رنگ‌سنجی در آمیزه‌های پلیمری: روش‌های متداول، نقش اجزاء ترکیب و عوامل طراحی

محسن جمالی[۱و*]، امیرحسین بی‌آزار[۲] ، علی هوشیار[۳]، فرانک وفاپور[۴]

۱- رییس امور مهندسی پارسا پلیمر شریف، تهران، ایران (jamali@parsapolymer.com)

۲- کارشناس مهندسی پارسا پلیمر شریف، تهران، ایران (biazar@parsapolymer.com)

۳- کارشناس مهندسی پارسا پلیمر شریف، تهران، ایران (hooshyar@parsapolymer.com)

۴- سرپرست آزمایشگاه پارسا پلیمر شریف، تهران، ایران (f.vafapour@parsapolymer.com)

چکیده

کیفیت رنگ و جلوه ظاهری نقش بزرگی در مقبولیت محصولات پلاستیکی در صنایع مختلف از جمله خودرو، لوازم خانگی و اسباب بازی دارد. به همین سبب روش‌های مختلفی جهت اطمینان از همانندی و ثبات رنگ در فرایند تولید محصولات پلیمری به کار گرفته شده است. اگرچه کنترل چشمی هنوز از جایگاه خاصی در این صنعت برخوردار است، لیکن فناوری‌های نوین کمّی‌سازی رنگ قطعات پلاستیکی نقش بسزایی در افزایش دقت و صحت رنگ‌سنجی ایفا می‌نمایند. در این مقاله روش‌های رنگ‌سنجی عددی پلیمرهای خودرنگ با هم مقایسه شده و مزایا، کاربردها و محدودیتهای هر کدام مطرح می‌شود. همچنین به عنوان چند نمونه‌ی متداول در آمیزه‌های مورد استفاده در صنعت خودرو، تأثیر پارامترهایی نظیر غلظت رنگ، تکسچر سطح قطعه، رنگ فیلر معدنی موجود در ترکیب و ... که بر قضاوت چشمی و دستگاهی رنگ اثرگذار هستند، بررسی می‌گردد.

واژه های کلیدی: رنگ، رنگ سنجی، آمیزه، پلیمر

مقدمه

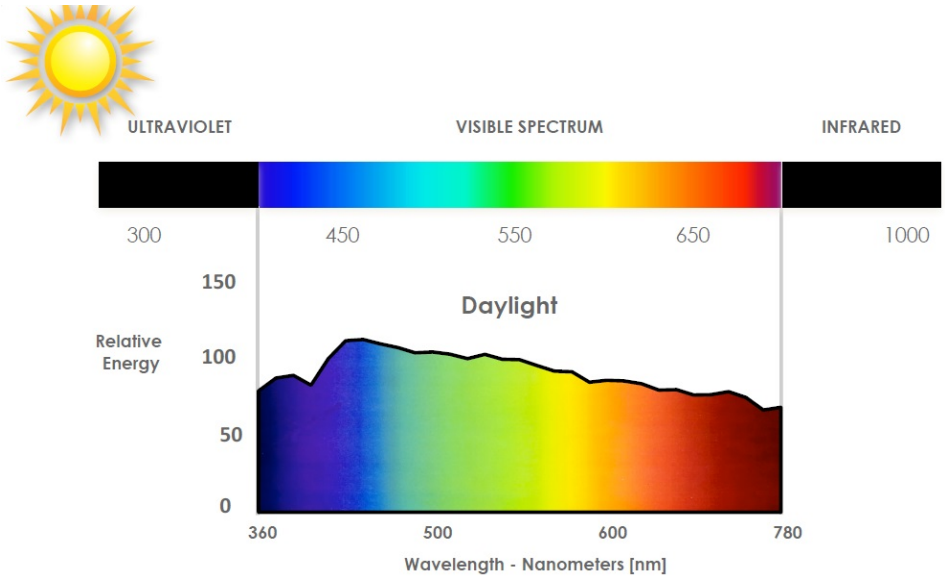
شاید بتوان رنگ را اینگونه تعریف کرد: احساسی که ناشی از نور بازتاب شده یا عبور کرده از جسم در انسان تجربه می‌شود. بنابراین برای اینکه این شرایط مهیا شود، حداقل سه فاکتور نیاز است که عبارتند از منبع نور، جسم مورد نظر و مشاهده‌گر، جالب اینکه تغییر در هر کدام این سه مورد می‌تواند تجربه‌ای متفاوت را از رنگ رقم بزند. اینکه رنگ اشیاء در نور آفتابی و مهتابی متفاوت دیده می‌شود یا قضاوت یک شخص در مورد همانندی رنگ بین دو جسم با قضاوت شخص دیگری (مثلاً یک استادکار نقاش اتومبیل) یکسان نیست، هر دو گواه این مساله است که تغییر در منبع نور و مشاهده‌گر به راحتی تجربه‌های متفاوت (رنگ‌های متفاوت) را در ذهن‌ها متبادر می‌کند.

در بسیاری از صنایع مانند خودروسازی، لوازم خانگی، منسوجات و ... رنگ محصولات اهمیت ویژه‌ای دارد و تلاش‌های زیادی به منظور ایجاد رنگ دلخواه، ثبت اطلاعات مربوط به آن و همچنین حفظ همان رنگ در محصولات آتی صرف می‌گردد. به عبارت دیگر همه‌ی این صنایع نیاز دارند تا راهی برای ارزیابی رنگ محصول خود و کنترل آن در حین تولید انبوه داشته باشند. به طور معمول یک نمونه‌ی مرجع مورد تایید وجود دارد (یا ایجاد می‌شود) و سپس رنگ نمونه‌ی آزمایشی با آن مقایسه می‌شود و این امر قضاوت در خصوص رنگ‌همانندی را مهیا می‌کند. چشم انسان ابزار بسیار کامل و مناسبی برای مقایسه در خصوص رنگ‌همانندی در اشیاء است و سالها در صنعت با اتکا به قضاوت‌های چشمی تصمیم‌گیری می‌شد. منتها همانطور که

اشاره شد، عواملی وجود دارند که تکرارپذیری نتیجه‌ی این مقایسه را از شخصی به شخص دیگر و از جایی به جای دیگر دچار مشکل می‌کند. لذا تلاش‌های عدیده‌ای به منظور ساخت ابزاری که رنگ اجسام را اندازه‌گیری بکند و در قضاوت‌های رنگ‌همانندی کمک حال بشر باشد، در چند دهه‌ی اخیر انجام شده است. در این مقاله تلاش شده است تا با مروری بر اصول و مبانی رنگ‌سنجی عددی و دستگاه‌های مورد استفاده، مفاهیمی که عدم وجود شناخت کافی از آنها می‌تواند موجب اختلاف نظر حتی بین آزمایشگاه‌های رنگ شود کمی ملموس‌تر و با ذکر چند مثال عملی تشریح گردد.

اسپکتروفوتومتر[1] و رنگ‌سنجی عددی

موسسه CIE[2] را می‌توان به عنوان یکی از پیشگامان انجام تحقیقات و ارائه استانداردها و روش‌های رنگ‌سنجی دانست که از سال ۱۹۱۳ تاکنون در این عرصه فعالیت دارد. این استانداردسازی معمولاً در بخش‌هایی که مربوط به منبع نور، مشاهده‌گر و هندسه‌ی قرارگیری نمونه نسبت به این دو است، انجام می‌شود. یکی از نورهایی که به عنوان منبع نور استاندارد شناخته می‌شود، نور روز[3] (D65) است که در شکل ۱ طیف مربوط به آن آورده شده است. این نور امروزه در دستگاه‌های اسپکتروفوتومتر (رنگ‌سنج) به کمک لامپ‌های زنون ایجاد می‌شود که شبیه‌ترین طیف به طیف نور مرئی را به دست می‌دهد.

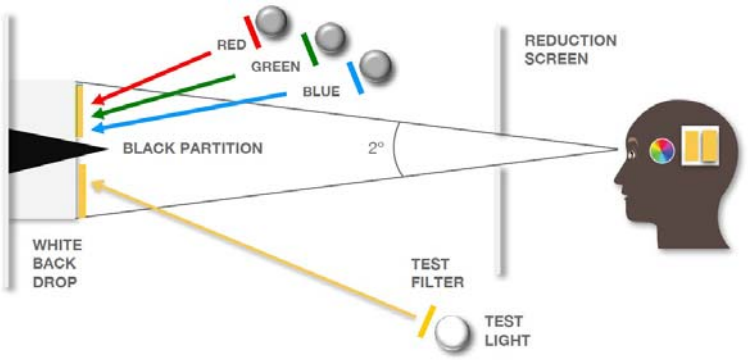


شکل ۱. طیف نور روز.

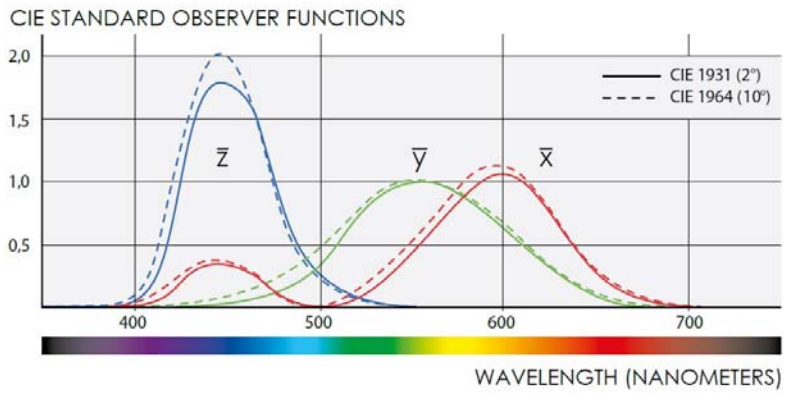
تعریف مشاهده‌گر استاندارد[4] یکی دیگر از فعالیتهایی است که توسط موسسه CIE انجام شده است. در سال ۱۹۳۱ و با فرض اینکه سلولهای مخروطی چشم که مسئول تشخیص رنگ هستند فقط در یک کمان کوچک (حدود ۲ درجه) از شبکیه قرار دارند، مشاهده‌گر استاندارد ۲ درجه[5] تعریف شد. لذا برای انجام مقایسه رنگ‌همانندی، اجسام از یک دریچه که زاویه‌ی دید ۲ درجه‌ای به مشاهده‌گر می‌داد، رویت می‌شدند. از همین دریچه و مانند آنچه در شکل ۲ ملاحظه می‌شود، تمام نورهایی که در طیف نور مرئی قابل ایجاد بودند روی یک پرده تابانده شدند و از مشاهده‌گر خواسته شد تا با استفاده از سه منبع قرمز و سبز و آبی ($\bar{x}$ و $\bar{y}$ و $\hat{z}$)، نور مشابه آن را ایجاد کنند به نحوی که هر دو نورِ ساخته شده و مورد آزمون را یکسان ببینند. سپس مجموعه‌ی این تلاش‌ها به صورت یک دیاگرامِ مشاهده‌گر استاندارد ۲ درجه منتشر شد. بعدها که مشخص شد سلولهای

[1] Spectrophotometer
[2] International Commission on Illumination (Commission Internationale de l'Eclairage)
[3] Daylight
[4] Standard Observer
[5] 2° Standard Observer CIE 1931

مخروطی در فضای بیشتری از شبکیه چشم گسترده شده‌اند، این استاندارد بازنگری شد و به صورت مشـاهده‌گـر اسـتاندارد ۱۰ درجه[6] عرضه شد که در شکل ۳ این دیاگرام نیز در کنار استاندارد قبلی آورده شده است.



شکل ۲. مشاهده از دریچه ۲ درجه.



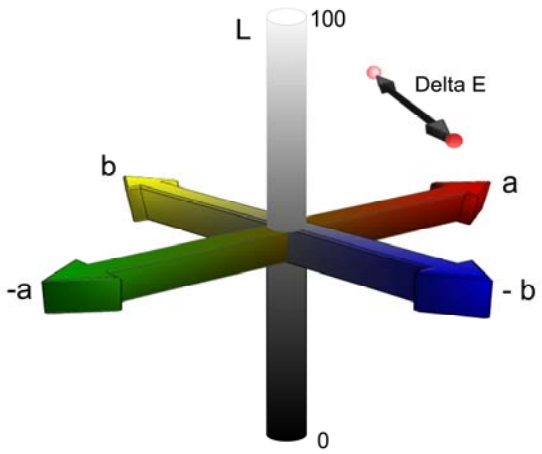
شکل ۳. مشاهده‌گر استاندارد ۲ و ۱۰ درجه.

حال با استفاده از یک سری روابط ریاضی که ورودی آنها عبارتست از تابع طیف نور مربوط به مرجـع اسـتاندارد (ماننـد طیـف D65) و طیف نور بازتابیده شده[7] یا عبور کرده[8] از جسم نمونه و همچنین توابع مشاهده‌گر استاندارد (عمدتاً استاندارد ۱۰ درجـه)، پارامترهای سه‌گانه‌ی CIE X, Y, Z قابل محاسبه خواهند بود که به نوعی بیانگر عدد رنگ در یک مختصـات سـه بعـدی قرمـز و سبز و آبی می‌تواند باشد. به غیر از این مختصات، رنگ را در مختصات دیگری نیز می‌توان گـزارش کـرد ماننـد Hunter L, a, b و CIE L*, a*, b* و CIE L*C*h و ... که دو مورد نخست، مختصات مستطیلی و مورد سوم مختصات استوانه‌ای است و تمام این موارد از طریق روابط ریاضی قابل محاسبه از CIE X, Y, Z هستند.

با توجه به اینکه کاربرد مختصات CIE L*, a*, b* در صنایع پلیمر و قطعات پلیمری بیشتر است، از سایر مختصات گذشته و توضیحات اندکی راجع به این سه پارامتر L* و a* و b* ارائه می‌شود. همانطورکه در شکل ۴ نشان داده شده است، برای هر رنـگ در این فضای سه بعدی یک نقطه در نظر گرفته می‌شود. پارامتر L* که عددی بین صفر تا ۱۰۰ است، مربوط به تیرگی و روشـنی است و هر چه بزرگتر باشد حاکی از روشنتر بودن رنگ است. پارامتر a* در محور مثبت بـه رنگهـای قرمـز و در محـور منفـی بـه

[6] 10° Standard Observer CIE 1964
[7] Reflected
[8] Transmitted

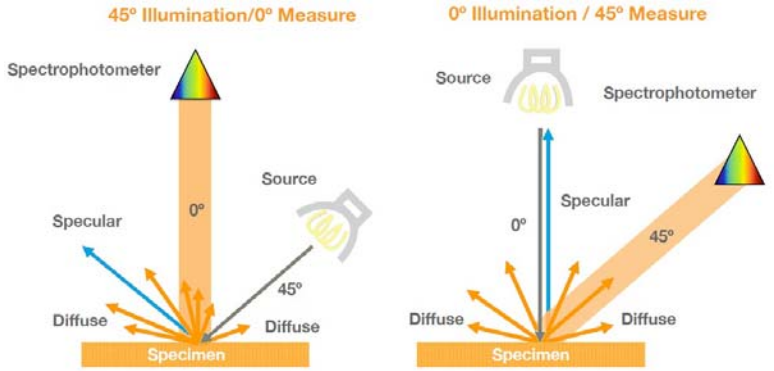
رنگهای سبز اشاره دارد، به عبارت دیگر هر چه بزرگتر باشد رنگ مورد نظر قرمزی بیشتری دارد. پارامتر *b به تقابل دو رنگ زرد و آبی اشاره دارد، که هر چه مثبت‌تر باشد رنگ زردتر است و هر چه منفی‌تر باشد رنگ آبی‌تر است. در مبحث مقایسه رنگ بین مرجع و نمونه، ابتدا اختلاف این پارامترها به صورت تک‌تک محاسبه شده و *ΔL و *Δa و *Δb گزارش می‌شود و نهایتاً اختلاف فضایی آن دو نقطه‌ی رنگ (مرجع و نمونه) با استفاده از جذر مجموع مربعات اختلافات فوق محاسبه و به صورت *ΔE گزارش می‌گردد (همانند شکل ۴).



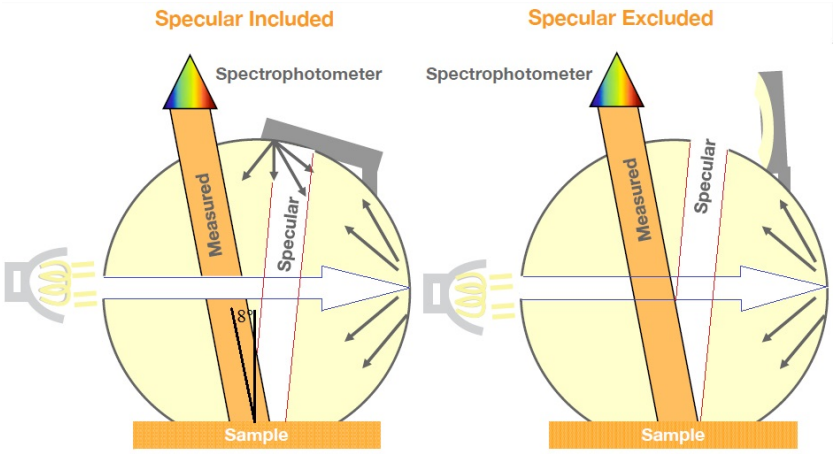
شکل ۴. مختصات سه بعدی رنگ L و a و b.

یکی دیگر از مسائلی که موسسه CIE در مبحث رنگ‌سنجی پیشنهاد داده است و بعدها تقریباً همه‌ی سازندگان اسپکتروفوتومتر مطابق آن رفتار کردند، هندسه‌ی قرارگیری منبع نور و نمونه و دیتکتور نسبت به یکدیگر است. سه هندسه‌ی 0/45 و 45/0 و d/8° [۹] امروزه بیشترین کاربرد را دارند. همانطور که در شکل ۵ آورده شده است، در دو هندسه‌ی 0/45 و 45/0 که به هندسه‌ی جهتدار[۱۰] معروف هستند، یا زاویه تابش یا زاویه دریافت ۴۵ درجه است و دیگری نزدیک به صفر درجه می‌باشد. مشاهده می‌شود که بخشی از نور تابیده شده در زاویه‌ای دقیقاً برابر با زاویه‌ی تابش به صورت آینه‌ای منعکس می‌شود که به آن جزء آینه‌ای[۱۱] گفته می‌شود و مابقی نور در جهات مختلف منعکس می‌شود که ناشی از ناصافی سطح است. در هندسه d/8° تمام اتفاقات در درون یک کره‌ی سفید با قابلیت بازتابش زیاد می‌افتد (شکل ۶). نور به درون کره تابانده می‌شود و پس از بازتابشهای مکرر از زوایای مختلف، یک طیف مشخص به سمت دیتکتور که در زاویه‌ی ۸ درجه نسبت به خط عمود بر نمونه قرار دارد، می‌رود. این فرایند می‌تواند در دو حالتِ شامل جزء آینه‌ای (SCI)[۱۲] و فاقد جزء آینه‌ای (SCE)[۱۳] انجام شود که هر کدام از این حالتها کاربردها و مزایای خاص خود را دارند.

[9] Diffuse 8°
[10] Directional
[11] Specular Component
[12] Specular Component Included
[13] Specular Component Excluded



شکل ۵. هندسه 0/45 و 45/0 در اسپکتروفوتومتر.



شکل ۵. هندسه d/8° در اسپکتروفوتومتر.

یکی از پارامترهایی که روی رنگ یک قطعه‌ی پلیمری اثر می‌گذارد، کیفیت سطح نمونه است. رفتار یک سطح مات و یک سطح براق در برابر نور تابیده شده متفاوت است و در حقیقت سهم جزء آینه‌ای از کلِ نور منعکس شده در این دو حالت فرق خواهد کرد. در هندسه 0/45 و 45/0 که جزء آینه‌ای راهی به سوی دیتکتور ندارد، براقیتِ بیشتر در سطح سبب کمتر شدن سهم آن بخش از نورهای بازتاب شده از سطح که می‌توانند به دیتکتور برسند، می‌شود و درنتیجه قضاوت واقعی در خصوص رنگ نمونه دچار خطا می‌شود. جای نگرانی نیست؛ زیرا چشم انسان نیز دقیقاً همین‌گونه قضاوت می‌کند و با افزایش یا کاهش براقیت، رنگ نمونه را متفاوت می‌بینند. ماجرای تقریباً مشابهی در خصوص حالت SCE در هندسه d/8° وجود دارد؛ در حالی که در حالت SCI به دلیل عدم حذف جزء آینه‌ای، قضاوتی که راجع به رنگ می‌شود تقریباً مستقل از کیفیت سطح قطعه خواهد بود و کم و زیاد شدن براقیت در این حالت اثر چندانی نداشته و می‌توان صرفاً رنگ مطلق نمونه را ارزیابی کرد. سناریوی مشابهی برای زبری سطح می‌توان متصور شد که در آنجا نیز به غیر از حالت SCI در هندسه d/8°، مابقی حالت‌ها نسبت به این متغیر سطحی واکنش نشان خواهند داد و اعداد L* و a* و b* تغییر خواهد کرد. بدین ترتیب زمانی که رنگ‌همانندی دو قطعه‌ی نامتجانس مد نظر است، اگر آن چیزی که چشم مشتری می‌بیند مهم و ملاک است، بهتر است از اسپکتروفوتومترهایی با هندسه 0/45 یا 45/0 و d/8° در حالت SCE استفاده شود؛ ولی اگر مطلق رنگ مد نظر است، باید از دستگاه با هندسه d/8° در حالت SCI استفاده شود.

آزمون‌ها و نتایج

با هدف ارزیابی میزان تأثیر مواردی که قبلاً ذکر شد بر روی کامپاندهایی که در شرکت پارسا پلیمر شریف تولید شده و در صنعت خودرو کاربرد دارند، چند آزمون طراحی شد. نمونه‌ها در دو سری A و B تعریف شدند که سری اول به نقش عوامل سطحی در رنگ‌سنجی توجه دارد و سری دوم به تغییر رنگ در مرحله‌ی ساخت آمیزه در شرکت کامپاندر و یا تولید قطعه در شرکت قطعه‌ساز اشاره دارد. در نمونه‌های سری A، سه ترکیب با رنگ‌های مختلف، شامل بژ تیره، طوسی و مشکی، و با فرمولاسیون نزدیک به هم که همگی بر پایه پلی‌پروپیلن بودند، تولید شد و سپس این کامپاندها در یک قالب شیت که چند گرین (تکسچر سطح) مختلف داشت، تزریق شدند (شکل۷). در نمونه‌های سری B، دو پارامتری که می‌تواند روی رنگ کامپاند اثرگذار باشند و در فرمولاسیون آن قابل تغییر بودند مدنظر قرار داده شد: ۱) غلظت پیگمنت یا مستربچ رنگی مورد استفاده (که هم در کامپاندینگ و هم در قطعه‌سازی ممکن است تغییر کند) و ۲) رنگ تالک (نوع تالک) به عنوان فیلر معدنی موجود در آمیزه (که در کامپاندینگ و با تغییر تأمین‌کننده‌ی تالک به دفعات ممکن است رخ دهد). برای رنگ‌سنجی از دو دستگاه X-Rite 962 (با هندسه 0/45) و Konica Minolta CM-5 (با هندسه d/8°) و همچنین به منظور اندازه‌گیری براقیت از دستگاه براقیت‌سنج Erichsen مدل 560MCX (با زاویه اندازه‌گیری ۶۰ درجه) استفاده شد.

شکل ۷. شیت تزریق شده مشتمل بر چند گرین مختلف، اعداد به شماره گرین اشاره دارند.

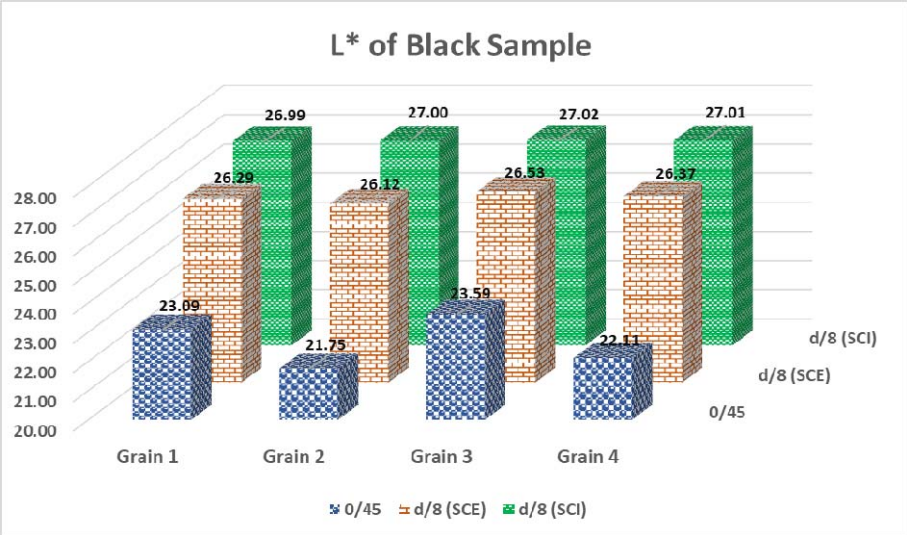
شکل ۸. مقدار براقیت گرین‌های مختلف تحت بررسی.

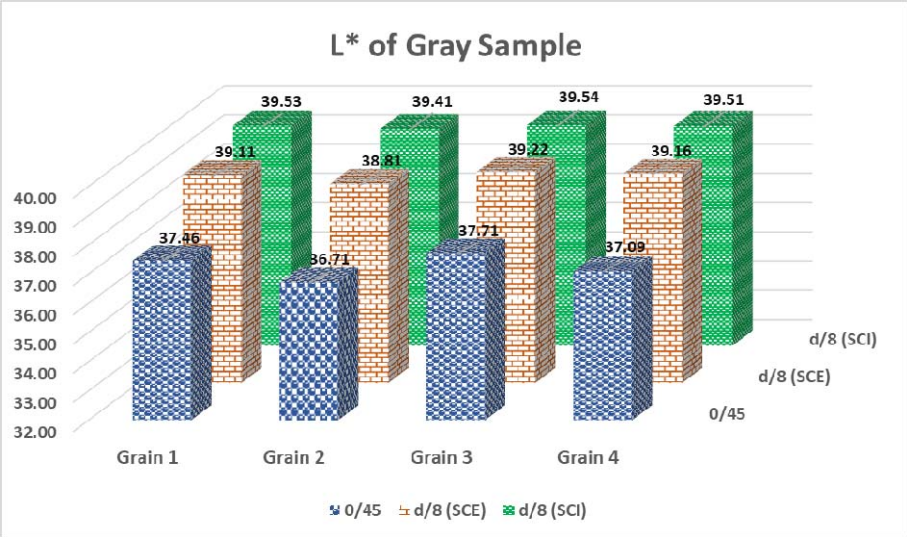
جدول ۱. نتایج رنگ‌سنجی شیت‌های با رنگ و تکسچر سطح مختلف

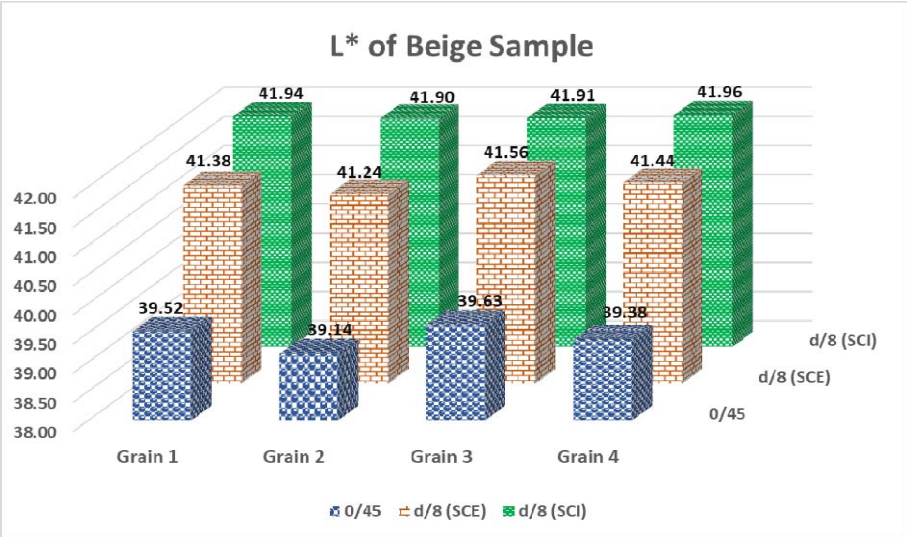
	L*			a*			b*		
	0/45	d/8 (SCE)	d/8 (SCI)	0/45	d/8 (SCE)	d/8 (SCI)	0/45	d/8 (SCE)	d/8 (SCI)
	مشکی								
Grain No. 1	23.09	26.29	26.99	-0.07	-0.12	-0.06	-0.45	-0.51	-0.48
Grain No. 2	21.75	26.12	27.00	-0.08	-0.11	-0.09	-0.41	-0.53	-0.50
Grain No. 3	23.59	26.53	27.02	-0.08	-0.07	-0.03	-0.41	-0.48	-0.48
Grain No. 4	22.11	26.37	27.01	-0.12	-0.10	-0.06	-0.61	-0.59	-0.47
Max - Min	1.84	0.41	0.03	0.05	0.05	0.06	0.20	0.11	0.03
	طوسی								
Grain No. 1	37.46	39.11	39.53	-0.18	-0.12	-0.12	0.17	-0.02	0.06
Grain No. 2	36.71	38.81	39.41	-0.16	-0.08	-0.12	0.26	0.01	0.05
Grain No. 3	37.71	39.22	39.54	-0.17	-0.12	-0.11	0.20	0.06	0.09
Grain No. 4	37.09	39.16	39.51	-0.19	-0.11	-0.14	0.16	-0.07	0.04
Max - Min	1.00	0.41	0.13	0.03	0.04	0.03	0.10	0.13	0.05
	بژ تیره								
Grain No. 1	39.52	41.38	41.94	3.19	3.00	2.98	6.35	5.89	5.86
Grain No. 2	39.14	41.24	41.90	3.24	3.00	2.97	6.48	5.90	5.82
Grain No. 3	39.63	41.56	41.91	3.20	3.01	2.99	6.41	5.91	5.87
Grain No. 4	39.38	41.44	41.96	3.25	3.03	2.95	6.50	5.76	5.67
Max - Min	0.49	0.32	0.06	0.06	0.03	0.04	0.15	0.15	0.20

مقدار براقیت و همچنین اندازه‌ی دانه‌بندی در چهار گرین مورد بررسی با هم تفاوت داشت که در شکل‌های ۷ و ۸ مشخص است. نتایج رنگ‌سنجی با دو دستگاه و در سه حالت مختلف در جدول ۱ آورده شده است. در هر بخش اختلاف بیشینه (Max) و کمینه (Min) اندازه‌گیری شده مابین چهار گرین مربوط به یک شیت نیز آورده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود در حالت d/8 (SCI) اختلاف بسیار کمی بین اعداد *L و *a و *b مربوط به گرین‌های مختلف هر شیت وجود دارد که تأیید کننده‌ی عدم وابستگی این هندسه از اسپکتروفوتومتر به براقیت سطح و همچنین تکسچر است. این در حالی است که پارامتر *L در هندسه d/8 (SCE) تغییراتی در حدود ۰/۴ واحد بین گرین‌های مختلف یک شیت داشته است. جالب اینکه وقتی اندازه‌گیری‌ها در هندسه 0/45 انجام شد، این بازه تغییرات افزایش داشت تا حدی که در نمونه مشکی رنگ بین کمترین و بیشترین *L اختلاف ۱/۸۴ واحد وجود دارد! شایان ذکر است این افزایش تغییرات *L به هیچ وجه به دقت دستگاه مربوط نمی‌باشد، زیرا در ستون‌های مربوط به *a و *b ملاحظه می‌شود که نتایج در هر سه حالت اندازه‌گیری نوسان کمی داشته‌اند. لذا می‌توان نتیجه گرفت پارامتری که بیشترین تأثیرپذیری را از تغییر براقیت سطح و تکسچر قطعه و یا تغییر هندسه دستگاه اسپکتروفوتومتر نشان می‌دهد، *L است.

تغییرات *L در شکل ۹ نشان داده شده‌اند و از مقایسه شکل ۹ و شکل ۸ به راحتی می‌توان دریافت که جهت تغییرات *L برعکس جهت تغییرات براقیت بین گرین‌ها است. به عبارت دیگر وقتی از یک پلیمر دو قطعه مشابه با براقیت متفاوت تولید شود، چشم انسان (!) و اسپکتروفوتومترهایی که هندسه 0/45 و یا d/8 (SCE) دارند، نمونه‌ی براقتر را تیره‌تر می‌بینند. منتها مقدار این اختلاف، به رنگ زمینه وابسته است، یعنی در نمونه‌هایی که رنگ زمینه تیره‌تر است، این مسأله شدیدتر رخ می‌دهد. موضوع هماهنگی در روش آزمون و نمونه‌سازی و پیش‌گیری از بروز اختلاف نتایج اندازه‌گیری در گرین‌های مختلف وقتی اهمیت بیشتری پیدا می‌کند که بدانیم مثلاً در صنعت خودرو حد پذیرش رنگ برای یک محصول پلیمری مثل داشبورد، $\Delta L^* < 1$ و $\Delta a^* < 0.5$ و $\Delta b^* < 0.5$ است و یک تفاوت ساده در تکسچر نمونه مورد بررسی و مرجع رنگ منجر به خطا در قضاوت می‌شود. لذا اکیداً توصیه می‌شود که آزمایشگاه‌های مختلف جهت مقایسه‌ی نتایج با یکدیگر حتماً به این مسائل دقت داشته باشند.

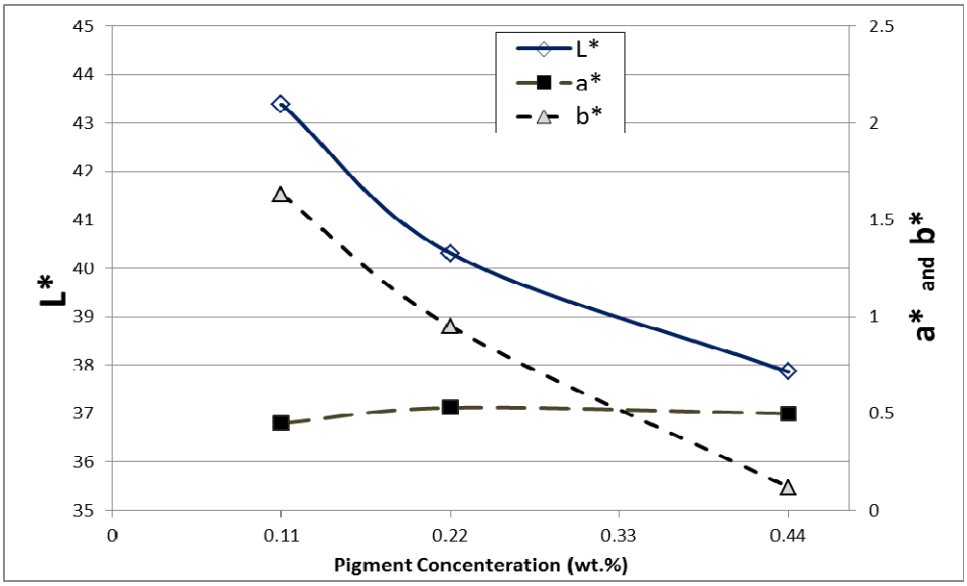






شکل ۹. مقایسه تغییرات پارامتر *L در رنگ‌سنجی شیت‌های با رنگ و تکسچر مختلف.

تغییر در فرمولاسیون کامپاند از دو طریق تغییر در غلظت پیگمنت‌های موجود در آن و همچنین تغییر گرید تالک مصرفی بررسی شد. همانطور که در شکل ۱۰ ملاحظه می‌شود، با افزایش غلظت پیگمنت‌ها (و یا معادلاً افزایش درصد مستربچ مصرفی)، رنگ کامپاند تغییر قابل توجهی می‌کند و نکته‌ی حائز اهمیت این است که سه پارامتر L* و a* و b* تغییرات مشابهی نخواهند داشت و اصولاً حتی با وجودی که مشخص است چه پیگمنت‌هایی در کامپاند حاضر هستند، نمی‌توان یک حکم کلی یا رویه‌ی تکراپذیر برای پیش‌بینیِ جهت تغییرات این سه مؤلفه ارائه کرد. در حالت بعدی تالک مورد استفاده در کامپاند از تالک ۱ به تالک ۲ که با هم تفاوت رنگ داشتند (جدول ۲) تغییر داده شد. جدول ۲ نشان می‌دهد که این تفاوت رنگ تالک‌ها به صورت خطی و مستقیم روی رنگ کامپاند اثر نگذاشته است. لذا می‌توان انتظار داشت رنگ کامپاند هم‌جهت با تغییر رنگ تالک تغییر کند ولی نتایج حاکی از آن است که میزان تغییر ایجاد شده در رنگ کامپاند رابطه‌ی مشخصی با مقدار تفاوت رنگ تالک‌ها ندارد.



شکل ۱۰. مقایسه تغییرات پارامتر L* (سمت چپ) و a* و b* (سمت راست) با تغییر غلظت پیگمنت.

جدول ۲. مطلق رنگ و اختلاف رنگ تالک‌ها و کامپاندهای متناظر

	L*	a*	b*	delta L*	delta a*	delta b*
Talc 1	87.95	-1.06	5.25	2.77	0.36	2.5
Talc 2	85.18	-1.42	2.75			
Comp .1	40.31	0.53	0.95	1.02	0.11	0.21
Comp. 2	39.29	0.42	0.74			

خلاصه مطالب و جمع‌بندی

۱. برای انجام یک رنگ‌سنجی استاندارد، حضور منبع نور استاندارد، مشاهده‌گر مشخص و استاندارد و همچنین نمونه‌ای که در هندسه‌ی مناسب قرار گرفته باشد، الزامی است.

۲. دستگاه‌های اسپکتروفوتومتر امروزه با سه هندسه 0/45 و 45/0 و همچنین d/8° بیشترین کاربرد را دارند که دو مورد اول در یک هندسه خطی/جهتدار و مورد سوم در یک هندسه کروی/پخشی کار می‌کنند.

۳. تغییر تکسچر سطح و براقیت آن به دلیل تأثیر بر میزان بازتابش جزء آینه‌ای روی رنگ‌سنجی موثر هستند و این مساله بیشتر روی پارامتر L* خود را نشان می‌دهد.

۴. تغییر در غلظت پیگمنت موجود در کامپاند و رنگ فیلر معدنی موجود در آن، شدیداً روی رنگ کامپاند اثرگذار هستند منتها نمی‌توان رابطه‌ی مشخصی برای این تبعیت ارائه کرد.

منابع

1. Basics of Color Theory, 2015, from: https://www.hunterlab.com/knowledge-library.html
2. Precise Color Communication, 2007, from: https://www.konicaminolta.com/instruments/knowledge/color/
3. Randall D., Instruments for the Measurment of Color, from: https://pdfs.semanticscholar.org/4ee7/5a94f974d2c0dbf142151fb2f888df90d96d.pdf
4. Gulrajani M. L., 2010, Color Measurment: Principles, Advances and Industrial Applications, Woodhead Publishing Series in Textiles.
5. Weeks-Atkins J., 2015, History of Color Measurment, from: https://www.xrite.com/blog/history-of-color-measurement
6. Arino I., Johansson S., Kleist U., Leander E., Rigdahl M., 2007, The effect of texture on the pass/fail colour tolerances of injection-molded plastics, Color Research and Application, Volume 32, pp. 45-54, @ Wiley Online Library.
7. Mathew R., 2017, Science and the Art of Color, Compounding World, July 2017, pp. 41-42.