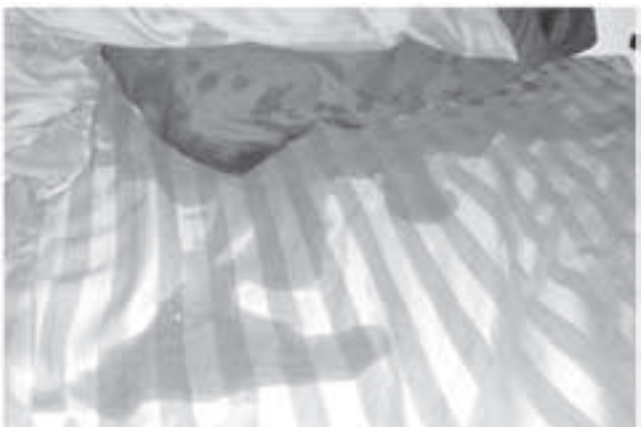
مروری کوتاه بر مواد عمق دهنده رنگ

دکتر مقداد کمالی مقدم *

مقدمه

یکی از مشکلات موجود در الیاف مصنوعی و به‌ویژه الیاف پلی‌استر، پایین بودن عمق رنگ حاصل از رنگرزی در مقایسه با الیاف طبیعی است. برای مثال، رنگرزی پارچه پلی‌استر با رنگ مشکی حتی با استفاده از مقدار رنگ‌زای زیاد منجر به ایجاد رنگ مشکی تیره نمی‌شود و حتی افزایش مقدار رنگ‌زا منجر به برنزه شدن و ثبات سایشی پایین می‌شود. محققان به این نتیجه رسیده‌اند همانند زمانی که پارچه با آب (دارای ضریب شکست ۱/۳۳) خیس می‌شود و عمق رنگ پارچه افزایش می‌یابد (شکل ۱) می‌توان پارچه را با موادی که دارای ضریب شکست پایین هستند تکمیل کرد و عمق رنگ را افزایش داد. دلیل این امر کاهش انعکاس سطح توسط این عملیات است [۱, ۲].



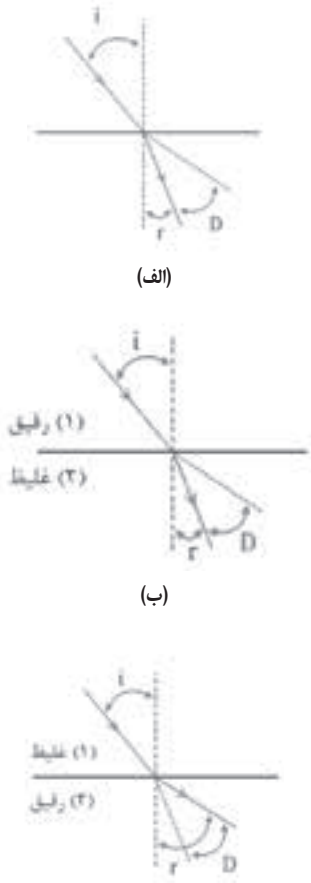
شکل ۱. افزایش عمق رنگی پارچه خیس شده با آب [۳]

پدیده شکست نور

هرگاه پرتو نوری به‌طور مایل به سطح جدایی دو محیط شفاف تابیده شود هنگام گذر از سطح جدایی دو محیط به دلیل تغییر سرعت نور در دو محیط شکسته می‌شود که به این پدیده شکست نور گفته می‌شود. ضریب شکست محیط شفاف (N=C/V) درواقع برابر با نسبت سرعت نور در هوا یا خلأ به‌سرعت نور در محیط شفاف است. C سرعت نور در هوا (۳×۱۰^{۸} m/s)، V سرعت نور در محیط شفاف و N ضریب شکست محیط شفاف است.

I زاویه بین پرتوی تابش و خط عمود را زاویه تابش و r زاویه بین پرتوی شکست و خط عمود را زاویه شکست می‌نامند. زاویه بین امتداد پرتوی تابش و پرتوی شکست را زاویه انحراف D می‌نامند (شکل ۲ الف).

اگر پرتو نور از محیط رقیق (ضریب شکست پایین) به محیط غلیظ (ضریب شکست بالا) وارد شود به خط عمود نزدیک می‌شود و زاویه انحراف برابر است با D= i-r (شکل ۲ ب) و اگر پرتو نور از محیط غلیظ به رقیق وارد شود از خط عمود دور می‌شود و زاویه انحراف برابر است با D= r- i (شکل ۲ ج).



(الف)

(ب)

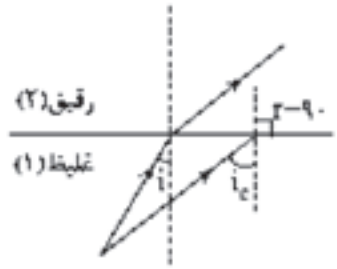
(ج)

شکل ۲. زاویه تابش و شکست سطح جدایی دو محیط

نسبت سینوس زاویه تابش به سینوس زاویه شکست، برای پرتوهایی که از یک محیط شفاف به محیط شفاف دیگر وارد می‌شوند، مقدار ثابتی است (معادله ۱-۱، قانون راسل). این مقدار ثابت ضریب شکست محیط ۲ به محیط ۱ است.

$$\frac{Sin\ i}{Sin\ r} = \frac{n_2}{n_1} \quad \rightarrow r = arcSin\ \frac{n_1\ Sini}{n_2} \qquad (۱-۱)$$

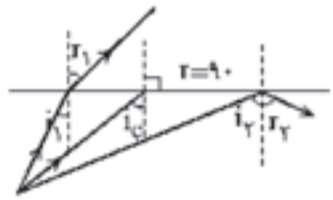
اگر پرتو نوری از محیط غلیظ به رقیق تابیده شود از خط عمود دور می‌شود. اگر زاویه تابش در محیط غلیظ به حدی باشد که زاویه شکست در محیط رقیق ۹۰ درجه شود (یا پرتوی شکست مماس بر سطح جدایی خارج شود) این زاویه تابش را زاویه حد گویند (شکل ۳). زاویه حد را با ic نشان می‌دهند (معادله ۱-۲).



شکل ۳. زاویه حد

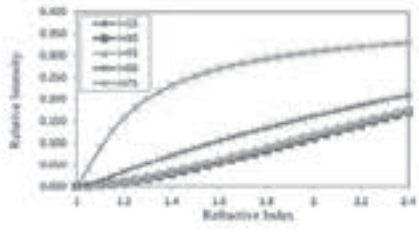
$$\frac{Sini_c}{Sin90} = \frac{n_2}{n_1} \rightarrow Sini_c = \frac{n_2}{n_1} \qquad (۲-۱)$$

اگر پرتوی نوری از محیط غلیظ وارد محیط رقیق شود درصورتی‌که زاویه تابش در محیط غلیظ از زاویه حد بیش‌تر باشد سطح جدایی دو محیط مانند آینه عمل نموده و پرتوی نور را به محیط غلیظ بازتاب می‌کند که به این پدیده بازتاب کلی گفته می‌شود (شکل ۴).



شکل ٤. بازتاب کلی

بر مبنای تئوری فرسنل، شدت نسبی انعکاس نور با افزایش ضریب شکست جسم و زاویه برخورد افزایش می‌یابد. بر مبنای همین تئوری، الیافی که ضریب شکست نوری آن‌ها بالا باشد شدت نسبی انعکاس نور آن‌ها نیز بالاتر است. از طرفی هر چه زاویه تابش بیشتر باشد این انعکاس نیز بیشتر خواهد بود (شکل ۵).



شکل۵ . تأثیر تغییر ضریب شکست برشدت انعکاس

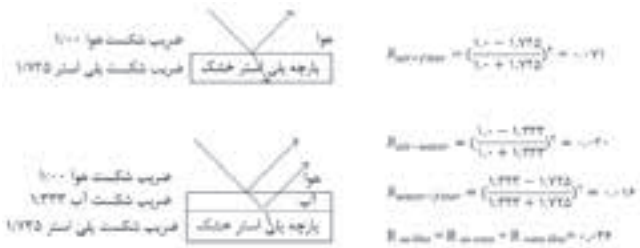
نور مورداستفاده پلاریزه نیست و دارای دو مؤلفه عمود بر هم است (مؤلفه عمودی و موازی) که از متوسط این دو مؤلفه می‌توان شدت انعکاس نور را محاسبه کرد (معادله ۱-۳).

$$R_s = \frac{Sin^2(i-r)}{Sin^2(i+r)} \qquad R_p = \frac{Tan^2(i-r)}{Tan^2(i+r)} \qquad \Rightarrow R = \frac{1}{2}(R_s + R_p) \qquad (۳-۱)$$

چنانچه از زاویه تابش صرف‌نظر شود رابطه ضریب انعکاس و ضریب شکست به‌صورت زیر خواهد بود:

$$R_{n1-n2} = (\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2})^2 \qquad (۴-۱)$$

با توجه به معادله ۱-۴ می‌توان اثر افزایش عمق رنگ منسوج خیس شده را تفسیر نمود. اگر پارچه پلی‌استر خشک در معرض تابش نور قرار گیرد ضریب انعکاس آن برابر با ۰/۰۷۱ خواهد بود اما چنانچه این پارچه خیس شود ضریب انعکاس سطح برابر با ۰/۰۳۶ خواهد بود که نشان‌دهنده ضریب شکست کمتر پارچه خیس شده نسبت به پارچه خشک و درنتیجه عمق رنگی بیشتر است (شکل ۶).



شکل ٦. افزایش عمق رنگی پارچه خیس شده

از طرفی، اگر پارچه پلی‌استر با رزین‌های اکریلاتی و سیلیکونی تکمیل شود عمق رنگی مشاهده‌شده افزایش خواهد یافت. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود استفاده از دولایه رزین منجر به افزایش عمق رنگی بیشتری نسبت به تک لایه رزین شده است. به عبارتی تکمیل دومرحله‌ای پارچه با رزین‌های مختلف منجر به افزایش عمق رنگی بیشتر پارچه در مقایسه با تکمیل تک‌مرحله‌ای می‌شود.

شکل ۷. افزایش عمق رنگی پارچه تکمیل‌شده با رزین

مواد عمق دهنده

پارچه پلی‌استر رنگرزی شده با رنگ دیسپرس عموماً ظاهری براق و روشن دارد و افزایش غلظت رنگ به‌منظور افزایش عمق رنگی چاره‌ساز نمی‌باشد. کاهش عمق رنگ در الیاف پلی‌استر ناشی از دو عامل سطح مقطع و ضریب شکست است: (الف) سطح مقطع لیف پلی‌استر مدور است؛ لذا انعکاس نور منظم و روشنایی بیشتر می‌باشد به همین دلیل رنگ روشن‌تر به نظر می‌رسد. (ب) ضریب شکست لیف پلی‌استر نسبت به سایر الیاف بیشتر است (جدول۱). هر چه ضریب شکست بالاتر باشد انعکاس نیز بیشتر خواهد بود [۷]. لذا برای مشکی‌تر شدن رنگ باید ضریب شکست را کاهش داد.

جدول ۱. ضریب شکست نوری الیاف [۵]

لیف	ضریب شکست موازی طول لیف	ضریب شکست عمود بر طول لیف	ضریب شکست متعاطف
اکریلیک	۱/۵۱۱	۱/۵۱۹	۰/۰۰۸
نایلون ۶	۱/۵۳۲	۱/۵۱۸	۰/۰۱۴
پلی‌استر POY	۱/۶۰۲	۱/۵۸۸	۰/۰۱۴
Dispersing agent			
پلی‌استر ELS	۱/۶۰۷	۱/۵۲۵	۰/۰۳۲
	۱/۵۹۴	۱/۵۴۲	۰/۰۵۲
	۱/۵۹۴	۱/۵۴۰	۰/۰۵۴

ضریب شکست نور در مواد با استفاده از رابطه تجربی Snell به‌صورت نسبت سینوس زاویه تابش به سینوس زاویه شکست نور تعریف می‌شود و بر اساس نظریه امواج الکترومغناطیس ضریب شکست عبارت از نسبت سرعت نور در خلأ به‌سرعت آن درون ماده است. از طرفی ضریب شکست مضاعف با اختلاف ضریب شکست در جهت موازی و عمودی بر محور لیف برابر است [۵].

این اعتقاد وجود دارد که رنگ زرد در ظاهر، روشنایی را تلقی می‌کند و رنگ آبی تیرگی را در ذهن ایجاد می‌کند. برای مثال، رنگ زرد تداعی‌گر ۷۵٪ روشنایی و ۲۵٪ تیرگی، رنگ قرمز تداعی‌کننده ۵۰٪ روشنایی و ۵۰٪ تیرگی و رنگ آبی تداعی‌کننده ۲۵٪ روشنایی و ۷۵٪ تیرگی است.

از دید غیرمسلح (چشم انسان)، رنگ کاملاً مشکی (Jet black، تیره‌ترین شید از رنگ مشکی) باید L^* حدود ۹–۱۰ داشته باشد و مقدار L^* حدود ۱۱ نیز به نظر مشکی نمی‌رسد [۶].

مواد عمق دهنده یا شدت دهنده رنگ موادی هستند که با تغییر زاویه انعکاس نور از سطح منسوج موجب می‌شوند که رنگ منسوج پررنگ‌تر دیده شود. ماده عمق دهنده طی فرایندی می‌تواند طیف انعکاسی رنگ‌زا را به سمت طول‌موج بالاتر منتقل کند و با ایجاد اثر هایپرکرومیک موجب افزایش شدت جذب رنگ‌زا شود. موادی نظیر رزین فلوئور، رزین استر آکریلیک اسید، رزین پلیمر وینیل یا سیلیکون دارای ضریب شکست کمتر از ۱/۴۵ هستند و می‌توانند به‌عنوان مواد سازنده عمق دهنده استفاده شوند[۱]. ضریب شکست برخی از رزین‌های پلیمری در جدول ۲ نشان داده‌شده است [۸].

چنانچه ویژگی آنیونی ماده عمق دهنده با رنگ به‌کاررفته یکسان باشد می‌توان این ماده را در فرایند رنگرزی هم‌زمان با رنگ استفاده کرد. اصولاً ماده عمق دهنده کاتیونی برای الیافی نظیر پلی‌استر که در محیط آبی ترکیبی آنیونی ایجاد می‌کنند مناسب است؛ هرچند که ماده عمق دهنده آنیونی نیز قابل‌استفاده است [۱].

جدول ۲. ضریب شکست رزین‌های پلیمری

رزین سنتزی	ضریب شکست
[illegible]	۱/۴۷
[illegible]	۱/۴۹
[illegible]	۱/۴۹
پلی یورتان	۱/۵۰
آکریلیک اصلاح‌شده با اپوکسی	۱/۴۶
دی‌متیل سیلیکون اصلاح‌شده با آمینو	۱/۴۰
پلی‌دی‌متیل سیلیکون	۱/۴۲
پلی آکریلات	۱/۴۸

مکانیسم‌فرایند

محققان مکانیسم عملکرد ماده عمق‌دهنده روی منسوجات را به دو بخش تقسیم کرده‌اند:

(الف) مرحله‌ی جذب: عمدتاً به علت نیروهای الکترواستاتیکی بین ماده عمق دهنده و لیف، عمق دهنده روی لیف جذب می‌شود. زمانی که الیاف نظیر الیاف پلی‌استر در آب دارای بار منفی هستند، می‌توان از یک عمق دهنده با بار مثبت استفاده کرد تا ماده به‌طور یکنواخت روی الیاف بچسبد. بااین‌حال، زمانی که بار مثبت ماده خیلی زیاد باشد، پایداری آن نیز در آب افزایش‌یافته و مانع از جذب کامل می‌شود [۲].

(ب) مرحله‌ی تشکیل فیلم: اجزای عمق دهنده رنگ که روی لیف جذب سطحی شده‌اند، طی مرحله‌ی خشک‌کردن باهم ترکیب می‌شوند تا یک فیلم تشکیل دهند. در این مرحله عمدتاً ضریب شکست پایین است. محققان دریافتند موادی که دارای ضریب شکست پایین و دمای انتقال شیشه‌ای بالا هستند بعد از مرحله خشک‌کردن، ساختاری را روی مواد لیفی می‌سازند که اثر عمق دهندگی خوبی ارائه می‌دهند. مواد عمق دهنده بر اساس روش پلیمریزاسیون به دودسته تقسیم می‌شوند [۲]:

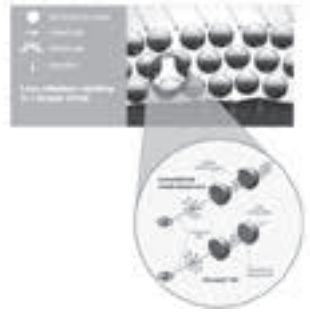
۱.سنتز عمق دهنده به روش پلیمریزاسیون امولسیونی

یکی از مواد عمق دهنده بر پایه رزین پلی‌یورتان می‌باشد. این عمق دهنده شامل یک ترکیب رزین آبی است که با پلیمریزه کردن یک منومر دارای پیوند غیراشباع در حضور یک امولسیون پلی یورتانی تولید می–شود به‌گونه‌ای که فیلم خشک این رزین دارای ضریب شکست ۱/۵ و یا کمتر است [۲].

۲.سنتز عمق دهنده به روش کوپلیمریزاسیون گرافت (شاخه‌ای)

نوع دیگر عمق دهنده شامل یک رزین آبی حاصل از پلیمریزه کردن۱– یک منومر دارای باند غیراشباع در حضور امولسیون پلی یورتانی و ۲– حداقل یک ترکیب سیلیکونی و یا فلوئوری می‌باشد. ضریب شکست فیلم خشک این رزین کمتر از ۱/۵ است. به‌هرحال، اعتقاد بر این است که تغییرات ساختار یا نظم مولکولی فیلم رزین تشکیل‌شده روی سطح الیاف، اثرات مفیدی روی کاهش ضریب شکست رزین خواهد داشت و وقتی ترکیب رزین آبی از ماده‌ای با دمای انتقال شیشه‌ای بالا تشکیل می‌شود فیلم حاصل از رزین ترک می‌خورد و سطوح محدب و مقعری را می‌سازد، که به‌وسیله‌ی آن پرتو ورودی روی فیلم رزین جذب‌شده یا وارد الیاف

می‌شود تا انعکاس عمقی را کاهش دهد و برای چنین اثری یک ماده با ضریب شکست پایین نظیر ترکیب سیلیکونی و یا ترکیب فلوئوری به رزین افزوده می‌شود که به‌وسیله‌ی آن اثر عمق دهنده به‌طور هماهنگ افزایش می‌یابد. همچنین اعتقاد بر این است که حتی اگر یک ترکیب رزین آبی از ماده‌ای با دمای انتقال شیشه‌ای پایین تشکیل‌شده باشد و فیلم ترک نخورد و سطوح محدب و مقعر نسازد، تغییر ساختار یا نظم مولکولی فیلم رزین تشکیل‌شده روی سطح الیاف سهم بزرگی برای افزایش اثر عمق دهنده دارد [۲]. افزودن ذرات به مواد عمق دهنده می‌تواند سبب بهبود عمق رنگ شود. این ماده عمق دهنده از طریق دو مکانیسم جذب نور و پلاریزه کردن نور موجب افزایش عمق رنگی می‌شود (شکل ۸). زمانی که نور به ذرات کوچک این ماده برخورد می‌کند به دلیل اینکه ابعاد ذرات از طول‌موج نور کوچک‌تر است در تمام جهات پراکنده می‌شود. این پراکنش الاستیک به نام پراکنش ریلی مشهور است و به دلیل انعکاس کمتر نور به سمت مشاهده‌کننده سبب افزایش عمق رنگی می‌شود [۹]. این پدیده با پلاریزه کردن نور ناشی از آرایش یافتگی دقیق ساختار پلیمری نیز بهبود می‌یابد.

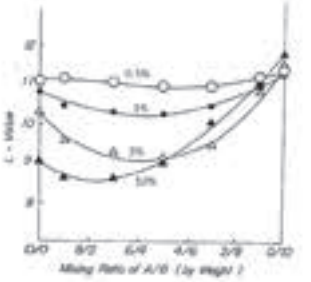


شکل ۸. مکانیسم عملکرد ماده عمق دهنده حاوی ذرات

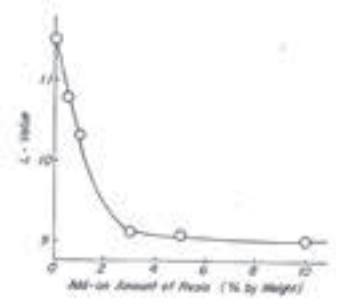
به‌طورکلی، مواد عمق دهنده دارای pH اسیدی هستند و به همین دلیل در فرایند تکمیل پارچه با این مواد باید محیط عملیات اسیدی ضعیف یا خنثی باشد. قلیایی بودن حمام تکمیل سبب ناپایداری امولسیون ماده عمق دهنده می‌شود و موجب می‌شود که نقاط و لکه‌های سفیدرنگ و حتی کاهش اثر عمق دهندگی روی پارچه اتفاق بیفتد. طی فرایند عمق دهندگی رنگ، هیچ‌گونه ماده قلیایی نباید روی منسوج رنگی باشد [۱۱]. ازآنجاکه ماده عمق دهنده اصولاً به‌صورت امولسیون به بازار عرضه می‌شود لذا پایداری آن در طی مصرف حائز اهمیت است. نگهداری این ماده باید در جای سرد و به‌دوراز تابش آفتاب باشد. دمای نگهداری نباید فراتر از ۳۵ درجه باشد. به‌منظور جلوگیری از تماس ماده با هوا و رطوبت طی انبارداری لازم است که درب ظرف کاملاً بسته باشد.

پیشینه تحقیقات

محققان ژاپنی در سال ۱۹۹۰ ماده عمق دهنده با استفاده از ترکیب دو رزین با ضریب شکست مختلف اختراع کردند. در این نوآوری، از رزین با میل جذبی کمتر به لیف و ضریب شکست ۱/۳۷–۱/۴۸ (برای مثال، رزین سیلیکون با ضریب شکست ۱/۴۱) و رزین با میل جذبی بالاتر نسبت به لیف با ضریب شکست ۱/۴۰–۱/۶۰ (برای مثال رزین پلی اتر– استر با ضریب شکست ۱/۴۸) استفاده شد[۸]. شکل ۹ ارتباط مقدار روشنایی (L^*) با نسبت اختلاط دو رزین در تشکیل لایه و مقدار ماده افزوده‌شده را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود افزایش درصد ماده عمق دهنده منجر به کاهش پارامتر روشنایی و درنتیجه افزایش عمق رنگی شده است.



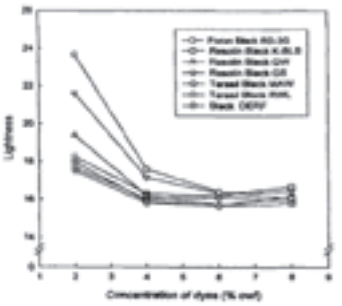
(الف)



(ب)

شکل ۹. (الف) تأثیر نسبت اختلاط دو رزین بر پارامتر L و (ب) تأثیر مقدار ماده افزوده‌شده بر پارامتر L

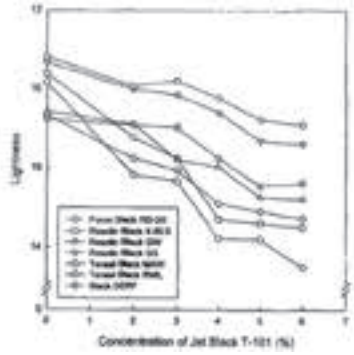
محققان کره‌ای در سال ۱۹۹۹ نشان دادند که لایه رزین می‌تواند تأثیر متفاوتی بر رنگ‌های دیسپرس مختلف داشته باشد. این محققان در مطالعه خود از ۷ رنگ مشکی و ۲ نوع رزین استفاده کردند. نتایج این تحقیق در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده‌شده است. نکته حائز اهمیت تأثیر متفاوت رزین بر عمق رنگی لیف رنگرزی شده بارنگ‌های مختلف است به‌طوری‌که در برخی از رنگ‌ها، افزایش غلظت رزین منجر به کاهش مقدار روشنایی با شیب بیشتری شده است. این نشان می‌دهد که تأثیر رزین عمق دهنده بر رنگ‌های دیسپرس متفاوت است. نتایج حاکی از آن است که رزین Jet black نسبت به رزین DSP دارای اثرگذاری بیشتر است [۱۴] .



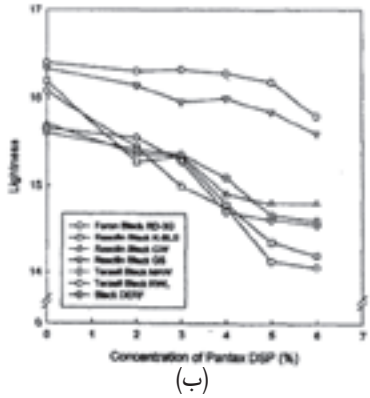
شکل ۱۰ . پارامتر روشنایی الیاف پلی‌استر رنگرزی شده با ۷ نوع رنگ دیسپرس [۱۴]

در سال ۲۰۰۷، محققان کره‌ای تأثیر ماده عمق‌دهنده NKR Black S-15

محصول شرکت Nicca کره جنوبی برای افزایش عمق رنگی رنگ‌های مشکی مختلف را بررسی کردند. نتایج K/S پارچه پلی‌استر رنگرزی شده بارنگ‌های مختلف در جدول ۵ و مقدار L^* آن در شکل ۱۲ نشان داده‌شده است [۱۵]. نتایج حاکی از آن است که رنگ Dianix deep black plus بیشترین مقدار K/S و کمترین مقدار L^* را ایجاد کرده است. این تحقیق نیز نشان می‌دهد که در افزایش عمق رنگی پارچه، علاوه بر اهمیت انتخاب نوع ماده عمق دهنده، انتخاب نوع رنگ دیسپرس نیز حائز اهمیت است.



(الف)



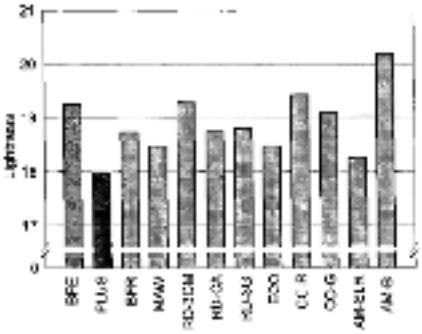
(ب)

شکل ۱۱. تأثیر غلظت رزین بر پارامتر روشنایی لیف رنگرزی شده با ۷ نوع رنگ دیسپرس، الف) رزین T-۱۰۱ و (ب) رزین DSP [۱۴]

جدول ۵. مقادیر k/s پارچه پلی‌استر رنگرزی شده بارنگ‌های مختلف [۱۵]

Dye used	Total K/S
RFL	551
PLUS	552
BRR	577
NAVY	578
RD-3GM	568
RD-GA	560
BD-3G	581
RD-3	590
CC-R	541
OC-G	456
AM-BLK	472
AM-B	498

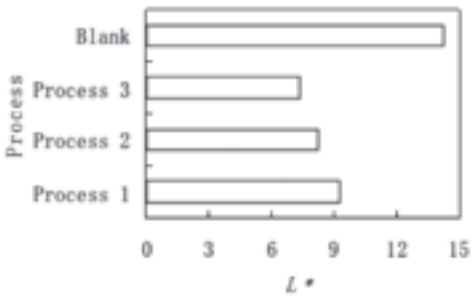
در سال ۲۰۰۹ محققان چینی نشان دادند که استفاده از دولایه رزین آکریلیکی و رزین سیلیکونی حاوی نانو ذرات می‌تواند عمق رنگی رنگ مشکی الیاف پلی‌استر را به‌شدت افزایش دهد به‌طوری‌که L^* زیر ۹ نیز قابل‌دستیابی است. در این تحقیق نشان داده شد که نانو ذرات سیلیکا اصلاح‌شده با آمینو پروپیل تری متوکسی سیلان به‌خوبی درون رزین آکریلیکی پراکنده می‌شود و یک‌لایه ناهموار روی سطح ایجاد می‌کند [۱۷].



شکل ۱۲. مقدار L^* پارچه پلی‌استر رنگرزی شده با رنگ‌های مشکی مختلف در غلظت ۵ owf% [۱۵]

همان‌گونه که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود فرایند دومرحله‌ای منجر به کسب L^* حدود ۷/۳ می‌شود درحالی‌که این پارامتر برای پارچه بدون عملیات تکمیلی ۱۴/۲ می‌باشد. در این حالت دولایه با ضریب انعکاس متفاوت روی پارچه ایجاد می‌شود.

پرتو نور تابیده‌شده از طریق دولایه روی سطح پارچه دو بار منعکس می‌شود و سبب افزایش جذب نور می‌شود. سطح ناهموار روی سطح پارچه ناشی از پودر نانو ذرات در لایه اول سبب افزایش انعکاس پراکنده نور می‌شود [۱۷].



شکل ۱۳. رابطه میان فرایند و پارامتر L^* [۱۷]

محققان در سال ۲۰۱۴ تأثیر ماده عمق دهنده را روی پارچه پلی‌استر بافته‌شده از نخ ITY 135D/72F بررسی کردند. این محققان دریافتند که رزین سیلیکون، عمق رنگی بالاتری نسبت به رزین آکریلیک ایجاد می‌کند. بهینه مقدار ماده رزین ۴٪ وزنی محلول است [۱۶].

در سال ۲۰۱۵ محققان چینی نوآوری با موضوع ماده تکمیل عمق دهنده رنگ منتشر کردند. نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم به‌عنوان مواد جامد و میکروامولسیون آمینو اصلاح‌شده با پلی ارگانوسیلوکسان برای ایجاد ماده عمق دهنده استفاده شد [۱۸].

در همین سال، محققان کره‌ای ماده عمق دهنده یک مرحله‌ای را برای افزایش عمق رنگی پارچه به ثبت رساندند. داده‌های کالریمتری نشان داد که با عمل نمودن پارچه رنگرزی شده با این ماده می‌توان L^* پارچه مشکی را از مقدار ۱۲ به زیر ۹ کاهش داد.

منابع در دفتر مجله موجود است.