



ارزیابی روش‌های رنگ همانندی با به کارگیری تئوری تجزیه طیفی

فرهاد عامری^{۱*}، سیامک مرادیان^{۲،۳}، کمال‌الدین قرنجیگ^۴

- ۱- استادیار، گروه پژوهشی فیزیک رنگ، موسسه پژوهشی علوم و فناوری رنگ و پوشش، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۷۶۵-۶۵۴
 - ۲- استاد، دانشکده مهندسی پلیمر و تکنولوژی رنگ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۵۸۷۵-۴۴۱۳
 - ۳- قطب علمی رنگ، موسسه پژوهشی علوم و فناوری رنگ و پوشش، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۷۶۵-۶۵۴
 - ۴- دانشیار، گروه پژوهشی مواد رنگزای آلی، موسسه پژوهشی علوم و فناوری رنگ و پوشش، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۷۶۵-۶۵۴
- تاریخ دریافت: ۹۱/۳/۲۱ تاریخ پذیرش: ۹۱/۱۲/۱۵ در دسترس به صورت الکترونیکی از: ۱۳۹۲/۳/۲۰

چکیده

هدف از این تحقیق بررسی و مقایسه عملکرد روش‌های مختلف رنگ همانندی می‌باشد. روش‌های بررسی شده در این تحقیق شامل رنگ همانندی بر اساس حدس اولیه آلن و روش تکرار بر اساس معادله اختلاف رنگ CIELAB (روش‌های کالریمتری) می‌باشد. علاوه بر این، روش‌های اسپکتروفوتومتری همچون روش حداقل مربعات مک‌گینیس، روش تکرار، روش تکرار وزن داده شده و رنگ همانندی اسپکتروفوتومتری با استفاده از مقادیر محرکه رنگ پایه نیز مورد بررسی قرار گرفتند. با به کارگیری نسخه‌های متفاوت از مواد رنگزا، تعداد ۱۶۵ نمونه مورد رنگرزی قرار گرفتند. جهت بررسی میزان موفقیت هر یک از روش‌های مذکور در تخمین این ۱۶۵ نمونه، برای هر روش مواردی همچون اختلاف رنگ و اندیس متامریزم مورد ارزیابی قرار گرفت. در نهایت جهت بررسی عملی، پیشگویی‌های انجام شده توسط برخی از این روش‌ها در مورد ۲۴ نسخه از ۱۶۵ نسخه رنگرزی شدند که نتایج حاصله هم‌راستا و موید نتایج تئوری بوده و نشان‌دهنده برتری نسبی روش رنگ همانندی اسپکتروفوتومتری با استفاده از مقادیر محرک رنگ پایه می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: رنگ همانندی، تئوری کیوبلکا-مانک، محرک رنگ پایه، متامریزم.

Assessment of Various Color-Matching Procedures Utilizing Spectral Decomposition Theory

F. Ameri^{*1}, S. Moradian^{2,3}, K. Gharanjig^{3,4}

¹ Department of Color Physics, Institute for Color Science and Technology, P.O.Box: 16765-654, Tehran, Iran

² Department of Polymer Engineering & Color Technology, Amirkabir University of Technology, P.O.Box: 15875-4413, Tehran, Iran

³ Center of Excellence for Color Science and Technology, P.O.Box: 16765-654, Tehran, Iran

⁴ Department of Organic Colorants, Institute for Color Science and Technology, P.O.Box: 16765-654, Tehran, Iran

Received: 10-06-2012

Accepted: 05-03-2013

Available online: 10-06-2013

Abstract

The aim of the present study was to investigate and compare the performance of various color matching procedures inclusive of color matching based on Allen's rough match and an iterative procedure using the CIELAB color difference formula, spectrophotometric procedures such as McGinnis least square method, iterative method, weighted iterative method and spectrophotometric color matching based on fundamental color stimulus. To this end, 165 samples were dyed. Initially, the comparisons were made theoretically on the basis of color differences and indices of metamerism. Additionally, such comparison was extended practically by dyeing 24 real dyed samples. Practical results were in good agreement with the theoretical results, showing a relatively better performance of the spectrophotometric color matching procedure based on the fundamental color stimulus. *J. Color Sci. Tech.* 7(2013), 75-83 © Institute for Color Science and Technology.

Keywords: Color matching, Kubelka-Munk theory, Fundamental color stimulus, Metamerism.

در زمینه رنگ همانندی کالریمتری یکی از معتبرترین تحقیقات توسط آلن^۱ صورت گرفته است. الگوریتم آلن شامل محاسبات در دو مرحله می‌باشد؛ در مرحله اول یک راه حل خطی توسط ماتریسی معکوس به دست می‌آید که در واقع می‌توان آن را به عنوان حدس اولیه در نظر گرفت، و این حل تقریبی برای جفت‌هایی با ماتریزم کم بسیار رضایت‌بخش است [۵]. در مرحله دوم، حل نهایی توسط یک روش تکرار به دست می‌آید که این امر با استفاده از حل ابتدایی و بهبود آن توسط همان ماتریس معکوس حاصل می‌شود. در مرحله اول الگوریتم آلن غلظت مواد رنگزا را به صورت رابطه ۷ تخمین می‌زند:

$$C = (TED\phi)^{-1} \times TED(f^t - f^s) \quad (7)$$

به گونه‌ای که ماتریس T یک ماتریس 31×31 حاوی توابع رنگ همانندی می‌باشد و E یک ماتریس 31×31 نشان دهنده توزیع انرژی نسبی منبع نوری است که این توزیع بر روی قطر اصلی آن قرار گرفته و باقی اعضا صفر می‌باشند. ماتریس D یک ماتریس قطری 31×31 حاوی مقادیر $d_i = \frac{dR_i}{d(f(R)_i)} = \frac{2R_i^2}{1-R_i^2}$ در طول موج‌های مختلف در روی قطر اصلی می‌باشد و همچنین ماتریس‌های f^t و f^s به صورت 1×31 به ترتیب حاوی مقادیر $\frac{K}{S}$ مربوط به هدف و زمینه در طول موج‌های مربوطه می‌باشند. در مرحله دوم لازم است تکرار برای تحقق همانندی نزدیک‌تر آغاز شود، و این فرآیند تا هنگامی که مقدار اختلاف بین محرکه‌های سه گانه به کمتر از مقدار توافق شده نرسیده است، ادامه می‌یابد و سپس متوقف می‌گردد (رابطه‌های ۸ و ۹) [۵].

$$\Delta t = B \times \Delta C \quad (8)$$

$$\Delta C = (B)^{-1} \times \Delta t \quad (9)$$

Δt میزان اختلاف بین مقادیر محرکه‌های سه‌گانه نمونه استاندارد و نمونه همانند شده را نشان می‌دهد و ΔC نشان‌دهنده میزان اصلاحی است که در مرحله تکرار به دست می‌آید و می‌بایست به غلظت‌های موجود اعمال شود. ماتریس B مطابق رابطه ۱۰ عبارتست از:

$$B = \begin{bmatrix} \frac{\partial X}{\partial C_1} & \frac{\partial X}{\partial C_2} & \frac{\partial X}{\partial C_3} \\ \frac{\partial Y}{\partial C_1} & \frac{\partial Y}{\partial C_2} & \frac{\partial Y}{\partial C_3} \\ \frac{\partial Z}{\partial C_1} & \frac{\partial Z}{\partial C_2} & \frac{\partial Z}{\partial C_3} \end{bmatrix}_{3 \times 3} \quad (10)$$

۱- مقدمه

برقراری ارتباط میان رنگ محصول نهایی و مقدار رنگزای اولیه مورد نیاز، بسیار حائز اهمیت می‌باشد. برای برقراری این ارتباط نیاز به یک تئوری احساس می‌شود که قابلیت پیش‌گویی مقدار نور انعکاس یافته از سطح مواد را داشته باشد. در اکثر موارد از تئوری کیوبلکا-مانک جهت برقراری این ارتباط استفاده می‌گردد، که دلیل به کارگیری آن سادگی و نتایج مطلوب آن می‌باشد. معادله کیوبلکا-مانک برای حالت پشت‌پوش به صورت رابطه ۱ می‌باشد.

$$\left(\frac{K}{S}\right)_\lambda = \frac{(1-R_\lambda)^2}{2R_\lambda} \quad (1)$$

که در آن R_λ فاکتور انعکاسی برای یک نمونه با ضخامت بینهایت می‌باشد. خواص نوری مواد با دو ضریب جذب K و انتشار S مشخص می‌شوند. میزان جذب و انتشار کل را می‌توان مجموعی از مقادیر جذب و انتشار تک تک مواد رنگزا و زیرآیند در نظر گرفت [۳-۱]:

$$K = K_S + c_1K_1 + c_2K_2 + c_3K_3 + c_4K_4 + \dots \quad (2)$$

$$S = S_S + c_1S_1 + c_2S_2 + c_3S_3 + c_4S_4 + \dots \quad (3)$$

که در رابطه‌های ۲ و ۳، S، K، و c به ترتیب بیانگر ضریب جذب، ضریب انتشار و غلظت بوده و همچنین اندیس s بیانگر زیرآیند و اعداد اشاره به شماره ماده رنگزا دارند.

به کمک رابطه‌های ۲ و ۳ برای هر طول موج مطابق رابطه ۴ خواهیم داشت:

$$\left(\frac{K}{S}\right)_{m\lambda} = \frac{K_S\lambda + c_1K_1\lambda + c_2K_2\lambda + c_3K_3\lambda + \dots}{S_S\lambda + c_1S_1\lambda + c_2S_2\lambda + c_3S_3\lambda + \dots} \quad (4)$$

مواد رنگزا در منسوجات فاقد انتشار فرض می‌شوند لذا در مخرج رابطه ۴ می‌توان S_1 ، S_2 و S_3 را ... را معادل صفر دانست (رابطه‌های ۵ و ۶):

$$\left(\frac{K}{S}\right)_{m\lambda} = \frac{K_S\lambda + c_1K_1\lambda + c_2K_2\lambda + c_3K_3\lambda + \dots}{S_S\lambda} \quad (5)$$

در نتیجه:

$$\left(\frac{K}{S}\right)_{m\lambda} = \left(\frac{K}{S}\right)_{S\lambda} + c_1\left(\frac{K_1}{S_S}\right)_\lambda + c_2\left(\frac{K_2}{S_S}\right)_\lambda + \dots \quad (6)$$

1- Allen

موج‌های نور مرئی برای رنگزاهای به کار رفته در رنگ همانندی می‌باشد. روش دیگر در رنگ همانندی اسپکتروفوتومتریک روش تکرار است [۲] که در این روش از حداقل مجموع مربعات وزن داده شده جهت بهینه‌سازی میزان اختلاف میان طیف‌های انعکاسی نمونه و هدف استفاده می‌گردد (رابطه‌های ۱۵ و ۱۶):

$$\sum_j W_j^2 (\Delta R_j)^2 \rightarrow \min \quad (15)$$

$$\Delta R = \left[\frac{\partial R_i}{\partial C_i} \right] \times \Delta C \quad (16)$$

و با فرض اینکه مقادیر انعکاس طیفی هدف و نمونه، اختلاف چندانی ندارند، می‌توان نوشت:

$$\frac{\partial R_i}{\partial C_i} = \left(\frac{dR}{df(R)} \right)_i \frac{\partial f(R)_i}{\partial C_i} = d_i \frac{\partial f(R)_i}{\partial C_i} \quad (17)$$

رابطه ۱۷ را می‌توان به فرم ماتریسی زیر نوشت:

$$\frac{\partial R_i}{\partial C_i} = D\phi \quad (18)$$

با ادغام روابط ۱۶ و ۱۸ می‌توان نوشت [۸]:

$$\Delta C = (D \times \phi)^{-1} \times \Delta R \quad (19)$$

و در نهایت با به کارگیری رابطه ۱۱ به غلظت جدید دست یافت. اگر ابتدا تابع وزنی W در طرفین رابطه ۱۶ ضرب گردد، آنگاه رابطه نهایی به صورت رابطه ۲۰ حاصل می‌گردد:

$$\Delta C = (W \times D \times \phi)^{-1} \times W \times \Delta R \quad (20)$$

یکی از توابع وزنی مورد استفاده جهت تطابق بهتر نتایج حاصل از منحنی‌های انعکاسی با محرکه‌های سه‌گانه عبارت است از (رابطه ۲۱):

$$W_i = \sum_{A, D65, F11} \left[(\bar{x}_i + \bar{y}_i + \bar{z}_i) E_i \right]^{1/4} [R_{ii}]^{-2/3} \quad (21)$$

بدیهی است که اگر ماتریس W با یک ماتریس واحد جایگزین شود آنگاه رابطه ۲۰ تبدیل به همان رابطه ۱۹ می‌گردد.

به طور کلی می‌توان گفت رنگ همانندی اسپکتروفوتومتریک در کارهای عملی توانایی انطباق کامل محرکه‌های سه‌گانه با نمونه هدف زیر یک منبع نوری خاص را ندارد، اما در عوض باعث می‌شود تا مقادیر اختلاف رنگ‌های حاصله در زیر منابع نوری مختلف تفاوت فاحشی با یکدیگر نداشته باشند. اغلب عملیات رنگ همانندی منجر به جفت‌های

در رنگ همانندی با استفاده از تئوری تک ثابتی، ماتریس B برابر است با $B = TED\phi$ [۵] و در نهایت پس از یافتن ΔC می‌توان از طریق رابطه ۱۱ به غلظت جدید برای تکرار بعدی دست یافت.

$$C_{new} = C_{old} + \Delta C \quad (11)$$

در انجام فرآیند تکرار به جای استفاده از ΔX ، ΔY و ΔZ می‌توان از مقادیر ΔL^* ، Δa^* و Δb^* نیز استفاده نمود [۶]. برای به کارگیری ΔL^* ، Δa^* و Δb^* در مرحله تکرار می‌توان رابطه ۱۲ را به کار گرفت:

$$(\Delta L^* \Delta a^* \Delta b^*)^T = J_{D65} \times B \times \Delta C \quad (12)$$

که در آن J_{D65} ماتریس تبدیل فضای XYZ به فضای $L^*a^*b^*$ تحت منبع نوری D65 می‌باشد (رابطه ۱۳):

$$J_{D65} = \begin{bmatrix} \frac{\partial L^*}{\partial X} & \frac{\partial L^*}{\partial Y} & \frac{\partial L^*}{\partial Z} \\ \frac{\partial a^*}{\partial X} & \frac{\partial a^*}{\partial Y} & \frac{\partial a^*}{\partial Z} \\ \frac{\partial b^*}{\partial X} & \frac{\partial b^*}{\partial Y} & \frac{\partial b^*}{\partial Z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\partial L^*}{\partial Y} & 0 \\ \frac{\partial a^*}{\partial X} & \frac{\partial a^*}{\partial Y} & 0 \\ 0 & \frac{\partial b^*}{\partial Y} & \frac{\partial b^*}{\partial Z} \end{bmatrix} \quad (13)$$

یکی دیگر از روش‌های کلاسیک در رنگ همانندی کامپیوتری، روش اسپکتروفوتومتري می‌باشد. این رنگ همانندی بر این ایده استوار است که نسخه رنگی به گونه‌ای محاسبه شود که مقادیر انعکاسی نمونه همانند شده تا حد امکان به مقادیر انعکاسی نمونه هدف نزدیک باشند و این خود به طور غیر مستقیم منجر به اختلاف رنگ‌های کوچک می‌گردد [۱-۲]. هر چند انطباق کامل مقادیر انعکاسی نمونه و هدف به معنی اختلاف رنگ صفر زیر تمامی منابع نوری است اما در عمل به دلیل محدودیت‌هایی که وجود دارد رسیدن به انطباق کامل غیر ممکن است. از روش‌های شناخته شده در استفاده از مقادیر انعکاس طیفی، روشی است که توسط مک‌گینس^۱ ارائه شد [۷]، در این الگوریتم سعی می‌گردد تا با استفاده از تئوری تک ثابتی کیوبلکا-مانک مجموع مربع اختلاف‌ها بین مقادیر انعکاسی نمونه و هدف و یا تابعی از آنها (غالباً K/S) کمینه گردد. غلظت مواد رنگزا بر اساس این روش توسط رابطه ۱۴ تعیین می‌گردد:

$$C = (\phi' \phi)^{-1} \phi' (f^t - f^s) \quad (14)$$

در رابطه اخیر ϕ حاوی ضرایب جذب (نسبت K/S واحد) در طول

1- McGinnis

اسپکتروفوتومتری در مقایسه با روش رنگ همانندی اسپکتروفوتومتری با استفاده از مقادیر محرکه رنگ پایه مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد

از پارچه نایلون ۶ به عنوان زمینه رنگریزی استفاده شد که از یکی از کارخانجات ریسندگی و بافندگی داخلی تهیه گردید. همچنین از ۶ ماده رنگزا ساخت شرکت سیبا^۳ به عنوان رنگهای اصلی برای تهیه نمونه‌های رنگی استفاده شد. مشخصات مواد رنگزا در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱: مشخصات مواد رنگزای مورد استفاده برای تهیه نمونه‌های رنگی.

Commercial Name	Manufacturer	C.I. Number
Tectilon Blue 4R	Ciba Specialty Chemical Inc.	Acid Blue 277
Tectilon Red 2B	Ciba Specialty Chemical Inc.	Acid Red 54
Tectilon Brown 5G	Ciba Specialty Chemical Inc.	Acid Brown 38
Tectilon Yellow 4R	Ciba Specialty Chemical Inc.	Acid Yellow 219
Polar Yellow GN	Ciba Specialty Chemical Inc.	Acid Yellow 117
Tectilon Blue 6G	Ciba Specialty Chemical Inc.	Acid Blue 268

۲-۲- روش کار

داده‌ها در این تحقیق شامل ۱۶۵ نمونه رنگریزی شده می‌باشند که از این میان برای رنگریزی برخی از آنها تنها از یک ماده رنگزا، برای رنگریزی برخی دو ماده رنگزا و برای رنگریزی سایر نمونه‌ها از سه ماده رنگزا مطابق جدول ۲ استفاده گردید. جهت اطمینان از تمیزی پارچه‌ها، آنها در محلول ۱ درصد از یک شوینده غیریونی به مدت ۲۰ دقیقه و در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد شست و شو داده شدند. جهت انجام رنگریزی محلولی از ماده رنگزای مورد نظر مطابق جدول ۳ تهیه گردید. از اسید استیک برای تنظیم pH= ۴٫۵ در حمام رنگریزی استفاده شد. پس از ساخت محلول رنگریزی، پارچه‌های شسته شده به همراه محلول رنگریزی در ۸ سل دستگاه رنگریزی نساج صنعت ساخت داخل قرار گرفت تا منحنی رنگریزی مطابق شکل ۱ را طی نمایند. پس از رنگریزی پارچه‌ها آبکشی و خشک شدند.

متامر خواهد شد که طبعاً منحنی انعکاس طیفی این جفت‌ها با یکدیگر برابر نیست. در سال ۱۹۵۳ ویشسکی تئوری خود را به این صورت ارائه داد که توزیع انرژی طیفی هر یک از متامرها از نظر ریاضی حداقل از دو جزء تشکیل شده است:

- یک توزیع پایه و مشترک که ذاتاً مقادیر محرکه‌های سه‌گانه‌ای را باعث می‌گردد که جفت‌های متامر در آن مشترک هستند و یک توزیع ثانویه که برای هر متامر منحصر بفرد است و دارای مقادیر محرکه‌های سه‌گانه (0,0,0) می‌باشد. این توزیع یا جزء ثانویه ضرورتاً مقادیر منفی در برخی طول موج‌ها همراه با مقادیر مثبت در سایر طول موج‌ها خواهد داشت و اثر خالص این جزء به گونه‌ای می‌باشد که هیچ‌گونه تأثیری بر روی مشخصه رنگی و یا ادراک رنگ نخواهد داشت. بعلاوه آنکه این توابع ثانویه تماماً دارای مقادیر محرکه‌های سه‌گانه یکسان (0,0,0) می‌باشند با یکدیگر جفت‌های متامر می‌باشند و ویشسکی آنها را سیاه‌های متامر نامید [۹].

محققان دستورالعمل‌هایی جهت به دست آوردن توزیع‌های انرژی که مقادیر محرکه‌های سه‌گانه یکسان با برخی توزیع‌های اولیه داشته باشد، بسط داده‌اند. این دستورالعمل‌ها همیشه منتهی به تعیین سیاه‌های متامر می‌گردد زیرا تابعی که تفاوت مابین هر دو توزیع انرژی متامر را نشان می‌دهد بایستی یک سیاه متامر باشد. چندین روش عمومی جهت انجام این کار در مقالات آورده شده است [۱۰]. در یکی از این روش‌ها که مستلزم استفاده از ماتریس $A(A'A)^{-1}A'$ است و به نام یک برازنده متعامد شناخته می‌شود و اولین بار در مقاله کوهن و فریدن [۱۱] به نام ماتریس R نامیده شده است، به صورت مشخص متامر پایه بسادگی توسط ضرب نمودن ماتریس R در N یافته می‌شود (رابطه ۲۲):

$$N^* = RN \quad (22)$$

ماتریس A سری وزنی حاوی توابع رنگ همانندی می‌باشد. کسر محرک رنگ پایه (N^*)، از تابع انعکاس طیفی (N)، سیاه متامر (B) را به دست می‌دهد یعنی:

$$N - N^* = B \quad (23)$$

برای رنگ همانندی اسپکتروفوتومتری با استفاده از مقادیر محرکه رنگ پایه بایستی در نظر داشت که بر پایه تئوری تجزیه طیفی جهت کمینه نمودن اختلاف مابین مقادیر محرک رنگ پایه نمونه همانند شده و نمونه هدف، ΔR_{FCS} بایستی کمینه گردد. هدف از این تحقیق بررسی و مقایسه عملکرد روش‌های مختلف رنگ همانندی می‌باشد. در این راستا روش‌های مختلف کالریمتری و

3- Ciba Specialty Chemical Inc.

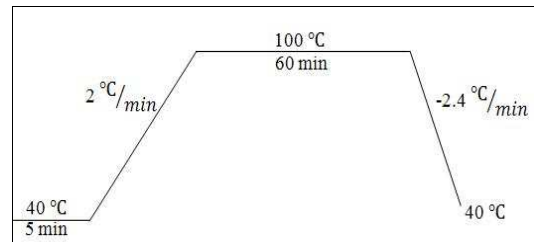
1- Cohen and Friden

2- Matrix R

جدول ۴: نتایج آزمون تکرارپذیری فرآیند رنگریزی تحت شرایط مشاهده‌کننده استاندارد ۱۰ درجه CIE و منبع نوری D65 برای ۵ نمونه.

Sample	L*	a*	b*	ΔE^*_{ab}
۴۰-۱	۳۵,۸۰	۸,۱۱	۱۹,۴۰	۰,۵۶
۴۰-۲	۳۶,۰۳	۸,۳۲	۱۹,۸۷	
۶۷-۱	۴۹,۷۷	۱۱,۰۵	-۱۸,۹۵	۰,۴۱
۶۷-۲	۴۹,۸۲	۱۰,۶۶	-۱۸,۸۵	
۷۸-۱	۳۳,۶۸	۲۴,۸۶	-۱۳,۲۵	۰,۷۰
۷۸-۲	۳۳,۱۵	۲۵,۲۹	-۱۳,۳۹	
۸۹-۱	۶۲,۱۳	-۱۰,۰۸	۲۴,۰۰	۰,۵۳
۸۹-۲	۶۲,۳۵	-۱۰,۲۰	۲۴,۴۶	
۹۵-۱	۴۶,۲۵	-۱۲,۴۰	-۱۲,۰۲	۰,۶۲
۹۵-۲	۴۶,۶۱	-۱۲,۸۴	-۱۱,۷۷	

برای رنگ همانندی کالریمتری از الگوریتم آلن با به کارگیری تئوری تک ثابتی کیوبلکا - مانک استفاده شد [۱۲]. به همین منظور فرآیند رنگ همانندی در دو مرحله انجام گرفت، در مرحله اول با استفاده از رابطه ۷ حل ابتدایی^۱ معین می‌شود. از آنجا که تعداد مواد رنگزای مورد استفاده در این رابطه می‌بایستی سه ماده رنگزا باشد، لذا کلیه ترکیبات سه تایی مختلف از ۶ ماده رنگزا ($C(3) = 20$) در این مرحله برای یافتن بهترین جواب بررسی شدند. بدین معنی که ابتدا برای هر ترکیب ۳ تایی حدس اولیه توسط روش آلن حل شد. سپس بین تمامی ترکیبات ۳ تایی و حدس‌های اولیه شان، آن ترکیب ۳ تایی انتخاب گردید که کمترین مقدار اختلاف رنگ را با نمونه هدف دارا بود. برای استفاده از روش تکرار نیز، ترکیب سه تایی منتخب در مرحله قبل و حدس اولیه‌اش را به عنوان نقطه شروع در نظر گرفته و عملیات تکرار بر روی آن با استفاده از رابطه‌های ۸ الی ۱۳ انجام گرفت. لازم به ذکر است که معیار توقف در حلقه تکرار برنامه‌های کالریمتری رسیدن به مقدار اختلاف رنگ کمتر از حد توافق شده می‌باشد. در این پروژه، معیار توقف رسیدن به اختلاف رنگ صفر (مقدار ایده‌آل) در نظر گرفته شد. ضمناً برای جلوگیری از ایجاد حلقه‌های بی‌نهایت (حلقه‌هایی که با بی‌نهایت تکرار هم به اختلاف رنگ صفر منتهی نمی‌شوند) یک معیار توقف دیگر نیز در نظر گرفته شد که اگر برنامه بعد از ۵۰ تکرار نیز به هدف دست نیافت از ادامه حلقه صرف نظر کند. از آنجا که معمولاً بعد از طی کردن چهار الی پنج حلقه، دیگر بهبود قابل توجهی در پاسخ‌ها حاصل نمی‌شود لذا در نظر گرفتن ۵۰ حلقه صرفاً جهت اطمینان می‌باشد.



شکل ۱: منحنی رنگریزی.

جدول ۲: مشخصات نمونه‌های رنگی.

تعداد مواد رنگزا در نسخه رنگریزی	۱	۲	۳
تعداد نمونه‌ها	۳۶	۶۰	۶۹

جدول ۳: اجزا تشکیل دهنده حمام رنگریزی.

وظیفه	مقدار	نوع ماده
ماده رنگزا	X% (O.W.F)	Dye
تنظیم pH=4.5	4%	Acetic acid
یکنواخت کننده	1%	Univadine PA

جهت اطمینان از تکرارپذیری فرآیند رنگریزی، تعداد ۵ نمونه به صورت تصادفی از نقاط مختلف فضای رنگی انتخاب گردید و مجدداً رنگریزی شدند که نتایج آن در جدول ۴ قابل مشاهده است. همان‌گونه که در این جدول مشهود است فرآیند رنگریزی دارای تکرارپذیری قابل قبولی می‌باشد. برای به دست آوردن منحنی‌های کالیبراسیون ۶ غلظت از هر ماده رنگزا در نظر گرفته شد که عبارت بودند از حاصل ضرب ضرایب ۰,۰۰۲، ۰,۰۰۶، ۰,۰۲، ۰,۰۵، ۰,۷ و ۰,۸۲ در غلظت اشباع هر یک از مواد رنگزا [۱۲]. بنابراین هر یک از مواد رنگزا مطابق این ۶ غلظت بر روی کالای نایلونی رنگریزی شدند و سپس نمودار ضریب جذب در طول موج بیشترین جذب بر حسب غلظت، برای هر ماده رنگزا رسم گردید. کلیه اندازه‌گیری‌ها با در نظر گرفتن جز انعکاس آینه‌ای (SCI) انجام گردید. از آنجایی که نمونه‌های تهیه شده ضخامت کافی جهت پشت‌پوش شدن را نداشتند، برای اندازه‌گیری مقادیر انعکاسی، نمونه‌ها به صورت چهارلا و توسط دریچه متوسط موجود در دستگاه (15 mm) تحت اندازه‌گیری قرار گرفتند. از آنجا که یک اختلاف رنگ اندک بین پشت و روی نمونه‌ها، وجود داشت تمامی اندازه‌گیری‌ها بر روی یک طرف از نمونه‌های رنگریزی شده صورت گرفت. جهت بالا رفتن دقت اندازه‌گیری، از متوسط ۲ اندازه‌گیری در دو نقطه مختلف نمونه استفاده شد و این دو اندازه‌گیری به صورت عمود بر هم انجام شد تا اثر بافتار کمتر شود. شکل ۲ نشان دهنده محدوده رنگی حاصل از تمامی ۱۶۵ نمونه، در مختصات رنگی $CIE L^*a^*b^*$ می‌باشد.

1- Rough match

برای بررسی کارایی روش‌های مختلف رنگ همانندی از رابطه اختلاف رنگ $CIE L^*a^*b^*$ استفاده شد [۱۳]. برای تعیین درجه متامریزم نمونه‌ها از اندیس متامریزم عمومی مرادیان و ریگ استفاده گردید [۱۴].

در انتهای کار جهت اطمینان از صحت پیشگویی، تصمیم گرفته شد تا برخی از پیشگویی‌ها به صورت عملی رنگریزی شوند، لذا تعداد ۲۴ نمونه از ۱۶۵ نمونه انتخاب شدند تا با پیشگویی‌های روش‌های اسپکتروفوتومتریک وزن داده شده، کالریمتری بر اساس تکرار به کمک معادله اختلاف رنگ CIE 1976 و روش تجزیه طیفی رنگریزی شوند. این ۲۴ نمونه همگی نمونه‌هایی بودند که از ترکیب ۳ ماده رنگزای مختلف تهیه شده بودند، در ضمن سعی بر آن بوده که تا جایی که امکان دارد این نمونه‌ها مربوط به یک منطقه خاص از فضا رنگ نباشند و توزیع مناسبی از فضا رنگ را شامل شوند، که شکل ۳ این توزیع را نشان می‌دهد.

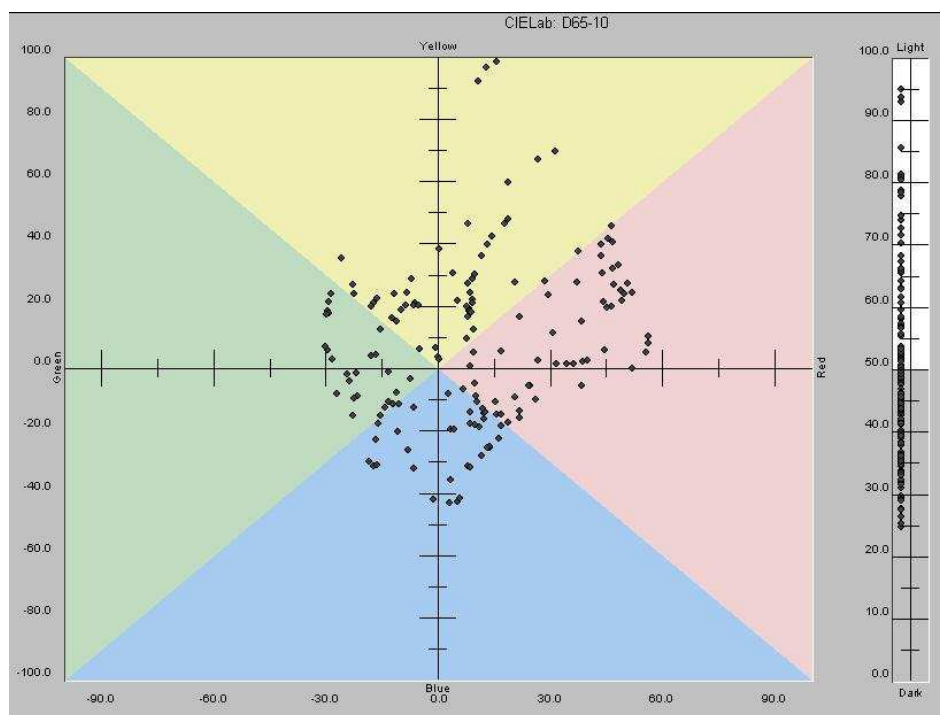
در این تحقیق مقادیر انعکاس طیفی نمونه‌های رنگریزی شده توسط دستگاه اسپکتروفوتومتر Color-Eye 7000A ساخت شرکت Gretag-Macbeth آمریکا در فواصل ۱۰ نانومتری در بازه ۳۶۰-۷۵۰ nm اندازه‌گیری شدند.

رنگ همانندی اسپکتروفوتومتریک به روش تک ثابتی کیوبلکا-مانک از طریق روش حداقل مربعات مک‌گینس و با استفاده از رابطه ۱۴ انجام گردید. روش تکرار با استفاده از رابطه‌های ۱۱ و ۱۹، همچنین روش تکرار وزن داده شده با به کارگیری رابطه‌های ۱۱، ۲۰ و ۲۱ انجام گردید. برای تشکیل ماتریس ϕ ، در روش مک‌گینس کلیه ترکیبات مختلف از مواد رنگزا در نظر گرفته شد ($2^6 = 64$)، به این صورت که به جز زیرآیند خالص کلیه ۶۳ حالت دیگر ترکیب مختلف مواد رنگزا برای تشکیل این ماتریس استفاده شد.

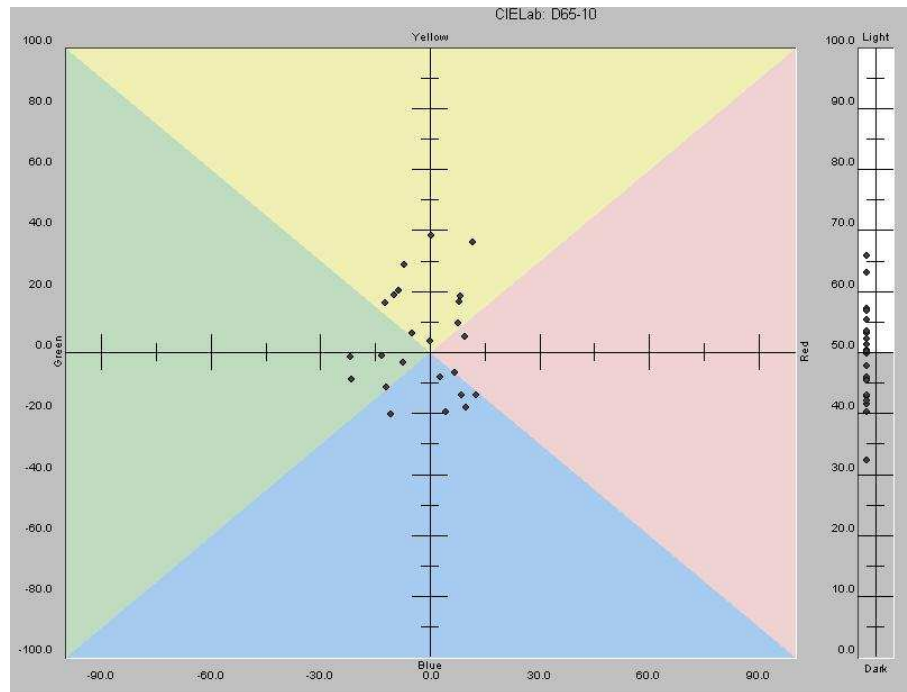
در روش‌های اسپکتروفوتومتری که بر مبنای تکرار می‌باشند معیار توقف رسیدن به مقدار اندیس متامریزم (MI6) کمتر از حد توافق شده می‌باشد، که در این تحقیق، معیار توقف رسیدن به اندیس متامریزم صفر (مقدار ایده‌آل) در نظر گرفته شد. ضمناً برای جلوگیری از حلقه‌های بی‌نهایت، در این جا نیز مانند روش کالریمتری از معیار محدودکننده حداکثر ۵۰ حلقه استفاده گردید.

برای رنگ همانندی اسپکتروفوتومتری با استفاده از مقادیر محرکه رنگ پایه نیز بایستی در نظر داشت که بر پایه تئوری تجزیه طیفی جهت کمینه نمودن اختلاف مابین مقادیر محرک رنگ پایه نمونه همانند شده و نمونه هدف، ΔR_{FCS} مطابق رابطه ۲۴ بایستی کمینه گردد:

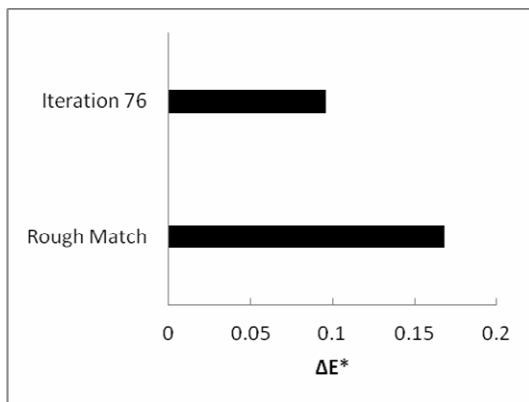
$$\Delta R_{FCS} = \text{matrix}R \times \left(\frac{\partial R_i}{\partial C_i} \right) \Delta C \quad (24)$$



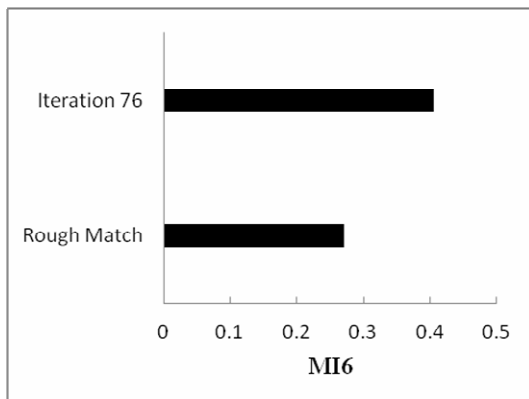
شکل ۲: نمایش توزیع ۱۶۵ نمونه تهیه شده در فضا رنگ سه‌بعدی $CIE L^*a^*b^*$ تحت شرایط منبع نوری استاندارد D65 و مشاهده‌کننده استاندارد ۱۰ درجه CIE.



شکل ۳: توزیع ۲۴ نمونه منتخب در فضا رنگ سه بعدی $CIE L^* a^* b^*$ جهت رنگریزی.



شکل ۴: مقادیر اختلاف رنگ CIELAB تحت شرایط منبع نوری استاندارد D65 و مشاهده‌کننده استاندارد ۱۰ درجه CIE برای روش‌های مختلف رنگ همانندی کالریمتری.



شکل ۵: مقادیر اندیس متامریزم کلی MI6 برای روش‌های مختلف رنگ همانندی کالریمتری.

۲- نتایج و بحث

۲-۱- رنگ همانندی کالریمتری

میانگین نتایج رنگ همانندی به دست آمده از روش کالریمتری و با استفاده از تئوری تک ثابتی برای کل نمونه‌ها در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است.

هدف رنگ همانندی کالریمتری کاهش مقدار اختلاف رنگ زیر منبع نوری تعیین شده می‌باشد و همان‌گونه که در شکل ۴ مشخص است، روش تکرار بر مبنای معادله اختلاف رنگ CIELAB، در نیل به این هدف موفق‌تر عمل نموده است.

از شکل ۵ این‌گونه برداشت می‌شود که روش تکرار بر مبنای معادله اختلاف رنگ CIELAB هر چند توانسته است میزان اختلاف رنگ را نسبت به روش حدس اولیه کاهش دهد اما میزان متامریزم همان‌گونه که می‌دانیم با به کارگیری این روش می‌تواند افزایش یا کاهش یابد. زیرا در روش تکرار بر مبنای معادله اختلاف رنگ CIELAB تحت منبع نوری مرجع (D65) به هدف نزدیک‌تر می‌شویم، لذا تضمینی برای کاهش یا افزایش اختلاف رنگ زیر سایر منابع نوری وجود ندارد بلکه هدف تنها کاهش اختلاف رنگ تحت منبع نوری مرجع می‌باشد؛ اما باید توجه داشت که در هر صورت این میزان از حد رواداری متداول کمتر است.

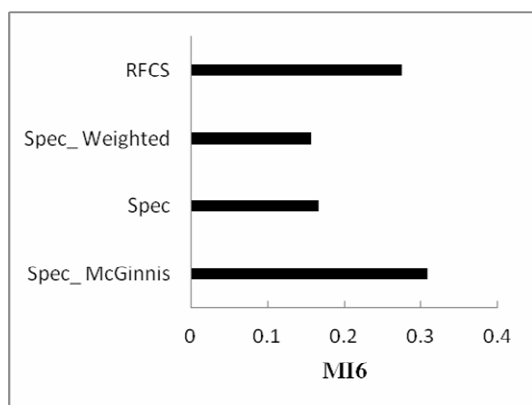
۲-۳- رنگ همانندی اسپکتروفوتومتری و تئوری تجزیه طیفی

میانگین نتایج رنگ همانندی به دست آمده از روش اسپکتروفوتومتری با استفاده از تئوری تک ثابتی و تئوری تجزیه طیفی برای کل نمونه‌ها در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است. همان‌گونه که در منابع اشاره شده بود و انتظار می‌رفت، استفاده از تابع وزنی در رنگ همانندی اسپکتروفوتومتری تأثیر خوبی بر نتایج روش اسپکتروفوتومتری دارد و نتایج از دو روش دیگر اسپکتروفوتومتری (روش اسپکتروفوتومتری تک ثابتی و روش مک‌گینیس) بهتر است [۴، ۱۵]. تقریباً در تمامی ترکیبات، میزان اختلاف رنگ و مقدار درجه متامریزم محاسبه شده در مورد روش اسپکتروفوتومتری وزن‌دهی شده بهتر از روش اسپکتروفوتومتری بدون وزن است.

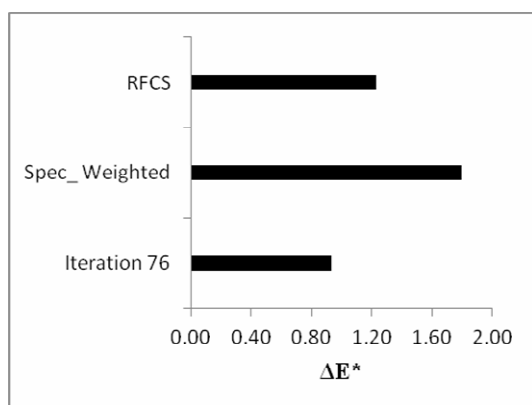
در شکل ۷ مشاهده می‌شود که روش تجزیه طیفی به لحاظ اندیس‌های متامریزم نسبت به روش‌های اسپکتروفوتومتری و اسپکتروفوتومتری وزن داده شده برتری ندارد، دلیل این امر را می‌توان اینگونه بیان کرد که هدف در این روش رنگ همانندی، همانندکردن منحنی‌های محرکه رنگ پایه می‌باشد و از آنجا که محرک رنگ پایه حاوی سیاه متامر نیست، لذا تعیین و پیشگویی میزان متامریزم محدود می‌باشد. لیکن مقادیر اختلاف رنگ هنوز در محدوده قابل قبول قرار گرفته‌اند.

۳-۳- نتایج رنگ‌رزی‌های عملی

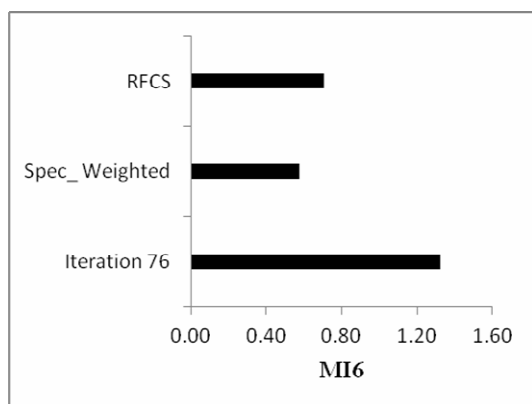
نتایج رنگ همانندی‌های عملی را می‌توان در شکل‌های ۸ و ۹ مشاهده نمود. معیار انتخاب ۲۴ نمونه رنگ‌رزی شده واقعی برای روش کالریمتری بر اساس تکرار با معادله اختلاف رنگ CIE1976 بر اساس کمترین میزان اختلاف رنگ می‌باشد و برای دو روش دیگر، کمترین اندیس متامریزم (MI6) انتخاب گردید. این مطلب به دلیل نشان دادن تغییرات در عملکرد، با تغییر در انتخاب اولیه است که دقیقاً در شکل‌های ۸ و ۹ مشهود است.



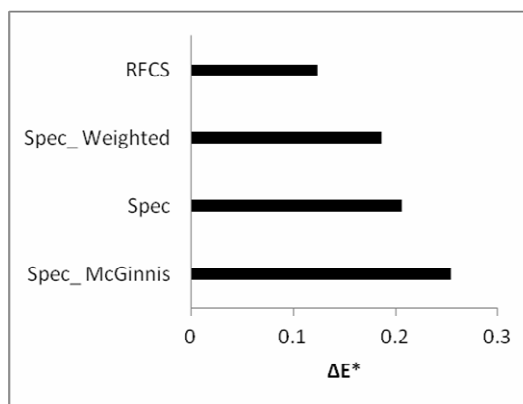
شکل ۷: مقادیر اندیس متامریزم کلی MI6 برای روش‌های مختلف رنگ همانندی اسپکتروفوتومتری.



شکل ۸: مقادیر اختلاف رنگ CIELAB تحت شرایط منبع نوری استاندارد D65 و مشاهده‌کننده استاندارد ۱۰ درجه CIE برای رنگ‌رزی واقعی ۲۴ نمونه منتخب.



شکل ۹: مقادیر اندیس متامریزم کلی MI6 برای رنگ‌رزی واقعی ۲۴ نمونه منتخب.



شکل ۶: مقادیر اختلاف رنگ CIELAB تحت شرایط منبع نوری استاندارد D65 و مشاهده‌کننده استاندارد ۱۰ درجه CIE برای روش‌های مختلف رنگ همانندی اسپکتروفوتومتری.

۴- نتیجه‌گیری

با استناد به نتایج به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که به کارگیری روش تجزیه طیفی و استفاده از تئوری کیوبلکا-مانک می‌تواند نتایج قابل قبولی را با توجه به معیارهایی از قبیل مقادیر اختلاف رنگ و درجه متامریزم در رنگ همانندی به دست دهد. با استفاده از تجزیه طیفی مقادیر انعکاسی نه تنها می‌توان روش‌های بر پایه مقادیر انعکاسی را بهبود داد بلکه این روش برتری مشخصی نسبت به روش‌های کالریمتری نیز دارد.

همان‌گونه که در بخش نتایج و بحث مشاهده شد نتایج حاصله، هم‌راستا و موید نتایج تئوری بوده و نشان‌دهنده برتری نسبی روش رنگ همانندی اسپکتروفوتومتری با استفاده از مقادیر محرکه رنگ پایه می‌باشد.

در شکل ۸ نظر به این که معیار ارزیابی اختلاف رنگ است، لذا میزان اختلاف رنگ در روش Iteration-76 از سایر روش‌ها کمتر می‌باشد. در شکل ۹ که معیار ارزیابی اندیس متامریزم است، روش‌های تجزیه طیفی و اسپکتروفوتومتری وزن داده شده نسبت به روش کالریمتری بر اساس تکرار با معادله اختلاف رنگ CIE1976 برتری نشان می‌دهند و این نشان‌دهنده آن است که با تغییر معیار ارزیابی، جابجایی در عملکرد امکان‌پذیر است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که هر سه روش از عملکرد خوبی برخوردار بوده، مضافاً بر اینکه روش پیشنهادی تجزیه طیفی عملکردی بینابین دو روش دیگر دارد که از یک سو با افزایش تعداد معادلات، موجب افزایش تعداد مواد رنگزای قابل استفاده می‌گردد و از سوی دیگر نمونه‌هایی با اختلاف رنگ مناسب‌تر نسبت به روش اسپکتروفوتومتری ایجاد می‌نماید.

۵- مراجع

1. G. A. Klein, Industrial color physics, Springer Series in Optical Science. 2010.
2. B. Sluban, Comparison of colorimetric and Spectrophotometric algorithms for computer match prediction. *Color Res. Appl.* 18(1993), 74-79.
3. R. McDonald, Computer match prediction, in Colour physics for industry, R. McDonald, ed. (Society of Dyers and Colourists. 1997, 209- 291.
4. R. H. Park, E. I. Stearns, Spectrophotometric formulation. *J. Opt. Soc. Am.* 34(1944), 112.
5. E. Allen, Colorant Formulation and Shading, in Optical radiation measurements, Volume 2 Color measurement, F. Grum and C. J. Bartleson, (Eds), Academic Press, NewYork, 1980.
6. R. S. Berns, A generic approach to color-modeling. *Color Res. Appl.* 22(1977), 318-325.
7. P. H. McGinnis, Spectrophotometric color-matching with the least squares technique. *Color Eng.* 5(1976), 22-27.
8. A. Karbasi, S. Moradian, S. Asiaban, Improving the performance of computer color matching procedures. *J. Opt. Soc. Am.* 25(2008), 2251-2262.
9. G. Wyszecki, Valenzmetrische Untersuchung des Zusammenhanges zwischen normaler und anomaler Trichromasie. *Die Farbe.* 2(1953), 39-45.
10. D. Pedoe, A geometric introduction to linear algebra. NewYork: Wiley, 1963.
11. J. Cohen, T. P. Friden, Euclidean color space and its invariants. Proceedings of the Technical Association of the Graphic Arts, 411(1976).
12. E. Allen, Basic equations used in computer color matching. *J. Opt. Soc. Am.* 56(1966), 1256-1259.
13. G. Wyszecki, W. S. Stiles, Color science, Concepts and methods, quantitative data and formulae, 2nd Edition, John Wiley and Sons, New York, 1982.
14. S. Moradian, B. Rigg, The quantification of metamerism. *J. Soc. Dyers Colour.* 103(1987), 209-213.
15. R. S. Berns, A generic approach to color modeling. *Color Res. Appl.* 22(1997), 318-325.