

مروری بر مدل های تطبیق رنگی به همراه بررسی کارایی مدل تطبیق رنگی CAT02 در پیش بینی جفت های مشابه رنگی از نظر میزان تطابق با نتایج بصری

سعیده گرجی کندیⁱ؛ سید حسین امیرشاهیⁱⁱ؛ محمد امانی تهرانⁱⁱⁱ

چکیده

در این مقاله، ابتدا مدل های تطبیق رنگی، مرور و روش های ارایه شده برای تهیه جفت های مشابه رنگی توضیح داده شده است. در بخش نخست، با استفاده از مدل تطبیق رنگی CAT02 و انجام ارزیابی های بصری، ۷ جفت مشابه رنگی تهیه شده است. بررسی بر روی نمونه های مذکور نشان داد مدل تطبیق رنگی CAT02 در پیش بینی جفت های مشابه رنگی در حدود درجه ۴ مقیاس خاکستری برای تغییر رنگ خطا دارد. در بخش دیگری از این تحقیق با جستجو و انجام ارزیابی های بصری، ۱۲ جفت مشابه رنگی از کتاب رنگ مانسل به دست آمد. بررسی مدل CAT02 برای مجموعه مذکور نشان داد این مدل برای فام های مختلف طیف متفاوت عمل می کند و در ناحیه قرمز و ارغوانی عملکرد نسبتاً قابل قبولی دارد؛ لیکن در ناحیه زرد و نارنجی پیش بینی ضعیفی از جفت های مشابه رنگی دارد.

کلمات کلیدی

انتقال های تطبیق رنگی، جفت مشابه رنگی، ارزیابی بصری، مقیاس خاکستری

A review on chromatic adaptation transforms and evaluation of the accuracy of CAT02 chromatic adaptation transform for predicting corresponding colors by visual assessment

S. Gorji Kandi; S.H. Amirshahi ; M. Amani Tehran

ABSTRACT

In this paper, at first, the chromatic adaptation transforms and the proposed methods for preparation of corresponding colors are reviewed. Then, the CIECAT02 CIE chromatic adaptation transform is used to prepare 7 pairs of corresponding color. The results show that the CAT02 model introduces a color difference error about the 4 degree of gray scale in comparison with visual assessments. In the next part, 12 corresponding color pairs from Munsell book of color have been prepared by employing a set of visual assessment test. Evaluating of CAT02 model with the prepared set shows that the performance of CAT02 is dependent on the color hue of the samples and it almost benefits from acceptable performance in the red and purple hues while performs the worst results in the yellow and orange region.

KEYWORDS

Chromatic adaptation transforms, Corresponding color, Visual assessment, Gray scale.

ⁱ دانشجوی دکترا؛ دانشکده نساجی؛ دانشگاه صنعتی امیر کبیر: gorji_s@aut.ac.ir

ⁱⁱ استاد؛ دانشکده نساجی؛ دانشگاه صنعتی امیر کبیر: hamirshahi@aut.ac.ir

ⁱⁱⁱ استادیار؛ دانشکده نساجی؛ دانشگاه صنعتی امیر کبیر: amani@aut.ac.ir

در سیستم بینایی انسان سه پدیده مهم از تطبیق شامل تطبیق در تاریکی^۱، تطبیق در روشنایی^۲ و تطبیق رنگی^۳ اتفاق می افتد.

تطبیق رنگی؛ که از اهمیت بیشتری نیز برخوردار است، بدین شکل تعریف می شود: "وقوع تغییرات در سیستم بینایی به نحوی صورت می گیرد که به طور تقریبی تأثیر تغییر در توزیع انرژی طیفی منبع نوری جبران شود" [۲]. هنگام مشاهده یک نمونه چنانچه منبع نوری به طور ناگهانی فرضاً از نور روز به نور لامپ تنگستن تغییر کند، ظاهر تمامی رنگ ها تغییر می کند و این، ناشی از تغییر منحنی انرژی طیفی منبع است و به سادگی با محاسبه میزان تغییر مختصات رنگی جسم قابل اندازه گیری است و تحت عنوان انتقال رنگی^۴ شناخته می شود. پس از گذشت مدت زمان بسیار کوتاهی، رنگ جسم به سمت رنگ معمولش در زیر نور روز برگشت می کند که این برگشت، انتقال تطبیق نامیده می شود و در صورتی که کامل نباشد اختلاف بین رنگ مشاهده شده زیر منبع نوری اولیه و زیر منبع نوری دوم پس از تطبیق کامل، انتقال باقیمانده نامیده می شود [۲]، [۴]. به عنوان مثالی ملموس در این زمینه می توان به یک جسم سفید در زیر منبع نوری روز اشاره کرد که با تغییر منبع نوری (فرضاً به نور لامپ تنگستن) پس از مدت زمان بسیار کوتاهی مجدداً به رنگ سفید مشاهده می شود. حال آنکه سفید همواره کسری از منبع را منعکس می کند و انتظار می رود زیر منبع نوری لامپ تنگستن به رنگ زرد دیده شود. بنابراین با وجود اینکه نور دریافت شده با چشم در دو حالت مذکور کاملاً متفاوت است، جسم سفید در زیر هر دو منبع همانند به نظر می رسد [۵].

۱-۲- جفت مشابه رنگی^۵

اصطلاح جفت مشابه رنگی، به دو نمونه ای اطلاق می شود که یکی در هنگام مشاهده زیر منبع نوری مرجع و دیگری در صورت مشاهده در زیر منبع نوری مورد آزمایش و پس از تطبیق کامل، ظاهر رنگی یکسان دارد [۵]. تلاش های بسیاری برای به دست آوردن جفت های مشابه رنگی انجام شده است و تمامی فرمول های تطبیق در حقیقت، تلاشی برای رسیدن از مختصات رنگی نمونه زیر منبع مورد آزمایش به مختصات جفت مشابه آن زیر منبع نوری مرجع است؛ زیرا هدف، رسیدن به مختصاتی است که بیانگر ظاهر رنگی جسم پس از تطبیق باشد و جفت مشابه جسم نیز زیر منبع مرجع همان ظاهر رنگی

جسم در زیر منبع نوری مورد آزمایش را دارد. چهار روش برای به دست آوردن جفت های مشابه رنگی به شرح زیر گزارش شده است:

الف- روش Haplosopic matching :

در روش قدیمی Haplosopic، به وسیله یک ابزار مشاهده، سمت چپ تصویر با یک چشم و سمت راست با چشم دیگر مشاهده می شود. پس از دادن زمان لازم برای تطبیق، بدین ترتیب که یک چشم با منبع نوری D65 و دیگری با منبع نوری A تطبیق حاصل نماید، از مشاهده کننده خواسته می شود که نمونه C_2 را که با یک چشم دیده می شود به وسیله تغییر دادن نورهای سبز، آبی و قرمز طوری تنظیم کند که با نمونه C_1 ؛ که به وسیله چشم دیگر مشاهده می شود، همانند شود [۱]. این روش، ساده است و به طور کلی از دقت بالاتری نسبت به سایر روش ها برخوردار است؛ لیکن اعتبار این روش به این فرضیه بستگی دارد که تطبیق یک چشم روی حساسیت چشم دیگر اثر نگذارد. تحقیقات نشان می دهد که وقتی هر دو چشم به طور همزمان با دو دسته محرکه و تحت شرایط مختلف تطبیقی عمل کنند مشاهده کننده ها تمایل بیشتری به یک سمت پیدا می کنند که این مسأله به عنوان رقابت دو چشم شناخته می شود. در ضمن، در این روش یک شرایط مشاهده غیر طبیعی بر مشاهده کننده تحمیل می شود. با انجام اصلاحاتی روی روش مذکور، روش Successive-Haplosopic را Eastman و Brecher ارایه کردند که تقریباً مشابه روش قبل است با این تفاوت که مسأله امکان اغتشاش مکانیزم های بینایی هنگامی که محرکه های تطبیقی متفاوتی در هر چشم وجود دارد، مورد توجه قرار گرفته است. برای کاهش این مشکل، مادامی که یک چشم در معرض یک شرایط تطبیق قرار می گیرد، چشم دیگر پوشیده می شود و بالعکس؛ در نتیجه، مشاهده کننده ها دو وضعیت مختلف تطبیقی را به طور همزمان درک نمی کنند. تحقیقات انجام شده نشان داد روش Successive-Haplosopic نسبت به روش قدیمی نتایج متفاوتی می دهد و در این روش می توان عکس العمل های عصبی بین دو چشم را کنترل کرد و مشکل رقابت چشم ها به دلیل آنکه در یک زمان تنها یک شرایط تطبیق وجود دارد، از بین می رود [۶]. یک مشکل عمده در این روش عدم تعریف مناسب از چگونگی مکانیزم تطبیق رنگی است؛ زیرا به دلیل بسته بودن یکی از چشم ها، چشم همواره در حال تغییر بین تاریکی و شرایط تطبیق مورد نظر است. مطالعات صورت گرفته نشان داده است که مکانیزم حساسیت بینایی برای تطبیق رنگی برای رسیدن به تعادل با تغییر شرایط تطبیق، حدود یک دقیقه زمان لازم دارد و Hunt نشان داد

چنانچه این مکانیزم بخواهد پس از تاریکی مجدداً تطبیق حاصل کند چندین دقیقه زمان لازم دارد. این در حالی بود که Brecher و Eastman در فواصل ۴ ثانیه ای وضعیت دو چشم را تغییر می‌دادند [۶]. با توجه به این مشکل Fairchild روش Successive-Ganzfeld Haplosopic را ارایه داد. در این روش با استفاده از وسیله‌ای مناسب، یک چشم زمینه تطبیقی مرجع را مشاهده و چشم دیگر به یک رنگ خنثی یکنواخت نگاه می‌کند که همان روشنایی و مختصات رنگی شرایط تطبیق مورد آزمایش را دارد. پس از زمان تطبیق مناسب، به عکس چشمی که در معرض شرایط تطبیق مورد آزمایش بوده، زمینه تطبیقی مورد آزمایش را نگاه می‌کند که شامل یک جفت تصویر یا نمونه است؛ در حالی که چشم دیگر رنگ خنثی یکنواختی را می‌بیند که روشنایی و مختصات رنگی شرایط تطبیقی مرجع را دارد. ادعا شده است که مشاهده کننده ها رنگی را انتخاب می‌کنند که بیشترین همانندی با نمونه قبلی را دارد که آن را در شرایط مرجع دیده بودند [۱]، [۶].

ب- روش Local-adaptation matching

در این روش؛ که MacAdam ارایه کرده است، دو قسمت شبکیه در یک چشم در معرض مشاهده دو قسمت زمینه برای تشخیص جفت‌های همانند قرار داده می‌شوند. MacAdam یک کالریتر بصری 10° ساخت که در آن دو قسمت زمینه مورد نظر تحت شرایط تطبیقی مختلف قرار داده شده بود. هر ۱۰ ثانیه یک بار برای یک ثانیه جسم مورد آزمایش در شرایط تطبیقی در یک بخش زمینه قرار داده می‌شد و یک سری نمونه برای انتخاب نمونه همانند در بخش دیگر قرار می‌گرفت. از مشاهده کننده ها خواسته می‌شد در فواصل یک ثانیه‌ای رنگ مشابه با نمونه مورد آزمایش را انتخاب کنند [۱]. دو اشکال عمده در این روش وجود دارد؛ اولاً، نظیر روش Haplosopic؛ که فرض شد تطبیق در یک چشم اثری بر حساسیت چشم دیگر نداشته باشد، در اینجا نیز فرض بر این است که دو بخش شبکیه تأثیری بر یکدیگر ندارند. ثانیاً، این روش شرایط مشاهده غیر طبیعی را تحمیل می‌کند و کاربرد عملی ندارد [۱]، [۷].

ج- روش همانندی خاطره ای^۱

روش همانندی خاطره‌ای تحت شرایط عادی چشم و بدون استفاده از وسایل ویژه بصری انجام می‌شود. در این روش لازم است به مشاهده کننده‌ها نحوه استفاده از یک سیستم رنگ منظم (مانند مانسل) آموزش داده شود تا با مقیاس‌های مربوطه آشنا شوند (برای سیستم مانسل ارزش، خلوص و فام) به طوری که قادر باشند هر جسم را در شرایط مشاهده با دقت قابل قبولی با مشخصه‌های مورد نظر توضیح دهند. ابتدا مشاهده کننده‌ها با منبع نوری اول تطبیق حاصل کرده، فام،

ارزش و خلوص نمونه را زیر این منبع گزارش می‌کنند سپس منبع نوری عوض می‌شود و در زیر منبع نوری جدید با به خاطر داشتن ظاهر رنگی نمونه مورد آزمایش، فام، ارزش و خلوص نمونه همانند با آن را تخمین می‌زنند [۱]، [۶]. از معایب این روش می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۷]:

- i. توانایی مشاهده کننده ها در یادآوری رنگ محدود است.
- ii. امکان بروز بعضی خطاها در یادآوری وجود دارد.
- iii. برخی خصوصیات گزارش شده برای نمونه ممکن است خارج از محدوده رنگی، برای مثال در سیستم مانسل باشد.

د- روش تخمین ارزش^۲

از این روش اخیراً بیش از سایر روش‌ها استفاده می‌شود. در این روش از مشاهده کننده‌ها خواسته می‌شود که پس از تطبیق کامل خصوصیات ادراکی مانند روشنایی، غنای رنگی و فام را در مورد نمونه‌ها تخمین بزنند. بنابراین مشاهده کننده‌ها لازم است مقیاس‌های مربوط به این خصوصیات را بخوبی درک کنند و از این رو، اعتبار نتایج جای تردید دارد. از امتیازات این روش می‌توان به این موارد اشاره کرد [۱]، [۷]:

- i. شرایط مشاهده عادی و با هر دو چشم است.
- ii. نتایج به دست آمده به صورت شاخص‌های قابل درک و معادل با موارد استفاده شده در پیش بینی مدل‌های رنگ ظاهری است و لذا مستقیماً می‌توانند برای مقایسه مدل‌های رنگ ظاهری و یا به دست آوردن یک مدل کامل تر استفاده شوند.
- iii. نسبت به روش همانندی خاطره‌ای برای آموزش به زمان کوتاه تری نیاز است.

۱-۳- مدل‌های تطبیق

از قدیمی ترین مدل‌های تطبیق رنگی، مدل تطبیق Von Kries است که ایشان در سال ۱۹۰۵ پیشنهاد کرد. این مدل بر این فرض استوار بود که وقتی مشاهده کننده با منبع نوری دوم تطبیق رنگی حاصل می‌کند حساسیت هر یک از مکانیزم‌های مخروطی با یک فاکتور ثابت تغییر می‌کند به نحوی که بزرگی فاکتورهای مذکور به رنگ منابع نوری بستگی دارد که مشاهده کننده با آن تطبیق حاصل کرده است [۴]. در سال ۱۹۷۴، کمیته تخصصی CIE برای Color-rendering مدلی را؛ که Helson و همکارانش بر مبنای مدل Von Kries به دست آوردند، پذیرفت [۱]. به تدریج مدل‌های تطبیق رنگی دیگر نظیر مدل Wassef [۱]، Sobagaki [۱]، Burnham [۱]، MacAdam [۱]، Bartleson [۱]، $CIE L^* a^* b^*$ [۸]، CIECAT94 [۱]، RLAB [۱]، Kuo96 [۸] و بالاخره در سال ۱۹۹۷ مدل تطبیق رنگی CMCCAT97 و به دنبال آن CMCCAT2000 و CIECAT02 ارایه شد که در این

بین CMCCAT97 و CAT02 به دلیل به کارگیری آنان در اندیس های ناپایداری رنگی CMCCON97 و CMCCON02 از اهمیت بیشتری برخوردارند.

مدل تطبیق رنگی CAT02

مدل CMCCAT97 [9]، [10] یک مدل دو طرفه است و مقادیر محرکه های سه گانه جسم را از زیر منبع نوری غیر نور روز، مانند A به جفت مشابه رنگی آن زیر نور روز؛ که در بیشتر مواقع D65 است، انتقال می دهد. برای پیش بینی رنگ های مشابه از زیر نور روز به منبع نوری غیر نور روز مدل معکوس نیاز است و مدل معکوس CMCCAT97 با تقریب همراه است؛ بنابراین نسخه ساده تری از CMCCAT97؛ که برگشت پذیر نیز بود، تحت عنوان CMCCAT2000 گزارش شد که در ضمن نتایج بهتری نیز داشته است [11]. به دنبال آن مدل CAT02 ارایه شد که در مدل رنگ ظاهری CMCCAM02؛ که مورد پذیرش CIE نیز واقع شده است و همچنین اندیس ناپایداری رنگی CMCCON02 به کار گرفته شده است. در ضمن CIE پیشنهاد کرد فرمول CAT02 به جای فرمول های CAMCAT97 و CMCCAT2000 و همچنین CMCCON02 به جای فرمول CMCCON97 جایگزین شوند [12].

محاسبات در انتقال تطبیق CAT02 به شرح ذیل است:

داده های ورودی عبارت از محرکه های سه گانه نمونه زیر منبع نوری مورد آزمایش (X, Y, Z)، محرکه های سه گانه سفید زیر منبع نوری مورد آزمایش (X_w, Y_w, Z_w)، محرکه های سه گانه سفید زیر منبع نوری مرجع (X_{wr}, Y_{wr}, Z_{wr}) و شدت روشنایی زمینه مورد آزمایش L_A (cd/m²) می باشند. داده های انتقال یافته شامل جفت مشابه رنگی نمونه زیر منبع نوری مرجع یا به عبارتی مشخصات نمونه پس از تطبیق، زیر منبع نوری مرجع (X_c, Y_c, Z_c) است.

مرحله اول: عکس العمل های مخروط های R, G, B استفاده از روابط (1) محاسبه می شوند:

$$\begin{bmatrix} R_{wr} \\ G_{wr} \\ B_{wr} \end{bmatrix} = M_{CAT02} \begin{bmatrix} X_{wr} \\ Y_{wr} \\ Z_{wr} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = M_{CAT02} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} R_w \\ G_w \\ B_w \end{bmatrix} = M_{CAT02} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix}$$

$$M_{CAT02} = \begin{bmatrix} 0.7328 & 0.4229 & -0.1624 \\ -0.7036 & 1.6975 & 0.0061 \\ 0.0030 & 0.0136 & 0.9834 \end{bmatrix}$$

مرحله دوم: محاسبه درجه تطبیق:

$$D = F \left[1 - \left(\frac{1}{3.6} \right) e^{\left(\frac{-L_A - 42}{92} \right)} \right] \quad (2)$$

در رابطه فوق، F به طور معمول برابر 1، 0.9 و 0.8 برای شرایط مشاهده؛ که اطراف تاریک است (تصاویر نمایش داده شده در محیط تاریک) در نظر گرفته می شود و L_A شدت روشنایی زمینه مورد آزمایش است. اگر D بیشتر از یک یا کمتر از صفر شود برابر یک یا صفر قرار داده می شود.

مرحله سوم:

$$R_c = R[D(R_{wr}/R_w) + 1 - D] \quad (3)$$

$$G_c = G[D(G_{wr}/G_w) + 1 - D]$$

$$B_c = B[D(B_{wr}/B_w) + 1 - D]$$

مرحله چهارم: محاسبه محرکه های سه گانه جفت مشابه

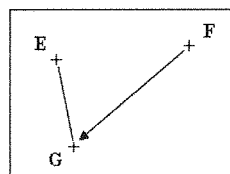
رنگی نمونه زیر منبع نوری مرجع:

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = M_{CAT02}^{-1} \begin{bmatrix} R_c \\ G_c \\ B_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$M_{CAT02}^{-1} = \begin{bmatrix} 1.096124 & -0.278869 & 0.182745 \\ 0.454369 & 0.473533 & 0.072098 \\ -0.009628 & -0.005698 & 1.015326 \end{bmatrix}$$

1-6- مقایسه کارایی مدل های مختلف تطبیق رنگی

هدف مدل های تطبیق، رسیدن از مختصات جسم زیر منبع نوری مورد آزمایش به مختصات رنگی جفت مشابه رنگی آن زیر منبع نوری مرجع است. برای تأمین این منظور از اطلاعات مربوط به نمونه های مشابه رنگی استفاده شده است تا با مدل کردن ارتباط ریاضی بین آنها، مدل عمومی ارایه شود. در شکل (1) نقاط F و E موقعیت یک جفت مشابه رنگی را در سیستم رنگ منظم CIELAB نشان می دهند به نحوی که F مشخصات نمونه زیر منبع نوری مرجع و E جفت مشابه رنگی آن زیر منبع نوری مرجع است. چنانچه نقطه F با استفاده از یکی از مدل های تطبیق رنگی به نقطه G منتقل شود، مسلماً در صورت انطباق کامل بین داده های حاصل از نتایج بصری و پیش بینی شده به وسیله مدل، نقطه G دقیقاً بر E منطبق می شود و لذا مقدار EG که می تواند به سادگی با یکی از فرمول های اختلاف رنگ محاسبه شود، نشان دهنده میزان خطا است و مقدار میانگین آن برای جفت های مشابه رنگی مختلف موجود می تواند برای ارزیابی و مقایسه مدل های تطبیق مورد استفاده قرار گیرد [10].



شکل (1): موقعیت یک جفت مشابه رنگی به همراه نمونه انتقال یافته با استفاده از مدل تطبیق در فضا رنگ CIELAB به طور شماتیک نشان داده شده است [4]

در این زمینه، تحقیقی در سال ۱۹۹۵ بر روی ۲۴۰ نمونه پیشمی انجام شد که محدوده رنگی وسیعی را پوشش می‌داد. به این ترتیب که یک گروه مشاهده کننده پنج نفری با روش تخمین ارزش در زیر سه منبع نوری TL₈₄، A و D65 ارزیابی‌های بصری را انجام دادند و سری داده‌های مربوط به جفت‌های مشابه رنگی تهیه شد که برای مقایسه مدل‌های تطبیق رنگی (Von Kries, Bartleson, Bradford (BFD), $CIE L^*a^*b^*$ و Hunt به کار گرفته شدند. نتایج نشان داد که اولاً، تمامی مدل‌های تطبیق زیر منبع نوری TL₈₄ نسبت به A نتیجه بهتری می‌دهند؛ ثانیاً، مدل BFD بهترین انطباق را با داده‌های موجود خصوصاً برای تطبیق زیر منبع نوری A، در صورتی که منبع نوری مرجع D65 باشد، نشان می‌دهد. در ضمن، نتایج این مطالعه بیانگر آن بود که مدل‌های تطبیق موجود تا آن زمان برای صنایع رنگ و خصوصاً صنعت نساجی رضایت بخش نیستند [۷].

۲- تجربیات

۲-۱- تهیه جفت‌های مشابه رنگی به وسیله چاپگر

۲-۱-۱ روش تهیه جفت‌های مشابه رنگی

برای تهیه نمونه‌ها از تبدیل تطبیق رنگی CAT02 استفاده شد؛ به این ترتیب که منبع نوری مرجع D65 و منبع نوری مورد آزمایش A باشد. محاسبات ناپایداری رنگی با استفاده از رابطه CMCCON02 انجام شد [۱۲]. نرم افزار مورد استفاده برای تهیه رنگ‌ها، Photoshop7 بود و نمونه‌ها با چاپ بر روی کاغذ به وسیله چاپگر رنگی مدل hp 5150 به دست آمدند. چاپگر مذکور دارای ۶ رنگ در دو کارتریج سه تایی شامل CMYK56 و photo cartridge58 و دارای رنگ‌های صورتی، نیلی و مشکی است. DPI چاپگر برابر ۱۲۰۰ بود و از نرم افزار مدیریت رنگ IRET.4 در آن استفاده می‌شود. در نهایت، رنگ‌ها بر روی کاغذ براق hp photo premium چاپ شد.

برای یک جسم کاملاً پایدار رنگی، جفت مشابه رنگی آن خود نمونه است؛ زیرا به دلیل پایداری رنگی، ظاهر رنگی آن با تغییر منبع نوری تغییر نمی‌کند؛ بنابراین در ابتدا به تهیه نمونه‌های ناپایدار رنگی نیاز بود. برای دستیابی به چنین نمونه‌هایی مختصات رنگی تعداد زیادی محرکه از مناطق مختلف محدوده رنگی در محیط نرم افزار Photoshop تهیه و چاپ شد؛ سپس منحنی انعکاسی نمونه‌ها با اسپکتروفوتومتر Color Eye ساخت شرکت Gretag Macbeth اندازه‌گیری شد و با محاسبه میزان ناپایداری رنگی آنها با اندیس CMCCON02، نمونه‌هایی که از نظر محاسباتی ناپایدار رنگی بودند، انتخاب شدند. در مرحله بعد، محرکه‌های سه گانه جفت‌های مشابه رنگی این نمونه‌ها زیر منبع نوری D65 با انتقال تطبیق رنگی CAT02 محاسبه و سعی شد مختصات رنگی آن با تهیه نمونه‌ای به وسیله چاپگر تقلید شود. از آنجا که بین مقادیر

در تحقیق دیگری، Kuo با استفاده از داده‌های مربوط به چهار دسته از جفت‌های مشابه رنگی، مدل‌های Von Kries, Bartleson, BFD, Kuo96, LLAB, RLAB, Hunt و $CIE L^*a^*b^*$ را مقایسه کرد. نتایج این مطالعه نشان داد که مدل Bartleson ضعیف‌ترین نتیجه را و متقابلاً BFD نتیجه مطلوبی دارد. در ضمن، مدل Kuo96 نیز حداقل برای این چهار دسته به طور نسبی نتایج خوبی داشته است [۱۲]. پس از ارایه مدل CMCCAT97 برای بررسی کارایی این مدل در مقایسه با دیگر مدل‌های تطبیق رنگی، از هشت دسته مناسب از داده‌های مربوط به جفت‌های مشابه رنگی استفاده شد و دو دسته از مدل‌های تطبیق رنگی و یا مدل‌های رنگ ظاهری ارزیابی شد که از مدل‌های تطبیق استفاده می‌کنند. میزان خطا یا همان اندازه EG در شکل (۱) با استفاده از فرمول اختلاف رنگ CMC(1:1) و با توجه به مدل تطبیق مورد استفاده، برای تمامی دسته داده‌ها محاسبه شد و میانگین به دست آمده برای هر مدل برای ارزیابی و مقایسه استفاده شد. نتایج حاصل از این ارزیابی نشان می‌داد که CMCCAT97 و همچنین مدل رنگ ظاهری CMCCAT97s که در حقیقت از همان انتقال تطبیق CMCCAT97 استفاده کرده است، دارای کمترین میانگین خطا و بهترین نتیجه و $CIE L^*a^*b^*$ ضعیف‌ترین نتیجه را داشته است [۱۰]. پس از ارایه CMCCAT2000، این مدل نیز با دیگر مدل‌های تطبیق مقایسه شد و نتایج نشان دهنده این مطلب بود که عملکرد این مدل برای برخی دسته داده‌ها بخوبی مدل CMCCAT97 و بهتر از دیگر مدل‌های تطبیق بوده است و در مورد برخی مجموعه داده‌ها، حتی نتیجه بهتری نسبت به

محركه‌های سه گانه $L^*a^*b^*$ داده شده به نرم افزار Photoshop و مقدار $L^*a^*b^*$ نمونه چاپ شده و اندازه گیری شده به وسیله اسپکتروفوتومتر، اختلاف زیادی وجود داشت سعی شد با اندازه گیری تعداد زیادی نمونه بین $L^*a^*b^*$ داده شده به نرم افزار و $L^*a^*b^*$ حاصله با به کارگیری روش رگراسیون یک رابطه خطی برقرار شود. با انجام این کار تا اندازه زیادی اختلاف بین مقادیر $L^*a^*b^*$ ورودی و دریافتی کاهش یافت؛ لیکن کماکان اختلاف وجود داشت و بدین دلیل در نهایت با تکرارهای بسیار در مورد ۷ نمونه، جفت مشابه رنگی آنها از نظر محاسباتی تهیه شدند که از این بین در ۵ مورد خطای تهیه نمونه (اختلاف رنگ بین جفت مشابه رنگی تهیه شده و جفت مشابه رنگی محاسباتی) کمتر از یک واحد CMC بود و در یک مورد اختلاف ۱/۲۸ واحد CMC و تنها در مورد یک نمونه اختلاف رنگ ۲/۲۸ واحد CMC بود.

به دلیل اینکه معادلات تطبیق رنگی در ارزیابی با روش‌های بصری با وجود پیشرفت های صورت گرفته همچنان خطای زیادی دارند؛ بنابراین پس از تهیه جفت مشابه رنگی نمونه زیر منبع نوری D65 برای نمونه اولیه؛ که زیر منبع نوری A مشاهده می‌شد، ۴ رنگ نزدیک به آن نیز تهیه شد تا به این ترتیب در ارزیابی های بصری مشاهده کننده امکان انتخاب نمونه مناسب تر را داشته باشد و خطای انتقال تطبیق رنگی CAT02 را نیز بتوان به طور تقریبی برآورد کرد. در نهایت، هفت مجموعه تهیه شد که هر کدام شامل شش نمونه بود، در هر گروه شش تایی پنج نمونه نزدیک به هم وجود داشت و نمونه ششم به عنوان جفت مشابه رنگی آنها زیر منبع نوری D65 بود که چنانچه توضیح داده شد حداقل در مورد یکی از پنج نمونه، نمونه یاد شده از نظر محاسبات CAT02 جفت مشابه رنگی آن بوده است. برای هر یک از این هفت مجموعه تهیه شده مقادیر $L^*a^*b^*$ محاسباتی جفت های مشابه رنگی هر یک از پنج نمونه زیر منبع نوری D65 به همراه مقادیر $L^*a^*b^*$ جفت مشابه رنگی تهیه شده و اختلاف رنگ موجود بین این رنگ و جفت‌های مشابه رنگی محاسباتی برای هر کدام از پنج نمونه با فرمول اختلاف رنگ CMC(1:1) در جدول (۱) آمده است.

۲-۱-۲ ارزیابی بصری جفت های مشابه رنگی

اساس تهیه مدل‌های تطبیق رنگی ارزیابی‌های بصری است و کارایی این روابط نیز با توجه به میزان انطباقشان با نتایج بصری سنجیده می‌شود. ارزیابی های بصری بدین ترتیب انجام شد که ابتدا مشاهده کننده پس از تطبیق کامل زیر منبع نوری مرجع رنگ را به خاطر می‌سپرد و سپس زیر منبع نوری

مورد آزمایش مجدداً پس از تطبیق کامل، نمونه همانند را برای رنگ به خاطر سپرده انتخاب می‌کرد.

ارزیابی با استفاده از کابینت نوری با رنگ خاکستری خنثی و با مقدار روشنایی حدود ۶۰ انجام شد. از مقیاس خاکستری استاندارد SDC برای تغییر رنگ (A02) که شامل ۹ جفت خاکستری است، به منظور ارزیابی اختلاف رنگ استفاده شد.

جدول (۱): مختصات رنگی جفت های مشابه رنگی محاسباتی برای هر ۵ نمونه موجود در هر دسته به همراه نمونه تهیه شده به عنوان جفت مشابه رنگی و اختلاف رنگ موجود بین نمونه محاسباتی و تهیه شده با واحد CMC(1:1)

نمونه تهیه شده بعنوان جفت مشابه رنگی	مقادیر $L^*a^*b^*$ محاسباتی جفت‌های مشابه رنگی ۵ نمونه مربوط به هر دسته زیر منبع نوری D_{65} به‌مراه اختلاف رنگ آن به جفت مشابه تهیه شده					
L^*	۴۸/۵۷	۴۶/۲۸	۴۷/۹۶	۴۸/۰۲	۴۹/۷۲	۴۹/۰۲
a^*	۱۲/۹۱	۱۶/۱۱	۱۸/۵۹	۱۲/۴۷	۱۴/۵۵	۱۲/۷۰
b^*	۲۲/۲۸	۱۹/۲۰	۱۸/۸۷	۱۷/۹۲	۲۱/۸۱	۲۱/۳۴
ΔE		۵/۸۲	۸/۵۵	۲/۸۰	۲/۰۰	۰/۳۶
L^*	۳۴/۹۷	۳۴/۷۵	۳۱/۷۶	۳۶/۶۸	۳۶/۵۲	۳۵/۲۵
a^*	-۳۱/۶۴	-۲۵/۲۴	-۳۱/۸۶	-۲۰/۷۴	-۳۹/۵۲	-۳۷/۶۲
b^*	-۱۵/۵۷	-۱۹/۰۱	-۱۹/۳۰	۱۹/۱۴	-۱۶/۸۰	-۱۶/۵۰
ΔE		۲/۳۷	۴/۱۳	۲/۹۰	۴/۱۳	۲/۸۸
L^*	۳۲/۱۶	۳۱/۱۳	۲۸/۶۴	۳۰/۷۴	۳۲/۴۶	۳۲/۲۵
a^*	-۱۶/۳۴	-۱۵/۹۳	-۱۳/۶۸	-۱۴/۱۱	-۱۶/۵۷	-۱۹/۱۵
b^*	-۳۳/۳۶	-۳۳/۵۹	-۳۶/۸۲	-۳۷/۰۰	-۳۲/۶۱	-۳۱/۱۹
ΔE		۱/۲۳	۴/۸۸	۲/۰۲	۰/۵۶	۲/۳۱
L^*	۶۲/۸۴	۶۲/۳۹	۶۲/۷۲	۶۲/۰۵	۶۵/۰۶	۶۳/۷۶
a^*	۲۱/۱۲	۲۲/۰۰	۲۰/۹۷	۲۲/۲۵	۱۹/۷۲	۱۹/۵۵
b^*	۳۳/۶۲	۳۲/۸۴	۳۲/۳۶	۳۱/۲۵	۳۱/۳۱	۳۳/۱۶
ΔE		۱/۲۸	۰/۸۱	۲/۶۵	۲/۱۳	۱/۵۶
L^*	۴۹/۵۰	۴۷/۷۲	۴۷/۷۰	۴۸/۸۱	۴۶/۹۷	۴۹/۹۷
a^*	۴۱/۱۷	۴۳/۷۳	۳۹/۶۸	۴۰/۵۶	۴۰/۱۴	۳۷/۱۴
b^*	۱۶/۴۱	۱۷/۰۲	۱۶/۷۰	۱۶/۴۰	۱۴/۷۶	۱۸/۱۱
ΔE		۱/۹۵	۱/۸۰	۰/۶۸	۲/۵۲	۲/۶۲
L^*	۵۴/۸۲	۵۲/۹۳	۵۶/۱۱	۴۹/۷۸	۵۵/۶۸	۵۴/۷۳
a^*	-۴۳/۳۲	-۴۳/۷۶	-۴۰/۵۰	-۵۲/۳۲	-۳۵/۲۱	-۴۴/۳۶
b^*	-۱۱/۶۳	-۱۱/۲۴	-۱۵/۸۵	-۱۳/۷۷	-۱۰/۷۷	-۶/۱۷
ΔE		۰/۸۱	۲/۹۱	۶/۰۱	۳/۴۶	۲/۰۰
L^*	۴۵/۱۹	۴۶/۵۲	۴۷/۰۹	۴۴/۷۴	۴۶/۷۱	۴۳/۵۲
a^*	۵۱/۴۵	۵۲/۱۲	۴۸/۹۰	۴۷/۰۱	۵۰/۳۰	۵۱/۹۹
b^*	-۲۴/۵۳	-۲۴/۹۰	-۳۰/۰۲	-۲۷/۱۶	-۲۲/۲۲	-۲۹/۵۰
ΔE		۱/۲۸	۲/۵۸	۲/۴۹	۱/۵۹	۲/۸۴

نمونه ها در شرایط هندسه مشاهده $0^\circ/45^\circ$ نسبت به جهت تابش منبع نوری و مشاهده کننده قرار داده شدند. با توجه به شرایط مشاهده کننده استاندارد CIE1964 (مشاهده کننده 1°) و مشخص بودن اندازه نمونه‌ها فاصله چشم از نمونه نیز حدود

۵۰ cm محاسبه شد. در نهایت، ارزیابی توسط ۲۴ مشاهده کننده شامل ۱۴ زن و ۱۰ مرد طی مراحل زیر انجام شد:

الف- انجام آزمون بینایی رنگ نرمال Ishihara

ب- نمونه مورد نظر زیر منبع نوری D65 با شرایط بیان شده در معرض دید مشاهده کننده قرار می‌گرفت و از وی خواسته می‌شد که رنگ نمونه را به خاطر بسپارد. برای تطبیق با منبع نوری حداقل ۱ دقیقه بر روی هر نمونه تأمل می‌شد.

ج- سپس پنج نمونه؛ که با توجه به توضیحات پیشین حداقل یکی از آنها از نظر محاسباتی CAT02 جفت مشابه رنگی نمونه قبل بود، در معرض دید مشاهده کننده زیر منبع نوری A قرار می‌گرفتند و از وی خواسته می‌شد نزدیک ترین رنگ به رنگی را که به خاطر سپرده انتخاب کند.

د- از مشاهده کننده‌ها خواسته شد که علاوه بر انتخاب نزدیک ترین همانند به نمونه اول، میزان اختلاف رنگ بین رنگ به خاطر سپرده شده زیر منبع D65 و همانند انتخاب شده زیر منبع نوری A را با مقیاس خاکستری گزارش کنند.

ه- به دلیل اینکه در روش همانندی خاطره‌ای، به خاطر سپردن رنگها مشکل است، چنانچه مشاهده کننده با تغییر منبع نوری از D65 به A احساس می‌کرد نمی‌تواند رنگ قبلی را به خاطر آورد، ارزیابی مجدداً تکرار می‌شد.

برای انتخاب نهایی از بین پنج نمونه، رنگی را که اکثر مشاهده کننده ها انتخاب کرده بودند، نمونه مورد نظر تلقی شد. در هر حال، در برخی موارد به علت نزدیکی نمونه ها، ۲ و یا حتی ۳ رنگ شرایط مشابه داشتند که در چنین مواردی به ارزیابی اشخاصی که در زمینه رنگ شناخت بیشتری داشتند، وزن بالاتری داده می‌شد و بدین ترتیب نمونه مناسب انتخاب می‌گردید.

۲-۲- تهیه جفت های مشابه رنگی از مجموعه نمونه‌های

رنگی مانسل

در بخش دیگری از این تحقیق با بهره گیری از کتاب رنگ مانسل سعی شد تا مجموعه دیگری از جفت‌های مشابه رنگی تهیه شود. اطلس مورد استفاده شامل ۱۲۶۹ چپس رنگی مات است [۱۵]. نمونه ها در ۴۰ صفحه؛ که هر صفحه بیانگر یک فام است، چیده شده‌اند. روش چیدمان در هر صفحه به ترتیبی است که در راستای عمودی روشنایی و در راستای افقی خلوص تغییر کند.

با توجه به فراوانی نمونه‌های رنگی با فواصل کوچک و منظم در راستاهای فام، خلوص و روشنایی در کتاب مانسل انتظار می‌رفت بتوان به جفت های مشابه رنگی در این مجموعه دست یافت. بنابراین، با استفاده از روش همانندی خاطره‌ای

سعی شد چنین نمونه‌هایی در مجموعه مذکور یافت شود. با توجه به مشکل بودن آزمایش های بصری و نیازمندی مشاهده کننده به آشنایی کافی با مفاهیم کتاب مانسل و همچنین مفهوم جفت مشابه رنگی، از سه مشاهده کننده خبره برای انجام ارزیابی‌های بصری کمک گرفته شد. روش به کارگرفته شده بدین ترتیب بود که در ابتدا از صفحات مختلف کتاب مانسل نمونه‌های ناپایدار بصری انتخاب شد؛ سپس رنگ نمونه مذکور زیر منبع نوری استاندارد A به خاطر سپرده می‌شد. در مرحله بعد، با تعویض منبع نوری به منبع نوری مرجع (D65) سعی شد از صفحات مجاور نمونه ای همانند با رنگ به خاطر سپرده شده انتخاب شود. در صورت فراموش کردن رنگ ابتدایی آزمایش مجدد تکرار می‌شد. در نهایت، پس از بررسی نمونه های متعدد، ۱۲ جفت مشابه رنگی با نظر قطعی مورد توافق هر سه مشاهده گر به دست آمد. قابل ذکر است نمونه‌ها از میان قاب استاندارد نمونه های مانسل؛ که اندازه پنجره آن با اندازه نمونه‌ها برابر است، مشاهده می‌شد تا در مشاهده یک نمونه، رنگ نمونه‌های دیگری؛ که در همان صفحه قرار داشتند، تأثیر نگذارند. از آنجا که جفت‌های تهیه شده بدین ترتیب از نظر بصری قطعیت بالایی داشتند انتظار می‌رفت تا بررسی خطای مدل تطبیق CAT02 در پیش بینی مختصات رنگی جفت‌های مشابه رنگی با مجموعه مذکور مناسب باشد؛ بنابراین، جفت‌های مشابه رنگی نمونه‌های مشاهده شده زیر منبع نوری A، با استفاده از مدل CAT02 نیز محاسبه شد و میزان خطای تبدیل CAT02 با استفاده از فرمول اختلاف رنگ CMC(1:1) محاسبه گردید.

۳- تجزیه و تحلیل نتایج

۳-۱- نتایج تهیه جفت های مشابه رنگی به وسیله چاپگر

جدول (۲) نتایج حاصل از انتخاب جفت‌های مشابه رنگی نمونه‌های به خاطر سپرده شده زیر منبع نوری مرجع به وسیله مشاهده کننده‌ها را از بین پنج انتخاب آنها زیر منبع نوری دوم نشان می‌دهد. چنانچه از جدول (۲) ملاحظه می‌شود نمونه هایی که مشاهده کننده‌ها به عنوان جفت مشابه رنگی نمونه اولیه انتخاب کرده‌اند، در بیشتر موارد نمونه محاسباتی CAT02 بوده است؛ لیکن در برخی موارد، مانند نمونه شماره ۳ و ۶، مشاهده کننده ها نمونه‌ای را که کمترین اختلاف با جفت مشابه رنگی محاسباتی دارند، انتخاب نکرده‌اند و به عبارتی در این موارد فرمول مذکور بر نتایج بصری انطباق ندارد. همچنین در تمامی موارد اختلاف رنگی در حد ۴ مقیاس خاکستری بین نمونه اولیه و جفت مشابه انتخابی آن گزارش شده است که از

این حیث مدل تطبیق CAT02 حداقل در مورد نمونه‌هایی که نمونه محاسباتی از بین مجموعه پنج تایی انتخاب شده‌اند، عملکرد نسبتاً قابل قبولی داشته است (مقیاس خاکستری ۵ نشانه همانندی کامل است). نکته قابل توجه اینکه در حین انجام آزمایش‌های بصری اکثر مشاهده‌کننده‌ها اظهار می‌کردند نمونه‌ای که زیر منبع D65 به خاطر سپرده‌اند از نمونه‌ای که به عنوان جفت مشابه رنگی آن زیر منبع A انتخاب کرده‌اند، روشن تر است و به عبارتی بیشتر اختلاف رنگی گزارش شده را به محور روشنایی مربوط می‌دانستند. با توجه به توضیحات مذکور به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که با وجود پیشرفت‌های صورت گرفته، هنوز فاصله فرمول‌های تطبیق با نتایج بصری قابل توجه است.

جدول (۲): مشخصات نمونه‌های انتخاب شده به عنوان جفت

مشابه رنگی برای ۷ رنگ تهیه شده

شماره رنگ	ΔE جفت مشابه رنگی محاسباتی (CAT02)، با نمونه انتخابی مشاهده کننده ها	متوسط مقیاس خاکستری	نمونه انتخابی نزدیک ترین نمونه از نظر محاسباتی بین ۵ نمونه
		CMC(1:1)	
۱	۰/۳۶۱	۴	+
۲	۲/۳۶۹	۴/۵	+
۳	۳/۰۲۵	۴	-
۴	۱/۵۲۸	۴	+*
۵	۰/۶۸۳	۴	+
۶	۲/۹۱۲	۴	-
۷	۱/۲۸۴	۴	+

* نمونه ای با اختلاف رنگ کمتر نیز در مجموعه است، لیکن ΔE نمونه انتخابی با نمونه مذکور بسیار اندک است.

۲-۳- نتایج تهیه جفت های مشابه رنگی از کتاب مانسل

مشخصات ۱۲ جفت مشابه رنگی به دست آمده از کتاب مانسل به همراه مختصات رنگی آنها در فضا رنگ CIELAB در جدول (۳) داده شده است. در این جدول، مقادیر رنگی جفت‌های مشابه رنگی محاسبه شده با فرمول تطبیق CAT02 برای ۱۲ نمونه مذکور نیز آورده شده است. ستون آخر این جدول میزان خطای مدل CAT02 را با فرمول اختلاف رنگ CMC(1:1) نشان می‌دهد. چنانچه ملاحظه می‌شود میزان خطا برای فام‌های مختلف متفاوت است. این نکته قابل پیش بینی است که با توجه به تخمینی بودن ماتریس تبدیل مورد استفاده در این مدل؛ که از داده‌های مربوط به مجموعه جفت‌های مشابه رنگی تهیه شده در نقاط مختلف به دست آمده و با توجه به

اینکه آزمایش‌های بصری لازم برای تهیه جفت‌های مشابه رنگی مشکل است، خطای حدود ۳ تا ۴ واحد اختلاف رنگ می‌تواند به طور تقریبی قابل قبول باشد که نتایج اختلاف رنگ در ناحیه قرمز و ارغوانی نیز در همین حدود است؛ لیکن چنانچه ملاحظه می‌شود مدل CAT02 در ناحیه زرد و نارنجی بسیار ضعیف عمل کرده است. با توجه به اینکه در حال حاضر مدل‌های رنگ ظاهری که در سیستم‌های مدیریت رنگ استفاده می‌شوند، اساس معادلات تطبیقشان CAT02 است، به نظر می‌رسد تصحیح ماتریس تبدیل این مدل با داده‌های بیشتر و از مجموعه‌های کامل تری همچنان امری بسیار ضروری باشد.

جدول (۳): مشخصات جفت های مشابه رنگی تهیه شده از کتاب مانسل (در مورد هر جفت ردیف اول نمونه مشاهده شده زیر منبع نوری A، ردیف دوم جفت مشابه یافت شده برای آن زیر منبع D65 و ردیف سوم جفت مشابه محاسباتی با مدل CAT02 است.)

کد مانسل	L^*	a^*	b^*	ΔE CMC
۱	10RP 4/8	۴۰/۲۸	۳۳/۵۸	۵/۳۲
	2.5R 4/8	۳۹/۷۹	۳۴/۴۲	۱۰/۱۰
	CAT02	۴۳/۰۸	۳۷/۹۰	۱۰/۱۱
۲	10RP 4/10	۳۹/۸۲	۴۰/۰۵	۵/۵۷
	2.5R 4/12	۳۹/۹۸	۴۷/۳۲	۱۳/۹۹
	CAT02	۴۳/۲۸	۴۶/۸۲	۱۱/۷۲
۳	2.5R 3/6	۳۱/۵۰	۲۵/۳۷	۵/۳۵
	5R 3/6	۲۹/۵۱	۲۶/۰۸	۱۰/۱۸۸
	CAT02	۳۳/۶۵	۲۸/۵۶	۸/۹۶
۴	2.5R 4/6	۳۹/۵۷	۲۶/۱۶	۷/۳۵
	5R 4/6	۳۹/۹۵	۲۷/۵۵	۱۰/۹۴
	CAT02	۴۱/۸۱	۲۹/۶۰	۱۰/۸۸
۵	5R 6/12	۵۹/۶۴	۴۷/۳۹	۲۴/۵۲
	7.6R 6/12	۵۸/۶۵	۴۷/۰۵	۳۲/۱۱
	CAT02	۶۳/۷۷	۵۰/۸۹	۳۰/۶۴
۶	5R 4/6	۳۹/۹۵	۲۷/۵۵	۱۰/۹۴
	7.5R 4/6	۳۹/۵۶	۲۵/۱۵	۱۶/۴۹
	CAT02	۴۲/۴۵	۲۷/۶۷	۱۵/۱۶
۷	10YR 6/10	۶۰/۵۳	۱۹/۵۵	۵۸/۷۴
	7.5YR 6/8	۵۸/۹۷	۲۱/۶۴	۴۱/۹۰
	CAT02	۶۳/۲۴	۱۶/۵۶	۵۷/۴۳
2.5Y 7.12	۶۹/۲۲	۱۶/۱۷	۷۷/۱۶	

ارزیابی‌های بصری با روش همانندی خاطره ای، در نهایت، ۱۲ جفت مشابه رنگی با دقت قابل قبول از مجموعه نمونه‌های این کتاب به دست آمد و خطای مدل تطبیق CAT02 برای نمونه‌های حاصل محاسبه شد که نتایج، بیانگر وابستگی این مدل به فام‌های مختلف و عملکرد نسبتاً قابل قبول در ناحیه قرمز و ارغوانی و عملکرد ضعیف در ناحیه زرد و نارنجی بوده است.

۵- مراجع

- [۱] Luo, M.; "A Review of Chromatic Adaptation Transforms", Rev. Prog. Coloration, vol 30, p.p. 77-91, 2000.
- [۲] Berns, R.S; *Billmeyer and Saltzman Principles of Color Technology*, 3rd Edition, John Wiley & Sons, New Yourk, 2000.
- [۲] Choudhury, A.K.R.; *Modern Concepts of Color and Appearance*, Science Publishers, Inc., U.S.A, 2000.
- [۴] McLaren, K; *The Colour of Dyes and Pigments*, Adam Hilger, Bristol, 1986.
- [۵] McDonald, R.; *Colour Physics for Industry*, The Society of Dyers and Colourists, Bradford, 1987.
- [۶] Fairchild, M.D, Pirrotta E., Kim, T.; "Successive-Ganzfeld Haploscopic Viewing Technique for Color-Appearence Research", Color Res. And Appl., vol. 9, No. 3, p.p. 214-221, 1994.
- [۷] Kuo, W.G., Luo, M.R., Bez, H.E.; "Various Chromatic-Adaptation Transformations Tested Using New Color Appearance Data in Textiles", Color Res. And Appl., vol. 20, No. 5, p.p. 313-327, 1995.
- [۸] Kuo, W.G.; "Predicting Corresponding Colours Using a New Chromatic-Adaptation Model", Color Res. And Appl., vol. 22, No. 6, p.p. 375-384, 1997.
- [۹] Luo, M.R., Hunt, "A Chromatic Adaptation Transform and a Colour Inconstancy Index", Color Res. And Appl., vol. 23, No. 3, p.p. 154-158, 1998.
- [۱۰] Luo, M.R., Hunt, R.W.G., Rigg, B., Smith K.J.; "Recommended Colour-Inconstancy Index", J.S.C.D., vol. 115, p.p. 183-188, 1999.
- [۱۱] Li, Ch., Luo, M.R., Rigg, B., Hunt, R.W.G, "CMC 2000 Chromatic Adaptation Transform: CMCCAT2000", Color Res. And Appl., vol. 27, No. 1, p.p. 49-58, 2002.
- [۱۲] Luo, M.R., Li, Hunt, R.W.G, Ch., Rigg, B., Smith, K.J., "CMC 2002 Color Inconstancy Index: CMCCON02", Color. Technol., 119, p.p. 280-284, 2003.
- [۱۳] Kuo, W.G., "Comparisons of the Latest Chromatic Adaptation Model with Others Using Corresponding Colours", The 6th FAPTA 2001 Hong Kong.
- [۱۴] Nayatani, Y., "Development of Chromatic Adaptation Transforms and Concept for Their Classification", Color Res. And Appl., vol. 31, No. 3, p.p. 205-217, 2006.

۸	10YR 7/10	۶۷/۸۷	۱۹/۴۴	۵۷/۹۹	۹/۰۴
	CAT02	۷۱/۹۶	۱۰/۴۳	۷۲/۹۸	
۹	5Y 7/10	۶۸/۳۲	۷/۴۳	۶۵/۸۱	۸/۱۶
	2.5Y 7/10	۶۷/۸۴	۱۴/۰۴	۶۲/۹۷	
	CAT02	۷۰/۳۱	۰/۷۳	۶۲/۷۸	
۱۰	10Y 7/10	۶۸/۶۲	-۲/۸۰	۶۶/۸۸	۸/۲۵
	7.5Y 7/8	۶۸/۷۵	۰/۸۸	۵۲/۷۶	
	CAT02	۶۹/۹۳	-۱۳/۹۱	۶۲/۷۳	
۱۱	5P 5/10	۵۱/۸۶	۲۴/۵۸	-۲۸/۳۰	۱/۳۵
	7.5P 5/10	۵۱/۴۹	۲۸/۶۹	-۲۲/۹۳	
	CAT02	۵۲/۷۹	۲۸/۴۲	-۲۴/۰۸	
۱۲	5RP 3/4	۳۱/۰۸	۱۸/۰۵	-۳/۷۳	۳/۳۳
	10RP 3/4	۳۰/۷۱	۱۸/۰۸	۱/۹۶	
	CAT02	۳۲/۳۷	۲۰/۵۰	-۰/۷۱	

۸- نتیجه گیری

- [۷] در این تحقیق، ابتدا مفاهیم تطبیق رنگی و جفت‌های مشابه رنگی مرور شده است. در این راستا روش‌های معرفی شده برای تهیه جفت‌های مشابه رنگی بررسی و مزایا و معایب هر روش به اجمال بیان شد؛ سپس مدل‌های تطبیق رنگی متداول، مرور شد و نتایج تحقیقات انجام شده در راستای مقایسه روابط موجود آورده شده است. بررسی‌های انجام شده در این بخش نشان دهنده این حقیقت بود که با وجود تلاش‌های صورت گرفته در راستای تهیه مجموعه‌های مناسب از جفت‌های مشابه رنگی همچنان روش‌های رایج شده ضعف‌های زیادی دارند. در مورد مدل‌های تطبیق نیز هرچند مطالعات زیادی صورت گرفته و روابط ابتدایی تا اندازه زیادی اصلاح شده‌اند؛ لیکن همچنان خطای این مدل‌ها در پیش بینی میزان تطبیق رنگی سیستم بینایی قابل توجه است. در ادامه با به کارگیری اندیس ناپایداری رنگی CMCCON97 و مدل تطبیق رنگی CAT02 و انجام ارزیابی‌های بصری هفت جفت مشابه رنگی با استفاده از چاپگر رنگی تهیه شد. نتیجه ارزیابی‌های بصری صورت گرفته نشان داد، با وجود اینکه در بیشتر موارد بین نمونه انتخابی در ارزیابی بصری به عنوان جفت مشابه رنگی و نتایج محاسباتی توافق وجود دارد؛ لیکن اختلاف رنگی در حد ۴ مقیاس خاکستری نیز گزارش شده است. در بخش دیگری با به کارگیری کتاب رنگ مانسل و پس از انجام مجموعه‌ای

۶- زیر نویس ها

- ^۱ Scotopic adaptation
- ^۲ Photopic adaptation
- ^۳ Chromatic adaptation
- ^۴ Colorimetric shift
- ^۱ Correspond Color
- ^۲ Memory matching
- ^۳ Magnitude estimation