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

دسترسی آنلاین: www.jcst.icrc.ac.ir
نشریه علمی علوم و فناوری رنگ/ ۱۵، (۱۴۰۰)۴، ۲۵۴ـ۲۴۳
نوع مقاله: پژوهشی
دسترسی آزاد

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
پژوهشگاه رنگ

# بررسی پایداری رنگی استانداردهای سرامیکی BCRA با استفاده از روش‌های آماری تـک متغیره

**نجمه خلیلی[۱]، مهدی صفی[۲*]، فرهاد عامری[۳]**

۱ـ کارشناس پژوهشی، گروه پژوهشی دوباره تولید رنگ و کنترل رنگ، پژوهشکده فیزیک رنگ، پژوهشگاه رنگ، تهران، ایران، صندوق‌پستی: ۶۵۴-۱۶۷۶۵.
۲ـ استادیار، گروه پژوهشی دوباره تولید رنگ و کنترل رنگ، پژوهشکده فیزیک رنگ، پژوهشگاه رنگ ، تهران، ایران، صندوق‌پستی: ۶۵۴-۱۶۷۶۵.
۳ـ دانشیار، گروه پژوهشی دوباره تولید رنگ و کنترل رنگ، پژوهشکده فیزیک رنگ، پژوهشگاه رنگ، تهران، ایران، صندوق‌پستی: ۶۵۴-۱۶۷۶۵.

**اطلاعات مقاله**

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۸/۱۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۲/۷
در دسترس به صورت الکترونیکی: ۱۴۰۰/۹/۳۰
شاپا چاپی: ۸۷۷۹-۱۷۳۵
شاپا الکترونیکی: ۲۱۶۹-۲۳۸۳

**DOR: 20.1001.1.17358779.1400.15.4.6.7**

**واژه‌های کلیدی:**
طیف‌سنج انعکاسی
کالیبراسیون
استانداردهای سرامیکی BCRA
پایداری رنگی
روش‌های آماری تک‌متغیره

## چکیده

*بررسی پایداری رنگی استانداردهای سرامیکی کالیبره شده BCRA به منظور تعیین زمان کالیبراسیون طیف‌سنج‌های انعکاسی بسیار حائز اهمیت می‌باشد. در این تحقیق تغییرات رنگی و طیفی سری ۱۴ تایی استانداردهای سرامیکی BCRA ساخت شرکت (آویان تکنولوژی - Avian Technologies) طی سه سال در شرایط تکرارپذیر بررسی گردید. برای بررسی تغییرات رنگی هر یک از سرامیک‌ها، مقادیر اختلاف رنگ محاسبه و با استفاده از آماره‌های تک‌متغیره MCDM و RMS(2S) تحلیل گردید. تغییرات مشخصه‌های انعکاس طیفی نیز بصورت مشابه با آماره‌های انحراف استاندارد ($\Delta R_{\lambda,2\delta}$) و $RMS_R$ بررسی شد. نتایج آماری این تحقیق نشان داد در بازه زمانی ۳ ساله، هیچ یک از استانداردهای سرامیکی BCRA تغییرات رنگی و طیفی قابل‌توجهی نداشته و از پایداری رنگی خوبی برخوردار بودند به‌طوری که بیشینه مقدار به دست آمده برای آماره MCDM($\Delta E^*_{ab}$) حدود ۰,۰۸ واحد و برای آماره $RMS_R$ حدود ۰,۰۲ درصد بوده است که این نتیجه می‌تواند نقش بسزایی در کاهش هزینه‌های کالیبراسیون مجدد این استانداردهای مرجع داشته باشد.*

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

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

available online @ www.jcst.icrc.ac.ir
Journal of Color Science and Technology, 15, 4(2022), 243-254
Article type: Research article
Open access

# Investigation of the Color Stability of BCRA Ceramic Standards using Univariate Statistical Methods

Najmeh Khalili, Mahdi Safi*, Farhad Ameri
Department of Color Physics, Institute for Color Science and Technology, P.O. Box: 16765-654, Tehran, Iran.

**ARTICLE INFO**

Article history:
Received: 09-11-2020
Accepted: 27-04-2021
Available online: 21-12-2021
Print ISSN: 1735-8779
Online ISSN: 2383-2169

**DOR: 20.1001.1.17358779.1400.15.4.6.7**

**Keywords:**
Reflectance spectrophotometer
Calibration
BCRA ceramic standards
Color stability
Univariate statistical methods

## ABSTRACT

*Investigating calibrated BCRA ceramic standards reference' color stability is essential to determine the reflectance spectrophotometer's calibration period. In this research, the color and spectral changes of a set of fourteen BCRA ceramic standards made by Avian Technologies Company were investigated over three years under repeatable conditions. Each ceramic's color changes were evaluated by calculating $\Delta E^*_{ab}$ and $\Delta E^*_{00}$ and then analyzed using univariate statistic metrics such as MCDM and RMS (2S). Similarly, the spectral reflectance factor's variation was evaluated using univariate metrics of the standard deviation of reflectance ($\Delta R_{\lambda,2\delta}$) and RMSR. This study's statistical results showed that the color and spectral reflectance factor of BCRA ceramic standards had no significant changes for three years and established good color stability. The maximum values were obtained for the statistic metric of MCDM ($\Delta E^*_{ab}$) and RMSR within about 0.08 units and 0.02 %., respectively. This result can play a significant role in reducing the recalibration costs of these reference ceramics.*

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

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

## ۱ــ مقدمه

امروزه اندازه‌گیری و کنترل رنگ در صنایع مختلف به صورت دستگاهی و عموماً با طیف‌سنج‌ها و کالریمترها انجام می‌شود. سازندگان و کاربران دستگاه‌های فوق با سری‌های مختلفی از آنها به شکل پرتابل و رومیزی از برندها و هندسه‌های متفاوت سر و کار دارند. از نکات حائز اهمیت در استفاده از این دستگاه‌ها در عمل، تکرارپذیری بالا[1]، صحت نتایج[2] و همچنین توافق بین دستگاهی[3] است. علاوه براین انتظار می‌رود نتایج دستگاهی از انطباق خوبی با نتایج ارزیابی چشمی برخوردار باشد. اهمیت این موارد زمانی آشکار می‌شود که به طور مثال بخواهیم مشکلات کنترل کیفیت رنگ یک قطعه با پوشش رنگ پودری قرمز را طی یکسال در یک خط تولید بررسی کنیم یا این که نتایج اندازه‌گیری مختصات رنگی[4] یک نمونه، بین دو دستگاه اندازه‌گیری رنگ به طور محسوسی با هم متفاوت باشد که در هر دو مورد، تجدیدپذیری[5] و توافق بین دستگاهی بسیار مهم بوده و در نتایج بررسی ها تاثیرگذار خواهد بود [۳-۱]. از نظر آماری، نبود دقت دستگاهی ناشی از خطای تصادفی و عدم صحت نتایج ناشی از خطای سیستماتیک دستگاه می‌باشد که گاهی خطای گرایش[6] نیز نامیده می‌شود. تکرارپذیری به دقت دستگاه در تکرار نتایج روی یک نمونه و با شرایط یکسان اندازه‌گیری طی یک دوره زمانی مشخص گفته می‌شود و به سه دسته تکرارپذیری کوتاه مدت (کل اندازه‌گیری‌ها به صورت پیاپی و در طول چند ثانیه و یا چند دقیقه انجام شود)، تکرارپذیری میان مدت (اندازه‌گیری‌ها در مدت چند ساعت یا چند روز صورت گیرد) و تکرارپذیری دراز مدت (اندازه‌گیری‌ها در طول چند هفته یا چند ماه و یا حتی زمان طولانی‌تری انجام شود) تقسیم می‌شود. دقت تکرارپذیری کوتاه مدت دستگاه‌های طیف‌سنج، با محاسبه انحراف استاندارد نتایج اندازه‌گیری‌های پیاپی مختصات رنگی و یا مشخصه انعکاس طیفی (۲۰ تا ۳۰ بار) روی استاندارد سفید BCRA و در بازه زمانی مشخص که اصولا کمتر از یک ساعت است و به وسیله یک اپراتور ثابت در شرایط اندازه‌گیری تکرارپذیر تعیین می‌گردد [۳]. تجدیدپذیری[7] نوعی تکرارپذیری تحت شرایط تغییر یافته اندازه‌گیری است و در واقع به توان دستگاه در تکرار نتایج یکسان روی یک نمونه گفته می‌شود زمانی که شرایط اندازه‌گیری نظیر آزمایش‌کننده تغییر کند. بررسی توافق بین دستگاه‌ها، حالت‌های خاصی از تکرارپذیری هستند که در حالت" توافق بین دستگاهی"، دستگاه‌هایی با مدل یکسان با هم مقایسه شده و در حالت "توافق بین مدل[8]"، دستگاه‌هایی با مدل‌های متفاوت و از شرکت‌های مختلف با هم مقایسه می‌گردند. صحت یعنی کنترل نزدیکی یا انطباق نتایج اندازه‌گیری دستگاه با مقادیر مرجع روی یک نمونه معین و استاندارد به‌طوری که این مقادیر مرجع توسط یک آزمایشگاه با دقت و صحت بالا نظیر موسسه ملی اندازه‌گیری[9] ارائه شده باشد [۴، ۵]. کنترل صحت دستگاه‌هایی نظیر طیف‌سنج‌ها، به صورت دوره‌ای و منظم با استفاده از سری ۱۲ تایی یا ۱۴ تایی استانداردهای سرامیکی رنگی و غیر رنگی BCRA انجام می‌شود که مشخصه انعکاس طیفی آنها توسط یک آزمایشگاه مرجع مانند NIST به صورت مطلق اندازه‌گیری شده و برای هر یک از آنها یک عدم قطعیت به صورت مستند گزارش می‌گردد [۸-۶، ۳]. البته در این میان توجه به این نکته بسیار حائز اهمیت است که دستگاه‌های طیف‌سنج تجاری نمی‌توانند به همان سطح از صحت گزارش شده توسط آزمایشگاه‌های مرجع برسند و در حال حاضر حدود رواداری قابل‌قبول برای صحت نتایج دستگاه‌های طیف‌سنج از حدود ۰,۳ تا ۰,۸ میانگین اختلاف رنگ $\Delta E^*_{ab}$ روی ۱۲ یا ۱۴ استاندارد سرامیکی BCRA تعریف شده است. شایان ذکر است که این حدود رواداری تعریف شده با قیمت و هندسه دستگاه مرتبط است. به طور مثال نتایج تجدیدپذیری بسیاری از تحقیقات نشان داده که دستگاه‌های بزرگ‌تر و رومیزی توافق بیشتری نسبت به دستگاه‌های کوچک‌تر و پرتابل داشته‌اند علاوه براین طیف‌سنج‌ها با هندسه کروی عملکرد بهتری در این زمینه در مقایسه با آنهایی که هندسه جهتی (°0:°45: یا °45:°0) دارند از خود نشان داده‌اند [۱۲-۸].

همان‌طوری‌که گفته شد یک اندازه‌گیری دقیق باید با کمترین خطای سیستماتیک همراه باشد لذا شناسایی عوامل ایجاد این خطا و تصحیح آن از موضوعات بسیار مهم برای کاربران این دستگاه‌ها می‌باشد. خطاهای رادیومتریک، طول موج، نورهای مزاحم[10]، پهنای باند[11]، پلاریزاسیون[12] و هندسه از منابع ایجاد خطای سیستماتیک اسپکتروفوتومترها می باشند. در مراجع مهم‌ترین منابع خطای این دستگاه‌ها سه عامل سفید مرجع[13]، سیاه مرجع[14] و طول موج[15] معرفی شده است که هر یک به صورت متفاوت و محسوسی روی

1- Repeatability
2- Trueness
3- Inter-instrument
4- Color Coordinates
5- Reproducibility
6- Bias Error
7- Reproducibility
8- Inter-model
9- National Metrological Institute
10- Stray Lights
11- Band Width
12- Polarization
13- Reference White
14- Reference Black
15- Wavelength

ضریب انعکاس طیفی و نتایج رنگ‌سنجی به دست آمده از دستگاه تاثیرگذار خواهند بود [۳، ۱۳].

هر دستگاه طیف‌سنج یک کاشی استاندارد سفید و سیاه (که می‌تواند بصورت کاواک یا کاشی باشد) اختصاصی داشته که برای کالیبراسیون دستگاه قبل از هر گونه اندازه‌گیری به کار می‌رود. با توجه به اینکه طیف مطلق این استانداردها توسط کمپانی سازنده در دستگاه ذخیره شده است طی فرآیند کالیبراسیون، پاسخ طیفی کنونی دستگاه به‌گونه‌ای با طیف ذخیره شده در دستگاه با حدود رواداری مشخصی تطبیق داده می‌شود [۹]. خطای سفید مرجع زمانی رخ می‌دهد که ظاهر رنگی کاشی سفید کالیبراسیون دستگاه در اثر آلودگی، گذشت زمان و استفاده تغییر کرده باشد. خطای سیاه مرجع زمانی اتفاق می‌افتد که هنگام کالیبراسیون با کاشی یا کاواک سیاه، نور محیط وارد دستگاه شود که در این صورت باعث افزایش ضریب انعکاس می‌گردد. این خطا در اثر آلودگی، استفاده و فرسودگی کاواک سیاه و یا تغییرات الکترونیکی دستگاه نظیر فرآیند تبدیل آنالوگ به دیجیتال ایجاد می‌شود. عامل ایجاد خطای طول موج در دستگاه‌هایی که از سیستم اسکن استفاده می‌کنند ناشی از فرسودگی مکانیکی سازوکار درایو و در دستگاه‌هایی که از چرخ‌های فیلتر تداخلی[1] استفاده می‌کنند در اثر لایه لایه شدن فیلترها باشد [۳]. با توجه به این که خطاهای سیستماتیک ناشی از سفید و سیاه مرجع و طول موج می‌تواند روی نتایج کالریمتریک تا ۹ واحد اختلاف رنگ $\Delta E^*_{ab}$ تاثیرگذار باشد لذا روش‌های آماری متفاوتی برای تخمین این خطاهای سیستماتیک و اصلاح آنها به منظور افزایش صحت نتایج معرفی شده است که بسیاری از این روش‌ها و مدل‌های ریاضی که برای تشخیص و اصلاح این خطاها معرفی شده است برای کاربران غیرعملی و سخت می‌باشد. یکی از ساده‌ترین روش‌ها برای بررسی صحت نتایج طیف‌سنج‌های انعکاسی، استفاده از سری استانداردهای سرامیکی مرجع BCRA می‌باشد که با استفاده از ۶ سرامیک غیررنگی آن خطاهای رادیومتریک و با سرامیک‌های رنگی آن، خطای طول موج و خطای پهنای باند را می‌توان بررسی نمود [۱۰، ۱۴، ۱۵].

استاندارد ASTM E2214، روش‌هایی را با استفاده از آماره‌های تک‌متغیره[2] و چندمتغیره[3] برای ارزیابی دقت و صحت دستگاه‌های طیف‌سنج انعکاسی معرفی نموده است. با توجه به این که مولفه‌های رنگی $\Delta L^*$، $\Delta b^*$ و $\Delta a^*$ متغیرهای وابسته هستند در روش‌های چندمتغیره، استفاده از ماتریس کوواریانس بجای انحراف استاندارد یا واریانس توصیه شده است. ماتریس کوواریانس این سه متغیر به طور هندسی یک بیضی را توصیف نموده که حجم این بیضی، توزیع سه‌بعدی این متغیرها را تعیین می‌کند و برای محاسبه آن از ریشه دوم مقادیر ویژه ماتریس کوواریانس استفاده می‌شود. دیگر آماره‌های چندمتغیره که در این استاندارد برای مقایسه میانگین دو یا چند دسته داده معرفی شده به ترتیب استفاده از آماره‌های هاتلینگ تی تست[4] برای مقایسه دو دسته داده و آنالیز واریانس چندمتغیره (MANOVA)[5] برای چند دسته داده می‌باشد. میانگین، انحراف استاندارد و یا واریانس مقادیر عددی رابطه‌های اختلاف رنگ متفاوت نظیر $\Delta E_{00}$، $\Delta E_{94}$ و $\Delta E^*_{ab}$، از آماره‌های تک متغیره کاربردی هستند که بطور معمول از آنها برای تحلیل نتایج استفاده می‌شود. البته باید به این نکته توجه نمود که چون مقادیر عددی اختلاف رنگ همیشه مثبت است لذا توزیع نرمال ندارند بنابراین می‌توان از آماره‌های میانگین اختلاف رنگ از میانگین (MCDM)[6] و RMS[7] مقادیر رابطه‌های اختلاف رنگ مختلف نظیر $\Delta E_{00}$، $\Delta E_{94}$ و $\Delta E^*_{ab}$ استفاده نمود که بدون سطح اطمینان گزارش می‌گردند. برای بررسی مشخصه انعکاس طیفی نیز از آماره‌های تک‌متغیره انحراف استاندارد ($\Delta R_{\lambda,2\delta}$) در سه طول موج ۴۴۰، ۵۶۰ و ۶۶۰ نانومتر و یا $RMS_R$ استفاده می‌شود [۳، ۴، ۷].

همان‌طوری که قبلا نیز گفته شد در حال حاضر سری استانداردهای سرامیکی BCRA تنها ابزار مرجع برای بررسی خطای سیستماتیک دستگاه‌های رنگ‌سنجی نظیر طیف‌سنج‌ها هستند. لذا پایداری رنگی این مواد مرجع و تعیین زمان کالیبراسیون دوره‌ای آنها مسئله بسیار مهمی است که می‌بایست مورد توجه قرار گیرد. سازندگان این استانداردهای مرجع بر این ادعا هستند در صورتی که شرایط محیطی حدود ۲۳±۲ ºC و شرایط نگهداری آنها به خوبی رعایت گردد این مواد مرجع، پایداری رنگی بالایی داشته و با گذشت حدود ۱۰ سال نیز تغییرات قابل ملاحظه‌ای در مشخصه انعکاس طیفی آنها دیده نشده است ولی با این حال در گواهینامه کالیبراسیون زمان اعتبار داده‌های مرجع این استانداردها وابسته به میزان استفاده از ۱ تا ۲ سال تعیین شده است [۱۶، ۱۷]. در کشورهای دارای تکنولوژی، دسترسی به یک آزمایشگاه کالیبراسیون برای تایید داده‌های مرجع این استانداردهای سرامیکی به صورت سالیانه بسیار راحت و ارزان بوده ولی در کشور ما با توجه به شرایط تحریم و احتمال خطرات موجود بسیار دشوار و پر هزینه است لذا بررسی پایداری رنگی این استانداردهای مرجع اهمیت ویژه‌ای دارد که در این تحقیق، تغییرات رنگی و طیفی سری ۱۴ تایی استانداردهای سرامیکی BCRA طی سه سال و با فواصل ۶ ماهه در شرایط یکسان و تکرارپذیر و با استفاده از آماره‌های تک‌متغیره

1- Interference Filter Wheels
2- Univariate
3- Multivariate
4- Hoteling's T-Squared Test
5- Multivariate Analysis of Variance
6- Mean Color Difference from the Mean
7- Root Mean Square

بررسی شده است. البته نکته ضروری که نویسندگان مقاله به آن توجه داشته‌اند این است که تجدیدپذیری آزمایشگاه و دستگاه در نتایج بررسی پایداری رنگی استانداردهای BCRA نهفته است که برای این منظور باید حتی‌المقدور از دستگاهی برای اندازه‌گیری استفاده نمود که دقت و صحت آن توسط یک آزمایشگاه مرجع تایید شده باشد.

## ۲ـ بخش تجربی

### ۲ـ۱ـ نمونه‌های مرجع و تجهیزات مورد استفاده

در تحقیق حاضر از دستگاه طیف‌سنج انعکاسی رومیزی مدل Color Eye 7000A با هندسه di:8° ساخت کمپانی آمریکایی Gretag Macbeth استفاده شد که مشخصات فنی آن به صورت کامل در جدول ۱ گزارش شده است. این دستگاه در سال ۱۳۹۶ توسط شرکت سازنده کالیبره و میانگین مقدار اختلاف رنگ روی ۱۲ سرامیک استاندارد BCRA- Series II با مشاهده کننده استاندارد ۱۰ درجه و تحت استاندارد روشنایی D65 حدود ۰،۱۵۱ واحد $\Delta E^*_{ab}$ گزارش شده است. این دستگاه طیف‌سنج از جمله مدل‌هایی است که از آن به عنوان یک طیف‌سنج مرجع با ارزش یاد می‌شود و دارای بالاترین حد دقت و توافق بین دستگاهی است [۱۸] و در حال حاضر به عنوان دستگاه مرجع در آزمایشگاه استفاده می‌شود.

از سری ۱۴تایی استانداردهای سرامیکی BCRA با کد BCRA-14-02c ساخت شرکت Avian Technology به عنوان نمونه مرجع استفاده شد که تغییرات رنگی و طیفی این نمونه‌ها طی سه سال در این تحقیق بررسی شده است. مقادیر مشخصه انعکاس طیفی استانداردهای سرامیکی BCRA که به عنوان داده مرجع ارائه شده قابلیت ردیابی به آزمایشگاه NIST را داشته و با عدم قطعیت ۰،۰۰۴۵ در محدوده طول موجی ۵۰۰-۷۵۰ nm و ۰،۰۰۵ در طول موج ۳۰۰nm گزارش شده است [۶].

### ۲ـ۲ـ روش کار

برای بررسی پایداری رنگی استانداردهای سرامیکی BCRA، مشخصه انعکاس طیفی و مختصات رنگی CIELAB هر یک از سرامیک‌ها در بازه زمانی سه ساله و از سال ۱۳۹۸-۱۳۹۶ با فواصل ۶ ماهه و با سه بار تکرار در هر دوره توسط دستگاه طیف‌سنج انعکاسی اندازه‌گیری شد. کلیه اندازه‌گیری‌ها توسط یک اپراتور و تقریبا با شرایط یکسان و تکرارپذیر و از قسمت میانی هر سرامیک انجام گرفت. دما و رطوبت قبل از هر اندازه‌گیری با یک رطوبت‌سنج –دماسنج دیجیتالی کالیبره شده، کنترل و تلاش شد تا شرایط محیطی هنگام اندازه‌گیری با آنچه در گواهی کالیبراسیون استانداردهای BCRA گزارش شده با دقت بالایی شبیه‌سازی شود. میانگین دمای آزمایشگاه هنگام اندازه‌گیری در هر دوره حدود ۱±۲۳ درجه سانتی‌گراد و رطوبت حدود ۵±۳۰ درصد بود. قبل از اندازه‌گیری، زمان گرم شدن لامپ دستگاه حدود ۱۵ دقیقه به طور یکسان در تمام اندازه‌گیری‌ها رعایت گردید [۳]. تمامی مراحل اندازه‌گیری که از فروردین سال ۱۳۹۶ شروع و با فواصل زمانی ۶ ماهه در مهرماه سال ۱۳۹۸ خاتمه یافته با کدهای P1 تا P6 به شرح جدول ۲ نامگذاری شدند.

همان‌طوری که در قسمت قبل گفته شد دستگاه طیف‌سنج مورد استفاده در این تحقیق در سال ۱۳۹۶ کالیبره شده ولی با توجه به اهمیت دقت و صحت دستگاه مورد استفاده، در هر دوره تکرارپذیری کوتاه مدت دستگاه روی کاشی سفید BCRA بررسی گردید به این ترتیب که در هر بار بررسی، مشخصه انعکاس طیفی آن ۳۰ مرتبه بدون جابجایی و پشت سر هم اندازه‌گیری شد.

برای بررسی دقت تکرارپذیری دستگاه، انحراف استاندارد (2s) هریک از مولفه‌های $\Delta a^*$، $\Delta b^*$، $\Delta L^*$ و آماره‌های RMS $\Delta E^*_{ab}$ و MCDM با استفاده از روابط ۱ تا ۵ محاسبه گردید [۴،۷].

$$\Delta L=L^*-\overline{L^*},\ \mathrm{var}\left(\Delta L^*\right)=V_{11}=\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\left(\Delta L_i^*-\overline{\Delta L^*}\right)^2$$
$$\text{Repeatability: } \Delta L^*\ (2s)=2\sqrt{V_{11}} \qquad (۱)$$

$$a^*=a^*-\overline{a^*},\ \mathrm{var}\left(\Delta a^*\right)=V_{22}=\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\left(\Delta a_i^*-\overline{\Delta a^*}\right)^2$$
$$\text{Repeatability: } \Delta a^*\ (2s)=2\sqrt{V_{22}} \qquad (۲)$$

**جدول ۱** :مشخصات فنی دستگاه طیف‌سنج مورد استفاده.

**Table 1:** The used spectrophotometer specifications.

| توافق بین دستگاه‌ها | تکرارپذیری کوتاه‌مدت | رومیزی/پرتابل | محدوده و فواصل طول موجی | هندسه | قطر روزنه اندازه‌گیری | مدل دستگاه |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Avg. 0.08 $\Delta E^*_{ab}$ (Based on avg. of 12 BCRA Series II tiles) | RMS ۰،۰۱$\Delta E^*_{ab}$ (on White Ceramic) | رومیزی | ۳۶۰-۷۵۰ nm در ۱۰ nm | di:8° | 15 mm | CE7000A |

**جدول۲:** دوره‌های زمانی اندازه‌گیری سری استانداردهای BCRA طی سه سال.

**Table 2**: The measuring periods of the BCRA standard series over three years.

| کد دوره زمانی | بازه زمانی مربوطه |
|---|---|
| P1 | فروردین ماه سال ۱۳۹۶ |
| P2 | مهر ماه ماه سال ۱۳۹۶ |
| P3 | فروردین ماه سال ۱۳۹۷ |
| P4 | مهر ماه ماه سال ۱۳۹۷ |
| P5 | فروردین ماه سال ۱۳۹۸ |
| P6 | مهر ماه ماه سال ۱۳۹۸ |

$$\Delta b^*=b^*-\overline{b^*},\ \mathrm{var}\left(\Delta b^*\right)=V_{33}=\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\left(\Delta b_i^*-\Delta\overline{b^*}\right)^2$$
$$\text{Repeatability: } \Delta b^*(2s)=2\sqrt{V_{33}} \qquad (۳)$$

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

$$\text{MCDM }(\Delta E^*_{ab})=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\sqrt{\left(\left(L_i^*-\overline{L}^*\right)^2+\left(a_i^*-\overline{a}^*\right)^2+\left(b_i^*-\overline{b}^*\right)^2\right)} \qquad (۵)$$

$$\text{MCDM}(\Delta E_{00})=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\Delta E_{00}\right)_i \qquad (۶)$$

در روابط فوق *L، *a و *b مختصات رنگی نمونه مورد اندازه‌گیری در سیستم CIELAB تحت استاندارد نوری D65 و مشاهده‌کننده ۱۰ درجه، s انحراف استاندارد و $\overline{L^*}$، $\overline{a^*}$ و $\overline{b^*}$ میانگین تکرارها می‌باشد. در روابط ۱ تا ۵، n تعداد تکرارهاست زمانی که برای بررسی تکرارپذیری دستگاه استفاده می‌شوند و زمانی که از این روابط برای بررسی تغییرات رنگی استاندارد سرامیکی BCRA استفاده می‌شود n تعداد بازه‌های زمانی می‌باشد. برای ارزیابی صحت دستگاه طیف‌سنج مورد استفاده، میانگین مقادیر اختلاف رنگ $\Delta E^*_{ab}$ روی ۱۴ استاندارد سرامیکی BCRA در هر دوره تعیین گردید [۱۹].

برای بررسی تغییرات رنگی استاندارد سرامیکی BCRA، در هر بازه زمانی هر یک از آنها سه بار اندازه‌گیری شده و میانگین گرفته شد. سپس تحلیل نتایج با استفاده از معادلات اختلاف رنگ $\Delta E^*_{ab}$ و $\Delta E^*_{00}$ [۲۰] و همچنین آماره‌های MCDM و RMS (2S) انجام شد که از روابط ۴ تا ۶ محاسبه شدند. در این روابط n تعداد بازه‌های زمانی است. برای تحلیل تغییرات مشخصه انعکاس طیفی، آماره‌های دو برابر انحراف استاندارد ($\Delta R_{\lambda,2\delta}$) و ($RMS_R$) با استفاده از روابط ۷ تا ۸ تعیین شد [۷].

$$\Delta R_{\lambda,2\delta}=2\times\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\left(R_{\lambda,i}-\overline{R_\lambda}\right)^2} \qquad (۷)$$

$$RMS_R=\frac{1}{m}\sum_{\lambda=1}^{m}\sqrt{\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(R_{\lambda,i}-\overline{R_\lambda}\right)^2\right)} \qquad (۸)$$

در این روابط $R_{\lambda,i}$ مشخصه انعکاس طیفی، $\overline{R_\lambda}$ میانگین مشخصه انعکاس طیفی در ۶ بازه زمانی و طی سه سال، n تعداد بازه‌های زمانی و m تعداد گام‌های طول موجی می‌باشد که در اینجا با توجه به اینکه محدوده بررسی طیفی ۷۰۰-۴۰۰ نانومتر با گام‌های ۱۰ نانومتری بود لذا ما ۳۱ گام طول موجی داشتیم.

## ۳ـ نتایج و بحث

### ۳ـ۱ـ بررسی تکرارپذیری دستگاه طیف‌سنج مورد استفاده

جدول ۳ نتایج تکرارپذیری کوتاه مدت دستگاه طیف‌سنج مورد استفاده را روی استاندارد سرامیکی سفید BCRA از سال ۱۳۹۸-۱۳۹۶ نشان می‌دهد.

همچنان که نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد تکرارپذیری دستگاه حداکثر ۰،۰۲۴ واحد RMS $\Delta E^*_{ab}(2s)$ می‌باشد که در مراجع مختلف بیشینه مقادیر قابل‌قبول برای تکرارپذیری دستگاه‌های طیف‌سنج وابسته به دقت و مدل آنها تا ۰،۰۸ واحد اختلاف رنگ $\Delta E^*_{ab}$ و برای دستگاه‌های تجاری تا ۰،۲ واحد اختلاف رنگ $\Delta E^*_{ab}$ گزارش شده است [۹، ۲۱، ۲۲]. لذا دقت تکرارپذیری کوتاه‌مدت دستگاه در هر دوره قابل قبول و تقریبا مطابق مشخصات فنی گزارش شده توسط شرکت سازنده دستگاه (جدول۱) می‌باشد.

**جدول۳:** نتایج تکرارپذیری کوتاه‌مدت دستگاه طیف‌سنج مورد استفاده.

**Table 3**: Short term repeatability for the used spectrophotometer.

| بازه زمانی | تکرار پذیری کوتاه مدت روی سفیدBCRA | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | $\Delta L^*(2S)$ | $\Delta a^*(2S)$ | $\Delta b^*(2S)$ | RMS $\Delta E^*_{ab}(2S)$ | MCDM ($\Delta E^*_{ab}$) |
| P1 | ۰,۰۰۶ | ۰,۰۱۵ | ۰,۰۱۷ | ۰,۰۲۴ | ۰,۰۱۰ |
| P2 | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۰۱۳ | ۰,۰۱۱ | ۰,۰۱۸ | ۰,۰۰۸ |
| P3 | ۰,۰۰۶ | ۰,۰۱۳ | ۰,۰۱۴ | ۰,۰۲۱ | ۰,۰۰۹ |
| P4 | ۰,۰۰۵ | ۰,۰۱۰ | ۰,۰۱۳ | ۰,۰۱۷ | ۰,۰۰۷ |
| P5 | ۰,۰۰۵ | ۰,۰۱۰ | ۰,۰۱۷ | ۰,۰۲۰ | ۰,۰۱۴ |
| P6 | ۰,۰۰۵ | ۰,۰۱۰ | ۰,۰۱۳ | ۰,۰۱۸ | ۰,۰۰۸ |

### ۳ـ۲ـ بررسی پایداری رنگی استانداردهای سرامیکی BCRA

همان‌طوری که در قسمت مقدمه نیز اشاره شد با توجه به مشکلات موجود و عدم دسترسی آسان به یک آزمایشگاه کالیبراسیون برای تایید داده‌های مرجع استانداردهای BCRA که برای ارزیابی درستی[1] نتایج طیف‌سنج‌های انعکاسی به کار می‌روند، بررسی دوام و پایداری رنگی این استانداردها طی چند سال اهمیت زیادی دارد و در این تحقیق تغییرات رنگی هر کدام از استانداردهای سرامیکی BCRA با استفاده از مقادیر رابطه‌های اختلاف رنگ $\Delta E^*ab$، $\Delta E^*00$ و همچنین پارامترهای آماری تک متغیره MCDM و RMS(2S) بررسی می‌گردد. البته با توجه به اینکه تجدیدپذیری دستگاه در نتایج بررسی پایداری رنگی سرامیک‌های استاندارد نهفته است، لذا ابتدا در هر بازه زمانی صحت دستگاه بررسی شد به این ترتیب که مقادیر $\Delta L^*$، $\Delta a^*$، $\Delta b^*$ و $\Delta E^*ab$ برای هر استاندارد سرامیکی رنگی و غیررنگی BCRA نسبت به مقادیر مرجع محاسبه شد که شکل ۱ توزیع این مقادیر را در فضای سه‌بعدی CIELAB طی سه سال را نشان می‌دهد.

شکل ۱ نشان می‌دهد تغییرات مشخصه‌های $\Delta L^*$، $\Delta a^*$ و $\Delta b^*$ برای هر استاندارد سرامیکی رنگی و غیر رنگی BCRA طی سه سال کوچک بوده و هیچ یک از آنها اختلاف رنگ محسوسی نسبت به مقادیر مرجع نداشته‌اند. استانداردهای سرامیکی رنگی در مقایسه با غیررنگی‌ها طی ۶ دوره زمانی P1 تا P6 پراکندگی بیشتری نشان دادند. علاوه براین استاندارد سرامیکی نارنجی تغییرات رنگی بیشتری در مقایسه با سایر سرامیک‌ها طی این دوره‌های زمانی داشته است که در شکل ۱ محدوده پراکندگی نقاط در بازه‌های زمانی مختلف با دایره قرمز نشان داده شده است. درجدول ۴ میانگین اختلاف رنگ $\Delta E^*_{ab}$ برای ۱۴ استاندارد سرامیکی BCRA نشان داده شده است.

نتایج جدول ۴ نشان می‌دهد میانگین مقادیر اختلاف رنگ $\Delta E^*_{ab}$ روی ۱۴ استاندارد سرامیکی BCRA در هر دوره حداکثر ۰,۶۱ واحد بوده که طبق مراجع، این اختلاف در حد رواداری قابل‌قبول برای دستگاه طیف‌سنج که حدود ۰,۳ تا ۰,۸ واحد $\Delta E^*_{ab}$ است قرار می‌گیرد [۹، ۱۲، ۲۱، ۲۲].

بنابراین در هر دوره زمانی صحت دستگاه تایید می‌گردد. این نتایج و نتایج خوب تکرارپذیری دستگاه در جدول ۳، نشان می‌دهد دستگاه طیف‌سنج مورد استفاده در این تحقیق کالیبره بوده و تغییرات محسوسی در این بازه زمانی نداشته است.

برای بررسی پایداری رنگی هر یک از استانداردهای سرامیکی BCRA طی سه سال، مقادیر اختلاف رنگ $\Delta E^*_{ab}$ و $\Delta E_{00}$ بین نتایج اندازه‌گیری در هر دوره زمانی و میانگین نتایج طی سه سال (۶ دوره) محاسبه شد که نتایج در جداول ۵ و ۶ نشان داده شده است. مشخصه‌های آماری بیشینه مقادیر اختلاف رنگ، MCDM و RMS (2s) به طور مشابه طی ۶ دوره زمانی در جداول ۷ و ۸ نشان داده شده است.

1- Accuracy

**جدول ۴:** نتایج میانگین مقادیراختلاف رنگ $\Delta E^*_{ab}$ برای استاندارد سرامیکی BCRA طی سه سال.

**Table 4**: The results of the mean color difference values $\Delta E^*_{ab}$ for the BCRA ceramic standards over three years.

| بازه‌های زمانی | میانگین اختلاف رنگ $\Delta E^*_{ab}$ روی ۶ استانداردهای سرامیکی غیررنگی BCRA | میانگین اختلاف رنگ $\Delta E^*_{ab}$ روی ۸ استانداردهای سرامیکی رنگی BCRA | میانگین اختلاف رنگ $\Delta E^*_{ab}$ روی ۱۴ استاندارد سرامیکی BCRA |
|---|---|---|---|
| P1 | ۰,۵۴ | ۰,۶۰ | ۰,۵۷ |
| P2 | ۰,۶۳ | ۰,۵۹ | ۰,۶۱ |
| P3 | ۰,۶۱ | ۰,۵۸ | ۰,۵۹ |
| P4 | ۰,۶۰ | ۰,۵۹ | ۰,۶۰ |
| P5 | ۰,۵۳ | ۰,۶۰ | ۰,۵۷ |
| P6 | ۰,۵۸ | ۰,۵۹ | ۰,۵۹ |

**جدول ۵:** نتایج اختلاف رنگ $\Delta E^*_{ab}$، $\Delta E_{00}$ برای استانداردهای سرامیکی رنگی BCRA در هر دوره زمانی.

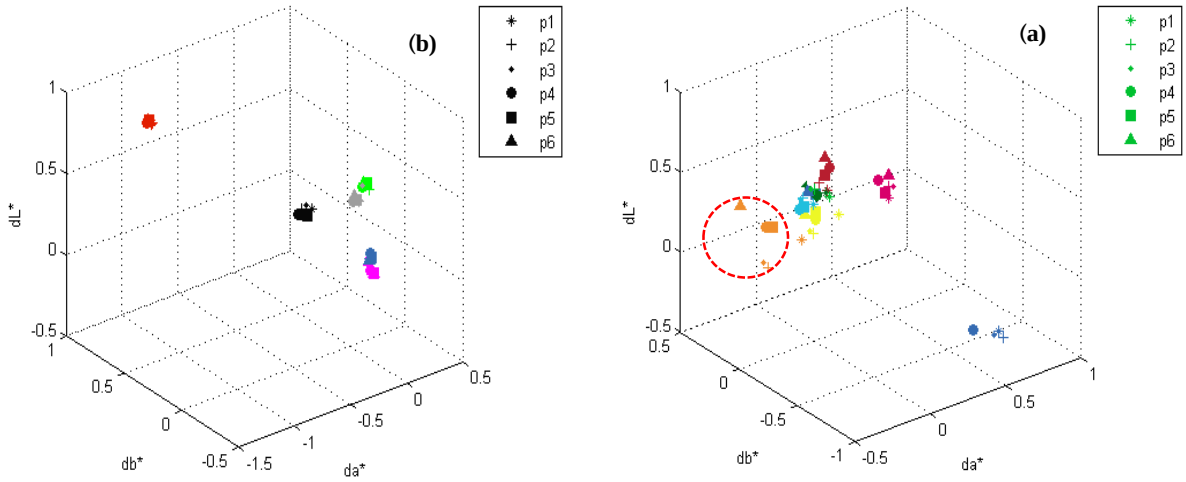
**Table 5:** The results of color differences $\Delta E^*_{ab}$ and $\Delta E_{00}$ for BCRA chromatic ceramic standards in each period of time.

| بازه زمانی | استانداردهای سرامیکی رنگی BCRA | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Red | | Rose | | Orange | | Yellow | | Blue | | Cyan | | Diff Green | | Green | |
| | $\Delta E_{00}$ | $\Delta E^*_{ab}$ | $\Delta E_{00}$ | $\Delta E^*_{ab}$ | $\Delta E_{00}$ | $\Delta E^*_{ab}$ | $\Delta E_{00}$ | $\Delta E^*_{ab}$ | $\Delta E_{00}$ | $\Delta E^*_{ab}$ | $\Delta E_{00}$ | $\Delta E^*_{ab}$ | $\Delta E_{00}$ | $\Delta E^*_{ab}$ | $\Delta E_{00}$ | $\Delta E^*_{ab}$ |
| P1 | ۰,۰۶ | ۰,۰۹ | ۰,۰۲ | ۰,۰۸ | ۰,۱۱ | ۰,۱۷ | ۰,۱ | ۰,۱۷ | ۰,۰۳ | ۰,۰۲ | ۰,۰۵. | ۰,۰۹ | ۰,۰۸ | ۰,۱۱ | ۰,۰۷ | ۰,۱ |
| P2 | ۰,۰۵. | ۰,۱۳ | ۰,۰۲ | ۰,۰۳ | ۰,۰۷ | ۰,۲۳ | ۰,۰۵ | ۰,۱۰ | ۰,۰۱ | ۰,۰۵ | ۰,۰۵ | ۰,۰۵ | ۰,۰۳ | ۰,۰۵ | ۰,۰۳ | ۰,۰۴ |
| P3 | ۰,۰۵ | ۰,۱۰ | ۰,۰۳ | ۰,۰۵ | ۰,۰۶ | ۰,۲۱ | ۰,۰۵ | ۰,۱۰ | ۰,۰۷ | ۰,۰۱ | ۰,۰۵ | ۰,۰۶ | ۰,۰۴ | ۰,۰۷ | ۰,۰۴ | ۰,۰۶ |
| P4 | ۰,۰۴ | ۰,۰۵ | ۰,۰۵ | ۰,۰۷ | ۰,۰۴ | ۰,۰۶ | ۰,۰۱ | ۰,۰۲ | ۰,۰۸ | ۰,۱۱ | ۰,۰۲ | ۰,۰۳ | ۰,۰۲ | ۰,۰۲ | ۰,۰۲ | ۰,۰۱ |
| P5 | ۰,۰۰۶ | ۰,۰۱ | ۰,۰۳ | ۰,۰۴ | ۰,۰۴ | ۰,۰۷ | ۰,۰۳ | ۰,۰۷ | ۰,۰۳ | ۰,۰۳ | ۰,۰۶ | ۰,۰۱ | ۰,۰۲ | ۰,۰۲ | ۰,۰۲ | ۰,۰۳ |
| P6 | ۰,۱۳ | ۰,۲۹ | ۰,۰۶ | ۰,۰۹ | ۰,۱۳ | ۰,۳۶ | ۰,۰۳ | ۰,۰۷ | ۰,۰۱ | ۰,۰۳ | ۰,۰۳ | ۰,۰۴ | ۰,۰۲ | ۰,۰۲ | ۰,۰۲ | ۰,۰۵ |

**جدول ۶:** مقادیر اختلاف رنگ $\Delta E^*_{ab}$، $\Delta E_{00}$ برای استانداردهای سرامیکی غیررنگی BCRA در هریک از دوره‌های زمانی.

**Table 6:** The results of color differences $\Delta E^*_{ab}$ and $\Delta E_{00}$ for BCRA achromatic ceramic standards in each period of time.

| بازه زمانی | استانداردهای سرامیکی غیررنگی BCRA | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Light Gray | | Diff Gray | | Mid Gray | | Dark Gray | | White | | Black | |
| | $\Delta E_{00}$ | $\Delta E^*_{ab}$ | $\Delta E_{00}$ | $\Delta E^*_{ab}$ | $\Delta E_{00}$ | $\Delta E^*_{ab}$ | $\Delta E_{00}$ | $\Delta E^*_{ab}$ | $\Delta E_{00}$ | $\Delta E^*_{ab}$ | $\Delta E_{00}$ | $\Delta E^*_{ab}$ |
| P1 | ۰,۰۱ | ۰,۰۱ | ۰,۰۳ | ۰,۰۳ | ۰,۰۳ | ۰,۰۲ | ۰,۰۶ | ۰,۰۶ | ۰,۰۰ | ۰,۰۰ | ۰,۰۹ | ۰,۰۹ |
| P2 | ۰,۰۳ | ۰,۰۴ | ۰,۰۴ | ۰,۰۴ | ۰,۰۲ | ۰,۰۲ | ۰,۰۴ | ۰,۰۴ | ۰,۰۲ | ۰,۰۲ | ۰,۰۵ | ۰,۰۳ |
| P3 | ۰,۰۶ | ۰,۰۹ | ۰,۰۵ | ۰,۰۶ | ۰,۰۹ | ۰,۰۹ | ۰,۰۱ | ۰,۰۱ | ۰,۰۲ | ۰,۰۲ | ۰,۰۸ | ۰,۰۹ |
| P4 | ۰,۰۳ | ۰,۰۴ | ۰,۰۲ | ۰,۰۳ | ۰,۰۴ | ۰,۰۴ | ۰,۰۴ | ۰,۰۶ | ۰,۰۲ | ۰,۰۲ | ۰,۰۶ | ۰,۰۷ |
| P5 | ۰,۰۱ | ۰,۰۱ | ۰,۰۳ | ۰,۰۲ | ۰,۰۲ | ۰,۰۲ | ۰,۰۱ | ۰,۰۱ | ۰,۰۴ | ۰,۰۴ | ۰,۰۸ | ۰,۰۸ |
| P6 | ۰,۰۲ | ۰,۰۲ | ۰,۰۲ | ۰,۰۲ | ۰,۰۴ | ۰,۰۳ | ۰,۰۱ | ۰,۰۱ | ۰,۰۳ | ۰,۰۳ | ۰,۰۵ | ۰,۰۶ |




**شکل ۱:** پراکندگی مقادیر $\Delta L^*$، $\Delta a^*$ و $\Delta b^*$ نسبت به مقادیر مرجع در سیستم سه‌بعدی CIELAB در ۶ دوره زمانی برای ۸ استاندارد سرامیکی رنگی BCRA (a) و برای ۶ استاندارد سرامیکی غیررنگی BCRA (b).

**Figure 1:** Scattering of ΔL*, Δa*, Δb* data from the reference values in the 3-D CIELAB system over the six periods of time for 8 BCRA chromatic ceramic standards (a) and 6 BCRA achromatic ceramic standards (b).

**جدول ۷**: حداکثر مقادیر اختلاف رنگ $\Delta E^*_{ab}$، $\Delta E_{00}$ و نتایج پارامترهای آماری MCDM، RMS $\Delta E^*_{ab}(2s)$ برای استانداردهای سرامیکی رنگیBCRA.

**Table 7**: The maximum values of color differences $\Delta E^*_{ab}$ and $\Delta E_{00}$" and the statistical parameters' results MCDM, RMS, $\Delta E^*_{ab}(2s)$ for BCRA chromatic ceramic standards.

| مشخصه‌های آماری | استانداردهای سرامیکی رنگی BCRA | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Red | Rose | Orange | Yellow | Blue | Cyan | Diff Green | Green |
| MAX $\Delta E^*_{ab}$ | ۰,۲۹ | ۰,۰۹ | ۰,۳۶ | ۰,۱۷ | ۰,۱۱ | ۰,۰۹ | ۰,۱۱ | ۰,۱۰ |
| MAX $\Delta E_{00}$ | ۰,۱۳ | ۰,۰۶ | ۰,۱۳ | ۰,۱۰ | ۰,۰۸ | ۰,۰۶ | ۰,۰۸ | ۰,۰۷ |
| MCDM($\Delta E^*_{ab}$) | ۰,۰۷ | ۰,۰۲ | ۰,۰۸ | ۰,۰۳ | ۰,۰۳ | ۰,۰۲ | ۰,۰۳ | ۰,۰۲ |
| MCDM($\Delta E_{00}$) | ۰,۰۴ | ۰,۰۱ | ۰,۰۳ | ۰,۰۲ | ۰,۰۲ | ۰,۰۱ | ۰,۰۲ | ۰,۰۱ |
| RMS $\Delta E^*_{ab}(2s)$ | ۰,۳۰ | ۰,۱۴ | ۰,۴۴ | ۰,۲۰ | ۰,۱۴ | ۰,۱۱ | ۰,۱۲ | ۰,۱۲ |

**جدول ۸**: حداکثر مقادیر اختلاف رنگ $\Delta E^*_{ab}$، $\Delta E_{00}$ و نتایج پارامترهای آماری MCDM، RMS $\Delta E^*_{ab}(2s)$ برای استانداردهای سرامیکی غیر رنگی BCRA.

**Table 8:** The maximum values of color differences $\Delta E^*_{ab}$ and $\Delta E_{00}$ and the statistical parameters' results of MCDM, RMS, $\Delta E^*_{ab}(2s)$ for BCRA achromatic ceramic standards.

| مشخصه‌های آماری | استانداردهای سرامیکی غیررنگی BCRA | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Light Gray | Diff Gray | Mid Gray | Dark Gray | White | Black |
| MAX $\Delta E^*_{ab}$ | ۰,۰۹ | ۰,۰۶ | ۰,۰۹ | ۰,۰۶ | ۰,۰۴ | ۰,۰۹ |
| MAX $\Delta E_{00}$ | ۰,۰۶ | ۰,۰۵ | ۰,۰۹ | ۰,۰۶ | ۰,۰۴ | ۰,۰۹ |
| MCDM($\Delta E^*_{ab}$) | ۰,۰۳ | ۰,۰۳ | ۰,۰۴ | ۰,۰۳ | ۰,۰۲ | ۰,۰۷ |
| MCDM($\Delta E_{00}$) | ۰,۰۳ | ۰,۰۳ | ۰,۰۴ | ۰,۰۳ | ۰,۰۲ | ۰,۰۷ |
| RMS $\Delta E^*_{ab}(2s)$ | ۰,۱۰ | ۰,۰۸ | ۰,۱۰ | ۰,۰۸ | ۰,۰۵ | ۰,۱۶ |

**جدول ۹:** نتایج مشخصه‌های آماری انحراف استاندارد ($\Delta R_{\lambda,2\delta}$) در سه طول موج ۴۴۰، ۵۶۰ و ۶۶۰ نانومتر و $RMS_R$ در محدوده طول موجی ۷۰۰-۴۰۰ نانومتر برای هر یک از استانداردهای سرامیکیBCRA.

**Table 9:** The statistical parameters' results of the standard deviation ($\Delta R_{\lambda,2\delta}$) at three wavelengths, 440, 560, 660 nm, and $RMS_R$ in the wavelength range 400-700 nm for each BCRA ceramic standard.

| استانداردهای سرامیکی BCRA | مشخصه‌های آماری | | | |
|---|---|---|---|---|
| | $\Delta R_{440,2\delta}$ (%) | $\Delta R_{560,2\delta}$ (%) | $\Delta R_{660,2\delta}$ (%) | $RMS_R$ (%) |
| Black | ۰,۰۶۸ | ۰,۰۴۷ | ۰,۰۲۶ | ۰,۰۰۰ |
| White | ۰,۳۰۸ | ۰,۲۱۵ | ۰,۱۹۸ | ۰,۰۱۴ |
| Dark Gray | ۰,۰۲۹ | ۰,۰۲۲ | ۰,۰۴۲ | ۰,۰۰۰۰ |
| Mid Gray | ۰,۱۳۳ | ۰,۰۹۲ | ۰,۰۹۱ | ۰,۰۰۲ |
| Diff Gray | ۰,۰۸۵ | ۰,۰۶۶ | ۰,۰۵۳ | ۰,۰۰۶ |
| Light Gray | ۰,۲۰۵ | ۰,۱۶۰ | ۰,۱۴۴ | ۰,۰۰۱ |
| Green | ۰,۰۴۷ | ۰,۰۴۴ | ۰,۰۳۱ | ۰,۰۰۲ |
| Diff Green | ۰,۰۵۳ | ۰,۰۶۲ | ۰,۰۳۹ | ۰,۰۰۲ |
| Cyan | ۰,۱۲۱ | ۰,۰۵۴ | ۰,۰۴۶ | ۰,۰۰۲ |
| Blue | ۰,۰۵۰ | ۰,۰۱۴ | ۰,۰۲۳ | ۰,۰۰۰ |
| Yellow | ۰,۰۲۷ | ۰,۱۷۵ | ۰,۱۹۴ | ۰,۰۱۰ |
| Orange | ۰,۱۰۸ | ۰,۵۵۹ | ۰,۴۳۸ | ۰,۰۲۱ |
| Rose | ۰,۰۶۷ | ۰,۰۳۰ | ۰,۲۳۹ | ۰,۰۰۳ |
| Red | ۰,۰۹۵ | ۰,۰۵۷ | ۰,۳۶۷ | ۰,۰۱۶ |

نتایج جداول ۵ و ۶ نشان می‌دهد محدوده تغییرات مقادیر اختلاف رنگ $\Delta E^*ab$ برای استانداردهای سرامیکی رنگی از حدود ۰,۰۱ تا ۰,۳۶ واحد و برای استانداردهای سرامیکی غیر رنگی این محدوده تغییرات حدود ۰,۰۱ تا ۰,۰۹ واحد می‌باشد که با توجه به کوچک بودن این تغییرات طی سه سال، می توان نتیجه‌گیری نمود که هیچ کدام از استانداردهای سرامیکی BCRA تغییرات رنگی قابل‌توجهی نداشته‌اند.

نتایج آماری MCDM($\Delta E^*_{ab}$) جدول ۷ و ۸ نشان می‌دهد که بطور میانگین تغییرات رنگی استانداردهای سرامیکی رنگی و غیررنگی BCRA طی سه سال به ترتیب حداکثر ۰,۰۸ و ۰,۰۷ واحد بوده است. بطور مشابه مقادیر آماره MCDM ($\Delta E_{00}$)، برای استانداردهای سرامیکی رنگی حداکثر ۰,۰۴ و برای غیررنگی‌ها حداکثر به ۰,۰۷ واحد می‌رسد. حداکثر مقادیر آماره RMS $\Delta E^*_{ab(2s)}$، نیز برای استانداردهای رنگی و غیررنگی به ترتیب ۰,۴۴ و ۰,۱۶ واحد است. بررسی نتایج این آماره‌های تک متغیره نشان می‌دهند هیچ یک از استانداردهای سرامیکی رنگی و غیررنگی BCRA طی بازه زمانی سه ساله تغییرات رنگی قابل‌توجهی نداشته‌اند به طوری که میانگین تغییرات رنگی با هر دو رابطه اختلاف رنگ $\Delta E^*_{ab}$ و $\Delta E_{00}$ بسیار کوچک است. علاوه براین، با توجه به اینکه در بین سرامیک‌های رنگی و غیررنگیBCRA، سرامیک های نارنجی و قرمز و سیاه حداکثر تغییرات رنگی هر چند بسیار کوچک را به خود اختصاص داده‌اند لذا می‌توان نتیجه گرفت این استانداردهای سرامیکی در مقایسه با سایر استانداردهای سرامیکی BCRA حساس‌تر بوده و تجدیدپذیری ضعیف‌تری دارند.

### ۳ـ۳ـ بررسی تغییرات فاکتور انعکاس طیفی استانداردهای سرامیکی BCRA

با توجه به توصیه استاندارد ASTM E2214، بررسی تغییرات مشخصه انعکاس طیفی استانداردهای سرامیکی رنگی و غیررنگی BCRA با آماره انحراف استاندارد ($\Delta R_{\lambda,2\delta}$) در سه طول موج ۴۴۰، ۵۶۰ و ۶۶۰ نانومتر صورت گرفت که در جدول ۹ نتایج آن گزارش شده است. علاوه براین مشخصه آماری $RMS_R$ نیز در بازه طول موجی ۷۰۰-۴۰۰ نانومتر برای هریک از استانداردهای سرامیکی و طی ۶ دوره زمانی مورد نظر محاسبه شد که جدول ۹ نتایج آن را نشان می‌دهد.

نتایج جدول ۹ نشان می‌دهد تغییرات آماره انحراف استاندارد ($\Delta R_{\lambda,2\delta}$) در سه طول موج ۴۴۰، ۵۶۰ و ۶۶۰ نانومتر برای استانداردهای سرامیکی BCRA در محدوده ۰,۰۱۴ تا ۰,۵۶ درصد قرار دارد.

با توجه به این که عدم قطعیت گزارش شده در گواهی کالیبراسیون استانداردهای سرامیکی BCRA برای مشخصه انعکاس طیفی در محدوده طول موجی ۷۰۰-۴۰۰ نانومتر، حدود ۰,۵ درصد گزارش شده است لذا تغییرات طیفی استانداردهای BCRA نیز طی سه سال بسیار کوچک می‌باشد [۶]. همین نتیجه در مورد آماره $RMS_R$ نیز به‌دست آمد به طوری که در محدوده طول موجی ۴۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر تغییرات این پارامتر آماری حداکثر ۰,۰۲ درصد می‌باشد و نشان می‌دهد مشخصه انعکاس طیفی استانداردهای رنگی و غیررنگی BCRA نیز طی این سه سال تغییر معنی‌داری نداشته است. علاوه براین بطور مشابه با نتایج قبلی، سرامیک نارنجی BCRA بیشترین مقدار انحراف استاندارد و $RMS_R$ را به خود اختصاص داده که حاکی از حساس بودن آن در مقایسه با سایر سرامیک‌ها است.

## ۴ـ نتیجه‌گیری

تغییرات طیفی و رنگی استانداردهای سرامیکی رنگی و غیررنگی BCRA با استفاده از آماره‌های تک متغیره MCDM و $RMS_R$ بررسی گردید. نتایج نشان داد تغییرات آماره ($\Delta E^*_{ab}$) MCDM در محدوده ۰,۰۲-۰,۰۸ واحد (تغییرات آماره ($\Delta E_{00}$)MCDM در محدوده ۰,۰۷- ۰,۰۱ واحد) و تغییرات آماره $RMS_R$ در محدوده ۰,۰۰۲ تا ۰,۰۲ درصد می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت طی کنترل سه ساله و با توجه به تکرارپذیر بودن شرایط اندازه‌گیری و کالیبره بودن دستگاه در هر دوره، هیچ یک از استانداردهای سرامیکی BCRA تغییرات رنگی و طیفی قابل‌توجهی نداشته و از پایداری رنگی خوبی برخوردار هستند. با توجه به این که در حال حاضر این استانداردها به‌عنوان تنها مواد مرجع برای کالیبراسیون طیف‌سنج‌های انعکاسی معرفی شده‌اند [۳، ۱۰] و این نتیجه می‌تواند نقش بسزایی در کاهش هزینه‌های کالیبراسیون این استانداردهای مرجع که بطور معمول هر ساله انجام می‌شود داشته باشد.

از طرفی با توجه به اینکه مشخصه آماری MCDM معادل ریاضی مشخصه آماری $RMS_R$ می‌باشد [۷، ۸]. لذا می‌توان گفت حداکثر تغییرات رنگی معادل ۰,۰۸ واحد ($\Delta E^*_{ab}$) MCDM تقریبا معادل ۰,۰۲ درصد تغییرات مشخصه انعکاس طیفی در این بازه زمانی است. از نتایج مهم دیگر این تحقیق می‌توان به توان خوب تکرارپذیری بلند مدت دستگاه طیف‌سنج رومیزی این تحقیق اشاره نمود به طوری که طی سه سال، بیشینه مقدار پارامترهای آماری ($\Delta E^*_{ab}$) MCDM و RMS $\Delta E^*_{ab}(2s)$ به ترتیب حدود ۰,۰۸ و ۰,۴ واحد بوده است. در بین ۱۴ استاندارد سرامیکی BCRA مورد مطالعه در این تحقیق، سرامیک نارنجی BCRA حداکثر تغییرات رنگی و طیفی را به خود اختصاص داده که نشان می‌دهد تجدیدپذیری این سرامیک در مقایسه با سایر استانداردها ضعیف‌تر بوده و نسبت به شرایط اندازه‌گیری حساس‌تر می‌باشد که این نتیجه در تحقیقات مشابه قبلی نیز به دست آمده است [۳، ۵، ۱۲].

### تشکر و قدردانی

بدینوسیله از پژوهشگاه رنگ و گروه دوباره تولید رنگ و کنترل رنگ برای فراهم نمودن امکانات و تجهیزات مورد نیاز این تحقیق صمیمانه تشکر و قدرانی می‌شود.

## ۵ـ مراجع

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. R. S. Berns, F. W. Billmeyer, M. Saltzman, Principles of color technology. John Wiley & Sons, Inc., 4th Ed., New York, 2019, 124-131.
4. Standard practice for Specifying and verifying the performance of color measuring instruments, Annual Book of ASTM Standard, ASTM standard, 06.01, E2214, 2019.
5. F. Ameri, N. Khalili, M. Safi, Investigating the precision and trueness of spectrophotometers using BCRA ceramic standard tiles. *J. Color Sci. Tech.* 12(2018), 73-80.
6. BCRA-14-02c, Avian Technologies LLC, P.O. Box 716, USA.
7. D. R. Wyble, D. C. Rich, Evaluation of methods for verifying the performance of color-measuring instruments. Part I: Repeatability. *Col. Res. Appl*. 32(2007), 166-175.
8. D. R. Wyble, D. C. Rich., Evaluation of methods for verifying the performance of color-measuring instruments. Part II: Inter-instrument reproducibility. *Col. Res. Appl*. 32(2007), 176-194.
9. 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.
10. R. S. Berns, L. Reniff, An abridged technique to diagnose spectrophotometric errors. *Col. Res. Appl*. 22(1997), 51-60.
11. F. Billmeyer, P. Alessi, Assessment of color-measuring instruments. *Col. Res. Appl*. 6(2007), 195-202.
12. 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.
13. E. A. Early, M. E. Nadal, Uncertainty analysis for reflectance colorimetry. *Col. Res. Appl*. 29(2004), 205-216.

14. R. Berns., K. H. Petersen, Empirical modeling of systematic spectrophotometric errors. *Col. Res. Appl*. 13(1988), 243-256.
15. A. R. Robertson, Colorimetric significance of spectrophotometric errors. *J. Opt. Soc. Am*. 57(1967), 691-698.
16. H. S. Fairman, H. Hemmendinger, Stability of ceramic color reflectance standards, *Col. Res. Appl*. 23(1988), 408–415.
17. Y. S.Chung, J. H. Xin, K. M. Sin, Improvement of inter-instrumental agreement for reflectance spectrophotometers. *Color. Technol*. 120(2004), 284-292.
18. Libero Testing Equipment, X-Rite Color Eye 7000A Bench top Spectrophotometer, http://liberohk.com/en/xrite-ce7000a - benchtop -spectrophotometer, accessed online 27 October 2020.
19. Standard Practice for Standard Practice for Calculation of Color Tolerances and Color Differences from Instrumentally Measured Color Coordinates, Annual Book of ASTM Standard, ASTM standard, 06.01, D2244, 2016.
20. CIE Technical Report, Colorimetry 015, 4th Ed., Central Bureau of the CIE, Vienna, 2018.
21. Standard Test Method for Reflectance Factor and Color by Spectrophotometry Using Hemispherical Geometry, Annual Book of ASTM Standard, ASTM standard, 06.01, E1331, 2015.
22. Standard Practice for Obtaining Spectrometric Data for Object-Color Evaluation, Annual Book of ASTM Standard, ASTM standard, 06.01, E1164, 2017.

**How to cite this article:**

N. Khalili, M. Safi, F. Ameri, Investigation of the Color Stability of BCRA Ceramic Standards using Univariate Statistical Methods, *J. Color Sci. Tech.* 15, 4(2022), 243-254.

**DOR: 20.1001.1.17358779.1400.15.4.6.7**