب‌ترین نمونه برای کاربرد روی نخ پشمی تعیین شد. چسباننده مورد استفاده از شرکت سیماب رزین تأمین شده و از خانواده رزین‌های آکریلیک پایه آبی به صورت امولسیون‌های پایدار بودند، که سازگاری بالایی با فرآیندهای نساجی، به‌ویژه چاپ با رنگدانه، نشان می‌دهند. چسباننده سیماکریل U-96 با توجه به پایداری برشی بالا و توانایی تولید فیلم نرم، شفاف و بدون رنگ با ثبات رنگی مطلوب انتخاب شد (جدول ۱). غلظت‌دهنده سدیم آلزینات در فرمولاسیون پراکنه حاوی رنگدانه استفاده شد و دیسپرس‌کننده نیز بر پایه پلی‌کربوکسیلات و صابون غیر یونی محصول شرکت کیمیاگران به‌کار رفت. تجهیزات مورد استفاده شامل خشک‌کن Memert (آلمان)، کراکومتر Labhitech ساخت شرکت فروردین آزما تجهیز، دستگاه تابش نور نساج صنعت یزد برای اندازه‌گیری ویژگی‌های فسفرسنت و ثبات نوری، دستگاه پد شرکت نساج صنعت

یزد، میکروسکوپ الکترونی SEM (چین) ۶۹۰۰ KYKY و اسپکتروفتورادیومتر CS-2000 ساخت شرکت Konica Minolta (ژاپن) بود.

جدول ۱- مشخصات رزین سیماکریل U-96

Table 1- Specifications of Simacryl U-96 Resin

Composition	Density (g/cm ³)	Viscosity (cP)	Solid Content (%)	pH
Styrene Acrylic	1.025	<100-20	40	3-2

۲-۲ روش‌ها

پراکنه‌ای حاوی رنگدانه فسفرسنت، چسباننده U-96 غلظت‌دهنده سدیم آلزینات و دیسپرس‌کننده پلی‌کربوکسیلات در آب تهیه شد. سدیم آلزینات به‌عنوان غلظت‌دهنده اصلی با مصرف ۳ تا ۵ درصد وزنی رنگدانه، نقش افزایش ویسکوزیته و حفظ پایداری تعلیق ذرات رنگدانه را در سامانه‌های پایه آب ایفا می‌کند. دیسپرس‌کننده‌ها در محدوده ۱۰ تا ۵۰ درصد وزن رنگدانه به کار رفته و برای دستیابی به پراکندگی یکنواخت رنگدانه‌ها در محیط آبی استفاده شدند. نسبت وزنی رنگدانه به وزن کالابین ۲۵ تا ۱۰۰ درصد تنظیم شد و در نهایت با افزودن آب، پراکنه‌ای مطلوب برای فرآیند آغشته‌سازی آماده گردید.

برای آغشته‌سازی کلاف‌های پشمی با پراکنه‌ی رنگدانه‌های فسفرسنت، ابتدا کلاف‌های پشمی در محلول آبی حاوی صابون غیریونی با غلظت ۱ گرم بر لیتر، در دمای ثابت ۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۵ دقیقه شستشو داده شدند. این فرآیند به منظور حذف کامل چربی‌ها و ناخالصی‌های سطح الیاف انجام گرفت تا خلوص و کیفیت الیاف حفظ شود. پس از پایان مرحله شستشو و انجام آبکشی کامل، فرآیند آغشته‌سازی در دمای محیط و به مدت ۱۵ دقیقه انجام گرفت. در این مرحله، کلاف‌ها به‌صورت مداوم و یکنواخت در داخل حمام حرکت داده شدند تا پوشش‌دهی مطلوب و همگنی در جذب رنگدانه‌ها حاصل شود. پس از اتمام فرآیند آغشته‌سازی، کلاف‌ها از میان دو غلتک با برداشت ۷۰ درصد عبور داده شدند تا اضافی مواد پراکنه از سطح الیاف حذف گردد. در ادامه، کلاف‌های آغشته‌شده تحت فرآیند تثبیت حرارتی قرار گرفتند. آنها ابتدا به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد و سپس به مدت ۵ دقیقه در دمای ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شدند. نمونه‌ها پس از تثبیت حرارتی و خشک شدن برای استفاده در تولید فرش دستباف آماده شدند.

۲-۲-۱ اندازه‌گیری خواص ثباتی

در این پژوهش، پایداری‌های نوری، شستشویی و مالشی نخ‌های آغشته به رنگدانه‌های فسفرسنت، با بهره‌گیری از دستورکارهای به روز شده استاندارد ISO مورد ارزیابی قرار گرفتند. در این راستا، به منظور سنجش میزان پایداری و بررسی

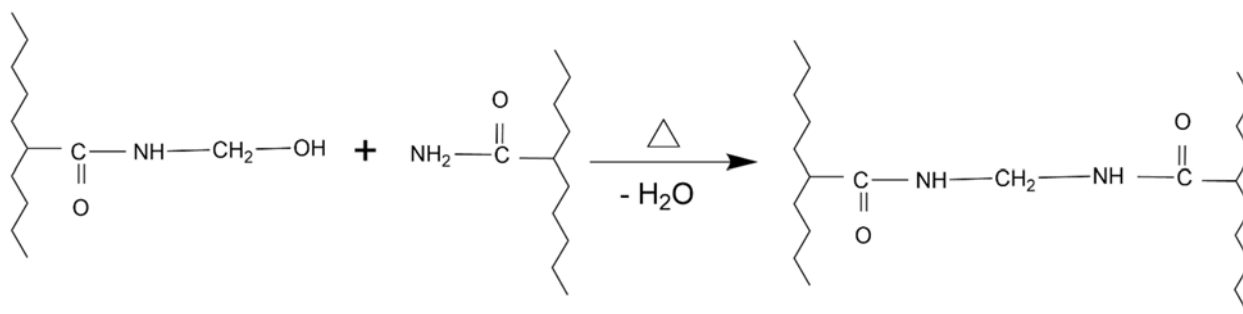
تغییرات نورتابی نمونه‌ها، آزمون‌های پایداری نوری، شستشویی و سایشی به ترتیب مطابق با استانداردهای ISO 105-B02:2014، ISO 105-C06:2010 و ISO 105-X12:2006 انجام پذیرفت.

در ادامه، نمونه‌های مورد آزمون گرفته در زیر محفظه نوری تحت منبع نوری UV-A قرار گرفتند و داده‌های نورتابی آن‌ها با دستگاه اسپکتروفتورادیومتر ثبت شد. برای افزایش دقت، داده‌ها در سه نقطه مختلف نمونه‌ها اندازه‌گیری و میانگین آنها لحاظ گردید. تحلیل نهایی با بررسی اختلاف شدت نورتابی در نمودارهای حاصل انجام شد تا تغییرات شدت نورتابی الیاف با دقت و اطمینان بالا ارزیابی شود.

۳- نتایج و بحث

۳-۱ تهیه پراکنه رنگدانه فسفرسنتی در محیط آبی حاوی چسباننده

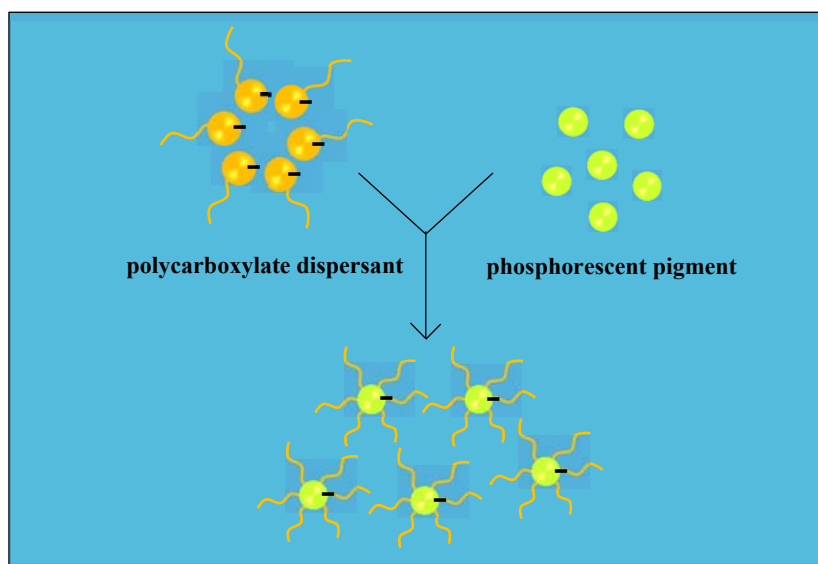
رنگدانه‌های فسفرسنت به دلیل نامحلول بودن در آب و نداشتن تمایل ذاتی به سطح لیف، نیاز به تثبیت توسط چسباننده‌های پلیمری دارند. چسباننده‌های اکریلاتی به عنوان یکی از مهم‌ترین انواع چسباننده‌های پلیمری در چاپ رنگدانه‌ای شناخته می‌شوند. این سامانه‌ها معمولاً از کوپلیمرهای بر پایه‌ی اکریلات و یا استایرن-اکریلات تشکیل شده‌اند که با دارا بودن گروه‌های عاملی نظیر N-متیلول آمید، قابلیت اتصال عرضی خودبه‌خودی در حضور حرارت یا کاتالیست را دارند (۱۸). واکنش‌های عرضی در محدوده دمایی حدود ۱۲۵ تا ۱۶۵ درجه سانتی‌گراد و در مدت ۱ تا ۵ دقیقه انجام می‌شود و در نتیجه‌ی آن شبکه‌ای سه‌بعدی با پایداری حرارتی و مکانیکی مناسب تشکیل می‌گردد. شکل (۱) نحوه ایجاد ساختار سه‌بعدی این نوع از چسباننده‌ها را نشان می‌دهد (۱۹). انتخاب سامانه‌های خوداتصال عرضی استایرن-اکریلاتی در این پژوهش بر پایه نقش ساختار کوپلیمری در بهبود عملکرد فیلم انجام شده است. حضور واحدهای استایرن موجب افزایش دمای انتقال شیشه‌ای T_g ، بهبود سختی و چسبندگی فیلم می‌شود، در حالی‌که بخش‌های اکریلاتی واکنش‌پذیر امکان تشکیل شبکه‌های عرضی مؤثر و ارتقای پایداری حرارتی و شیمیایی سامانه را فراهم می‌کنند (۲۰). این تعادل ساختاری، چسباننده را به گزینه‌ای مناسب برای تثبیت رنگدانه‌های فسفرسنت تبدیل می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که عملکرد فسفرسنتی نمونه‌ها تنها به حضور رنگدانه محدود نبوده، بلکه به تشکیل شبکه پلیمری پایدار در چسباننده وابسته است. شبکه سه‌بعدی ایجادشده، با محصورسازی فیزیکی ذرات فسفرسنت، از جابه‌جایی و تجمع مجدد آن‌ها جلوگیری کرده و ضمن بهبود یکنواختی نورتابی، پایداری نوری و مکانیکی سامانه را افزایش می‌دهد؛ رفتاری که با گزارش‌های پیشین درباره نقش چسباننده‌های خوداتصال عرضی در سامانه‌های رنگدانه‌ای همخوانی دارد (۱۹-۲۰).



شکل ۱- سازوکار تشکیل شبکه در چسباننده‌های اکریلاتی حاوی گروه N-متیلول آمید (۱۹).

Figure 1- Mechanistic Insights into Network Formation in Acrylic Binders Incorporating N-Methylol Amide Functional Groups (19)

یکی از عوامل موثر بر کیفیت کالای رنگ شده، پراکنش مناسب رنگدانه‌های فسفرسنت در محیط آبی حاوی چسباننده است. دیسپرس‌کننده‌ها موادی هستند که به منظور پراکنده کردن یکنواخت ذرات رنگدانه در آب به کار برده می‌شوند. در این پژوهش از دیسپرس‌کننده‌های پلی‌کربوکسیلات استفاده شد. این مواد که سازگار با محیط زیست هستند با القای بار منفی بر سطح ذرات فسفرسنت، از طریق دافعه الکترواستاتیکی و ممانعت فضایی، پایداری کلوییدی پراکنه‌های آبی را بهبود می‌بخشند و از تجمع ذرات ممانعت می‌کنند. جلوگیری از تجمع ذرات پیگمنت می‌تواند مانع از رسوب آن‌ها در ظرف شود و آن‌ها را برای چسباندن روی الیاف در دسترس قرار می‌دهد؛ در نتیجه حضور دیسپرس‌کننده‌ها در افزایش بازده فرآیند موثر است (۲۱-۲۳). سازوکار این برهم‌کنش به صورت شماتیک در شکل (۲) نشان داده شده است. البته حضور غلظت‌دهنده طبیعی سدیم آلزینات با افزایش ویسکوزیته و محدودسازی تحرک ذرات، ته‌نشینی را کاهش داده و یکنواختی سامانه را تقویت می‌کند (۲۴). نتایج بصری نشان می‌دهد که دستیابی به نورتایی یکنواخت، حاصل اثر هم‌افزای این دو مؤلفه است؛ به گونه‌ای که دیسپرس‌کننده با تثبیت کلوییدی و غلظت‌دهنده با تنظیم رفتار رئولوژیکی، توزیع فضایی ذرات فسفرسنت را در ماتریس چسباننده به سمت حداقل ناهمگنی هدایت می‌کنند. این هم‌زمانی عملکردی، به‌ویژه در سامانه‌های آبی حاوی رنگدانه‌های نامحلول، نقش کلیدی در حفظ پایداری نوری و کاهش پراکندگی داده‌های فسفرسنتی ایفا می‌کند (۲۴-۲۱).

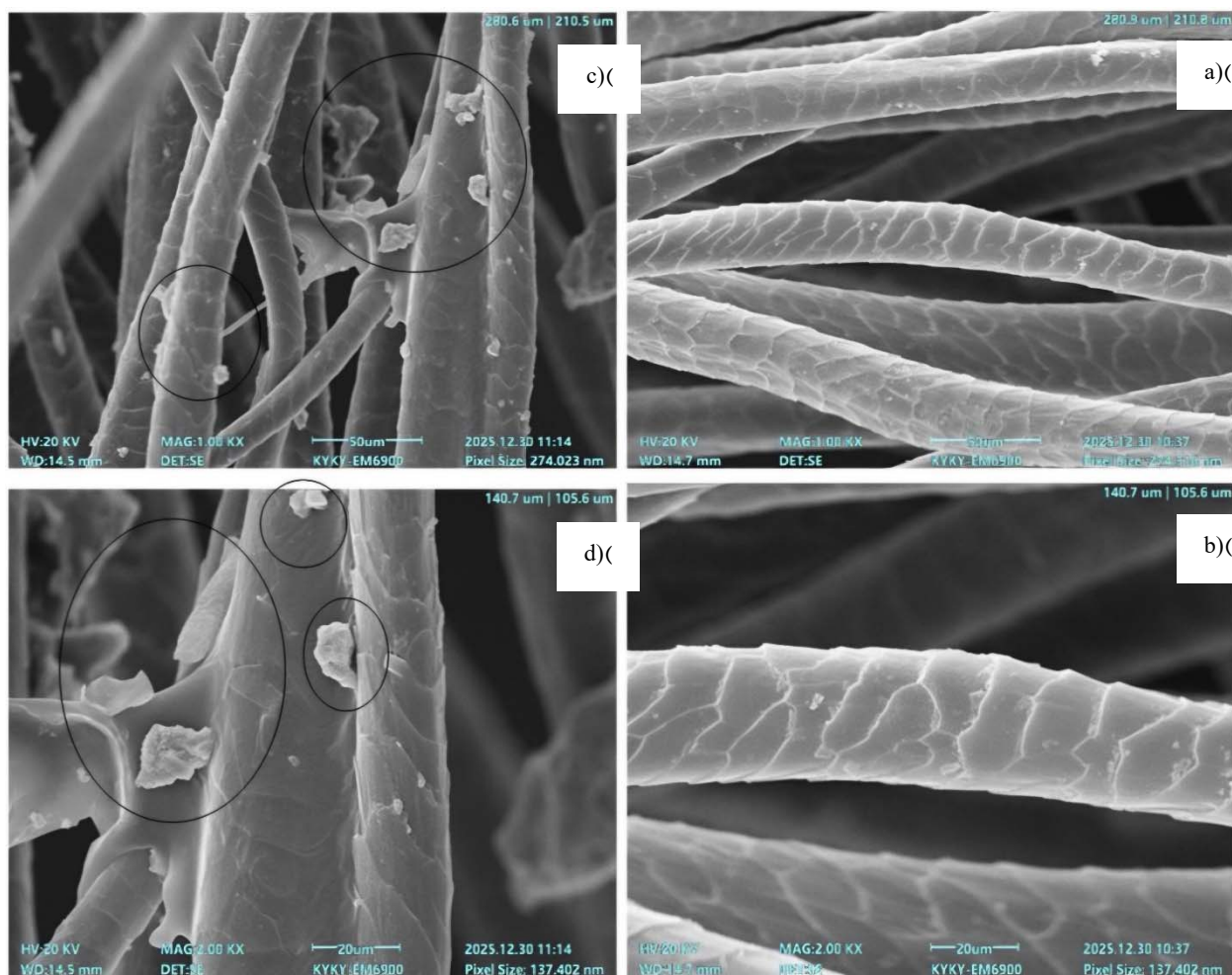


شکل ۲- نمایش شماتیک اثر هم‌زمان دیسپرس‌کننده پلی‌کربوکسیلات و سدیم آلژینات بر پخش رنگدانه و یکنواختی نورتابی

Figure 2- Schematic representation of the synergistic role of polycarboxylate dispersant and sodium alginate in improving pigment dispersion and luminescence uniformity

۳-۲- بررسی ویژگی‌های مورفولوژیکی سطح الیاف پشم

به‌منظور بررسی تأثیر اعمال رنگدانه نورتاب بر ویژگی‌های مورفولوژیکی سطح الیاف پشم، نمونه‌های پوشش‌دهی‌شده و نمونه مرجع به‌وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مورد ارزیابی قرار گرفتند. تصاویر حاصل از SEM اطلاعات ارزشمندی در خصوص نحوه استقرار رنگدانه و تغییرات ساختار سطحی الیاف در اثر فرآیند نورتاب‌سازی فراهم نمود. مطابق شکل (۳) ذرات رنگدانه نورتاب که در شکل هم مشخص شدند، به‌طور مؤثر بر سطح الیاف پشم توزیع گردیده‌اند. این موضوع بیانگر برهم‌کنش مناسب میان رنگدانه و بستر پلیمری الیاف پشم بوده و نشان‌دهنده چسبندگی مطلوب ذرات رنگدانه به سطح الیاف است. در مقایسه با نمونه مرجع که سطح الیاف آن ساختاری صاف‌تر و فاقد هرگونه پوشش اضافی است، نمونه‌های نورتاب‌شده دارای لایه‌ای پوششی با بافت متفاوت و زبری کنترل‌شده هستند که ناشی از حضور رنگدانه‌ها و مواد کمکی فرآیند می‌باشد. همچنین تشکیل یک لایه رزینی پیوسته، یکنواخت و همگن بر روی سطح الیاف پشم در نمونه‌های پوشش‌دهی‌شده مشاهده گردید. این لایه نقش بسزایی در تثبیت مکانیکی رنگدانه‌های نورتاب، افزایش دوام پوشش و بهبود یکنواختی سطح ایفا می‌کند. وجود این پوشش رزینی موجب تقویت اتصال بین ذرات رنگدانه و الیاف شده و از جداسازی یا ریزش رنگدانه‌ها در طی فرآیندهای مکانیکی و شستشو جلوگیری می‌نماید. به‌طور کلی، نتایج حاصل از آنالیز SEM نشان می‌دهد که روش اعمال رنگدانه نورتاب به همراه استفاده از رزین، منجر به تشکیل پوششی پایدار، یکنواخت و چسبنده بر سطح الیاف پشم شده است که این امر می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر بهبود خواص نوری، دوام عملکرد نورتابی و کیفیت نهایی محصول داشته باشد.



شکل ۳- ریخت شناسی الیاف پشم مرجع الف) بزرگنمایی ۱۰۰۰ ، ب) بزرگنمایی ۲۰۰۰، پ) الیاف پشم حاوی رنگدانه فسفرسنت با بزرگنمایی ۱۰۰۰ و ت) بزرگنمایی ۲۰۰۰

Figure 3- Morphology of the reference wool fibers: (a) 1000× magnification and (b) 2000× magnification; and phosphorescent pigment-treated wool fibers: (c) 1000× magnification and (d) 2000× magnification

۳-۳ بررسی ویژگی فسفرسنستی کالاهای رنگ شده

برای ارزیابی کمی خاصیت فسفرسنسی نمونه‌ها از دستگاه اسپکتروفتورادیومتر استفاده شد. این دستگاه شدت نور ساطع شده از نمونه را در طول موج‌های مختلف اندازه‌گیری کرده و نتیجه را به صورت یک طیف نوری نمایش می‌دهد. اساس عملکرد آن بر سه بخش اصلی استوار است: منبع نور تحریک کننده که نمونه را برانگیخته می‌کند، جزء پخش کننده که نور را بر اساس طول موج جدا می‌کند و آشکارساز که میزان انرژی نوری در هر طول موج را ثبت می‌کند (۲۵). دستگاه، انرژی تابشی را در گستره فرابنفش تا نزدیک مادون قرمز اندازه می‌گیرد و معمولاً نتایج را به صورت توان تابشی در واحد سطح و زاویه ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$) گزارش می‌دهد. خروجی اولیه دستگاه، یک مجموعه داده‌ی عددی است که بیانگر میزان نورتابی نمونه در طول موج‌های مختلف است. سپس با استفاده از روابط ریاضی و وزن دهی نوری، یک مقدار عددی کلی با عنوان ارزش نورتاب (LV) محاسبه می‌شود که شدت نشر نمونه را نشان می‌دهد (۲۶). در این روش، زاویه و سطحی که نور از آن اندازه‌گیری می‌شود نیز اهمیت دارد، زیرا

مقاله پذیرفته شده

دستگاه نور ساطع شده را از ناحیه مشخصی از سطح نمونه دریافت می‌کند. بنابراین در گزارش داده‌ها باید شرایط اندازه‌گیری از جمله زاویه، فاصله و شدت منبع تحریک مشخص باشد تا مقایسه بین نمونه‌ها قابل اعتماد باشد (۲۶-۲۵). در فرآیند اندازه‌گیری نورتابی، چند عامل مؤثرند: تابش منبع نوری اولیه، بازتاب طیفی ناشی از بافتار و ظاهر سطح، و در نهایت نورتابی حاصل از پدیده فسفرسنس. از آنجا که سطح نمونه‌های مورد بررسی دارای زبری و بافتار مات هستند، بخش عمده نور تابیده شده به زوایای مختلف پراکنده می‌شود و سهم مؤلفه‌ی بازتاب آینه‌ای قابل صرف نظر است (۲۸-۲۷). در چنین شرایطی، اسپکتروفتورادیومتر تنها بخشی از نور پراکنده شده را در زاویه خاصی اندازه‌گیری می‌کند، بنابراین بازتاب کلی ($R_{Measured}$) عمدتاً شامل سهم‌های ناشی از بافت سطح ($R_{Textured}$) و نورتابی فسفرسنت ($R_{Phosphorescence}$) است (۲۹). با استفاده از مدل‌های اپتیکی ارائه شده برای سطوح مات، روابط (۱) و (۲) برای جداسازی مؤلفه‌های بازتابی قابل بیان است:

$$R_{Measured} = R_{Textured} + R_{Phosphorescence} + R_{Lamp} \quad \text{معادله}$$

(۱)

$$R_{Lamp} \approx 0 : R_{Measured} = R_{Textured} + R_{Phosphorescence} \quad (۲)$$

معادله

بر این اساس، سهم فسفرسنسی از رابطه (۳) به دست می‌آید:

$$R_{Phosphorescence} = R_{Measured} - R_{Textured} \quad \text{معادله (۳)}$$

و مقدار عددی $LV_{Phosphorescence}$ از تفاضل ارزش نورتابی اندازه‌گیری شده و مؤلفه‌ی بافتار $LV_{Textured} - LV_{Measured}$ مطابق معادله (۴) محاسبه می‌شود (۳۰-۲۹).

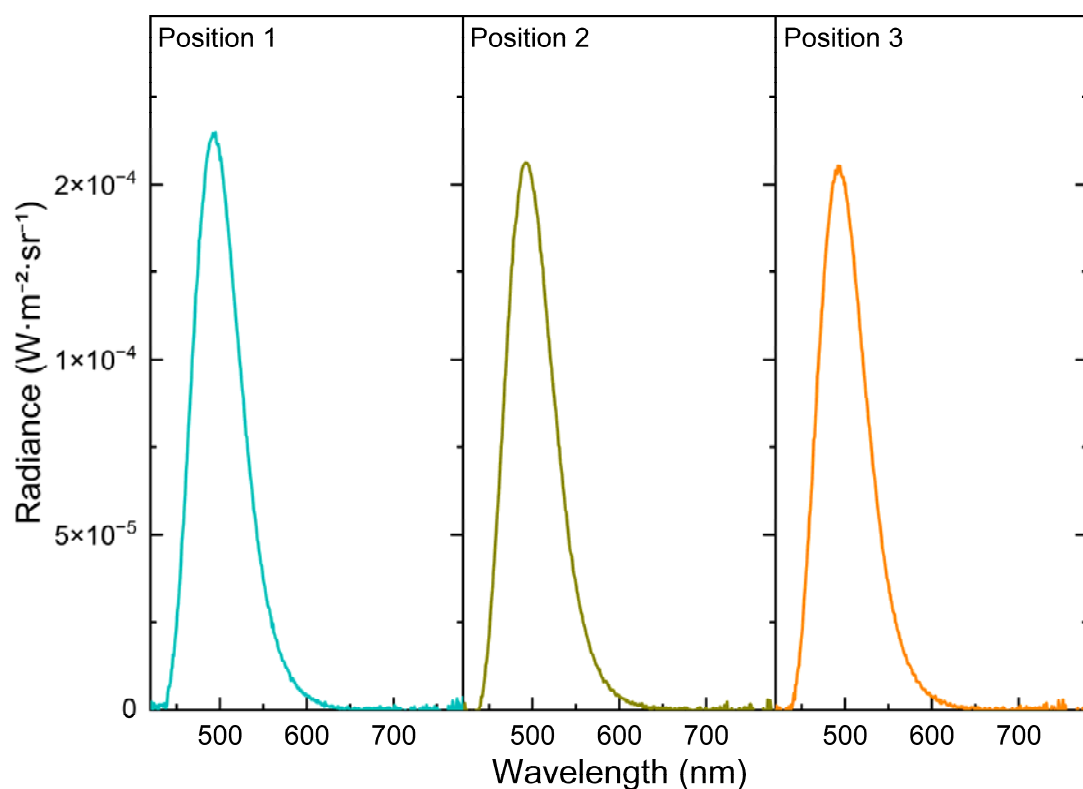
$$LV_{Phosphorescence} = LV_{Measured} - LV_{Textured} \quad \text{معادله (۴)}$$

این روابط تحلیلی با مطالعات کلاسیک در زمینه پراکندگی نور از سطوح زبر و مدل‌های بازتاب ترکیبی هم‌خوانی دارند و امکان تفکیک سهم واقعی فسفرسنس از بازتاب ناشی از بافت را فراهم می‌کنند (۳۱-۲۹). برای بررسی ارزش نورتابی نمونه‌های پشمی رنگ شده با رنگدانه فسفرسنسی، ابتدا نمونه پشم خام بدون هیچ‌گونه پوشش فسفرسنت به‌عنوان نمونه مرجع تحت تابش منبع نوری دستگاه اسپکتروفتورادیومتر قرار گرفت. سپس نمونه‌های رنگ شده در شرایط مشابه اندازه‌گیری شدند (جدول ۲). در نمونه رنگی، نورتابی در سه نقطه از سطح کالا بررسی شد و میانگین آن‌ها به‌عنوان مقدار نهایی در نظر گرفته شد. با استفاده از رابطه (۴)، اختلاف بین ارزش نورتابی نمونه رنگی و نمونه خام به‌عنوان ارزش نورتابی فسفرسنت ($LV_{Phosphorescence}$) محاسبه شد. شکل (۴) داده‌های طیفی دستگاه اسپکتروفتورادیومتر را برای نمونه رنگ شده با ۳ بار اندازه‌گیری از سه نقطه منسوج رنگ شده را نشان می‌دهد.

جدول ۲- داده‌های اسپکتروفتورادیومتری نمونه رنگی و نمونه خام از سه موقعیت مختلف نخ

Table 2- Spectrophotometric radiometric data of the colored and untreated samples from three position of yarn

Statistical Data		Luminance Value Data (Measured Spectral Reflectance (cd/m ²))			Sample Name
Mean	Standard Deviation	LV ₃	LV ₂	LV ₁	
6.01	0.10	6.13	5.97	5.94	Coated Sample
2.64	0.01	2.65	2.63	2.65	Raw Sample (Texture Effect)
3.37	-	-			After removing the effect of texture



شکل ۴- داده‌های طیفی نخ پشمی فلورسنتی پس از حذف اثر بافتار از سه موقعیت

Figure 4- Spectral data of the control sample after texture removal from three positions

مقادیر انحراف معیار داده‌ها برای هر نمونه نیز برای ارزیابی یکنواختی سطح محاسبه شد؛ به‌طوری‌که انحراف معیار کمتر، نشان‌دهنده یکنواختی بالاتر نشر نور و توزیع یکنواخت‌تر رنگدانه‌ها بر سطح لیف است (۳۲). این داده‌ها با نتایج حاصل از مشاهدات میکروسکوپ الکترونی در تطابق است. در بررسی طیفی نمونه‌ها، بیشینه نورتایی در محدوده‌ی طول موج کمتر و نزدیک به ۵۰۰ نانومتر مشاهده شد که به‌طور معمول به انتشار نور فیروزه‌ای مربوط است و با نتایج گزارش‌شده برای رنگدانه‌های آلی فسفرسنت در سامانه‌های لیفی هم‌خوانی دارد.

۳-۴ بررسی خواص ثباتی کالاهای پوشش داده شده به رنگدانه فسفرسنتی

بررسی خواص ثباتی رنگدانه های فسفرسنت اعمال شده، از اهمیت بالایی در ارزیابی عملکرد نهایی محصول برخوردار است. برای مثال، ترکیب SrAl_2O_4 موجود در ساختار این رنگدانه ها در حضور رطوبت محیط مستعد هیدرولیز بوده و این پدیده می تواند موجب کاهش شدت نورتایی شود. از دیگر عوامل مهم می توان به دما اشاره نمود؛ به گونه ای که در رنگدانه های فسفرسنت معدنی، افزایش دما ارتعاشات شبکه بلوری را بیشتر کرده و احتمال وقوع فرآیندهای غیرتابشی را افزایش می دهد که در نهایت به افت عملکرد نورتایی منجر می شود. بر این اساس، آزمون های مختلف ثباتی بر کالاهای آغشته شده به رنگدانه فسفرسنت انجام شد تا پایداری و عملکرد نورتایی سامانه در شرایط مختلف مورد ارزیابی قرار گیرد (۳۳-۳۴).

به منظور ارزیابی ثبات نوری نمونه های فسفرسنت، آزمون تابش کنترل شده انجام شد و شدت نورتایی با استفاده از اسپکتروفتورادیومتر اندازه گیری گردید. برای حذف اثرات ناشی از بافتار سطح، مقادیر نورتایی نمونه خام از داده های اندازه گیری شده کسر شد و درصد تغییر نورتایی بر اساس رابطه (۵) محاسبه شد (جدول ۳ و شکل ۵). این شاخص، میزان کاهش شدت نورتایی پس از اعمال تنش نوری را نسبت به حالت اولیه بیان کرده و معیار معتبری برای ارزیابی پایداری فوتولومینسانس محسوب می شود.

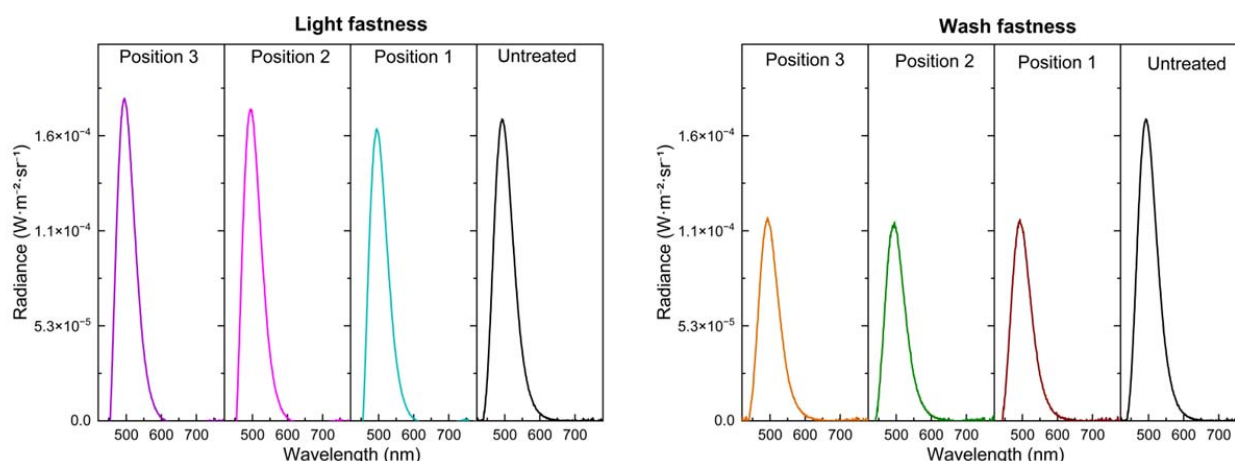
$$\text{LV Change (\%)} = \frac{(LV_{\text{Blank}} - LV_{\text{Changed}})}{LV_{\text{Blank}}} \times 100 \quad \text{معادله (۵)}$$

نتایج حاصل از آزمون ثبات نوری نمونه های نخ پشمی پوشش دهی شده با رنگدانه فسفرسنت که به وسیله رزین در محیط آبی و در حضور دیسپرس کننده اعمال شده بود، نشان داد که کاهش شدت نورتایی پس از تابش نوری کنترل شده کمتر از ۲/۵٪ است. این تغییر ناچیز بیانگر آن است که ساختار لومینسانس رنگدانه در طی فرآیند تابش دچار تخریب نشده و ویژگی های نوری آن به خوبی حفظ شده اند. علاوه بر این، پایداری بالای نورتایی حاکی از توزیع یکنواخت و تثبیت مؤثر ذرات رنگدانه در ماتریس رزینی و برهم کنش مناسب این سامانه با سطح الیاف پشمی است. چنین رفتاری نشان دهنده مقاومت بالای سامانه پوشش دهی شده در برابر تنش نوری و پتانسیل کاربردی آن در تولید منسوجات پشمی با خواص نوری عملکردی است. این نتایج با گزارش های پیشین در خصوص پایداری فوتولومینسانس رنگدانه های معدنی بر روی کالاهای نساجی مطابقت دارد.

جدول ۳- بررسی تغییرات نورتایی نمونه رنگ شده در سه موقعیت از کالا، بعد از عملیات نوری.

Table 3- Spectral data of the control sample after texture removal, at three positions, after light treatment.

LV Change After Photochemical Treatment (%)	Statistical Data		Phosphorescence (cd/m ²) Intensity Data			Sample after optical treatment
	Mean	Standard Deviation	LV ₃	LV ₂	LV ₁	
2.47	5.93	0.18	6.09	5.97	5.73	Measured Spectral Reflectance
	3.28	-	-			After removing the effect of texture



شکل ۵- داده‌های طیفی نمونه رنگ شده قبل و بعد از عملیات نوری و شستشویی در سه موقعیت مختلف کالا پس از حذف اثر بافتار ،

Figure 5- Spectral data of the colored sample before and after light and wash treatment, at three positions, after texture removal

در ادامه، به منظور بررسی پایداری عملکرد نوری سامانه پوشش‌دهی شده در شرایط مصرف واقعی، آزمون ثبات شستشو بر روی نمونه‌ها انجام شد. نتایج حاصل، مطابق جدول (۴) و شکل (۵)، کاهش نسبتاً قابل توجهی در شدت نورتایی، در حدود ۳۰٪، را نشان می‌دهد. این کاهش عمدتاً به جداسدن بخشی از ذرات رنگدانه فسفرسنت که به‌طور ترجیحی در نواحی سطحی الیاف پشمی و درون ماتریس رزینی تثبیت شده بودند، نسبت داده می‌شود.

از دیدگاه سازوکاری، تماس سامانه پوششی با محیط آبی طی فرآیند شستشو منجر به نفوذ مولکول‌های آب به درون شبکه چسباننده اکریلاتی و ایجاد پدیده تورم پلیمری می‌گردد. این تورم باعث افزایش فاصله زنجیره‌های پلیمری، کاهش چگالی اتصالات فیزیکی و شیمیایی بین رزین و ذرات رنگدانه، و در نهایت تضعیف نیروهای چسبندگی بین پوشش و سطح الیاف پشمی می‌شود. علاوه بر این، حلالیت جزئی اجزای قطبی موجود در چسباننده اکریلاتی در محیط آبی می‌تواند موجب تخریب موضعی ساختار پوشش و تسهیل رهائش ذرات فسفرسنت گردد. همچنین، نیروهای مکانیکی ناشی از تلاطم محلول شستشو و اصطکاک بین الیاف، نقش مضاعفی در جدایش ذرات رنگدانه با پیوندهای ضعیف‌تر ایفا می‌کنند. بنابراین، کاهش شدت نورتایی مشاهده‌شده نتیجه هم‌زمان اثرات فیزیکی (تورم و سایش)، شیمیایی (برهم‌کنش آب با شبکه پلیمری) و مکانیکی (تنش برشی) بر سامانه تثبیت رنگدانه می‌باشد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که علی‌رغم مزایای زیست‌محیطی چسباننده‌های اکریلاتی پایه‌آب، بهینه‌سازی ساختار شبکه پلیمری و بهبود برهم‌کنش بین رزین، رنگدانه و الیاف پشمی برای افزایش دوام عملکرد نوری در برابر شستشو ضروری است.

جدول ۴- بررسی تغییرات نورتایی نمونه رنگ شده بعد از عملیات شستشویی و در سه محل مختلف از کالا

Table 4- Luminescence changes of the colored sample after washing treatment at three positions

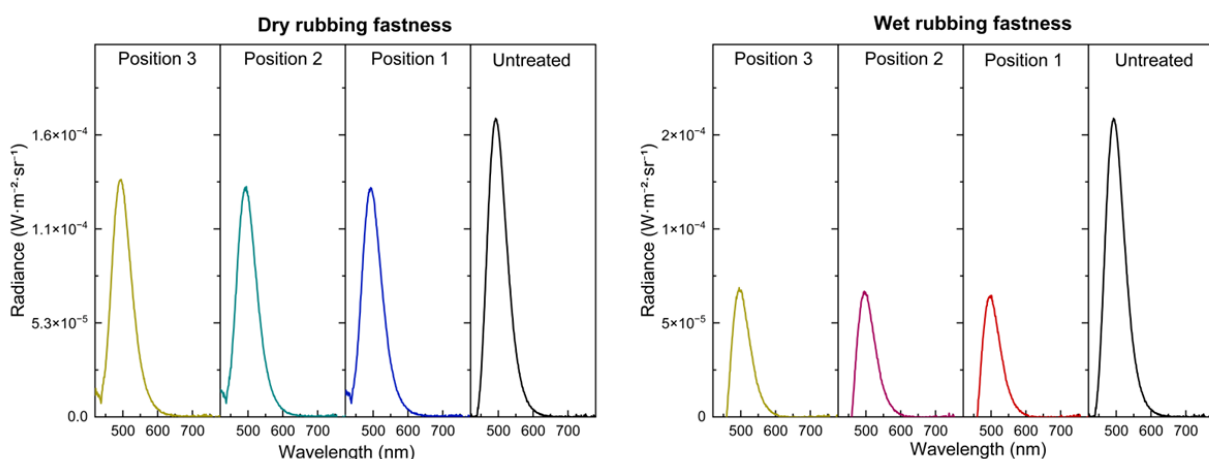
LV Change After Washing Treatment (%)	Statistical Data		Luminance Value Data (cd/m ²)			The sample after the washing process
	Mean	Standard Deviation	LV ₃	LV ₂	LV ₁	
32.93	4.90	0.02	4.93	4.88	4.09	Measured Spectral Reflectance
	2.26	-	-			After the removal of the contextual texture

بررسی نتایج آزمون مالشی نیز تفاوت معناداری میان شرایط خشک و تر نشان می‌دهد. بر اساس داده‌های طیفی و نتایج اسپکتروفتورادیومتری (جدول ۵ و شکل ۶)، کاهش نورتایی در شرایط مالشی خشک حدود ۱۵٪ است که حاکی از پایداری نسبتاً مطلوب رنگدانه در برابر تنش‌های مکانیکی خشک است. در مقابل، در آزمون مالشی تر، افت نورتایی به حدود ۵۵٪ افزایش می‌یابد (جدول ۶ و شکل ۶) که نشان‌دهنده حساسیت بیشتر سامانه به تنش‌های مکانیکی در حضور رطوبت است. این رفتار به عملکرد چسباننده اکریلاتی استفاده شده نسبت داده می‌شود؛ به گونه‌ای که نفوذ آب به شبکه پلیمری، حتی پس از تثبیت حرارتی، می‌تواند موجب تضعیف اتصال چسباننده-رنگدانه و خروج ذرات فسفرسنت از سطح کالا گردد.

جدول ۵- بررسی تغییرات نورتایی نمونه رنگ شده بعد از عملیات مالشی خشک در سه محل مختلف کالا

Table 5- Luminescence changes of the colored sample after dry rubbing treatment at three positions

LV Change After Dry Rubbing Treatment (%)	Statistical Data		Luminance Value Data (cd/m ²)			Specimen after dry rubbing treatment
	Mean	Standard Deviation	LV ₃	LV ₂	LV ₁	
17.01	5.35	0.05	5.42	5.33	5.32	Measured Spectral Reflectance
	2.71	-	-			After the removal of the texture effect



شکل ۶- داده‌های طیفی برای نمونه رنگ شده قبل و بعد از عملیات مالشی خشک و تر در سه محل مختلف کالا

Figure 6- Spectral data of the colored sample before and after dry and wet rubbing treatment at three positions

جدول ۶- بررسی تغییرات نورتایی نمونه رنگ شده بعد از عملیات مالشی تر، در سه محل مختلف کالا.

Table 6- Investigation of luminescence changes of the colored sample after wet rubbing treatment, at three positions

LV Change After Wet Rubbing Treatment (%)	Statistical Data		Luminance Value Data (cd/m ²)			Sample after wet rubbing treatment
	Mean	Standard Deviation	LV ₃	LV ₂	LV ₁	
58.88	4.04	0.04	4.08	4.05	3.39	Measured Spectral Reflectance
	1.39	-	-			After the removal of the texture effect

به طور کلی می توان گفت که فرایند پوشش دهی الیاف پشم با رنگدانه فسفرسنت به طور یکنواخت و موفقیت آمیز انجام شده است. اگرچه کاهش نسبی در ثبات شستشویی و مالشی مرطوب مشاهده می شود، اما شدت نورتایی در سطح قابل قبولی حفظ شده است. ضمن اینکه فرایند و فرمولاسیون بکار رفته می تواند برای کالاهایی که کمتر در معرض شستشو قرار دارند مثل فرش های دستبافت تزئینی به ویژه تابلو فرش مورد استفاده قرار گیرد.

در این راستا یک فرش دستباف با استفاده از الیاف فسفرسنت به طور انتخابی در کانون فرش با طرح ترنج بافته شده که نواحی مشخصی از آن در تاریکی به رنگ فیروزه های نورتایی می کند. تحت نور روز، الیاف فسفرسنت از نظر رنگی با زمینه ترنج (به رنگ پشم خام) همخوانی دارد و به صورت بصری یکپارچه دیده می شود. در شرایط تاریکی، نورتایی الیاف فسفرسنت منجر به آشکارسازی طرح اصلی فرش می شود و بیننده حرکت دورانی رقص سماع در آسمان را مشاهده می کند. از این رو در نور روز، نقش ترنج در آسمان و در شب، رقص سماع نشان داده می شود تا رازآمیزی عرفان را به تصویر درآورد (شکل ۷ الف و ب).



(ب.ب)



(الف.ا)

شکل ۷ الف- فرش بافته شده با الیاف فسفرسنت فیروزه‌ای و عکاسی در نور روز و ب- فرش بافته شده با الیاف فسفرسنت فیروزه‌ای و عکاسی در نور شب.

Figure 3-7 a- Carpet woven using turquoise phosphorescent fibers and photographed under daylight conditions and **b-** Carpet woven using turquoise phosphorescent fibers and photographed under nighttime conditions.

۴- نتیجه‌گیری

فرش دستباف ایرانی به‌عنوان یکی از شاخص‌ترین جلوه‌های فرهنگی، هنری و اقتصادی، برای حفظ جایگاه رقابتی خود در بازار معاصر نیازمند بهره‌گیری از رویکردهای نوآورانه در طراحی و عملکرد است. بر این اساس، در پژوهش حاضر آغشته‌سازی نخ‌های پشمی مورد استفاده در بافت فرش با رنگدانه‌های فسفرسنت و بررسی امکان ایجاد نورتایی پایدار در ساختار فرش دستباف مورد توجه قرار گرفت. نتایج نشان داد که دستیابی به نورتایی پایدار در نخ‌های پشمی فسفرسنت به طراحی مناسب سامانه رنگ‌آمیزی و برهم‌کنش مؤثر میان چسباننده، دیسپرس‌کننده و شرایط فرآیندی وابسته است. استفاده از چسباننده اکریلاتی خوداتصال‌عرضی با تشکیل شبکه‌ای پلیمری و پایدار، نقش مهمی در تثبیت ذرات فسفرسنت و حفظ یکنواختی نورتایی ایفا کرد. همچنین، حضور دیسپرس‌کننده‌های پلی‌کربوکسیلاتی در کنار غلظت‌دهنده طبیعی سدیم آلژینات، با جلوگیری از تجمع ذرات و بهبود پایداری کلوییدی، موجب توزیع یکنواخت‌تر رنگدانه‌ها در سامانه آبی شد. نتایج آزمون‌های نوری نشان داد که نمونه‌ها پس از اعمال شرایط نوری تنها حدود ۲٪ کاهش شدت نورتایی داشتند که بیانگر پایداری مناسب ساختار لومینسانس رنگدانه‌ها در برابر تابش نور است. در آزمون‌های مالشی و شستشویی نیز با وجود کاهش نسبی نورتایی، بخش عمده عملکرد فسفرسنت حفظ گردید که این موضوع به نقش شبکه سه‌بعدی چسباننده در جلوگیری از جداسازی ذرات رنگدانه از سطح الیاف نسبت داده می‌شود. در مجموع، فرمولاسیون ارائه‌شده قابلیت کاربرد در تولید منسوجات پشمی فسفرسنت با نورتایی یکنواخت و دوام عملکردی مناسب را داراست و می‌تواند زمینه‌ساز توسعه رویکردهای نوآورانه در هنر نساجی و به‌ویژه طراحی فرش دستباف ایرانی باشد.

مراجع

1. Taheri F, Jafari R. Investigating the factors affecting the color change of wool fibers used in handmade carpets. J stud color world.2021 ;11(2):43-52. <https://doi.net/doi/20.1001.1.22517278.1400.11.2.4.4> [In Persian].
2. Hosseini M, Perme Z. 2004. The structure of the global market for handmade carpets and Iran's export target markets. Proceedings of the First National Seminar on Handmade Carpet Research, Tehran: Nationl Center for Carpet and Trade. [In Persian]

3. Sehat S, Farjloo Motlagh M. 2007. Pathological study of Iranian handmade carpet exports. Allameh Tabatabaei University. Tehran. [In Persian]
4. Mousavi AS, Zakariaei Kermani I, Hajigholam Sarizadi A. Designing of the Technology Development Model the Use of Natural Dyes in the Handwoven Carpet Industry with a Qualitative System Dynamics Approach. Studies in the Color World. 2024;14(4):303–313. doi: 10.30509/jscw.2024.167333.1196. [In Persian]
5. Belbasi S, Gharanjig K, Safapour S. The use of a fluorescent dye in the dyeing of wool fibers in carpet: Naphthalimide. Adv Mater New Coatings. 2016;5(17):1243–1250. Available from: https://amnc.aut.ac.ir/article_68731.html?lang=en. [In Persian]
6. Natari AS, Veysian M. Past, Present, and Future of Application of Natural Dyes in Hand-Woven Carpets. Studies in the Color World. 2021;11(2):33-42. doi: 20.1001/1.22517278.1400.11.2.3.3. [In Persian]
7. Sole J, Bausa L, Jaque D. 2005. An introduction to the optical spectroscopy of inorganic solids. John Wiley and Son, 973-974
8. Feng A, Joos J, Du J, Smet P. Revealing trap depth distributions in persistent phosphors with a thermal barrier for charging. Physical Review B. 2022;105(20):205101. doi:10.1103/PhysRevB.105.205101
9. Sirkova B, Mouckova E. Study of luminescent yarns structure impact on light emission. scientific report. 2025 15:15610. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-00506-4>
10. Mahltig B, Heil C, Kaub S, Korn A, Kapadiya J. The use of phosphorescence micromaterials for commercial textile products. J stud COMMUNICATIONS INDEVELOPMENT AND ASSEMBLING OF TEXTILE PRODUCTS.2024 ;5(1):1-10. <https://creativecommons.org/licenses/ DOI 10.25367/cdatp.2024.5.p1-10>
11. Shahzadi N, Yousaf M, Ashraf M. Room temperature stimulated long-persistent phosphorescence of polyurethane/SrAl₂O₄: Eu²⁺, Dy³⁺ composite material for textile-based applications. Ceramics international. 2024. 50(5) 45566-45573. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.08.394>
12. Al-Qahtani S, Alkhamis Kh, Abdulaziz alfi A, Alhasani M, El-morsy M, Abdulhamid sedayo A, El-metvaly N. Simple Preparation of Multifunctional Luminescent Textile for Smart Packaging. ACS Omega. 2022, 7, 19454–19464. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c01161>
13. Sharma R, Bairagi N, Gupta M. Photoluminescent Printed Fabrics: Design and Development of Home Fashion Products to Aid Nighttime Navigation. In: Majumdar A, Gupta D, Gupta S, editors. Functional Textiles and Clothing 2020. Singapore: Springer; 2020. p. 87–98. doi:10.1007/978-981-15-9376-5_8

14. Khattab T, Rehan M, hamdy Y, shaheen T. Facile Development of Photoluminescent Textile Fabric via Spray Coating of Eu(II)-Doped Strontium Aluminate. J stud Industrial & Engineering Chemistry Research. 2018, 57, 34, 11483–11492. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.8b01594>
15. Jing L, Yan Z, Mingqiao G, Sida F, Tong L. Superhydrophobic and luminescent cotton fabrics prepared by dip-coating of APTMS modified SrAl₂O₄:Eu²⁺, Dy³⁺ particles in the presence of SU8 and fluorinated alkyl silane. J Rare Earths. 2016;34:653-9
16. Prahsarn C, Sooksimuang T, Sahasithiwat S, Roungpaisan N, Kamtonwong S, Panchan W, Klinsukhon W, Suwannamek N. Luminescent polypropylene fibers containing novel organic luminescent substance. J Polym Res. 2015;22:87-94
17. Gallage R, Teranishi R, Fujiwara T, Watanabe T, Yoshimura M. Direct fabrication of CaWO₄ patterns on cellulose-based organic substrates by on-site ink-jet reaction at room temperature Mater Sci Eng B. 2007;137:299-303
18. Dessie A, Eshetu B. The role of binders and its chemistry in textile pigment printing. 11. 2021:1-6.
19. Poth U, Harvey Ed Schwartz, Schwalm R, Schwartz M. Acrylic Resins. Hanover: Vincentz Network; 2011.
20. Lu Y, Lu Z-Y, Guan W-X, Tang L-M. Fabrication of novel crosslinking carboxylic styrene-acrylate latices as binders for exterior flexible facing tiles. Molecules. 2023;28(17):6249. doi:10.3390/molecules28176249
21. Farrokhpay S, Morris GE, Fornasiero D, Self P. Stabilisation of titania pigment particles with anionic polymeric dispersants containing carboxylate groups. Powder Technology. 2010;202(1–3):143-150. doi:10.1016/j.powtec.2010.04.031
22. Cran M, Morris G, Britcher LG. Influence of dispersant functional group architecture on titania pigment particle interactions. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2024;684:133027. doi:10.1016/j.colsurfa.2023.133027
23. Zheng YM, Sun XR, Li GY. Synthesis and application of an anionic poly-carboxylate dispersant for kaolin slurry. Advanced Materials Research. 2013;781–784:1791–1796. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.781-784.1791
24. Akter N, Akter N, Pervin M, Repon MR. The influence of mixed thickeners on printing over lyocell knitted fabric. Heliyon. 2023;9(3):e14175. doi:10.1016/j.heliyon.2023.e14175
25. Ronda CR. Luminescence: From Theory to Applications. Weinheim: Wiley-VCH; 2007
26. Berns RS. Billmeyer and Saltzman's Principles of Color Technology. 4th ed. Hoboken (NJ): Wiley; 2019.
27. Vik M. Colorimetry in Textile Industry. Liberec: VÚTS; 2017.
28. Hunter RS, Harold RW. The Measurement of Appearance. 2nd ed. New York: Wiley; 1987.

29. Bennett HE, Porteus JO. Relation between surface roughness and specular reflectance at normal incidence. *J Opt Soc Am.* 1961;51(2):123–9. doi: 10.1364/josa.51.000123
30. van Ginneken B, Stavridi M, Koenderink JJ. Diffuse and specular reflectance from rough. surfaces. *Appl Opt.* 1998;37(1):130-9
31. Yong Q, Chang J, Liu Q, Jiang F, Wei D, Li H. Matt Polyurethane Coating: Correlation of Surface Roughness on Measurement Length and Gloss. *Polymers.* 2020;12(2):326. doi:10.3390/polym12020326
32. Khoza P, Antunes E, Nyokong T. Photophysicochemical behavior of carbazole derivatized zinc phthalocyanine in the presence of ZnO microparticles and when embedded in electrospun fibers. *Dyes Pigments.* 2014;104:57-66. doi:10.1016/j.dyepig.2013.12.019
33. Liu S, Fang X, Lu B, Yan D. Wide range zero-thermal-quenching ultralong phosphorescence from zero-dimensional metal halide hybrids. *Nat Commun.* 2020;11(1):4649. doi:10.1038/s41467-020-18482-w.
34. Wang L, Shang Z, Shi M, Cao P, Yang B, Zou J. Preparing and testing the reliability of long-afterglow SrAl₂O₄:Eu²⁺, Dy³⁺ phosphor flexible films for temperature sensing. *RSC Adv.* 2020;10(19):11418-11425. doi:10.1039/D0RA00628A.