

Investigating the Correlation Between Precision and Trueness of Spectrophotometers in Measuring the Whiteness Index and Tint Factor of None Fluorescence white Ceramic

Razieh Jafari* and Najmeh Khalili

Department of Color Physics, Institute for Color, Science and Technology, P.O. Box 16765-654, Tehran, Iran

Received: ?? 2023, Accepted: 2023

Abstract

The reflective spectrophotometers are available to users in benchtop and portable models with different geometries and designs to measure whiteness and tint attribute of white specimens and color coordinates of the samples. In these devices, factors like illumination-observation geometry, the type of light source and its lifetime, light scattering devices and optical receivers play an effective role in their precision and accuracy, which will somehow affect the outputs of the devices. In this research, the role of precision and accuracy of spectrophotometers in measuring the whiteness and tint indices of a BCRA reference white ceramic tile was investigated. For this purpose, seven spectrophotometers with different models and the same geometry ($d_i: 8^\circ$) were used. The results showed that not only the operation and maintenance of the device directly and potentially plays an important role in the precision and accuracy of the results, but also spectrophotometers with the same geometry and different models whose precision and accuracy are within acceptable tolerances, different results are observed in the whiteness index assessment. So that the difference of the measured whiteness index compared to the real values ranges from 0.16 to 3.28 units.

Keywords: reflectance spectrophotometer, precision, accuracy, BCRA ceramic standards, whiteness index

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail: jafari-ra@icrc.ac.ir; rajafiut@gmail.com

بررسی همبستگی دقت و صحت دستگاه‌های طیف‌نورسنج در اندازه‌گیری شاخص‌های سفیدی و تهرنگ سرامیک سفید غیر فلوئورسنتی

راضیه جعفری*، نجمه خلیلی

تهران، پژوهشگاه رنگ، پژوهشکده فیزیک رنگ، گروه پژوهشی دوباره تولید رنگ و کنترل رنگ، صندوق پستی ۶۵۴-۱۶۷۶۵

دریافت:؟؟، پذیرش:؟؟

چکیده

واژه‌های کلیدی: طیف‌نورسنج بازتابشی، دقت، صحت، استانداردهای سرامیکی BCRA، شاخص سفیدی

۱ مقدمه

سفید تداعی‌کننده احساساتی نظیر تازگی، تمیزی و خلوص است. نمونه‌های سفید، کاربردهای بسیاری در صنایع مختلف نظیر نساجی، کاغذ و مقوا، آرایشی و بهداشتی، کاشی و سرامیک و رنگ و پوشش دارند. به‌طور عمده با توجه به کاربرد گسترده آن‌ها ارزیابی سفیدی برای پاسخ بدین پرسش که کدام نمونه سفیدی بیشتری دارد، همیشه مورد توجه بوده است. از نظر بصری، نمونه‌ای سفید شناخته می‌شود که با دارا بودن بیشترین میزان روشنایی، عاری از هرگونه فام باشد. این نمونه‌ها در هر فضای رنگی محدوده بسیار کوچک و نزدیک به قله (رأس) را به‌خود اختصاص می‌دهند. مشخصه بارز این نمونه‌ها عموماً روشنی زیاد و خلوص رنگ (chroma) بسیار کم است. از نظر فیزیکی به نمونه‌ای سفید گفته می‌شود که تقریباً در تمام طیف مرئی بازتابشی یکسان و یکنواخت و تقریباً معادل ۱۰۰٪ را داشته باشد. این شرایط تنها یک حالت ایده‌آل است و برای پوشش‌هایی با موادی نظیر سولفات باریم، اکسیدهای

در حال حاضر، دستگاه‌های طیف‌نورسنج بازتابشی به‌شکل رومیزی و قابل‌حمل با هندسه و طراحی‌های مختلف برای سنجش شاخص‌های سفیدی و تهرنگ نمونه‌های سفید و مختصات‌های رنگی نمونه‌ها در دسترس کاربران قرار دارند. در این دستگاه‌ها مواردی نظیر هندسه روشنایی-مشاهده، نوع منبع نوری و عمر آن، وسایل پراکنندگی نور و گیرنده‌های نوری نقش مؤثری در دقت و صحت اندازه‌گیری آن‌ها دارند که به نوبه خود بر نتایج دستگاه مؤثر است. در این پژوهش، نقش دقت و صحت طیف‌نورسنج‌ها در اندازه‌گیری شاخص‌های سفیدی و تهرنگ یک نمونه سفید سرامیکی مرجع BCRA بررسی شده است. بدین منظور از هفت دستگاه طیف‌نورسنج با مدل‌های متفاوت و با هندسه $di:8^\circ$ استفاده شد. نتایج نشان داد، نه‌تنها کارکرد و نگهداری دستگاه به‌طور مستقیم و بالقوه در دقت و صحت این دستگاه‌ها نقش دارد، بلکه طیف‌نورسنج‌های دارای هندسه یکسان و مدل‌های متفاوت که دقت و صحت آن‌ها نیز در حد رواداری قابل‌قبول است، در اندازه‌گیری شاخص سفیدی با هم اختلاف دارند. به‌طوری که اختلاف شاخص سفیدی اندازه‌گیری‌شده در مقایسه با مقادیر واقعی در محدوده ۰/۱۶ واحد تا ۳/۲۸ واحد متغیر است.

$$T_w = 900(x_n - x) - 650(y_n - y) \quad (2)$$

که در آن‌ها، x و y مؤلفه‌های فام نمونه و x_n و y_n مؤلفه‌های فام پراکنده‌کننده ایده‌آل (منبع نوری) هستند. عامل Y ، بیانگر میزان روشنایی نمونه سفید است. WI در معادله (۱) به‌عنوان شاخص سفیدی نمونه و در معادله (۲)، T_w به‌عنوان شاخص تهرنگ نمونه معرفی می‌شود. افزون بر این، همان‌طور که گفته شد، براساس پیشنهاد CIE، نتایج حاصل از فرمول سفیدی تنها زمانی معتبر است که مقادیر سفیدی و تهرنگ در نامعادله‌های (۳) و (۴) صدق کنند [۹، ۱۰]:

$$40 < WI < 5Y - 280 \quad (3)$$

$$-4 < T_w < +2 \quad (4)$$

طبق معادله (۴)، میزان تهرنگ قابل قبول برای نمونه‌های سفید از ۴- برای سفید تهرمز تا ۲+ برای سفید ته‌سبز متفاوت است. زمانی که از دستگاه‌های طیف‌نورسنج برای اندازه‌گیری سفیدی استفاده می‌شود، باید بدین نکته توجه داشت، کاربران این دستگاه‌ها با مجموعه‌های مختلف از آن‌ها به‌شکل قابل حمل و رومیزی با هندسه‌های مختلف و ساخت شرکت‌های متفاوت سروکار دارند. بنابراین نکات حائز اهمیت در استفاده از این دستگاه‌ها، تکرارپذیری (repeatability) زیاد و صحت نتایج و همچنین توافق بین‌دستگاهی (inter-instrument) بوده که خطای ناشی از هر یک به‌نوعی بر اندازه‌گیری مقدار سفیدی اثرگذار است.

تکرارپذیری به دقت دستگاه در تکرار نتایج یک نمونه با شرایط یکسان اندازه‌گیری طی یک دوره زمانی مشخص گفته می‌شود. دقت تکرارپذیری کوتاه‌مدت دستگاه‌های طیف‌نورسنج با محاسبه انحراف استاندارد اندازه‌گیری‌های پیاپی (۲۰ بار تا ۳۰ بار) روی استاندارد سفید و در بازه زمانی مشخص که اصولاً کمتر از ۱ h است توسط یک کارور (operator) ثابت در شرایط اندازه‌گیری تکرارپذیر تعیین می‌شود. توافق بین‌دستگاهی، حالت خاصی از تکرارپذیری است که در این حالت یا نتایج دستگاه‌های با مدل یکسان یا دستگاه‌های با مدل‌های متفاوت و ساخت شرکت‌های مختلف با هم مقایسه می‌شوند که به این حالت اصطلاحاً توافق بین‌مدلی (inter-model) گفته می‌شود.

صحت، کنترل نزدیکی یا انطباق نتایج اندازه‌گیری دستگاه با مقادیر مرجع یک نمونه معین و استاندارد است. به نحوی که

منیزیم و سرب، آن هم نه به‌طور کامل، وجود دارد.

در شرایط واقعی، نمونه‌های سفید دارای تهرنگ‌های متفاوت هستند و با نام‌هایی نظیر سفید ته‌آبی، سفید ته‌سبز و سفید تهرمز و نظایر آن شناخته می‌شوند. بنابراین، ارائه یک پاسخ صریح به این پرسش که ظاهر کدام نمونه سفیدتر است به سادگی و صراحت مقدور نیست. به‌طور مثال از بین دو نمونه با روشنایی یکسان، نمونه‌ای که آبی‌تر است، مشاهده‌گر ترجیحاً به‌عنوان سفید ارزیابی می‌شود [۴-۱]. سفید ترجیحی نیز خود مسئله‌ای است که ریشه در آموزه‌ها و عوامل وابسته به فرهنگ و پیشینه ذهنی مشاهده‌گر دارد. بدین دلیل، قضاوت یک مشاهده‌گر با دیگری اختلاف دارد و افراد مختلف تعریف متفاوتی را مطابق سلیقه و فرهنگ خود ارائه می‌دهند [۵]. عوامل متعددی چون شرایط و روش ارزیابی، سن، جنسیت، پیشینه آموزشی و فرهنگی و ملیت در ارزیابی‌های چشمی، درک میزان سفیدی و گزینش سفید برتر اثرگذار هستند. بنابراین، همواره سعی شده تا برای ارزیابی کمی نمونه‌های سفید از روش‌های دستگاهی مانند طیف‌نورسنجی بازتابشی به‌همراه استفاده از فرمول‌های سفیدی در کنار روش‌های ارزیابی بصری استفاده شود. بدیهی است، با وجود همه تفاوت‌های موجود در ارزیابی چشمی نمونه‌های سفید، معیار نهایی بررسی نتایج دستگاهی ارزیابی سفیدی و فرمول‌های ارائه‌شده برای آن، ارزیابی‌ها و قضاوت‌های چشمی است [۷-۵].

برای ارزیابی کمی سفیدی از دستگاه‌های طیف‌نورسنج استفاده می‌شود. این دستگاه‌ها، ضریب بازتابش طیفی (spectral reflectance factor) نمونه را در محدوده مرئی طیف امواج الکترومغناطیس اندازه‌گیری می‌کنند و شاخص‌های سفیدی و تهرنگ نمونه از فرمول‌های مختلف در شرایط روشنی و مشاهده‌گر استاندارد CIE محاسبه می‌شود [۸]. در میان فرمول‌های زیادی که برای ارزیابی سفیدی نمونه‌ها ارائه شده است، شاخص سفیدی CIE که در سال ۱۹۷۲ توسط Ganz ارائه شد، به‌عنوان یکی از پرکاربردترین و متداول‌ترین شاخص‌های به‌کاررفته در ارزیابی سفیدی به‌کار می‌رود. از جمله محدودیت‌های فرمول‌های سفیدی و تهرنگ CIE، محدوده‌های تعریف‌شده برای مقادیر سفیدی و تهرنگ نمونه‌های فلورئوسان است. معادله‌های (۱) و (۲) به‌ترتیب شاخص‌های سفیدی CIE و تهرنگ را برای نمونه‌هایی که از نظر حسی سفید هستند، تحت استاندارد روشنایی D65 و مشاهده‌گر استاندارد CIE1964 یا ۱۰° نشان می‌دهند [۹]:

$$WI = Y + 800(x_n - x) + 1700(y_n - y) \quad (1)$$

با نتایج دستگاهی تطابق داشته باشد [۱۶،۱۷].
 با توجه به مقدمه پیش گفته مشخص می‌شود در طراحی و ساخت دستگاه‌های طیف نورسنج مواردی نظیر هندسه تابش مشاهده، نوع منبع نوری، وسایل پراکندگی نور نظیر توری پراش (diffraction grating) یا فیلترهای تداخلی (interference filter) و گیرنده‌های نور نظیر دیودهای نوری سیلیکونی یا آرایه‌های دیودی (diode array) نقش بسیار زیادی در تعیین میزان دقت و صحت دستگاه دارند. حتی تفاوت اندک در این ویژگی‌ها نیز می‌تواند به نوعی بر خروجی‌های نهایی دستگاه در ارزیابی‌ها مؤثر واقع شود [۱۸]. در این پژوهش، به منظور بررسی نقش دقت و صحت دستگاه‌های طیف نورسنج در ارزیابی دستگاهی سفیدی و تهرنگ نمونه‌های سفید، چند دستگاه طیف نورسنج از سازندگان مختلف با هندسه اندازه‌گیری و طراحی تقریباً یکسان انتخاب و دقت و صحت هر یک از دستگاه‌ها بررسی شد. شاخص‌های سفیدی و تهرنگ یک سرامیک سفید غیرفلوئورسان که دارای داده‌های مرجع است، به وسیله هر یک از دستگاه‌ها اندازه‌گیری شد. سپس بررسی شد که دقت و صحت هر دستگاه تأثیری در نتایج اندازه‌گیری سفیدی و تهرنگ داشته است یا خیر.

۲ تجربی

۲-۱ مواد و دستگاه‌ها

به منظور بررسی اثر دقت و صحت دستگاه‌ها بر اندازه‌گیری مقادیر شاخص‌های سفیدی و تهرنگ نمونه‌های سفید از هفت دستگاه طیف نورسنج انعکاسی رومیزی و قابل حمل با هندسه $di:8^\circ$ استفاده شد که مشخصات فنی آن‌ها به طور کامل در جدول ۱ گزارش شده است. برای بررسی صحت هر یک از دستگاه‌های طیف نورسنج از مجموعه ۱۴ تایی استانداردهای سرامیکی BCRA با کد BCRA-14-02c ساخت شرکت Avian Technology استفاده شد که اعتبار کالیبره کردن آن‌ها در بازه زمانی تعریف شده توسط شرکت سازنده قرار داشت. از استاندارد سفید سرامیکی BCRA نیز به عنوان نمونه مرجع سفید غیرفلوئورسنتی به منظور بررسی میزان سفیدی و تهرنگ استفاده شد. مقادیر ضریب بازتابش طیفی استانداردهای سرامیکی BCRA به عنوان داده مرجع استفاده شده‌اند. این داده‌های مرجع، قابلیت ردیابی به آزمایشگاه NIST را دارند و در گواهی عدم قطعیت این داده‌ها، ± 0.045 در محدوده طول موج ۵۰۰-۷۵۰ nm و ± 0.05 در طول موج ۳۰۰ nm گزارش شده است [۱۴].

مقادیر مرجع به وسیله یک آزمایشگاه با دقت و صحت زیاد نظیر مؤسسه ملی اندازه‌گیری (national metrological institute) ارائه شده باشند. از ساده‌ترین روش‌ها برای بررسی صحت نتایج طیف نورسنج‌های بازتابشی، استفاده از مجموعه استانداردهای سرامیکی مرجع BCRA و گزارش میانگین مقادیر اختلاف رنگ (ΔE_{ab}^*) است. حدود رواداری قابل قبول برای تکرارپذیری و صحت نتایج دستگاه‌های طیف نورسنج به صورت میانگین ΔE_{ab}^* توسط سازنده دستگاه گزارش می‌شود یا در استانداردهای مربوط به آزمون اندازه‌گیری رنگ و اختلاف رنگ این حدود رواداری گزارش شده است [۱۵-۱۱]. نکته مهم دیگر در استفاده از این دستگاه‌ها، منبع نور به کاررفته در دستگاه برای روشن کردن نمونه است. به طور کلی، در دستگاه‌های طیف نورسنج از لامپ‌های قوس زنون، فیلامنتی تنگستن، تنگستن-هالوزن و دیود گسیلنده نور (light-emitting diode, LED) استفاده می‌شود.

لامپ‌های فیلامنتی تنگستن یا تنگستن-هالوزن به طور نظری، توزیع طیفی استاندارد روشنایی CIE A را شبیه‌سازی می‌کنند. اصلی‌ترین مشکل آن‌ها، مصرف زیاد جریان الکتریکی برای رسیدن به دمای رنگ هم‌پسته است. این مسئله باعث گرم شدن دستگاه شده و در استفاده طولانی مدت ممکن است گرما روی رنگ نمونه‌ها اثر بگذارد.

لامپ‌های قوس زنون، توزیع طیفی استاندارد روشنایی D65 را شبیه‌سازی می‌کنند. این منابع نوری انرژی کافی در محدوده UV را برای تحریک نمونه‌های فلوئورسان دارند. در این دستگاه‌ها از فیلترهای مختلف برای حذف یا تنظیم میزان UV استفاده می‌شود. از آنجا که تابش‌های فرابنفش این لامپ‌ها با گذشت زمان و افزایش مدت استفاده از لامپ تغییر می‌کند، بنابراین برای این کالیبره کردن میزان UV در این دستگاه‌ها از سرامیک سفید دیگری با شاخص سفیدی مشخص استفاده می‌شود.

منابع نوری LED برای مدت بیشتری پایدار هستند و چون مصرف انرژی آن‌ها حداقل است، بنابراین گرمای زیادی تولید نمی‌کنند. در مقابل، تولید شدت زیاد نور خروجی برای این دسته از منابع نوری امکان‌پذیر نیست. با توجه به تفاوت‌های یادشده میان منابع نوری مختلف دستگاه‌های طیف نورسنج، این نکته بسیار حائز اهمیت است که برای اندازه‌گیری شاخص سفیدی نمونه‌های حاوی روشن‌کننده نوری (optical brightener) یا مواد فلوئورسان، منبع نوری دستگاه باید استاندارد روشنایی D65 را به خوبی شبیه‌سازی کند. این شبیه‌سازی نه تنها در منطقه مرئی، بلکه در ناحیه فرابنفش نیز باید به خوبی انجام پذیرد تا نتایج ارزیابی چشمی زیر نور روز

جدول ۱- مشخصات فنی دستگاه‌های طیف‌نورسنج استفاده‌شده با هندسه اندازه‌گیری $di:8^\circ$ و گام طول موج 1.0 nm .

کد دستگاه	مدل	شرکت سازنده	محدوده طیفی (nm)	نوع	تکرارپذیری کوتاه‌مدت (روی سفید استاندارد)	توافق بین‌دستگاهی (روی مجموعه دوم استانداردهای مرجع BCRA)	منبع نوری
K	CI-60	Xrite	۴۰۰-۷۰۰	قابل حمل	$0.1 \Delta E^*_{ab}$	$0.4 \Delta E^*_{ab}$	لامپ تنگستن پرشده با گاز
M	SP-62	Xrite	۴۰۰-۷۰۰	قابل حمل	$0.05 \Delta E^*_{ab}$	$0.2 \Delta E^*_{ab}$	لامپ تنگستن پرشده با گاز
S	500 uv	Data Color	۳۶۰-۷۰۰	رومیزی	$0.03 \Delta E^*_{ab}$	$0.15 \Delta E^*_{ab}$	زنون پالسی فیلترشده به حدود D65
C	CE 7000 A	Xrite	۳۶۰-۷۵۰	رومیزی	$0.1 \Delta E^*_{ab}$	$0.08 \Delta E^*_{ab}$	زنون پالسی
N	CI-60	Xrite	۴۰۰-۷۰۰	قابل حمل	$0.1 \Delta E^*_{ab}$	$0.4 \Delta E^*_{ab}$	لامپ تنگستن پرشده با گاز
P1	CE 7000 A	Xrite	۳۶۰-۷۵۰	رومیزی	$0.1 \Delta E^*_{ab}$	$0.08 \Delta E^*_{ab}$	زنون پالسی
P2	SP64	Xrite	۴۰۰-۷۰۰	قابل حمل	$0.05 \Delta E^*_{ab}$	$0.2 \Delta E^*_{ab}$	لامپ تنگستن پرشده با گاز

موج ۴۴۰، ۵۶۰ و ۶۶۰ nm از معادله (۵) محاسبه شد [۱۲]:

$$\Delta R_{\lambda,2\theta} = 2 \times \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (R_{\lambda,i} - \bar{R}_\lambda)^2} \quad (5)$$

برای بررسی ارتباط دقت و صحت با نتایج اندازه‌گیری سفیدی و تهرنگ از آماره ضریب همبستگی R استفاده شد.

کلیه اندازه‌گیری‌ها به وسیله یک کارور و تقریباً در شرایط یکسان و تکرارپذیر انجام گرفت. دما و رطوبت پیش از هر اندازه‌گیری با یک رطوبت‌سنج-دماسنج رقمی کالیبره‌شده، کنترل و تلاش شد تا شرایط محیطی هنگام اندازه‌گیری‌ها با آنچه در گواهی کالیبره‌شدن استانداردهای BCRA گزارش شده با دقت زیادی شبیه‌سازی شود. متوسط دمای آزمایشگاه هنگام اندازه‌گیری در هر دوره $23 \pm 1^\circ \text{C}$ و رطوبت نسبی $50 \pm 3\%$ بود. پیش از اندازه‌گیری، زمان گرم‌شدن لامپ دستگاه حدود ۱۵ min به‌طور یکسان در تمام اندازه‌گیری‌ها رعایت شد [۵].

۳ نتایج و بحث

۳-۱ بررسی نتایج دقت و صحت دستگاه‌های طیف‌نورسنج استفاده‌شده

نتایج تکرارپذیری و صحت ۷ دستگاه طیف‌نورسنج استفاده‌شده در این مطالعه در جدول ۲ گزارش شده است. همچنان که نتایج جدول ۲ نشان می‌دهد، حداکثر مقدار تکرارپذیری دستگاه‌ها تقریباً 0.037 واحد $RMS \Delta E^*_{ab}(2\theta)$ است که در مراجع مختلف حدود

۲-۲ روش کار

برای بررسی نقش دقت و صحت دستگاه‌های طیف‌نورسنج در اندازه‌گیری سفیدی و تهرنگ یک نمونه سفید، ابتدا تکرارپذیری و صحت هر یک از دستگاه‌ها بررسی شد. بدین ترتیب که برای بررسی دقت تکرارپذیری هر دستگاه، سرامیک سفید کالیبره‌کردن آن ۳۰ مرتبه بدون جابه‌جایی و پشت سر هم اندازه‌گیری و انحراف استاندارد (2s) هر یک از مؤلفه‌های Δa^* ، Δb^* ، ΔL^* و آماره $RMS \Delta E^*_{ab}$ محاسبه شد [۱۱-۱۳].

برای بررسی صحت هر دستگاه، از مجموعه ۱۴ تایی استانداردهای سرامیکی مرجع رنگی و غیررنگی BCRA استفاده شد [۱۴]. بدین ترتیب که هر یک از استانداردهای سرامیکی ۳ بار با هر دستگاه اندازه‌گیری و سپس میان میانگین مقادیر اندازه‌گیری‌شده و مقادیر مرجع هر استاندارد، اختلاف رنگ (ΔE^*_{ab}) محاسبه شد. از میانگین مقادیر اختلاف رنگ ۱۴ استاندارد سرامیکی BCRA به‌عنوان معیاری برای مقایسه صحت دستگاه‌ها استفاده شد [۲۱-۱۹، ۵]. برای محاسبه شاخص‌های سفیدی و تهرنگ، ضریب بازتابش طیفی استاندارد سفید BCRA با هر یک از دستگاه‌های طیف‌نورسنج در محدوده طیفی $400-700 \text{ nm}$ ، ۳ بار اندازه‌گیری شد. مختصات رنگی نمونه سفید در فضای رنگ CIELAB، شاخص‌های سفیدی و تهرنگ CIE طبق معادله‌های (۱) و (۲) تحت استاندارد روشیابی D65 و مشاهده‌گر استاندارد 2° با استفاده از ضریب بازتابش میانگین حاصل محاسبه شد [۹]. به‌منظور بررسی ارزیابی تغییرات ضرایب بازتابش طیفی اندازه‌گیری‌شده در هر تکرار نسبت به ضریب بازتابش میانگین، آماره تک‌متغیر $\Delta R_{\lambda,2\theta}$ برای هر یک از دستگاه‌ها طبق دستورکار استاندارد ASTM E2214 در سه طول

جدول ۲- نتایج تکرارپذیری و صحت طیف‌نورسنج‌ها.

درستی	تکرارپذیری (2 δ)	مدل دستگاه	کد دستگاه
ΔE^*_{ab} (براساس میانگین ۱۴ کاشی BCRA)	RMS ΔE^*_{ab}		
۰/۸۲	۰/۰۲۰	Xrite CI-60	K
۰/۷۴	۰/۰۲۳	XRite SP-62	M
۰/۸۳	۰/۰۲۹	Data Color 500 uv	S
۱/۱۰	۰/۰۳۲	XRite CE 7000 A	C
۰/۵۶	۰/۰۲۴	XRite CI-60	N
۰/۶۵	۰/۰۲۴	XRite CE 7000 A	P1
۰/۸۰	۰/۰۳۷	XRite SP-64	P2

شرکت سازنده در مشخصات فنی ادعا کرده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت، کارکرد و نگهداری طیف‌نورسنج‌های بازتابشی نقش مهم و مؤثری در دقت و صحت آنها دارد.

۳-۲ ارزیابی استاندارد سفید سرامیکی BCRA

همان‌طور که در قسمت‌های پیشین شرح داده شد، ضریب بازتابشی طیفی استاندارد سفید BCRA با هر یک از دستگاه‌های طیف‌نورسنج در محدوده طیفی ۷۰۰-۴۰۰ nm، ۳ بار اندازه‌گیری شد. به‌منظور بررسی تغییرات بازتابشی‌های طیفی اندازه‌گیری‌شده نسبت به فاکتور بازتابش میانگین، آماره $\Delta R_{\lambda,2\delta}$ برای هر یک از دستگاه‌ها در سه طول موج ۴۴۰، ۵۶۰ و ۶۶۰ nm محاسبه و نتایج در جدول ۳ گزارش شد. همچنان که نتایج آماره $\Delta R_{\lambda,2\delta}$ در این جدول نشان می‌دهد، تغییرات طیف‌های بازتابشی اندازه‌گیری‌شده نسبت به مقدار میانگین برای هر یک از دستگاه‌های طیف‌نورسنج بسیار ناچیز هستند. این نکته یکنواختی سطح کاشی و مجدداً دقت خوب دستگاه‌ها در تکرار نتایج را تأیید می‌کند.

منحنی میانگین ضریب بازتابشی طیفی استاندارد سفید سرامیکی مرجع BCRA، نتیجه ۳ بار اندازه‌گیری با هر یک از دستگاه‌های

روداری قابل‌قبول برای تکرارپذیری دستگاه‌های طیف‌نورسنج وابسته به دقت و مدل آنها تا ۰/۰۸ واحد ΔE^*_{ab} و برای دستگاه‌های تجاری تا ۰/۲ واحد ΔE^*_{ab} گزارش شده است [۲۲]. بنابراین، دقت تکرارپذیری کوتاه‌مدت کلیه دستگاه‌ها قابل‌قبول بوده و در حدود روداری قابل‌قبول ذکر شده قرار می‌گیرند. ولی تنها برای دستگاه‌های طیف‌نورسنج مدل CE7000A (کد C و P1) مطابق مشخصات فنی گزارش‌شده توسط شرکت سازنده آنها (جدول ۱) نیست. بررسی صحت دستگاه‌ها نشان می‌دهد، دستگاه C دارای بیشینه میانگین اختلاف رنگ و دستگاه N دارای کمینه میانگین اختلاف رنگ ΔE^*_{ab} هستند. با توجه به اینکه حدود روداری قابل‌قبول برای صحت دستگاه‌های طیف‌نورسنج از ۰/۳ واحد تا ۰/۸ واحد اختلاف رنگ ΔE^*_{ab} در مراجع گزارش شده است [۱۵،۱۶،۲۲]، بنابراین فقط صحت دستگاه C کمی بیش از حدود روداری تعیین شده است. افزون بر این، ۶ دستگاه طیف‌نورسنج بررسی‌شده در این مطالعه به‌جز دستگاه S، ساخت XRite هستند که حتی برخی از آنها از یک مدل یکسان نیز انتخاب شده‌اند، ولی دقت و صحت آنها با هم متفاوت بوده و در بررسی صحت، میانگین اختلاف رنگ اندازه‌گیری‌شده برای هر یک از آنها بزرگ‌تر از مقادیری است که

جدول ۳- نتایج آماره $\Delta R_{\lambda,2\delta}$ برای هر یک از دستگاه‌های طیف‌نورسنج.

$\Delta R_{\lambda,2\delta}$			مدل دستگاه	کد دستگاه
$\lambda=660 \text{ nm}$	$\lambda=560 \text{ nm}$	$\lambda=440 \text{ nm}$		
۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۵	Xrite CI-60	K
۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۷	XRite SP-62	M
۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۰۶	Data Color 500 uv	S
۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۵	XRite CE 7000 A	C
۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۰۷	XRite CI-60	N
۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۰۵	XRite CE 7000 A	P1
۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۵	XRite SP-64	P2

استاندارد را در محدوده طول موج ۴۰۰ nm تا ۷۰۰ nm نشان می‌دهد. مطابق این جدول، میانگین اختلاف ضریب بازتابش طیفی اندازه‌گیری شده به کمک طیف‌نورسنج C با اطلاعات مرجع در محدوده طول موج ۴۰۰ nm تا ۷۰۰ nm حداکثر ۱/۲۷٪ است. داده‌های حاصل به‌نوعی نتایج جدول ۲ را تأیید می‌کند، زیرا دستگاه C که در جدول ۲ کمترین صحت را در میان سایر دستگاه‌ها دارد و صحت نتایج آن از حدود رواداری قابل‌قبول نیز بیشتر بود، اکنون

طیف‌نورسنج با کدهای مشخص در شکل ۱ نشان داده شده است. کد A در این شکل به داده مرجع این استاندارد سرامیکی مربوط بوده که توسط شرکت Avaim Technology ارائه شده است. مطابق شکل ۱ و مقادیر ضریب بازتابش طیفی اندازه‌گیری شده، سرامیک سفید BCRA فاقد مواد سفیدکننده نوری است. جدول ۴، نتایج اختلاف ضریب بازتابش طیفی اندازه‌گیری شده با هر دستگاه طیف‌نورسنج در مقایسه با داده مرجع سرامیک سفید

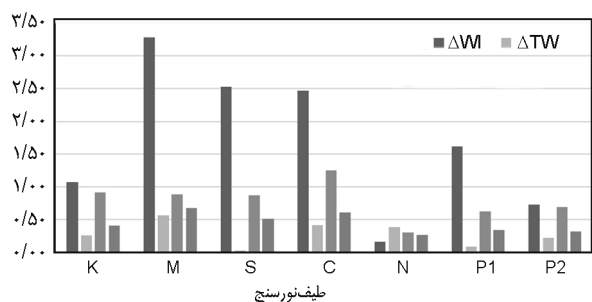
جدول ۴- نتایج اختلاف ضریب بازتابش طیفی اندازه‌گیری شده با هر دستگاه طیف‌نورسنج در مقایسه با داده مرجع سرامیک سفید استاندارد.

ΔR_{λ} (%)							طول موج (nm)
K	M	S	C	N	P1	P2	
۱/۳۸	۳/۰۸	۱/۵۶	۲/۳۵	۰/۴۳	۱/۰۴	۰/۷۷	۴۰۰
۰/۸۶	۲/۴۳	۱/۷۴	۱/۶۸	-۰/۱۲	۱/۰۱	۱/۰۳	۴۱۰
۰/۵۲	۲/۰۴	۱/۷۳	۱/۹۴	۰/۰۱	۱/۰۵	۰/۹۴	۴۲۰
۰/۹۵	۱/۵۵	۱/۵۵	۱/۳۹	-۰/۲۴	۰/۸۹	۰/۵۷	۴۳۰
۰/۸۴	۱/۴۸	۱/۳۶	۱/۲۵	-۰/۲۴	۰/۸۹	۰/۵۶	۴۴۰
۱/۰۵	۱/۶۳	۱/۳۷	۱/۶۳	-۰/۰۶	۰/۹۴	۰/۷۶	۴۵۰
۰/۹۶	۱/۴۳	۱/۲۰	۱/۷۵	-۰/۱۴	۰/۸۷	۰/۶۸	۴۶۰
۰/۹۶	۱/۴۵	۱/۱۳	۱/۵۶	-۰/۱۶	۰/۸۹	۰/۵۶	۴۷۰
۰/۹۷	۱/۴۵	۱/۱۱	۱/۵۴	-۰/۱۸	۰/۸۰	۰/۶۴	۴۸۰
۰/۹۸	۱/۴۱	۱/۰۹	۱/۵۳	-۰/۱۶	۰/۷۶	۰/۸۲	۴۹۰
۰/۸۷	۱/۳۱	۱/۰۳	۱/۴۹	-۰/۲۸	۰/۶۷	۰/۶۸	۵۰۰
۱/۰۴	۱/۲۶	۱/۰۹	۱/۶۲	-۰/۱۴	۰/۷۱	۰/۵۸	۵۱۰
۱/۰۹	۱/۳۰	۰/۷۷	۱/۵۳	-۰/۰۵	۰/۶۵	۰/۸۵	۵۲۰
۱/۰۰	۱/۰۱	۰/۵۳	۱/۳۴	-۰/۱۷	۰/۵۹	۰/۸۲	۵۳۰
۱/۰۶	۱/۱۶	۰/۹۰	۱/۴۰	-۰/۱۲	۰/۶۳	۱/۰۴	۵۴۰
۰/۹۸	۰/۷۳	۰/۸۳	۱/۲۴	-۰/۲۹	۰/۶۶	۰/۶۴	۵۵۰
۰/۹۹	۰/۷۱	۰/۹۳	۱/۲۴	-۰/۲۱	۰/۶۰	۰/۷۷	۵۶۰
۰/۹۱	۰/۵۸	۰/۸۵	۱/۰۸	-۰/۳۰	۰/۶۱	۰/۶۷	۵۷۰
۰/۸۵	۰/۸۶	۰/۸۸	۱/۰۲	-۰/۴۰	۰/۶۱	۰/۶۳	۵۸۰
۰/۹۳	۰/۸۰	۰/۹۱	۱/۱۹	-۰/۳۳	۰/۶۲	۰/۷۳	۵۹۰
۰/۶۶	۰/۴۸	۰/۷۳	۰/۸۸	-۰/۶۶	۰/۴۶	۰/۵۵	۶۰۰
۰/۶۸	۰/۳۱	۰/۷۶	۰/۸۵	-۰/۷۰	۰/۵۰	۰/۵۰	۶۱۰
۰/۶۸	۰/۳۱	۰/۷۷	۰/۸۹	-۰/۷۳	۰/۴۹	۰/۳۴	۶۲۰
۰/۶۴	۰/۱۷	۰/۶۷	۰/۸۰	-۰/۷۸	۰/۴۶	۰/۳۸	۶۳۰
۰/۵۹	۰/۱۷	۰/۵۱	۰/۸۹	-۰/۸۷	۰/۵۰	۰/۴۶	۶۴۰
۰/۷۵	۰/۱۰	۰/۶۶	۱/۲۴	-۰/۷۰	۰/۴۵	۰/۶۴	۶۵۰
۰/۷۰	۰/۰۳	۰/۴۵	۰/۹۸	-۰/۷۰	۰/۵۴	۰/۷۲	۶۶۰
۰/۴۶	-۰/۴۹	۰/۶۴	۰/۵۳	-۰/۹۱	۰/۳۷	۰/۲۸	۶۷۰
۰/۷۱	-۰/۴۶	۰/۸۵	۰/۷۳	-۰/۷۰	۰/۳۹	۰/۳۶	۶۸۰
۱/۲۸	-۰/۰۴	۱/۰۵	۱/۲۵	-۰/۰۸	۰/۸۴	۰/۸۹	۶۹۰
۰/۵۴	-۱/۲۱	۰/۴۶	۰/۶۲	-۰/۹۳	۰/۳۵	۰/۲۱	۷۰۰
۰/۸۷	۰/۸۷	۰/۹۷	۱/۲۷	-۰/۳۵	۰/۶۷	۰/۶۵	میانگین اختلاف ضریب بازتابش طیفی (%)

همگی بیش از مقدار مرجع بوده و کلیه اندازه‌گیری‌ها به‌طور مشابه سرامیک سفید را به‌عنوان یک نمونه سفید ته‌قرمز معرفی می‌کنند. مطابق جدول ۵، دستگاه M بیشترین مقدار شاخص سفیدی (۷۸/۱۲) را در میان مقادیر محاسبه‌شده نشان می‌دهد. در حالی که کمترین مقدار شاخص سفیدی معرفی‌شده متعلق به دستگاه N (۷۵/۰۰) است. در بررسی مقادیر تهرنگ مشاهده می‌شود، کمترین ته‌قرمزی محاسبه‌شده برای سرامیک سفید برابر با ۰/۲۱- مربوط به دستگاه M و بیشترین مقدار آن نیز برابر با ۰/۷۵- مربوط به دستگاه S است. در یک بررسی اجمالی مشخص می‌شود، هیچ یک از دستگاه‌ها به‌طور هم‌زمان مقادیر شاخص‌های سفیدی و تهرنگ را نزدیک به پایگاه داده مرجع محاسبه نکرده‌اند.

۳-۳ ارتباط دقت و صحت دستگاه‌ها با نتایج ارزیابی سفیدی

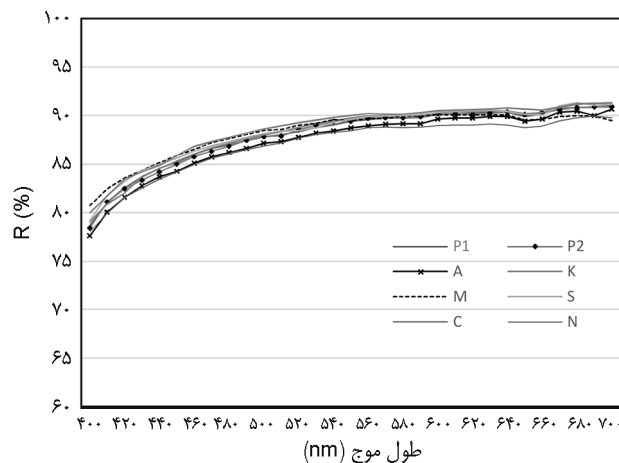
برای بررسی ارتباط دقت و صحت دستگاه‌های طیف‌نورسنج با نتایج اندازه‌گیری سفیدی و تهرنگ سرامیک سفید، ابتدا قدر مطلق اختلاف مقادیر شاخص سفیدی، تهرنگ، روشنایی و نیز اختلاف رنگ برپایه فرمول ΔE_{ab}^* میان مقادیر ارائه‌شده به‌وسیله هر یک از



شکل ۲- نمودار ستونی مقادیر اختلاف شاخص سفیدی، تهرنگ، روشنایی و اختلاف رنگ ΔE_{ab}^* با داده مرجع نمونه سفید استاندارد BCRA برای هر یک از دستگاه‌های طیف‌نورسنج کد K تا P2.

جدول ۵- مقادیر مشخصه‌های رنگی، شاخص سفیدی، تهرنگ CIE نمونه سفید استاندارد BCRA. کد A مربوط به پایگاه داده مرجع استاندارد سفید BCRA است.

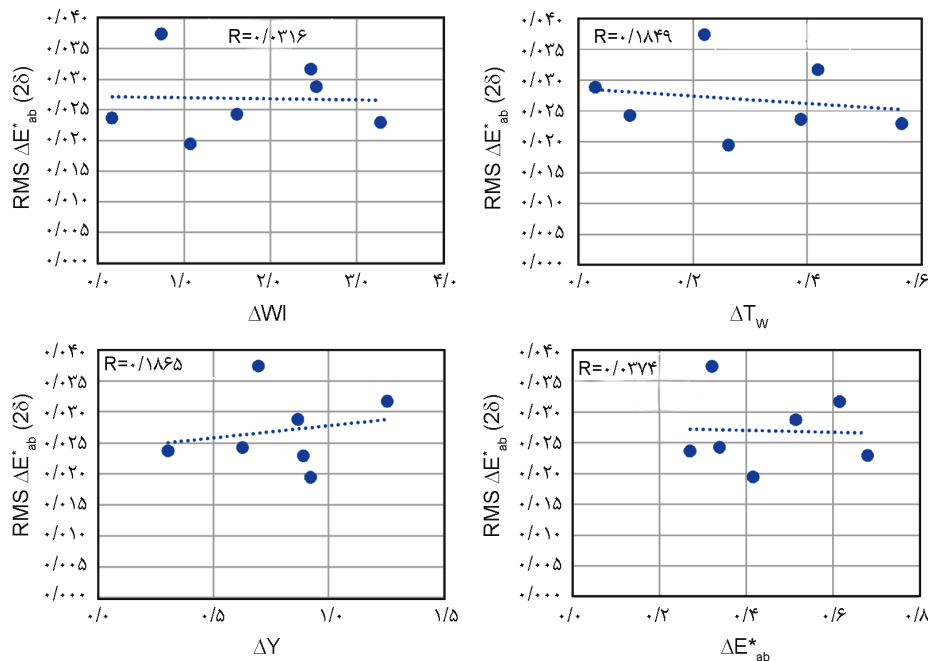
کد دستگاه	x	y	Y	WI	T_w
A (مرجع)	۰/۳۲	۰/۳۴	۸۸/۳۹	۷۴/۸۴	-۰/۷۷
K	۰/۳۲	۰/۳۴	۸۹/۳۱	۷۵/۹۱	-۰/۵۱
M	۰/۳۲	۰/۳۴	۸۹/۲۸	۷۸/۱۲	-۰/۲۱
S	۰/۳۲	۰/۳۴	۸۹/۲۶	۷۷/۳۷	-۰/۷۵
C	۰/۳۲	۰/۳۴	۸۹/۶۵	۷۷/۳۱	-۰/۳۶
N	۰/۳۲	۰/۳۴	۸۸/۰۹	۷۵/۰۰	-۰/۳۸
P1	۰/۳۲	۰/۳۴	۸۹/۰۲	۷۶/۴۵	-۰/۶۸
P2	۰/۳۲	۰/۳۴	۸۹/۰۹	۷۵/۵۷	-۰/۵۵



شکل ۱- منحنی بازتابش طیفی استاندارد سفید سرامیکی مرجع BCRA در محدوده طول موج ۴۰۰-۷۰۰ nm (کد A مربوط به داده مرجع استاندارد سرامیکی است).

بیشترین اختلاف ضریب بازتابش طیفی اندازه‌گیری‌شده را با مقادیر مرجع دارد. کمینه اختلاف مربوط به دستگاه N بود که طبق نتایج جدول ۲ بیشترین صحت را داشته و از کمترین مقدار میانگین اختلاف رنگ در مقایسه با سایر دستگاه‌ها برخوردار است.

جدول ۵، مقادیر مشخصه‌های رنگی، شاخص‌های سفیدی و تهرنگ CIE نمونه سفید استاندارد BCRA را نشان می‌دهد که ضریب بازتابش طیفی آن با ۷ دستگاه طیف‌نورسنج یادشده اندازه‌گیری شده است. کلیه کمیت‌ها در شرایط استاندارد نوری D65 و مشاهده‌گر استاندارد ۱۰° محاسبه شده‌اند. مطابق این جدول، نمونه سفید استاندارد BCRA بررسی‌شده، یک نمونه سفید با شاخص سفیدی حدود ۷۴/۸ واحد با مقدار تهرنگ -۰/۷۷- به‌عنوان یک نمونه سفید ته‌قرمز معرفی می‌شود. براساس نتایج، مقادیر شاخص سفیدی ارائه‌شده به‌وسیله ۷ دستگاه طیف‌نورسنج،



شکل ۳- ارتباط نتایج تکرارپذیری ۷ دستگاه طیف‌نورسنج با اختلاف در شاخص سفیدی، روشنایی، تهرنگ و اختلاف رنگ با مقادیر مرجع.

XRite SP-62) M و رومیزی C (XRite CE 7000 A) بیشترین اختلاف را با مقادیر مرجع در اندازه‌گیری شاخص سفیدی، تهرنگ و اختلاف رنگ دارند و می‌توان گفت عملکرد ضعیف‌تری در مقایسه با سایر دستگاه‌ها داشته‌اند.

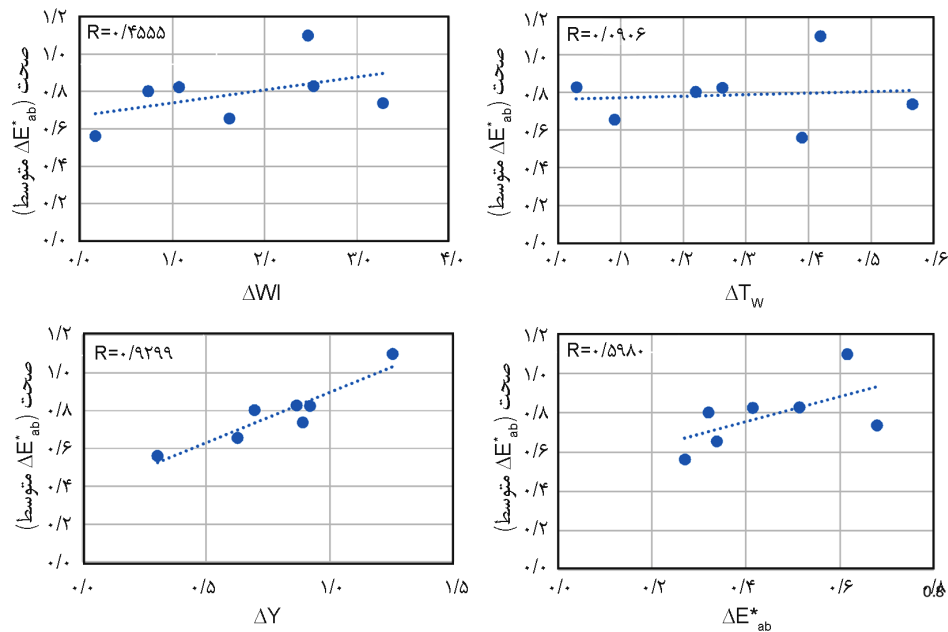
در بررسی نقش دقت و صحت دستگاه‌ها در اندازه‌گیری سفیدی و تهرنگ، از آماره ضریب همبستگی R استفاده شد. شکل ۳ رابطه تکرارپذیری هر یک از نتایج طیف‌نورسنج‌ها را با اختلاف‌های شاخص سفیدی، روشنایی، تهرنگ و رنگ نشان می‌دهد. با توجه به شکل و اینکه تکرارپذیری نتایج کلیه طیف‌نورسنج‌های این مطالعه در محدوده رواداری قابل قبول قرار دارند، با استناد به مقادیر ضریب همبستگی به‌دست‌آمده هیچ رابطه خطی میان دقت (تکرارپذیری) دستگاه با مقادیر اختلاف در شاخص سفیدی، تهرنگ، روشنایی و اختلاف رنگ مشاهده نمی‌شود.

برای بررسی ارتباط صحت دستگاه‌ها با ۴ کمیت اختلاف در شاخص سفیدی، تهرنگ، روشنایی و اختلاف رنگ به‌صورت مشابه از آماره ضریب همبستگی R استفاده شد که نمودارها در شکل ۴ نمایش داده شده است.

با توجه به پراکندگی نقاط و مقادیر و ضریب همبستگی R در شکل ۴، هیچ رابطه خطی میان صحت دستگاه‌های طیف‌نورسنج با اختلاف‌های شاخص سفیدی، تهرنگ و رنگ مشاهده نمی‌شود. درباره ارتباط اختلاف روشنایی با صحت دستگاه‌ها، ضریب

دستگاه‌های طیف‌نورسنج با پایگاه داده مرجع محاسبه و در نمودار ستونی شکل ۲ نشان داده شدند.

همان‌طور که در شکل ۲ دیده می‌شود، نتایج اختلاف سفیدی محاسبه‌شده برای هر یک از دستگاه‌ها در محدوده ۰/۱۶ واحد تا ۳/۲۸ واحد قرار دارد و بیشتر دستگاه‌های بررسی‌شده در این پژوهش بیش از یک واحد اختلاف را با مقادیر مرجع در اندازه‌گیری شاخص سفیدی دارند. افزون بر این، نتایج شاخص سفیدی اندازه‌گیری‌شده با دستگاه‌های (XRite SP-62) M، (XRite CE 7000 A) C و (Data Color 500 uv) S بیشترین اختلاف را نشان داده‌اند، به‌طوری که محدوده مقادیر اختلاف آن‌ها در محدود ۳/۳ واحد تا ۲/۴۷ واحد است. دستگاه (X Rite CI60) N کمترین اختلاف را در حدود ۰/۱۶ واحد با داده مرجع نشان داده است. در اندازه‌گیری تهرنگ (ΔT_w) کمترین اختلاف مربوط به دستگاه S است. بررسی اختلافات تک‌تک کمیت‌ها برای هر یک از دستگاه‌ها نشان می‌دهد، طیف‌نورسنج (X Rite CI60) N کمترین اختلاف را نسبت به مقادیر مرجع برای کمیت‌های ΔW_{CIE} ، ΔY و ΔE^*_{ab} نشان می‌دهد. به‌طور کلی، نتایج این طیف‌نورسنج در مقایسه با سایر دستگاه‌ها به مقادیر واقعی و مرجع نزدیک‌تر بوده و حداکثر اختلاف محاسبه‌شده برای این دستگاه حدود ۰/۴ واحد و مربوط به کمیت تهرنگ است. همچنان که نتایج شکل ۲ نشان می‌دهد، طیف‌نورسنج‌های قابل‌حمل



شکل ۴- ارتباط نتایج صحت ۷ دستگاه طیف‌نورسنج با اختلاف در شاخص سفیدی، روشنایی، تهرنگ و اختلاف رنگ با مقادیر مرجع.

اندازه‌گیری سفیدی یک نمونه سفید مرجع با هم اختلاف دارند، به طوری که اختلاف شاخص سفیدی اندازه‌گیری شده در مقایسه با مقادیر واقعی در محدوده ۰/۱۶ واحد تا ۳/۲۸ واحد متغیر است.

۴ نتیجه‌گیری

در این مطالعه، ۷ دستگاه طیف‌نورسنج استفاده شده به جز دستگاه S ساخت شرکت XRite هستند و حتی برخی از دستگاه‌ها از یک مدل یکسان هم انتخاب شده‌اند. ولی همچنان که نتایج این مطالعه نشان می‌دهد، دقت و صحت آن‌ها کمی با هم تفاوت دارند. به نظر می‌رسد، کارکرد و نگهداری دستگاه‌ها به طور مستقیم و بالقوه بر دقت و صحت آن‌ها اثرگذار است. بررسی مقادیر مثبت اختلاف کمیت‌های شاخص سفیدی، تهرنگ، روشنایی و اختلاف رنگ نسبت به مقادیر مرجع استاندارد سفید سرامیکی BCRA نشان می‌دهد، نتایج طیف‌نورسنج قابل‌حمل N مدل XRite CI-60 که بیشترین صحت را دارد و کمی بهتر از سایر دستگاه‌ها بوده و به مقادیر واقعی نزدیک‌تر است. در مقابل، نتایج دستگاه طیف‌نورسنج رومیزی C مدل XRite CE7000A که نتایج ارزیابی صحت آن خارج از محدوده قابل‌قبول است و دستگاه طیف‌نورسنج قابل‌حمل M مدل XRite Sp-64 که صحت آن در محدوده قابل‌قبول قرار دارد تا حدودی ضعیف‌تر از سایر دستگاه‌های

همبستگی به دست آمده حدود ۰/۹۳ است. به نظر می‌رسد، این اختلاف ناشی از تغییرات تک‌بعدی عامل روشنایی باشد، چون ۳ پارامتر شاخص سفیدی، تهرنگ و اختلاف رنگ همگی متشکل از چند پارامتر به‌ویژه تهرنگ بوده و در چند بعد در حال تغییر هستند. بنابراین، شاخص تهرنگ آن‌ها در ناهمگونی با صحت اثرگذار است. به طور مشابه با نتایج قبلی دستگاه (XRite CI60) N که بیشترین صحت را داشته در اندازه‌گیری کمیت‌های سفیدی، روشنایی و اختلاف رنگ نیز عملکرد بهتری دارد و نتایج آن به مقادیر واقعی و مرجع نزدیک‌تر است. اما برای کمیت تهرنگ، دستگاه S (Data Color 500 uv) کمترین اختلاف را نشان داده است. در اندازه‌گیری شاخص سفیدی دستگاه M (XRite SP-62) که صحت آن حدود ۰/۷۴ واحد میانگین اختلاف رنگ ΔE^*_{ab} است و در محدوده رواداری قابل‌قبول قرار دارد، بیشترین اختلاف سفیدی را با مقدار مرجع در مقایسه با سایر دستگاه‌ها داشته است. پس از آن دستگاه C (XRite CE 7000 A) که صحت آن در خارج از محدوده رواداری قابل‌قبول قرار دارد، بیشترین اختلاف شاخص سفیدی و اختلاف رنگ را نشان داده است. افزون بر این، دستگاه‌های K (XRite CI-60)، S (Data Color 500 uv) و P2 (XRite SP-64) که صحت آن‌ها حدود ۰/۸۳ واحد اختلاف رنگ است، اختلاف شاخص سفیدی محاسبه شده برای آن‌ها در محدوده ۳/۲۸ واحد تا ۰/۷۳ واحد است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت، دستگاه‌های طیف‌نورسنج این پژوهش با هندسه یکسان در

هندسه یکسان و مدل متفاوت که دقت و صحت آن‌ها در محدوده رواداری قابل قبول قرار می‌گیرد در اندازه‌گیری شاخص سفیدی یک نمونه سفید با هم اختلاف دارند، به طوری که تغییرات شاخص سفیدی CIE نسبت به مقدار مرجع در محدوده ۰/۱۶ واحد تا ۳/۲۸ واحد قرار دارد.

بررسی شده در کار حاضر عمل کرده است. با توجه به اینکه در میان گروه ۷ تایی طیف‌نورسنج‌ها تنها صحت یکی از آن‌ها خارج از محدوده قابل قبول بود، هیچ ارتباط خطی میان دقت و صحت دستگاه‌های طیف‌نورسنج در اندازه‌گیری سفیدی و تهرنگ مشاهده نشد. به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت، طیف‌نورسنج‌های دارای

مراجع

- [1] H. Amirshahi and P. Agahian, *Computational Color Physics (Persian)*, Tehran: Arkane Danesh, 1997, pp. 306-322.
- [2] R. Jafari, "Comparing of selected whiteness formulae in Assessment of samples out of CIE1982 whiteness formula restricted boundaries", *MS thesis*, Amir Kabir University of Technology, Tehran, Iran, 2006.
- [3] R. Jafari and S.H. Amirshahi, "The dependency of colorimetric characteristics of black fabrics to the whiteness attribute of substrate", *Prog. Color Color. Coat.*, vol. 11, no. 2, pp. 113-122, 2018.
- [4] R. Jafari, "Achromatic: definitions, concepts and indices. Part I: Whiteness", *Stud. Color World*, vol. 4, pp. 49-56, 2014.
- [5] R.S. Berns, F.W. Billmeyer, and M. Saltzman, *Principles of Color Technology*: New York, 4th ed., John Wiley and Sons, 2019, pp. 124-131.
- [6] R. Jafari and S.H. Amirshahi, "A comparison of the CIE and uchida whiteness formulae as predictor of average visual whiteness evaluation of textiles", *Text. Res.*, vol. 77, no. 10, pp. 756-763, 2007.
- [7] R. Jafari and S.H. Amirshahi, "Variation in the precisions of observers regarding the ordering of white samples", *Color Technol.*, vol. 124, no. 2, pp. 127-131, 2008.
- [8] R. Jafari and M. Shahmohamadi, "Evaluation of performance of Uchida whiteness formula in CIE modified tinting region", *Color Sci. Technol.*, vol. 11, no.1, pp. 23-34, 2017.
- [9] ASTM E 313, Standard Practice for Calculating Yellowness and Whiteness Indices from Instrumentally Measured Color Coordinates, Annual Book of ASTM Standard, 2015.
- [10] H. Uchida., "A new whiteness formula", *Color Res. Appl.*, vol. 23, pp. 202-209, 1998.
- [11] F. Ameri, N. Khalili, and M. Safi, "Investigating the precision and trueness of spectrophotometers using BCRA ceramic standard tiles", *Color Sci. Technol.*, vol. 12, pp. 73-80, 2018.
- [12] N. Khalili, M. Safi, and F. Ameri, "Investigation of the color stability of BCRA ceramic standards using univariate statistical methods", *Color Sci. Technol.*, vol. 15, no. 4, pp. 243-254, 2022.
- [13] Standard practice for "Specifying and verifying the performance of color measuring instruments", Annual Book of ASTM Standard, ASTM Standard, 06.01, E2214, 2019.
- [14] BCRA-14-02c, Avian Technologies LLC, P.O. Box 716, USA.
- [15] J. Seymour, "Evaluation of reference material for standardization of spectrophotometer", in Proceedings of the 65th Annual Conference of Technical Association of the Graphic Arts, 2013.
- [16] Ifra Special Report, "Inter instrument agreement in color and density measurement", http://www.ifra.com/website/specialr.nsf/sre_2007-02.pdf, access online in Sept 2017.
- [17] Standard practice for "Color measurement of fluorescent specimens using the one-Monochromator method", Annual Book of ASTM Standard, ASTM standard, E991, 2021.
- [18] Standard practice for Standard Practice for "Obtaining spectrometric data for object-color evaluation", Annual Book of ASTM Standard, ASTM standard, 06.01, E1164, 2012.
- [19] H.S. Fairman and H. Hemmendinger, "Stability of ceramic color reflectance standards", *Color Res. Appl.*, vol. 23, pp. 408-415, 1988.
- [20] D.R. Wyble and D.C. Rich, "Evaluation of methods for verifying the performance of color-measuring instruments. Part I: Repeatability", *Color Res. Appl.*, vol. 32, pp. 166-175, 2007.
- [21] D.R. Wyble and D.C. Rich., "Evaluation of methods for verifying the performance of color-measuring instruments. Part II: Inter-instrument reproducibility", *Color Res. Appl.*, vol. 32, pp. 176-194, 2007.
- [22] Standard Test Method for "Reflectance factor and color by spectrophotometry using hemispherical geometry", Annual Book of ASTM Standard, ASTM standard, 06.01, E1331, 2015.