وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
موسسه پژوهشی علوم و فناوری رنگ و پوشش

available online @ www.jcst.icrc.ac.ir
نشریه علمی- پژوهشی علوم و فناوری رنگ/ ۱۲ (۱۳۹۷)، ۸۰-۷۳

نشریه علمی پژوهشی علوم و فناوری رنگ
Journal of Color Science and Technology
www.jcst.icrc.ac.ir

بررسی دقت و صحت دستگاه‌های طیف‌سنج با استفاده از کاشی‌های سرامیکی استاندارد BCRA

فرهاد عامری[1*]، نجمه خلیلی[2]، مهدی صفی[1]

۱- استادیار، گروه پژوهشی فیزیک رنگ، موسسه پژوهشی علوم و فناوری رنگ، تهران، ایران، صندوق پستی ۶۵۴-۱۶۷۶۵

۲- کارشناس ارشد، گروه پژوهشی فیزیک رنگ، موسسه پژوهشی علوم و فناوری رنگ، تهران، ایران، صندوق پستی ۶۵۴-۱۶۷۶۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۶/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۰/۲۶ در دسترس به صورت الکترونیکی از: ۱۳۹۷/۳/۸

چکیده

در تحقیق حاضر دقت و صحت ۴ دستگاه طیف‌سنج از مدل‌های مختلف شرکت X-Rite به کمک کاشی‌های استاندارد BCRA مقایسه گردیده است. با توجه به اینکه از این ۴ دستگاه دو دستگاه کالیبره و دو دستگاه غیرکالیبره می‌باشند نقش کالیبراسیون دوره‌ای این دستگاه‌ها در کم کردن خطای آنها ارزیابی می‌گردد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد دقت هر ۴ دستگاه طیف‌سنج کاملا قابل قبول بوده و تفاوت معنی داری بین دستگاه‌های کالیبره و غیرکالیبره در تکرار نتایج وجود ندارد. علاوه براین نتایج میانگین اختلاف رنگ روی ۱۴ کاشی BCRA نشان می‌دهد که دستگاه طیف‌سنج غیرکالیبره مدل CE7000A نیاز به کالیبراسیون مجدد دارد ولی دستگاه غیرکالیبره مدل SP62 خطای قابل توجهی در مقایسه با دو دستگاه کالیبره این تحقیق ندارد. علاوه براین دستگاه نو و کالیبره مدل Ci64 در اندازه‌گیری کاشی های غیررنگی ضعف بیشتری در مقایسه با دو دستگاه SP62 و SP64 دارد. ضمنا میانگین مقادیر اختلاف رنگ روی کاشی‌های BCRA برای هر یک از دستگاه‌ها از مقدار قابل قبول تعیین شده بزرگ‌تر بوده است و به نظر می‌رسد مقدار مورد قبول تعیین شده برای صحت نتایج طیف‌سنج‌ها سخت‌گیرانه بوده و نیاز به بازنگری دارد.

واژه‌های کلیدی: طیف‌سنج، کالیبراسیون، اختلاف رنگ، کاشی‌های استاندارد BCRA ، دقت، صحت.

Investigating the Precision and Trueness of Spectrophotometers Using BCRA Ceramic Standard Tiles

F. Ameri*, N. Khalili, M. Safi

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

Received: 05-09-2017 Accepted: 16-01-2018 Available online: 29-05-2018

Abstract

In the present investigation four spectrophotometers from different models of the X-Rite company were compared in terms of precision and truness using BCRA standard tiles. We investigated the effect of manufacturer's re-calibration procedure on the reduction of error for spectrophotometers in which only two of them were calibrated. The repeatability results of this research show that the precision of all spectrophotometers is acceptable and there is no significant difference between calibrated and non-calibrated devices. Moreover, the average of color difference results for a series of fourteen BCRA tiles show that only the CE7000 A as a non-calibrated spectrophotometer needs the manufacturer's re-calibration procedure whereas the SP62 spectrophotometer which was not calibrated, shows no significant error in comparison to both other calibrated devices. Additionally for achromatic tiles, the new calibrated Ci64 device demonstrates a larger error than both SP62 and SP64 devices. Meanwhile, the average of color difference values per device for BCRA tiles are larger than acceptable values. Therefore, it seems that the acceptable value for trueness of spectrophotometers is an unreasonable expectation and needs to be revised. .J. Color Sci. Tech. 12(2018), 73-80©. Institute for Color Science and Technology.

Keywords: Spectrophotometer, Calibration, Color difference, BCRA standard tiles, Precision, Trueness.

***Corresponding author: ameri@icrc.ac.ir**

۱ـ مقدمه

اندازه‌گیری رنگ سطوح، اهمیت زیادی در تولید با کیفیت طیف وسیعی از محصولات صنایع مختلف دارد. بنابراین در فرآیندهای مختلف تولید باید این امکان وجود داشته باشد تا بتوان رنگ محصول را با دقتی برابر با قدرت تمایز چشم انسان[1] اندازه‌گیری نمود[۱،۲]. برای روشن شدن اهمیت مسأله به طرح یک مثال می‌پردازیم. یک تولیدکننده در نظر دارد یک محصول را با رنگ و ظاهری[2] خاص تولید کند. ظاهر این محصول قبل از تولید طراحی می‌شود ولی پس از تولید به دلیل برخی خطاهای تصادفی[3] در فرآیند تولید، رنگ محصول تغییر کرده و یا رنگ یک دسته محصول با دسته دیگر متفاوت می‌شود. این مسأله توجیه اقتصادی برای فروش یک محصول با کیفیت ندارد زیرا که کلید شهرت یک کالا، عرضه آن بدون تغییر در کیفیت و کارکرد است و این مسئله موجب شناخت محصول و اطمینان بازار و مشتریان شده و در نتیجه درآمد بیشتری را به وجود می آورد. بنابراین علاوه بر به کارگیری دستگاه‌های اندازه‌گیری رنگ در فرآیندهای مختلف تولید، کنترل دقت[4] و صحت[5] نتایج اندازه‌گیری نیز باید مد نظر قرار گیرد [۳]. چشم انسان قادر به درک میلیون‌ها رنگ است و قدرت تفکیک دو رنگ را تا حداقل کمتر از ۰,۵ واحد اختلاف رنگ $\Delta E^*_{a,b}$ دارد [۴]. لذا انتظار می‌رود نتایج دستگاه‌های اندازه‌گیری رنگ از انطباق خوبی با نتایج ارزیابی سیستم چشم انسان برخوردار باشند. اگر تنها هدف بررسی اختلاف رنگ[6] بین دو یا چند نمونه با هم باشد، این محدودیت یک مشکل محسوب نمی‌گردد، اما زمانی اهمیت آن آشکار می‌شود که نتایج اندازه‌گیری مختصات رنگی[7] دو نمونه یکسان بین دو دستگاه اندازه‌گیری رنگ به طور محسوسی با هم متفاوت باشد [۴،۵].

دستگاه‌های اندازه‌گیری رنگ به دو گروه کالریمترها و طیف‌سنج‌ها تقسیم می‌شوند. کالریمترها ساز و کار ساده‌تری در مقایسه با طیف‌سنج‌ها دارند لذا قیمت پایین‌تری نیز دارند. در این دستگاه‌ها رنگ شیء با نسبت نور منعکس شده از سه یا ۴ صافی رنگی و بصورت نسبی تخمین زده می‌شود. نتایج برخی تحقیقات نشان داده به منظور بالا بردن دقت اندازه‌گیری، باید طیف انعکاسی یا انتقالی نمونه را اندازه‌گیری نمود سپس این طیف با الگوریتم‌های منابع نوری استاندارد[8] و توابع رنگ همانندی[9] معین در فضاهای رنگی[10] مختلف با توجه به نوع کاربرد تبدیل به مختصات رنگی نمونه در آن فضا شود. طیف‌سنج‌ها طیف انعکاسی و یا انتقالی نمونه را در محدوده‌های طول موجی مختلف معمولا ۷۰۰-۴۰۰ نانومتر اندازه‌گیری می‌کنند در نتیجه برای اندازه‌گیری‌های دقیق[11] رنگ مناسب هستند. در این دستگاه‌ها هندسه قرارگیری منبع نوری و دریافت‌کننده نسبت به نمونه به صورت بین المللی استانداردسازی شده است و در حالت انعکاسی به سه هندسه 0:45° یا 45°:0، d:0°، 0:d° و d/8° یا 8°/d تقسیم می‌شوند [۸-۶]. هندسه تابش و مشاهده در دستگاه‌های اندازه‌گیری رنگ نقش مهمی در صحت نتایج اندازه‌گیری دارد به طوری که اندازه‌گیری رنگ یک نمونه با دو دستگاه طیف‌سنج با هندسه متفاوت باعث بروز اختلافاتی در نتایج حاصله می‌شود که می‌توان آن را به عنوان خطای عمومی در نظر گرفت[۹].

درستی[12] نتایج دستگاه‌های طیف‌سنج در بررسی دقت و صحت نتایج اندازه‌گیری آنها خلاصه می‌شود. در بررسی دقت، پراکندگی اندازه‌گیری‌ها نسبت به هم ارزیابی می‌گردد و در بررسی صحت، پراکندگی اندازه‌گیری‌ها حول یک مقدار واقعی[13] ارزیابی می‌گردد. برای کنترل صحت طیف‌سنج‌ها از سری ۱۴تایی یا ۱۲تایی کاشی‌های استاندارد BCRA استفاده می‌شود که توسط یک آزمایشگاه مرجع مانند NIST[14] اندازه‌گیری شده‌اند و داده‌های اندازه‌گیری شده به عنوان داده‌های مرجع گزارش می‌گردد و بدین وسیله هر آزمایشگاهی می‌تواند میزان خطای اندازه‌گیری خود را نسبت به این مقادیر مرجع تخمین بزند. این کاشی‌ها طیف گسترده‌ای از رنگ‌ها را پوشش می‌دهند و علاوه بر این، ویژگی‌های رنگی آنها در مدت طولانی (حدود چند سال) در صورتی‌که به طور صحیح استفاده شوند، کاملا ثابت و پایدار بوده و در حال حاضر به عنوان تنها ابزار مرجع برای کنترل صحت طیف‌سنج‌های انعکاسی و همچنین تعیین اختلاف قابل قبول یک طیف‌سنج با سایر طیف‌سنج‌ها معرفی شده است [۱۳-۱۰]. در استاندارد ASTM E2214، روش‌هایی برای ارزیابی تکرارپذیری[15] و تجدیدپذیری[16] دستگاه‌های طیف‌سنج انعکاسی معرفی شده است. تکرارپذیری در واقع بررسی دقت اندازه‌گیری دستگاه در یک بازه زمانی مشخص است که به سه دسته‌ی تکرارپذیری کوتاه مدت، میان مدت و دراز مدت تقسیم می‌شود. در تکرارپذیری کوتاه مدت، یک نمونه در

1- Discrimination limits of human eye
2- Appearance
3- Noise Inherent
4- Precision
5- Trueness
6- Color Difference
7- Color Coordinate values
8- Standard Illumination
9- Color Matching Functions
10- Color Space
11- Accurate
12- Accuracy
13- True value
14- National Institute of Standards and Technology
15- Repeatability
16- Reproducibility

شرایط یکسان بدون جابجایی ۳۰ بار اندازه‌گیری می‌گردد و دقت تکرار اندازه‌گیری‌ها نسبت به مقدار میانگین بررسی می‌گردد. در تکرارپذیری کوتاه مدت با توجه به این‌که اندازه‌گیری بدون جابجایی نمونه است لذا حصول نتایج تکرارپذیر وابسته به فناوری ابزار و دقت کاربر می‌باشد. در تکرارپذیری میان مدت دقت تکرار اندازه‌گیری‌ها بصورت روزانه و در طول ۱ تا سه هفته بررسی می‌گردد و در تکرارپذیری بلند مدت دقت تکرار نتایج در طول ۴ تا ۸ هفته و یا حداکثر در طول ۳ سال و ۳ ماه بررسی می‌گردد. تجدیدپذیری نوعی تکرارپذیری است که در آن یک یا چند عامل اندازه‌گیری تغییر می‌کند نظیر حالتی که روش اندازه‌گیری و یا دستگاه اندازه‌گیری متفاوت باشد و یا اپراتورهای مختلفی اندازه‌گیری را انجام دهند یا زمان اندازه‌گیری بسیار طولانی باشد. در بحث توافق بین دستگاه‌های طیف‌سنج یکی از رایج‌ترین حالت‌ها بررسی توافق میان دو یا چند دستگاه مختلف با مدل یکسان از یک شرکت سازنده است که با عنوان "Inter –Instrument agreement" تعریف می‌شود و یا بررسی توافق بین دو یا چند دستگاه با مدل‌های مختلف و از شرکت‌های سازنده متفاوت است که با عنوان " Inter - Model agreement" تعریف می‌شود. که توافق بین دستگاهی معمولا با تعیین مقادیر اختلاف رنگ بین نتایج اندازه‌گیری دو دستگاه و یا بین یک دستگاه مرجع با میانگین گروهی از دستگاه‌های طیف‌سنج بررسی می‌گردد. یکی از رایج‌ترین این روش‌ها، اندازه‌گیری کاشی‌های استاندارد BCRA با دستگاه و سپس بررسی میزان اختلاف رنگ میان نتایج اندازه‌گیری با داده‌های مرجع این کاشی‌هاست که در حالت ایده آل طبق استانداردها و تحقیقات انجام شده در این زمینه، میانگین مقادیر اختلاف رنگ تا حدود۰,۳ واحد اختلاف رنگ ΔE^*_{ab} توصیه شده است [۱۶-۱۱].

با توجه به اهمیت این موضوع، تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه توسط شرکت‌های سازنده دستگاه‌های طیف‌سنج و محققان دیگر صورت گرفته است. به طور مثال نتایج تحقیقاتی که در سال ۲۰۰۹ روی بررسی توافق بین ۹ طیف‌سنج ساخت شرکت‌های مختلف با استفاده از کاشی‌های BCRA صورت گرفت نشان داد که بطور کلی تمام طیف‌سنجها، اختلاف رنگ بزرگ‌تر از ۰,۵ واحد اختلاف رنگ ΔE^*_{ab} نسبت به داده‌های مرجع دارند و از یک گروه ۹ تایی طیف‌سنج، ۸ تای آنها خطای بزرگ‌تر از ۲ واحد اختلاف رنگ ΔE^*_{ab} را روی حداقل یک یا دو کاشی BCRA داشتند [۱۷]. در تحقیقات دیگری که توسط شرکت X-Rite روی ۶ جفت طیف‌سنج از مدل‌های مختلف ساخت خود این شرکت و روی ۴۶ نمونه رنگی چاپ شده انجام گرفت مقادیر اختلاف رنگ در محدوده ۱,۰۸-۰,۲۷ واحد اختلاف رنگ ΔE^*_{ab} گزارش شده است [۱۸، ۱۶]. بطور مشابه در تحقیق دیگری که هدف آن مقایسه طیف‌سنج‌های قابل حمل و رومیزی بوده و ۱۰ دستگاه طیف‌سنج رومیزی و قابل حمل از شرکت‌های مختلف را با هم مقایسه نموده است، مقادیر اختلاف رنگ روی سری ۱۲ تایی کاشی‌های BCRA در این تحقیق بین ۱,۶۸-۰,۷۳ واحد اختلاف رنگ ΔE^*_{ab} گزارش شده است [۱۹]. در تحقیق حاضر میزان دقت و صحت ۴ دستگاه طیف‌سنج با هندسه یکسان از مدل‌های مختلف شرکت Rite- با استفاده از سری ۱۴تایی کاشی‌های استاندارد BCRA بررسی می‌گردد. علاوه براین با توجه به اینکه تعدادی از دستگاه‌ها کالیبره و تعدادی نیز از زمان کالیبراسیون آنها گذشته است می‌توان بررسی نمود که کالیبراسیون دوره‌ای دستگاه‌ها که عموما توسط شرکت سازنده دستگاه‌ها انجام می‌شود تا چه اندازه می‌تواند در کم کردن خطای دستگاه‌های طیف‌سنج مفید واقع شود.

۲ـ بخش تجربی

۲ـ۱ـ مواد

در تحقیق حاضر از ۴ دستگاه طیف‌سنج انعکاسی با هندسه d/8° از مدل‌های مختلف شرکت آمریکایی X-Rite استفاده شد که سه دستگاه قابل حمل و یک دستگاه رومیزی بود و مشخصات فنی آنها در جدول ۱ خلاصه شده است. از بین این ۴ دستگاه طیف‌سنج، دستگاه Ci64 کاملا نو و کالیبره، دستگاه SP64 دارای گواهینامه کالیبراسیون معتبر، دستگاه CE7000A که از زمان کالیبراسیون آن بیش از ۱۰ سال گذشته و دستگاه SP62 که از زمان کالیبراسیون این دستگاه هم حدود ۳ سال گذشته است. در جدول ۱ دستگاه‌های دارای گواهینامه کالیبراسیون معتبر با علامت اختصاری VC[1]و دستگاه‌هایی که اعتبار گواهینامه کالیبراسیون آنها به پایان رسیده بود با علامت اختصاری EC[2] مشخص شدند. از سری ۱۴ تایی کاشی‌های استاندارد BCRA با کد BCRA-14-02c ساخت شرکت Avian Technology [۲۱] که برای هندسه کروی[3] قابل کاربرد هستند به عنوان مواد مرجع استفاده شد. داده‌های مرجع این استانداردها توسط آزمایشگاه مرجع NIST با عدم قطعیت ۰,۰۰۴۵ در محدوده طول موجی ۷۵۰-۵۰۰ nm و ۰,۰۰۵ در طول موج ۳۰۰ nm گزارش شده است و قابل ردیابی است.

۲ـ۲ـ روش کار

قبل از هر اندازه‌گیری زمان گرم‌شدن لامپ دستگاه‌ها حدود ۱۵ دقیقه به طور استاندارد برای تمام دستگاه‌ها رعایت گردید. تمام دستگاه‌ها با استاندارد سفید و سیاه مربوطه قبل از اندازه‌گیری کالیبره شدند.

1- Valid Certification
2- Expired Certification
3- Hemispherical Geometry

برای بررسی تکرارپذیری دستگاه‌ها، تکرارپذیری کوتاه مدت بررسی گردید و استاندارد سفید هر دستگاه، ۳۰ بار بدون جابجایی اندازه‌گیری گردید و سپس طبق استاندارد ASTM E2214 مقادیر RMS[1] ΔE^*_{ab} برای بررسی دقت تکرار نتایج گزارش گردید که از روابط ۱ تا ۴ محاسبه می‌گردد [۱۳].

$$\Delta L^*=L^*-\overline{L^*}, \text{var}(\Delta L^*)=V_{11}=\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(\Delta L_i^*-\Delta\overline{L^*}),\ \textbf{Repeatability (2S)}\ \Delta L^*=2\sqrt{V_{11}} \quad (۱)$$

$$\Delta a^*=a^*-\overline{a^*}, \text{var}(\Delta a^*)=V_{22}=\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(\Delta a_i^*-\Delta\overline{a^*}),\ \textbf{Repeatability (2S)}\ \Delta a^*=2\sqrt{V_{22}} \quad (۲)$$

$$\Delta b^*=b^*-\overline{b^*}, \text{var}(\Delta b^*)=V_{33}=\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(\Delta b_i^*-\Delta\overline{b^*}),\ \textbf{Repeatability (2S)}\ \Delta b^*=2\sqrt{V_{33}} \quad (۳)$$

$$\text{RMS}\Delta E^*_{ab}=2\sqrt{V_{11}+V_{22}+V_{33}} \quad (۴)$$

که در روابط فوق N تعداد اندازه گیری‌ها و L*، a* و b* مختصات رنگی نمونه مورد اندازه‌گیری در فضای CIELAB، Var واریانس، S انحراف استاندارد، $\overline{L^*}$، $\overline{a^*}$ و $\overline{b^*}$ میانگین ۳۰ بار اندازه‌گیری می‌باشند.

برای بررسی صحت طیف‌سنج‌ها، هر یک از کاشی‌های BCRA، ۵ بار با هر یک از دستگاه‌ها اندازه‌گیری و سپس مختصات رنگی هر کاشی در فضای CIELab با منبع نوری D65 و مشاهده کننده ۱۰ درجه توسط نرم‌افزار دستگاه محاسبه و سپس اختلاف رنگ ΔE^*_{ab} میان میانگین داده‌های اندازه‌گیری شده با داده‌های مرجع هر یک از کاشی‌های استاندارد BCRA بررسی می‌گردد.

۳ـ نتایج و بحث

۳ـ۱ـ بررسی تکرارپذیری

جدول ۲ نتایج تکرارپذیری کوتاه مدت هر یک ازدستگاه‌های طیف‌سنج را روی کاشی سفید کالیبراسیون در مقایسه با مقدار اسمی که توسط شرکت سازنده در مشخصات فنی هر دستگاه گزارش شده نشان می‌دهد.

1 Root Mean Square

جدول ۱: مشخصات فنی دستگاه‌های طیف‌سنج.

مدل دستگاه	قطر روزنه اندازه‌گیری (میلی‌متر)	هندسه	محدوده طول موجی در گام ۱۰ نانومتری	رومیزی/قابل حمل	تکرارپذیری کوتاه مدت (RMS ΔE^*_{ab} روی کاشی سفید)	توافق بین دستگاه‌ها* (روی سری دوم کاشی‌های۱۲ تایی BCRA)
CE7000A (EC)	۱۵	d/8°-SCI	۳۶۰-۷۵۰ نانومتر	رومیزی	۰،۰۱	Avg. 0.08 ΔE*
SP64 (VC)	۸	d/8°-SCI	۴۰۰-۷۰۰ نانومتر	قابل حمل	۰،۰۵	Avg. 0.13 ΔE^*_{ab}
SP62 (EC)	۸	d/8°-SCI	۴۰۰-۷۰۰ نانومتر	قابل حمل	۰،۰۵	Avg. 0.20 ΔE^*_{ab} Max. 0.40 ΔE*ab
Ci64 (VC)	۸	d/8°-SCI	۴۰۰-۷۰۰ نانومتر	قابل حمل	۰،۰۴	Avg. 0.13 ΔE^*_{ab}

*Inter Instrument Agreement

جدول ۲: نتایج تکرار پذیری کوتاه مدت دستگاه‌های طیف‌سنج.

مدل دستگاه	تکرارپذیری کوتاه مدت (2s) روی کاشی سفید				تکرار پذیری کوتاه مدت اسمی (2s) روی کاشی سفید
	ΔL*	Δa*	Δb*	RMS ΔE^*_{ab}	RMS ΔE^*_{ab}
CE7000A (EC)	۰،۰۰۷	۰،۰۱۵	۰،۰۱۷	۰،۰۲۴	۰،۰۱
SP64 (VC)	۰،۰۱۴	۰،۰۱۰	۰،۰۲۵	۰،۰۳۱	۰،۰۵
SP62 (EC)	۰،۰۲۰	۰،۰۱۵	۰،۰۲۱	۰،۰۳۲	۰،۰۵
Ci64 (VC)	۰،۰۲۱	۰،۰۱۲	۰،۰۱۵	۰،۰۲۸	۰،۰۴

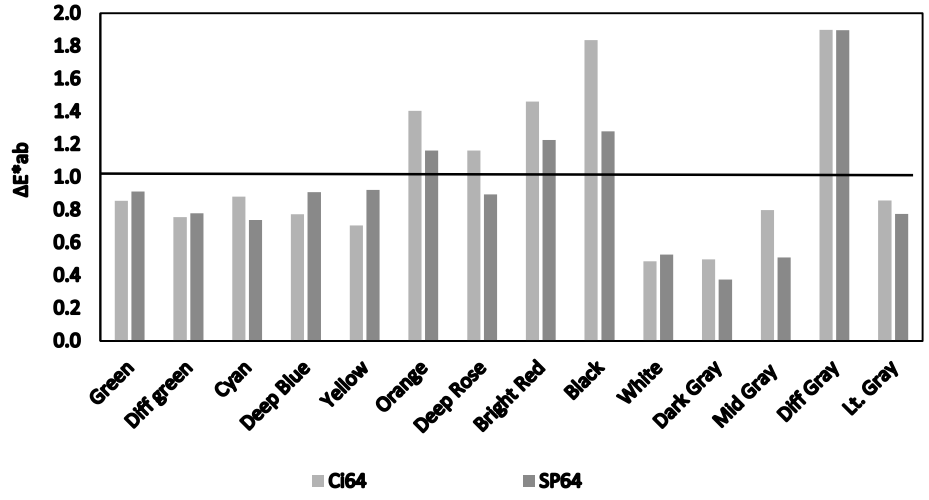
همان‌طوری که نتایج جدول ۲ نشان می‌دهد تکرارپذیری کوتاه‌مدت دستگاه‌های طیف‌سنج قابل حمل حتی کوچک‌تر از مقادیر گزارش شده توسط سازنده دستگاه می‌باشد به جز طیف‌سنج مدل CE7000A که تکرارپذیری واقعی آن تقریبا ۰,۰۱۴ از مقدار اسمی آن بزرگ‌تر است. طبق مراجع [۲۲-۲۰، ۹] که محدوده قابل قبول برای تکرارپذیری نتایج حاصل از یک طیف‌سنج دقیق را تا حدود ۰,۰۸ واحد اختلاف رنگ ΔE^*_{ab} و برای یک طیف‌سنج تجاری را تا حدود ۰,۱ واحد اختلاف رنگ ΔE^*_{ab} تعیین می‌کند می‌توان با اطمینان نتیجه گرفت که نتایج تکرارپذیری هر ۴ دستگاه طیف‌سنج کاملا قابل قبول بوده و تفاوتی بین دستگاه‌های کالیبره و غیرکالیبره در دقت تکرار نتایج وجود ندارد.

۳ـ۲ـ بررسی صحت دستگاه‌های طیف‌سنج

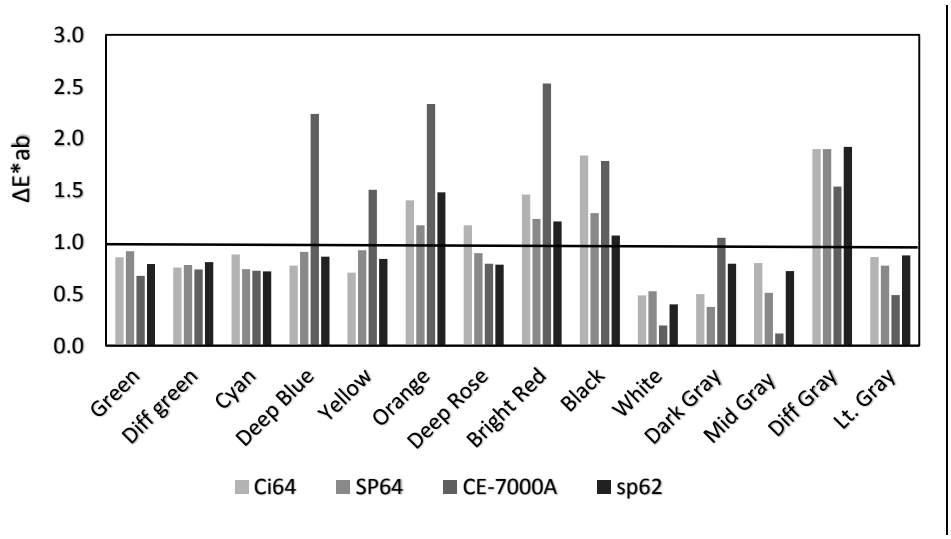
همان‌طوری که در قسمت مقدمه اشاره شد در بحث صحت نتایج، پراکندگی داده‌های اندازه‌گیری شده توسط دستگاه نسبت به مقادیر مرجع و مورد قبول بررسی می‌گردد. در این تحقیق برای بررسی صحت نتایج هر یک از دستگاه‌ها، اختلاف رنگ ΔE^*_{ab} میان میانگین نتایج هر دستگاه با مقادیر مرجع کاشی‌های استاندارد BCRA محاسبه گردید که شکل ۱ اختلاف رنگ دو دستگاه Ci64 و SP64 با داده‌های مرجع را نشان می‌دهد.

همان‌طوری که مشاهده می‌گردد میزان خطای دو دستگاه طیف‌سنج کالیبره این تحقیق یعنی Ci64 و SP64 روی کاشی‌های غیررنگی BCRA حداقل ۰,۳۷ واحد اختلاف رنگ ΔE^*_{ab} و مربوط به کاشی Dark Gray و حداکثر ۱,۹ واحد اختلاف رنگ ΔE^*_{ab} و مربوط به کاشی Diff Gray می‌باشد. روی کاشی‌های رنگی BCRA، حداقل ۰,۷۱ واحد اختلاف رنگ ΔE^*_{ab} و مربوط به کاشی Yellow و حداکثر ۱,۴۶ واحد اختلاف رنگ ΔE^*_{ab} و روی کاشی Bright Red است. هر دو دستگاه به طور مشابه روی کاشی‌های Orange، Bright Red، Black و Diff Gray مقادیر اختلاف رنگ بزرگ‌تر از ۱ واحد و کوچک‌تر از ۲ واحد اختلاف رنگ ΔE^*_{ab} دارند. در مورد دستگاه Ci64 که جدیدا خریداری شده و کاملا نو و کالیبره می‌باشد نتایج نشان می‌دهد روی ۴ کاشی نامبرده شده بجز کاشی Diff Gray، خطای آن بزرگ‌تر از دستگاه SP64 است که حدود یک‌سال از تاریخ آخرین کالیبراسیون آن می‌گذرد. علاوه براین روی کاشی Deep Rose نیز این دستگاه خطای بزرگ‌تر از ۱ واحد اختلاف رنگ ΔE^*_{ab} دارد. کمترین میزان خطا هر دو دستگاه طیف‌سنج به ترتیب روی کاشی‌های Dark Gray و White و تقریبا در حدود ۰,۵ واحد اختلاف رنگ ΔE^*_{ab} است.

در شکل ۲ اختلاف رنگ دو دستگاه طیف‌سنج غیرکالیبره CE7000A و SP62 با داده‌های مرجع کاشی‌های BCRA اضافه شده است. همان‌طوری که شکل ۲ نشان می‌دهد هر ۴ دستگاه طیف‌سنج کالیبره و غیرکالیبره این تحقیق به طور مشابه با نتایج تحقیقات قبلی [۱۱] روی کاشی‌های رنگی، Orange و Bright Red خطای بزرگ‌تر از ۱ واحد اختلاف رنگ ΔE^*_{ab} دارند. همچنین خطای بزرگ‌تر از ۱ واحد اختلاف رنگ روی کاشی‌های غیر رنگی Black و Diff Gray نیز مشاهده می‌گردد. ولی همچنان که مشاهده می‌شود خطای دستگاه طیف‌سنج CE7000A که خرید آن مربوط به سال ۲۰۰۱ بوده و تاکنون کالیبره نشده روی کاشی‌های رنگی Bright Red، Orange و همچنین روی کاشی Deep Blue به حدود تقریبا ۲,۵ واحد اختلاف رنگ



شکل ۱: مقادیر اختلاف رنگ ΔE^*_{ab} میان میانگین نتایج دستگاه طیف‌سنج Ci64 و SP64 با مقادیر مرجع ۱۴ کاشی BCRA.



شکل ۲: مقادیر اختلاف رنگ ΔE^*_{ab} میان میانگین نتایج هر دستگاه با مقادیر مرجع ۱۴ کاشی BCRA.

ΔE^*_{ab} می‌رسد. علاوه براین خطای این دستگاه روی کاشی Yellow نیز در مقایسه با سایر دستگاه‌ها که خطای زیر یک واحد اختلاف رنگ روی این کاشی دارند بالاتر بوده و به حدود ۱,۵ واحد اختلاف رنگ ΔE^*_{ab} می‌رسد. این در حالی است که در مورد سایر دستگاه‌ها حتی دستگاه غیرکالیبره SP62 بیشترین مقادیر خطا روی کاشی‌های رنگی BCRA، به ترتیب ۱,۴۸ و ۱,۲۳ واحد اختلاف رنگ ΔE^*_{ab} و آن هم مربوط به کاشی Orange و Bright Red است. دستگاه طیف‌سنج CE7000A روی کاشی‌های غیررنگی Black و Diff Gray به طور مشابه با سه دستگاه دیگر و علاوه براین روی کاشی Dark Gray نیز خطای بزرگ‌تر از ۱ واحد اختلاف رنگ ΔE^*_{ab} دارد به طوری که حداکثر خطای آن ۱,۷۸ واحد اختلاف رنگ ΔE^*_{ab} و مربوط به کاشی Black است که دستگاه نو و کالیبره Ci64 نیز تقریبا با اختلاف بسیار کمی همین خطا را روی این کاشی دارد. لذا با توجه به مشخصات فنی، بزرگ‌تر بودن قطر کره و رومیزی بودن دستگاه طیف‌سنج CE7000A که همه دلایلی برای دقیق‌تر بودن این دستگاه در مقایسه با سه دستگاه قابل حمل دیگر هستند می‌توان مشاهده نمود که این دستگاه در وضعیت موجود روی کاشی‌های رنگی در مقایسه با نتایج سه دستگاه دیگر خطای قابل توجهی به ترتیب روی کاشی‌های Bright Red، Orange، Deep Blue و Yellow داشته و در نقطه مقابل روی کاشی‌های غیررنگی خطای قابل توجه و بزرگ‌تری نسبت به سایر دستگاه‌ها ندارد به طوری که روی کاشی‌های روشن White، Mid Gray، Diff Gray و Lt. Gray خطای این دستگاه از سایر دستگاه‌ها کمتر است.

در مورد دستگاه غیرکالیبره SP62 خطای قابل توجهی در مقایسه با دو طیف‌سنج کالیبره این تحقیق روی هیچ یک از کاشی‌های BCRA مشاهده نمی‌شود بطوری که حتی روی برخی کاشی‌ها نظیر Bright Red و Black می‌توان گفت خطای دستگاه‌های Ci64 و SP64 کمی بیشتر از این دستگاه نیز می‌باشد. به طور کلی خطای دستگاه SP62 روی کاشی‌های غیررنگی BCRA حداقل ۰,۴۰ واحد روی کاشی White و حداکثر ۱,۹۲ واحد اختلاف رنگ ΔE^*_{ab} روی کاشی Diff Gray است. همچنین روی کاشی‌های رنگیBCRA حداقل ۰,۷۲ واحد و مربوط به Cyan و حداکثر ۱,۴۸ واحد اختلاف رنگ ΔE^*_{ab} و مربوط به کاشی Orange است. بنابراین در مورد دستگاه SP62 که حدود ۴ سال از تاریخ آخرین کالیبراسیون آن می‌گذرد و از نظر مشخصات فنی به دو دستگاه طیف‌سنج کالیبره SP64 و Ci64 شباهت دارد می‌توان گفت این دستگاه کماکان از نظر دقت تکرارپذیری و صحت نتایج کاملا مورد اطمینان بوده به طوری که حداکثر خطاهای مشاهده شده بزرگ‌تر از ۱ واحد اختلاف رنگ ΔE^*_{ab} این دستگاه روی کاشی‌های Diff Gray، Black، Bright Red و Orange بوده که در مقایسه با نتایج دو دستگاه کالیبره SP64 و Ci64 قابل توجه نمی‌باشد و با تقریب کمی می‌توان گفت دو دستگاه طیف‌سنج کالیبره نیز همین مقدار خطا را روی این کاشی‌ها دارند و در برخی از موارد خطای دستگاه SP62 کمتر نیز بوده است. برای ۴ دستگاه طیف‌سنج نتایج میانگین، حداقل و حداکثر اختلاف رنگ ΔE^*_{ab} بصورت جداگانه برای کاشی‌های غیررنگی، رنگی و کل ۱۴کاشی‌های BCRA در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳: مقادیر میانگین، کمینه و بیشینه اختلاف رنگ ΔE^*_{ab} میان نتایج اندازه‌گیری هر یک از دستگاه‌های طیف‌سنج با داده‌های مرجع برای کاشی‌های غیررنگی، رنگی و ۱۴ کاشی BCRA.

مدل دستگاه	مقادیر اختلاف رنگ ΔE^*_{ab}								
	کاشی‌های غیررنگیBCRA (۶ کاشی)			کاشی های رنگی BCRA(۸ کاشی)			کل کاشی‌های BCRA (۱۴ کاشی)		
	بیشینه	کمینه	میانگین	بیشینه	کمینه	میانگین	بیشینه	کمینه	میانگین
CE7000A	۱,۷۸	۰,۱۲	۰,۸۶	۲,۵۳	۰,۶۸	۱,۴۴	۲,۵۰	۰,۱۲	۱,۱۹
SP64	۱,۹۰	۰,۳۷	۰,۸۹	۱,۲۳	۰,۷۴	۰,۹۰	۱,۹۰	۰,۳۷	۰,۹۲
SP62	۱,۹۲	۰,۴۰	۰,۹۶	۱,۴۸	۰,۷۲	۰,۹۳	۱,۹۱	۰,۴۰	۰,۹۵
Ci64	۱,۹۰	۰,۴۹	۱,۰۶	۱,۴۶	۰,۷۱	۰,۹۸	۱,۹۰	۰,۴۹	۱,۰۲

همان‌طوری که نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد روی کاشی‌های غیررنگی BCRA، بالاترین مقدار میانگین اختلاف رنگ ΔE^*_{ab} مربوط به دستگاه طیف‌سنج Ci64 و کمترین مقدار مربوط به دستگاه طیف‌سنج CE7000A می‌باشد.

در مورد کاشی‌های رنگی BCRA، بالاترین مقدار میانگین اختلاف رنگ ΔE^*_{ab} مربوط به دستگاه طیف‌سنج CE7000A و برای سه دستگاه قابل حمل دیگر نتایج مشابه و تقریبا برابر با ۱ واحد اختلاف رنگ می‌باشد که این نتایج مجددا نشان می‌دهد که دستگاه طیف‌سنج CE7000A روی کاشی‌های رنگی خطای بزرگ‌تری در مقایسه با سایر دستگاه‌ها داشته و نیازمند کالیبراسیون مجدد می‌باشد ولی خطای سایر دستگاه‌ها اعم از کالیبره و غیرکالیبره در اندازه‌گیری کاشی‌های رنگی با اختلاف کمی تقریبا با هم برابر می‌باشد

مقایسه نتایج به دست آمده در جدول ۳ با مقادیر گزارش شده در جدول ۱ نشان می‌دهد که خطای اندازه‌گیری دستگاه‌های طیف‌سنج از مقدار گزارش شده توسط شرکت سازنده آنها بزرگ‌تر بوده و بجز دستگاه طیف‌سنج CE 7000 A که کالیبره نمی‌باشد، در محدوده ۰,۹۲ تا ۱,۰۲ واحد اختلاف رنگ ΔE^*_{ab} می‌باشد. علاوه براین بعد از دستگاه طیف‌سنج CE7000A، دستگاه Ci64 بیشترین خطا را داشته است و بررسی نتایج میانگین اختلاف رنگ روی کاشی‌های غیر رنگی و رنگی برای این دستگاه نشان می‌دهد که دستگاه Ci64 در اندازه‌گیری کاشی‌های غیررنگی ضعف بیشتری نسبت به کاشی‌های رنگی در مقایسه با دستگاه‌های SP62 و SP64 دارد، به نظر می‌رسد کالیبراسیون دستگاه در نقطه صفر و صد که توسط شرکت سازنده صورت گرفته با خطا همراه بوده است. این در حالی است که انتظار می رفت با توجه به مشخصات فنی گزارش شده توسط شرکت سازنده و همچنین نو و کالیبره بودن آن، این دستگاه خطای کمتری در مقایسه با دو دستگاه قابل حمل دیگر داشته باشد. در مورد دستگاه غیرکالیبره SP62، نتایج میانگین مقادیر اختلاف رنگ روی ۱۴ کاشی BCRA برابر با ۰,۹۵ واحد اختلاف رنگ ΔE^*_{ab} بوده و اختلاف چندان معناداری با نتایج میانگین دستگاه کالیبره SP64 نشان نداده است و به نظر می‌رسد که این دستگاه در حال حاضر نیاز به کالیبراسیون مجدد نداشته باشد. علاوه براین با توجه به اینکه دستگاه طیف‌سنج CE7000A در اندازه‌گیری کاشی‌های غیر رنگی برخلاف کاشی‌های رنگی، کمترین مقدار میانگین اختلاف رنگ را در مقایسه با سایر دستگاه‌ها به خود اختصاص داده است لذا به نظرمی‌رسد برای ارزیابی دقیق صحت نتایج دستگاه‌های طیف‌سنج باید هر ۱۲ یا ۱۴ کاشی BCRA با دستگاه اندازه‌گیری شود و سپس با جمع‌بندی نتایج در مورد کالیبره یا غیرکالیبره بودن دستگاه قضاوت نمود.

۴ـ نتیجه‌گیری

نتایج میانگین مقادیر اختلاف رنگ ΔE^*_{ab} روی ۱۴ کاشی استاندارد BCRA نشان می‌دهد که خطای اندازه‌گیری دستگاه‌های کالیبره این تحقیق در محدوده ۰,۹۲ تا ۱,۰۲ واحد اختلاف رنگ قرار دارند. علاوه براین بعد از دستگاه طیف‌سنج CE7000A، دستگاه Ci64 بزرگترین مقدار اختلاف رنگ را به خود اختصاص داده که بررسی نتایج روی کاشی‌های رنگی و غیررنگی نشان می‌دهد که این دستگاه در اندازه‌گیری کاشی‌های غیررنگی ضعف بیشتری نسبت به کاشی‌های رنگی در مقایسه با دستگاه‌های SP62 و SP64 دارد که به نظر می‌رسد این مشکل ناشی از عدم کالیبراسیون صحیح دستگاه در نقطه صفر و صد توسط شرکت سازنده باشد و این در حالی است که انتظار می رفت با توجه به مشخصات فنی گزارش شده توسط شرکت سازنده و همچنین نو و کالیبره بودن آن، این دستگاه خطای کمتری در مقایسه با دو دستگاه قابل حمل دیگر داشته باشد. در حالت کلی می‌توان گفت که کارکرد دستگاه، نحوه نگهداری و استفاده از آن از جمله عوامل مهم در تعیین تاریخ کالیبراسیون یک دستگاه طیف‌سنج می‌باشند و این را می‌توان با کنترل‌های میانی منظم دستگاه و با

استفاده از سری ۱۴ تایی یا ۱۲ تایی کاشی‌های استاندارد BCRA تعیین نمود.

علاوه براین نتایج میانگین اختلاف رنگ روی ۱۴ کاشی BCRA نشان می‌دهد مقدار قابل قبول ۰٫۳ واحد اختلاف رنگ ΔE^*_{ab} تعیین شده برای صحت نتایج طیف‌سنج‌ها بسیار سخت‌گیرانه بوده به طوری که نتایج تمام دستگاه‌های طیف‌سنج این تحقیق از جمله دستگاه طیف‌سنج Ci64 که کاملا نو و کالیبره نیز می‌باشد از این مقدار بزرگ‌تر بوده است. لذا با توجه به نتایج این تحقیق و تحقیقات مشابه دیگر به نظر می‌رسد مقدار قابل قبول تعیین شده برای صحت نتایج طیف‌سنجها به دلیل وجود عوامل مهمی همچون هندسه دستگاه، طراحی، ساخت و نوع مواد به کار رفته در دستگاه نظیر صافی‌ها، حس‌گرها، آیینه‌ها و منبع نوری، توان الکتریکی و مکانیکی دستگاه، استانداردهای کالیبراسیون دستگاه، خطی بودن نورسنج، دقت طیفی و پهنای طول موجی، زمان گرم شدن دستگاه و شرایط دمایی که هریک نقش بسزایی روی دقت و صحت نتایج اندازه‌گیری دارند و مجموعه‌ای از این موارد سبب بروز اختلافات بین دستگاه‌های طیف‌سنج می‌شوند، سخت‌گیرانه بوده و نیاز به بازنگری دارد.

۵ـ مراجع

۱۴. ف. عامری، س. مرادیان، ک. قرنجیگ، ارزیابی روش‌های رنگ همانندی با به کارگیری تئوری تجزیه طیفی. *نشریه علمی پژوهشی علوم و فناوری رنگ*، (۷)۱۳۹۲، ۸۳-۷۵.

1. NPL Report COEMS33, Harmonization of national scales of surface color measurements. Luxembourg, 2000.
2. J. Hiltunen, Accurate color measurement, PhD thesis, University of Joensuu, Finland, 2002.
3. B. A. Wandell, Measurement of small color differences. *Psychol. Rev*. 89(1982), 281-302.
4. J. Hiltunen, Accurate Color Measurement. Academic Dissertation, University of Eastern Finland, Finland, 2002.
5. CIE Publication 15.2, Colorimetry, 2nd Ed., Central Bureau of the CIE, Vienna, 1986.
6. P. J. Clarke, A. R. Hanson, J. F. Verrill, Determination of colorimetric uncertainty the spectrophotometric measurement of color. *ANAL. CHIM. ACTA*. 380(1999), 363-367.
7. Standard practice for obtaining spectrometric data for object-color evaluation, ASTM standard, E1164-09, 2009.
8. F. Billmeyer Jr ، P. Alessi, Assessment of color-measuring instruments. *Color. Res. App*. 6(2007), 195-202.
9. Test method for spectrophotometric determination of data for object color evaluation, ISIRI Standard, 11717, 2008.
10. R. Berns, F. Billymer and Saltzman، s, Principle of color technology, Wiley, New York, 2000.
11. P. Nussbaum, A. Sole, J. Y. Hardeberg, Analysis of color measurement uncertainty in a color managed printing workflow. *P M T R*. 1(2012)1, 7-24.
12. P. Nussbaum, Color measurement and print quality assessment in a color managed printing workflow. PhD thesis, University of Oslo, Norway, 2010.
13. S. Gorji Kandi, F. Ameri, N. Khalili, Instrument dependency of Kubelka-Munk theory in computer color matching. *Prog. Color Colorants Coat. 5(2012), 85-90.*
15. Standard practice for specifying and verifying the performance of color measuring instruments, ASTM standard, E2214-08, 2008.
16. 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.
17. P. Nussbaum, A. Sole, J. Y. Hardeberg, Consequences of using a number of different color measurement instruments in a color managed printing workflow, in Proceedings of the 61st annual meeting of technical association of the Graphic Arts, New Orleans, 2009.
18. 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.
19. D. R. Wyble, D. C. Rich, Evaluation of methods for verifying the performance of color-measuring instruments. Part 2: Inter-instrument reproducibility. *Color. Res. Appl*. 32(2007), 176-194.
20. Standard test method for reflectance factor and color by spectrophotometry using hemispherical geometry,. ASTM standard, E1331-15, 2015.
21. R. Berns., K. H. Petersen, Empirical modeling of systematic spectrophotometric errors. *Color. Res. Appl*. 13(1988), 243-256
22. BCRA-14-02c, Avian Technologies LLC, P.O. Box 716, USA.