

مقایسه مدل‌های ظاهر رنگی CIECAM97s و نسخه اصلاح شده آن در توصیف ظاهر رنگی یک منسوج

مهدی تقوی قادیکلایی* و سید حسین امیرشاهی**
دانشکده مهندسی نساجی دانشگاه صنعتی اصفهان،
دانشکده مهندسی نساجی دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(دریافت مقاله: ۸۲/۷/۱۶ - دریافت نسخه نهایی: ۸۴/۹/۲۶)

چکیده - از آن جایی که در رابطه با کارایی نسخه اصلاح شده مدل CIECAM97s به روی منسوجات و مقایسه آن با مدل اصلی تاکنون هیچ گونه بحث و بررسی انجام نشده است، در این مقاله از دو مدل رنگ ظاهری CIECAM97s و نسخه اصلاح شده آن در توصیف مولفه‌های ظاهر رنگی منسوجاتی با رنگها و عمقهای مختلف و شرایط یکسانی از مشاهده استفاده شده است و مولفه‌های رنگ ظاهری آنان به عنوان خروجی دو مدل مورد بحث قرار گرفته است. نتایج حاصل نشان می‌دهند که مدل اصلاح شده به دلیل استفاده از محدوده کرومائی وسیعتر از قابلیت مناسبتری در محاسبه این فاکتور برخوردار است. به علاوه استفاده از حالت معکوس در نسخه اصلاح شده به دلیل ساده‌سازیهای انجام شده سهولتر از نسخه اصلی است در حالی که نتایج حاصله از دو مدل کاملاً یکسان است.

واژگان کلیدی: مدل‌های ظاهر رنگی، CIECAM97s، CIECAM97s اصلاح شده، منسوج، تطبیق رنگی

A Comparison between CIECAM97s and its Revised Colour Appearance Models for Appearance Attributes of Fabrics

M. Taghavi Ghadikolaee and S. H. Amirshahi

Department of Textile Engineering, Isfahan University of Technology
Department of Textile Engineering, Amirkabir University of Technology

Abstract: *The CIECAM97s and its revision, as a colour appearance model, were applied for a series of fabrics with different colours and depths to explain their colour appearance coordinates in similar viewing conditions. The results show that due to some modifications which expand the scale, the modified model has improved capabilities in calculating chroma. Besides, the calculations were simpler for the revised version of CIECAM97s model while the results from the two models were the same.*

Keywords: *Colour appearance models, CIECAM97s, Textile, Colour*

فاکتور تأثیر زمینه	n	عکس العمل غیر رنگی نمونه	A
توان تبدیل غیر خطی	p	عکس العمل غیر رنگی سفید	A _w
درخشندگی	Q	توابع مکمل قرمز-سبز و زرد-آبی	a,b
واکنشهای مخروطی مشاهده کننده تحت منبع مرجع	RGB	خلوص	C
واکنشهای مخروطی مشاهده کننده تحت منبع آزمایشی	R _C G _C B _C	فاکتور تأثیر محیط	C
واکنش های مخروطی سفید تحت منبع آزمایشی	R _W G _W B _W	درجه تطبیق	D
واکنشهای مخروطی سفید تحت منبع مرجع	R _{rw} G _{rw} B _{rw}	منبع نوری استاندارد	D ₆₅
مقادیر محرکه‌های سه گانه مربوط به نمونه آزمایشی	R' G' B'	فاکتور دوری از مرکز	e
عکس العملهای مخروط بعد از تطبیق نمونه آزمایشی	R' _a G' _a B' _a	فاکتور درجه تطبیق	F
اشباع	s	فاکتور وقتی سطح روشنایی	F _L
محرکه‌های سه گانه نمونه مورد آزمایش در شرایط منبع مورد استفاده	XYZ	فاکتور تباین روشنایی	F _{LL}
محرکه‌های سه گانه سفید در شرایط منبع مورد استفاده	X _W Y _W Z _W	فام متریک	H
محرکه های سه گانه نمونه مورد آزمایش که از طریق روش معکوس مورد محاسبه قرار گرفته است	X" Y" Z"	زاویه فام	h
روشنایی نسبی زمینه در شرایط منبع	Y _b	روشنایی	J
مقادیر واسطه ای برای محاسبه مقادیر محرکه‌های سه گانه در روش معکوس	Y _c & Y'	ظریب تبدیل	K
پایه نمایی غیر خطی	Z	غنای رنگی	M
		ماتریس انتقالی	M _B
		معکوس ماتریس انتقالی	M _B ⁻¹
		معکوس ماتریس انتقالی جدید	M ⁻¹
		فاکتور تأثیر زمینه کروماتیک	N _C
		فاکتور تأثیر کرومای زمینه	N _{Cb}
		فاکتور تأثیر روشنایی زمینه	N _{bb}

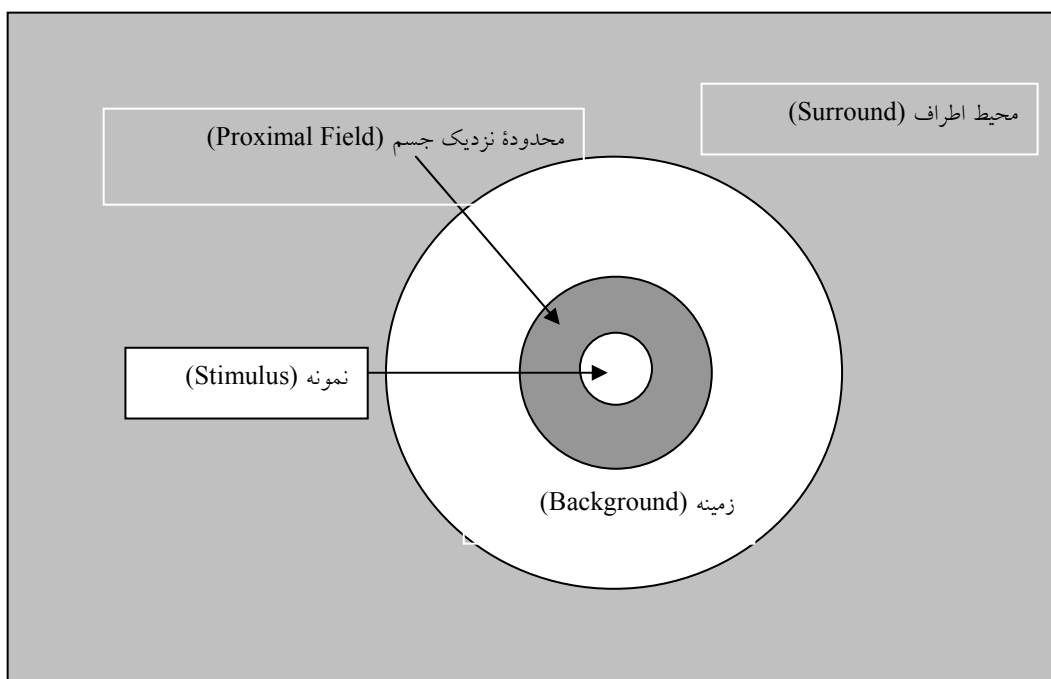
۱- مقدمه

این موارد نیاز به قضاوت‌های چشمی با استفاده از افراد با تجربه دارد و عاری از خطاهای ناشی از ادراکات و ارزیابیهای بشری نخواهد بود. راه حل غلبه بر این مشکل طراحی یک مدل استاندارد برای ارزیابی ظاهر رنگی است که قابلیت تخمین ظاهر رنگ هر نمونه اعم از یک جسم و یا یک تصویر چاپ شده و یا عرضه شده در یک صفحه نمایشگر مانند تلویزیون و یا مونیتر را در محدوده وسیعی از شرایط مشاهده داشته باشد. با افزایش تقاضا برای تطبیق ظاهر رنگی در فرایند رنگ همانندی، پیشگویی ظاهر رنگی تحت شرایط مشاهده متفاوت بیش از پیش اهمیت پیدا کرد

بحث در خصوص ظاهر رنگی^۱ در سالهای اخیر مطرح و توجه به ارائه کمی ظاهر رنگی نمونه‌ها با در نظر گرفتن عوامل متعدد بیشتری به جز منبع نوری و مشاهده کننده که بدون تردید در رنگ دریافت شده موثرند مورد توجه قرار گرفته است [۱].

ظاهر رنگی یک جسم یا یک تصویر با تغییر شرایط مشاهده مانند تغییر محیط، منبع نوری، زمینه و روشنایی میدان دید تغییر می‌کند. این پدیده منجر به بروز مشکلات جدی در کنترل رنگ می‌شود. ارزیابی رنگ نمونه در تمامی

- فام: یکی از رنگ های قرمز، زرد، سبز و آبی و یا ترکیبی از دو یا چندتای آنها که تحت عنوان فام مشخص می شود [۶۰۵].
- درخشندگی: این ویژگی ظاهری در واقع مقدار نوری است که از یک نمونه ساطع یا منعکس می شود و از درخشان تا تاریک تغییر می کند [۶۰۵].
- غنای رنگی: ویژگی یک احساس چشمی که بر اساس آن یک سطح، دارای ظاهر رنگی کم یا زیاد است (مقدار محتوی فام که شدت رنگی بودن را می رساند) و از وضوح و تازگی تا متمایل به خاکستری تغییر می کند [۶۰۵].
- خلوص: یک احساس چشمی است که محتوای رنگ یک سطح را با یک سفید که تحت روشنایی یکسانی مشاهده می شود مقایسه می کند و از قوی تا ضعیف تغییر می کند [۶۰۵].
- روشنایی: مقدار درخشندگی نمونه مورد بررسی نسبت به مقدار درخشندگی یک سفید است که از روشن تا تاریک تغییر می کند [۶۰۵].
- اشباع: مقدار غنای رنگی ناحیه مورد بررسی نسبت به مقدار درخشندگی همان ناحیه است [۶۰۵].
- رنگهای مرتبط^{۱۳}: رنگهایی که از یک شیء یا یک ناحیه درک می شود و متاثر از رنگهای اطراف است [۶۰۵].
- رنگهای غیر مرتبط^{۱۴}: رنگهایی که از یک شیء یا یک ناحیه درک می شود و مستقل از رنگهای اطراف است [۶۰۵].
- زمینه^{۱۵}: محیطی که بلافاصله در مجاورت نمونه مورد نظر قرار دارد [۷۰۶].
- محیط اطراف^{۱۶}: مابقی محدوده دید بعد از زمینه [۷۰۶].
- محدوده نزدیک جسم^{۱۷}: حد فاصل بین شیء یا محیط مورد بررسی و زمینه [۷۰۶]. شکل (۱) تقسیم بندی فضای اطراف یک نمونه را نشان می دهد.
- در تمامی مدل های رنگ ظاهری، متناسب با کارایی هر مدل، تعدادی و یا تمامی پدیده های زیر مورد توجه قرار می گیرند.
- زیرا برای انجام این کار یک مدل ظاهر رنگی^۲ توانا و دارای قابلیت و کاربرد عملی مورد نیاز است و لذا ضروری است که قبل از بیان هر مطلبی ابتدا پدیده ظاهر رنگی به طور دقیقتری مورد بحث قرار گیرد [۲].
- به منظور ارائه مدلی برای ارائه ظاهر رنگی نمونه ها عوامل متعددی در نظر گرفته و مدل های گوناگونی تحت عناوین نایاتانی و هانت، ZLAB, CIECAM97s, RLAB, عرضه شده است که مدل ظاهر رنگی CIECAM97s مدل تکامل یافته آنان است [۸-۱۴]. در واقع مدل های ظاهر رنگی به منظور توسعه و بهبود روش های رنگ سنجی قدیمی مانند CIEXYZ و CIELAB برای پیشگویی ظاهر رنگی اجسام تحت شرایط وسیعی از مشاهده مورد استفاده قرار می گیرد. این امر با در نظر گرفتن مقادیر محرکه های سه گانه نمونه، زمینه ای که نمونه بر روی آن قرار گرفته است، شرایط محیط اطراف آن، تطبیق رنگی^۳ نمونه و کاهش اثر منبع^۴ دنبال می شود. خروجی مدل های ظاهر رنگی شامل روابط ریاضی برای بیان ویژگی های ظاهری^۵ دریافت شده مانند درخشندگی^۶، روشنایی^۷، خلوص^۸، غنای رنگی^۹، اشباع^{۱۰} و فام^{۱۱} است. مدل های ظاهر رنگی کاربردهای مختلفی در زمینه های دوباره تولید^{۱۲} دیجیتال رنگ و ارزیابی خواص تغییر رنگ منابع نوری پیدا کرده است [۲-۴].
- در این مقاله ضمن ارائه توضیحات مختصری در خصوص مدل های رنگ ظاهری، کارایی مدل CIECAM97s و نسخه اصلاح شده آن به روی منسوجات مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. لازم به ذکر است پیش از این در این زمینه هیچ گونه تحقیقاتی مختص به منسوجات صورت پذیرفته است.
- از آنجا که در تمامی مدل های رنگ ظاهری از اصطلاحات و واژه های بیشتری در مقایسه با رنگ سنجی عادی استفاده می شود لذا مناسب به نظر می رسد تا قبل از شروع هرگونه بحث در این خصوص بعضی از این گونه واژه ها و مفاهیم به طور خلاصه مورد اشاره قرار گیرند.



شکل ۱- تقسیم بندی محیط اطراف یک نمونه

- تباین همزمان^{۱۸}: ظاهر رنگی دو نمونه با ظاهر رنگی یکسان به روی زمینه‌هایی با رنگهای مختلف، متفاوت درک می‌شود [۵].
- کدر^{۱۹}: اختلاف رنگی بین دو نمونه هنگامی که روی زمینه‌ای با رنگ مشابه خود مورد مشاهده قرار می‌گیرند افزایش می‌یابد [۵].
- تغییر فام بزولد - بروک: فام تولید شده در محدوده بینایی فتوپیک با تغییرات روشنایی تغییر می‌کند [۵].
- اثر آبنی: فام تولید شده هنگامی که طول موج حاکم و روشنایی ثابت است با کاهش خلوص تغییر می‌کند [۵].
- اثر هلمهوتز - کوهل‌راش: درخشندگی درک شده از یک نمونه در محدوده بینایی فتوپیک هنگامی که روشنایی ثابت نگه داشته می‌شود با افزایش خلوص نمونه رنگی تغییر می‌کند [۵].
- اثر هانت: غنای رنگی درک شده با افزایش روشنایی افزایش می‌یابد [۵].
- اثر استیونس: تباین با افزایش تطبیق در روشنایی افزایش می‌یابد [۵].
- اثر هلسون - جاد: هنگامی که یک نمونه در زیر یک منبع نوری رنگی مورد مشاهده قرار گیرد رنگ درک شده در واقع ترکیبی از رنگ جسم و رنگ منبع خواهد بود ولی برای نمونه‌های تیره رنگ درک شده رنگ نمونه با رنگ مکمل منبع خواهد بود [۵].
- معادلات بارتلسون - برنمن: تباین تصاویر با تغییر روشنایی محیط اطراف تغییر می‌کند [۵].
- کاهش اثر منبع: این تمایل وجود دارد که تاثیر منبع نوری یا روشنایی بر روی رنگ درک شده از اشیا تقلیل یابد [۵].
- اثر محیط: تباین در تصاویر با افزایش روشنایی محیط افزایش می‌یابد [۵].
- پایداری رنگی^{۲۰}: رنگ اشیا در محدوده وسیعی از تغییرات منابع روشنایی بدون تغییر درک می‌شود [۵].
- رنگ ذهنی^{۲۱}: این تمایل وجود دارد که رنگ اشیا هم خانواده همان طور درک شود که بر اساس خاطره انتظار می‌رود دیده شوند [۵].

۱-۱- مدل ظاهر رنگی CIECAM97s

در سال ۱۹۹۷، مدل CIECAM97s به عنوان یک استاندارد بین المللی برای پیشگویی ظاهر رنگی اجسام در یک محدوده وسیعی از شرایط مشاهده، تنظیم و ارائه شد.

مدل به دست آمده برای همانندی علاوه بر در نظر گرفتن پارامترهای قبلی مانند مشاهده کننده، جسم و منبع این قابلیت را دارد که پارامترهای دیگری مانند روشنایی محیط، روشنایی زمینه و درصد تطبیق را نیز منظور کند. همچنین با دریافت ورودیهای فوق و اعمال آنان بر محرکه‌های رنگی X و Y و Z نمونه، ظاهر رنگی نمونه را در شرایط مشاهده مختلف پیشگویی کند.

اطلاعات ورودی مدل شامل روشنایی فضای تطبیق با واحد شمع بر مترمربع cd/m^2 یعنی L_A ، مقادیر محرکه‌های سه‌گانه نمونه مورد آزمایش در شرایط منبع مورد استفاده یعنی X و Y و Z، مقادیر محرکه‌های سه‌گانه منبع سفید در شرایط منبع مورد استفاده یعنی X_w و Y_w و Z_w و روشنایی نسبی زمینه در شرایط منبع یعنی Y_b می‌باشد. به علاوه ثابت C به عنوان تاثیر محیط، فاکتور تاثیر زمینه کروماتیک N_C ، فاکتور تباين روشنایی F_{LL} و همچنین F به عنوان فاکتور درجه تطبیق همان گونه که در جدول (۱) نشان داده شده است انتخاب می‌شود [۱۷]. تمامی مقادیر محرکه‌های سه‌گانه با استفاده از مشاهده کننده ۲ درجه تعیین می‌شود و زمینه به عنوان محیطی که بلافاصله در مجاورت نمونه مورد نظر قرار دارد و محیط اطراف به صورت بقیه محدوده دید تعریف می‌شود [۱۷]. معادلات و روابطی که این مدل برای محاسبه ویژگیهای ظاهری به کار می‌برد به طور خلاصه به دنبال نشان داده شده‌اند.

یک انتقال اولیه تطبیق رنگی برای گذر از شرایط مشاهده منبع مورد استفاده شرایط مشاهده منبع مرجع که یک منبع انرژی برابر است مورد استفاده قرار گرفته است. در ابتدا مقادیر محرکه‌های سه‌گانه برای نمونه و سفید نرمالیزه می‌شود و به عکس‌العملهای طیفی مخروطها با استفاده از معادلات و

ماتریس انتقالی مربوطه M_B با استفاده از معادله (۱) تبدیل می‌شود [۱۷].

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = M_B \begin{bmatrix} X/Y \\ Y/Y \\ Z/Y \end{bmatrix} \quad (1)$$

به نحوی که

$$M_B = \begin{bmatrix} 0.8951 & 0.2664 & -0.1614 \\ -0.7502 & 1.7135 & 0.0367 \\ 0.0389 & -0.0685 & 1.0296 \end{bmatrix}$$

است. تبدیل تطبیق رنگ، تبدیل اصلاح شده از نوع ون کریس است که در آن از یک معادله غیرخطی نمائی برای حساسیت مخروط حساس در طول موجهای کوتاه همان گونه که در معادله (۵) نشان داده شده استفاده شده است. متغیر D به منظور بیان درجه تطبیق به کار گرفته شده است. D برای تطبیق کامل یا عدم توجه به منبع برابر (۱) و برای عدم تطبیق برابر (۰) در نظر گرفته می‌شود و هنگامی مقادیر بین صفر و یک را می‌پذیرد که درجات متفاوتی از تطبیق - عدم تطبیق کامل صورت پذیرفته باشد [۱۷].

$$R_c = \left[D \left(\frac{R_{rw}}{R_w} \right) + 1 - D \right] R \quad (2)$$

$$G_c = \left[D \left(\frac{G_{rw}}{G_w} \right) + 1 - D \right] G \quad (3)$$

$$B_c = \left[D \left(\frac{B_{rw}}{B_w^p} \right) + 1 - D \right] |B|^p \quad (4)$$

$$p = \left(\frac{B_w}{B_{rw}} \right)^{0.0834} \quad (5)$$

پیش از شروع محاسبات بعدی می‌بایست فاکتورهای تاثیر زمینه n، تاثیر روشنایی و کرومای زمینه N_{bb} و N_{cb} و پایه نمایی غیر خطی z، همچنین عکس العمل آکروماتیک برای نمونه و سفید محاسبه شود [۱۷]. مدل، مقادیر R و G و B و شدت روشنایی Y را طی مراحل مختلف و تحت روابط متعدد به تدریج به مقادیر تطبیق یافته در شرایط مشاهده تبدیل می‌کند.

جدول ۱ - مقادیر ثابتها و فاکتورهای مختلف بر اساس شرایط مشاهده [۷ و ۸]

شرایط مشاهده	c	N _c	F _{LL}	F
محیط، نمونه های بازویه مشاهده بزرگتر از چهار درجه	۰/۶۹	۱/۰۰	۰/۰۰	۱/۰۰
محیط متوسط	۰/۶۹	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰
محیط نیمه تاریک	۰/۵۹	۱/۱۰	۱/۰۰	۰/۹۰
محیط تاریک	۰/۵۲۵	۰/۸۰	۱/۰۰	۰/۹۰
برگه های نیمه شفاف ترانسپارنسی	۰/۴۱	۰/۸۰	۱/۰۰	۰/۹۰

می شود. مراحل مدل در جهت عکس برای محاسبه رنگهای مربوطه و یا به کار گرفتن آنان برای دوباره تولید رنگ به صورت زیر است:

اطلاعات مشخصات فام مطابق با مقادیر ارائه شده در جدول (۲) است. Q یا J، M یا C و H یا h: اطلاعات شروع کننده اند [۷ و ۱] و A_w، n، Z، F_L، N_{cb} و N_{bb} نیز با استفاده از مدل مزبور به دست می آیند. پارامترهای محیط اطراف یعنی F، c، F_{LL} و N_c و پارامترهای سطح روشنایی یعنی L_A و D با استفاده از جداول (۱) تا (۳) تعیین می شوند. مدل با استفاده از داده های ورودی و معادلات مربوطه ابتدا R و G و B مورد نظر را محاسبه کرده و نهایتاً X و Y و Z مورد محاسبه قرار می گیرند که توسط معادلات (۱۲) تا (۱۷) نشان داده شده اند [۷ و ۱].

$$R' = 100[(2R'_a - 2)/41 - R'_a]^{1/0.73} \quad (12)$$

$$G' = 100[(2G'_a - 2)/(41 - G'_a)]^{1/0.73} \quad (13)$$

$$B' = 100[(2B'_a - 2)/(41 - B'_a)]^{1/0.73} \quad (14)$$

$$Y_c = 0.43231 R_c Y + 0.51836 G_c Y + 0.04929 B_c Y \quad (15)$$

$$Y' = 0.43231 YR + 0.51836 YG + 0.04929 (Y/Y_c)^{1/p} B Y_c \quad (16)$$

$$\begin{bmatrix} X'' \\ Y'' \\ Z'' \end{bmatrix} = M_B^{-1} \begin{bmatrix} Y_c(Y/Y_c)R \\ Y_c(Y/Y_c)G \\ Y_c(Y/Y_c)^{1/p} B/(Y/Y_c)^{1/p} \end{bmatrix} \quad (17)$$

برای محاسبه ارتباطات ظاهری ابتدا توابع مکمل قرمز-سبز و زرد-آبی به دست می آید و در مرحله بعدی زاویه فام h در سیستم CIECAM97s محاسبه می شود [۷ و ۱].

$$h = \tan^{-1}(b/a) \quad (6)$$

سپس فام متریک H و فاکتورهای عدم تقارن (یا دوری از مرکز) e از اطلاعات جدول (۲) با استفاده از مقادیر مشخص فامها و با درون یابی به دست می آید [۷ و ۱]. نهایتاً ویژگیهای ظاهری از طریق معادلات (۷) تا (۱۱) محاسبه می شود [۷ و ۱].

$$J(\text{Lightness}) = 100 \left(\frac{A}{A_w} \right)^{CZ} \quad (7)$$

$$Q(\text{Brightness}) = (1.24/c) (J/100)^{0.67} (A_w + 3)^{0.9} \quad (8)$$

$$s(\text{saturation}) = \frac{\left[50(a^2 + b^2) \right]^{0.5} 100e(10/13)N_c N_{cb}}{\left[R'_a + G'_a + (21/20)B'_a \right]} \quad (9)$$

$$C(\text{Chroma}) = 2.44s^{0.69} (J/100)^{0.67n} (1.64 - 0.29^n) \quad (10)$$

$$M(\text{Colourfulness}) = CF_L^{0.15} \quad (11)$$

مدل CIECAM97s علاوه بر این که توانایی محاسبه ویژگیهای ظاهری و پیشگویی آنها در شرایط مشاهده متفاوت را داراست از این امکان نیز برخوردار است که با دریافت اطلاعات مربوط به شرایط محیط و ویژگیهای ظاهری مطلوب و مورد نظر، XYZ مربوطه را استخراج کند و در واقع تولید کننده را راهنمایی کند که برای حصول ظاهر رنگی مد نظر مصرف کننده در شرایط استفاده، از چه اولیه هایی و به چه میزان لازم است استفاده کند. این امکان از توانمندیهای برجسته مدل است که از امکان به کارگیری مدل در جهت معکوس حاصل

جدول ۲- مقادیر مشخص فامها [۷ و ۸]

فام	زاویه فام (h)	فاکتور عدم تقارن (e)	ترکیب فام (H)
قرمز	۲۰/۱۴	۰/۸	۰ یا ۴۰۰
زرد	۹۰/۰۰	۰/۷	۱۰۰
سبز	۱۶۴/۲۵	۱/۰	۲۰۰
آبی	۲۳۷/۵۳	۱/۲	۳۰۰

جدول ۳- مقادیر ثابتها و فاکتورهای مختلف بر اساس شرایط مشاهده [۹]

شرایط مشاهده	c	N _c	F
محیط متوسط	۰/۶۹	۱/۰	۱/۰
محیط نیمه تاریک	۰/۵۹	۰/۹۵	۰/۹
محیط تاریک	۰/۵۲۵	۰/۸۰	۰/۹

د - در نظر گرفتن یک متغیر پیوسته جبران کننده محیط،
ه - تطبیق نقطه سیاه
و - ساده سازی عمومی.

داده‌های ورودی و شرایط کار برای مدل بازنگری شده مطابق نسخه اصلی است. مدل بازنگری شده پس از به کارگیری معادلاتی مشابه مدل اصلی با مراحل محاسباتی کمتر و ساده‌تر که با اعمال برخی از ضرایب و نمادها حاصل شده است. نهایتاً با استفاده از معادلات (۱۸) تا (۲۲) ویژگیهای مورد نظر را محاسبه می‌کند [۱۵].

$$J = 100 (A/A_w)^{cz} \quad (18)$$

$$Q = (1.24/c) (J/100)^{0.67} (A_w + 3)^{0.9} \quad (19)$$

$$s = \frac{[50(a^2 + b^2)^{0.5} 100e(10/13)N_c N_{cb}]}{[R'_a + G'_a + (21/20)B'_a]} \quad (20)$$

$$C = 0.7487^{0.973} (J/100)^{0.945n} (1.64 - 0.29^n)^{1.41} \quad (21)$$

$$M = CF_L^{0.15} \quad (22)$$

در واقع مدل بازنگری شده با توجه به تعدیلاتی که در روابط و معادلات انجام داده است با معادلاتی بسیار ساده‌تر و از مسیری بسیار کوتاه‌تر محرکه‌های رنگی جسم یعنی X و Y و Z نمونه مورد نظر را محاسبه می‌کند [۱۵].

آزمایشات اولیه بر روی این مدل مبین این است که مدل در محدوده وسیعی از اطلاعات و کاربردهای عملی کارایی دارد [۱۷].

۲-۱- مدل CIECAM97s بازنگری شده

نتیجه فعالیت‌های کمیته فنی CIE منجر به یافتن مدل CIECAM97s اصلی شد ولی علی‌رغم اینکه این مدل یک موفقیت محسوب می‌شود هنوز در کاربردهای عملی به طور محسوس حضور پیدا نکرده است که یکی از مهمترین دلایل عدم استقبال از این مدل می‌تواند پیچیدگی آن باشد [۱۵].

بنا بر دلایل فوق کمیته‌های فنی سعی کردند امکانات بازنگری در مدل CIECAM97s را به وجود آورند. این حرکت منجر به انجام بازنگریهایی شد که نهایتاً به صورت یک جمع‌بندی و در قالب بهترین بازنگری حاضر در دسامبر سال ۲۰۰۱ میلادی توسط فیرچایلد ارائه شد. مبنای بازنگریهای انجام شده توجه به نکات زیر بوده است [۱۵]:

- الف - خطی کردن تبدیل تطبیق رنگی به منظور ساده‌سازی مدل مستقیم و معکوس،
- ب - قرار دادن مقیاس روشنایی برای نمونه سیاه کامل،
- ج - برقراری یک مقیاس خلوص وسیعتر برای رنگهای با کرومای کم (خنثی)،

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = M^{-1} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (23)$$

۲- اساس تجربی

در تحقیق فعلی به منظور مقایسه مدل اصلی و مدل بازنگری شده ظاهر رنگی و استخراج ویژگیهای مدل بازنگری شده از نمونه‌های اکریلیک با بافت کرپ که با رنگزاهای کاتیونیک C.I. Basic Yellow 28 و C.I. Basic Red 41 و Basic Blue 46 با نام تجاری ماکسیلون از شرکت سیبا رنگرزی شده بودند استفاده شد. به منظور تهیه نمونه‌های رنگی با عمقهای رنگی متفاوت، درصدهای مختلفی از مواد رنگزای مذکور مورد استفاده قرار گرفت. انعکاس نمونه‌های رنگ شده با استفاده از اسپکتروفتومتر تکسفلاش ساخت شرکت دیتاکالر با دیافراگم ۱۸ میلی‌متر اندازه‌گیری شده است و محرکه‌های سه‌گانه کلیه نمونه زیر منابع نوری D₆₅ و A و مشاهده‌کننده استاندارد ۲ درجه اندازه‌گیری شده‌اند. لازم به ذکر است که از نمونه‌های مذکور، در ارزیابی مدلها و مؤلفه‌های آنها استفاده شده است. برای تبدیل فرمولها و روابط به کارگرفته شده در مدلهای کاربردی به یک برنامه محاسباتی، از نرم‌افزار متلب استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مقایسه نتایج مدل ظاهر رنگی CIECAM97s و نسخه بازنگری شده آن

برای انجام این بررسی از نمونه رنگرزی شده با فام قرمز که با استفاده از ۱٪ رنگزا تهیه شده بود استفاده شد. محرکه‌های سه‌گانه مربوط به این نمونه و سایر نمونه‌ها به همراه سفید تحت منبع نوری D₆₅ اندازه‌گیری شد. شدت روشنایی میدان تطبیق (L_A) ۳۱۸/۳۱، درصد روشنایی زمینه (یعنی مقدار Y_b) ۲۰ و شماره شرایط مشاهده ۲ برای مدل اصلی و ۱ برای مدل بازنگری شده (محیط متوسط) در نظر گرفته شد. نتایج حاصله و جزییات مربوط به خروجی هر مدل در جدول (۴) نشان داده شده‌اند.

در جدول (۴) مقادیر محاسبه شده توسط مدلهای

CIECAM97s اصلی و نسخه بازنگری شده آن با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همان طور که در جدول (۴) مشاهده می‌شود به علت عدم اعمال تغییرات در محاسبه ضریب تطبیق غیرکامل D هر دو مدل این ضریب را یکسان و برابر با ۰/۹۹۷ محاسبه کرده‌اند. پارامترهای واسطه‌ای مورد نیاز در محاسبات مانند k, F_L, n, N_{cb}, N_{bb} و Z نیز مقادیر برابری در هر دو مدل به خود اختصاص داده‌اند.

با توجه به حذف فاکتور F_{LL} و خطی شدن تبدیل تطبیق رنگی در مدل بازنگری شده، مقادیری برای فاکتور F_{LL} و توان ρ (در تبدیل تطبیق رنگی غیرخطی کاربرد دارد) در خروجی مربوط به این مدل مشاهده نمی‌شود. با اعمال این تغییرات و تغییرات ذکر شده در قسمت‌های قبلی، روابط و معادلات تا حد زیادی ساده‌تر شده و منظور اولیه محققان در ساده بودن مدل برای استفاده‌های عملی بیشتر به واقعیت نزدیک شده است.

در مراحل بعدی مشاهده شد تفاوت‌هایی بین مقادیری که ارزشهای R و B G در مراحل مختلف به خود اختصاص داده‌اند بین دو روش وجود دارد که به دلیل تغییرات اعمال شده در فرمولبندی تبدیل تطبیق رنگی جدید که در مدل CIECAM97s بازنگری شده به کار رفته است. این اختلافها نهایتاً در محاسبه مقادیر ارزشهای R و B G تطبیق یافته حذف و خروجی دو مدل برابر می‌شود.

در مقادیر خروجیهای اصلی مدل، توابع مکمل قرمز - سبز و زرد - آبی (a و b)، زاویه فام (h)، ترکیب فام (H)، فاکتور عدم تقارن (e)، عکس‌العمل اکروماتیک نمونه و سفید (A) و A_w، اشباع (s)، روشنایی (J) و درخشندگی (Q) تفاوت و اختلاف بزرگی مشاهده نمی‌شود ولی برای مقادیر خلوص (C) و غنای رنگی (M) تفاوت‌های فاحشی وجود دارد که ناشی از تغییرات اعمال شده در مدل بازنگری شده است.

به منظور بررسی بیشتر این موضوع مقادیر ویژگیهای ظاهری خلوص و غنای رنگی برای نمونه‌های قرمز، زرد، آبی در غلظتهای مختلف و شرایطی مشابه شرایط به کار گرفته شده در مرحله قبل برای مدل اصلی و بازنگری شده محاسبه شدند که

جدول ۴- مقایسه مقادیر محاسبه شده توسط دو مدل CIECAM97s اصلی و بازنگری شده

فاکتورها	مدل		فاکتورها	مدل		فاکتورها	مدل	
	اصلی	بازنگری شده		اصلی	بازنگری شده		اصلی	بازنگری شده
X	۳۰/۳۷	۳۰/۳۷	R	۱/۸۱	۲۹/۰۰	R _a '	۷/۴۶	۷/۴۶
Y	۱۶/۲۷	۱۶/۲۷	G	۰/۳۴	۴/۴۷	G _a '	۵/۵۲	۵/۵۳
Z	۱۲/۸۶	۱۲/۸۶	B	۰/۸۲	۱۳/۳۳	B _a '	۵/۲۰	۵/۲۰
X _W	۹۵/۰۵	۹۵/۰۵	R _W	۰/۹۴	۹۴/۰۴	R _{aW} '	۱۵/۳۶	۱۵/۳۶
Y _W	۱۰۰/۰۰	۱۰۰/۰۰	G _W	۱/۰۴	۱۰۴/۱۷	G _{aW} '	۱۵/۳۶	۱۵/۳۶
Z _W	۱۰۸/۸۸	۱۰۸/۸۸	B _W	۱/۰۹	۱۰۸/۸۰	B _{aW} '	۱۵/۳۶	۱۵/۳۶
L _A	۳۱۸/۳۱	۳۱۸/۳۱	p	۱/۰۱	---	a	۱/۹۱	۱/۹۰
F	۱	۱	R _C	۱/۹۲	۳۰/۸۳	b	۰/۲۹	۰/۲۹
D	۰/۹۹۷	۰/۹۹۷	G _C	۰/۳۳	۴/۲۹	h	۸/۵۶	۸/۶۰
Y _b	۲۰/۰۰	۲۰/۰۰	B _C	۰/۷۵	۱۲/۲۵	H	۳۹۱/۷۹	۳۹۱/۸۲
c	۰/۶۹	۰/۶۹	R _{CW}	۱/۰۰	۹۹/۹۸	e	۰/۷۸	۰/۷۸
N _c	۱/۰۰	۱/۰۰	G _{CW}	۱/۰۰	۱۰۰/۰۱	A	۱۸/۶۶	۱۷/۶۷
F _{LL}	۱/۰۰	----	B _{CW}	۱/۰۰	۱۰۰/۰۱	A _W	۴۴/۸۰	۴۳/۸۰
K	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۰۶	R'	۲۳/۱۹	۲۳/۲۰	J	۴۱/۷۱	۴۰/۴۰
F _L	۱/۱۷	۱/۱۷	G'	۱۳/۱۸	۱۳/۲۱	Q	۳۲/۴۸	۳۱/۲۰
N	۰/۲۰	۰/۲۰	B'	۱۱/۸۶	۱۱/۷۷	s	۳۱۳/۵۲	۳۱۲/۲۱
N _{bb}	۱/۰۰	۱/۰۰	R' _W	۹۹/۹۹	۹۹/۹۹	C	۹۸/۴۲	۱۳۶/۰۴
N _{cb}	۱/۰۰	۱/۰۰	G' _W	۱۰۰/۰۰	۹۹/۹۹	M	۱۰۰/۷۳	۱۳۹/۲۳
z	۱/۴۵	۱/۴۵	B' _W	۱۰۰/۰۳	۱۰۰/۰۳	---	---	---

نتایج آن در جدول (۵) نشان داده شده‌اند.

با توجه به تعریف غنای رنگی انتظار می‌رود با کاهش غلظت این ویژگی کاهش یابد که مطابق انتظار در تمامی موارد و در هر دو مدل با کاهش غلظت، غنای رنگی کاهش یافته است (در محدوده غلظت مواد رنگزا که در این پروژه به کار گرفته شده‌اند). از طرفی همان گونه که اشاره شد خلوص به

صورت غنای رنگی ناحیه مورد بررسی نسبت به درخشندگی یک سفید تعریف می‌شود. با توجه به ثابت بودن شرایط و عدم تغییر درخشندگی سفید انتظار می‌رود با کاهش غلظت و کاهش غنای رنگی کروما کاهش پیدا کند که با توجه به مقادیر مندرج در جدول (۵) در تمامی موارد این امر واقع شده است. در هر حال نکته حائز اهمیت این است که کاهش مذکور با چه نرخ

جدول ۵- مقایسه مقادیر Chroma و Colourfulness به دست آمده از مدل‌های CIECAM97s اصلی و بازنگری شده برای شرایط مساوی و غلظت‌های متفاوت از یک رنگ‌زا

Colourfulness(M)		Chroma(C)		محركه‌های سه گانه			فام
بازنگری شده	اصلي	بازنگری شده	اصلي	Z	Y	X	(قرمز) غلظت
۱۵۱/۷۹	۱۰۷/۱۹	۱۴۸/۳۰	۱۰۴/۷۳	۸/۴۵	۱۳/۴۷	۲۵/۹۳	۱/۸
۱۴۳/۴۶	۱۰۲/۹۵	۱۴۰/۱۶	۱۰۰/۵۸	۱۰/۴۶	۱۴/۳۷	۲۷/۱۹	۱/۴
۱۳۹/۲۳	۱۰۰/۷۳	۱۳۶/۰۴	۹۸/۴۲	۱۲/۸۶	۱۶/۲۷	۳۰/۳۷	۱/۰
۱۲۱/۳۲	۹۱/۲۵	۱۱۸/۵۳	۸۹/۱۶	۱۹/۷۹	۲۱/۱۳	۳۷/۱۱	۰/۵
۹۲/۷۰	۷۵/۳۱	۹۰/۵۸	۷۳/۵۸	۳۱/۴۳	۲۹/۴۳	۴۶/۱۵	۰/۲
بازنگری شده	اصلي	بازنگری شده	اصلي	Z	Y	X	(زرد) غلظت
۸۷/۹۷	۷۲/۳۶	۸۵/۹۵	۷۰/۷۰	۶/۴۱	۳۶/۲۷	۴۱/۳۴	۱/۸
۸۵/۴۶	۷۰/۸۹	۸۳/۵۰	۶۹/۲۶	۷/۰۵	۳۲/۲۱	۴۲/۰۷	۱/۴
۸۱/۷۳	۶۸/۶۵	۷۹/۸۵	۶۷/۰۸	۸/۸۳	۴۳/۱۱	۴۷/۵۹	۱/۰
۶۶/۰۴	۵۹/۰۲	۶۴/۵۲	۵۷/۶۶	۱۴/۴۴	۴۹/۷۰	۵۱/۷۲	۰/۵
۴۹/۳۸	۴۸/۰۲	۴۸/۲۵	۴۶/۹۱	۲۴/۷۳	۵۹/۹۱	۵۹/۲۷	۰/۲
بازنگری شده	اصلي	بازنگری شده	اصلي	Z	Y	X	آبی (غلظت)
۹۲/۵۳	۷۵/۶۷	۹۰/۴۱	۷۳/۹۴	۲۳/۹۹	۶/۰۶	۷/۱۸	۱/۸
۹۱/۱۲	۷۴/۷۴	۸۹/۰۲	۷۳/۰۲	۲۵/۵۸	۶/۹۱	۷/۷۹	۱/۴
۸۱/۸۶	۶۹/۰۹	۷۹/۹۸	۶۷/۵۱	۲۸/۶۰	۹/۳۲	۹/۸۰	۱/۰
۷۸/۵۹	۶۶/۸۸	۷۶/۷۹	۶۵/۳۵	۴۱/۷۴	۱۵/۴۸	۱۵/۳۸	۰/۵
۶۳/۶۵	۵۷/۴۷	۶۲/۱۹	۵۶/۱۵	۵۶/۰۶	۲۵/۷۳	۲۴/۵۶	۰/۲

به دلیل اصلاحات انجام شده اختلاف بین مقادیر مذکور بیشتر و سیر نزولی سرعت بیشتری یافته است. با توجه به مقادیر جدول (۶) مشاهده می‌شود سیر نزولی در مدل بازنگری شده حدوداً ۱/۷ برابر سریعتر شده است و اختلاف بین مقادیر ویژگی‌های ظاهری خلوص و غنای رنگی

اتفاق می‌افتد و اختلاف مقادیر این ویژگی‌ها بین بیشترین غلظت مورد بررسی و کمترین غلظت مورد بررسی چه میزان است؟ اختلاف بین خلوص برای بیشترین غلظت و خلوص برای کمترین غلظت در جدول (۶) نشان داده شده است. نتایج مندرج در جدول (۶) نشان می‌دهند که در مدل بازنگری شده

جدول ۶- مقایسه مقادیر Chroma و Colourfulness به دست آمده از مدل‌های CIECAM97s اصلی و بازنگری شده

برای کمترین و بیشترین غلظت به کاررفته

فام	Colourfulness(M)		Chroma(C)	
	مدل اصلی	مدل بازنگری شده	مدل اصلی	مدل بازنگری شده
قرمز	۳۱/۸۸	۵۹/۰۹	۳۱/۱۵	۵۷/۷۲
زرد	۲۴/۳۴	۳۸/۶۵	۲۳/۷۹	۳۷/۷
آبی	۱۸/۲	۲۸/۸۸	۱۷/۷۹	۲۸/۲۲

جدول ۷- مقادیر ویژگی‌های ظاهری که در قسمت معکوس مدل مورد استفاده قرار گرفته است.

M	C	s	Q	J	H	h	
۱۳۹/۲۳	۱۳۶/۰۴	۳۱۲/۲۱	۳۱/۳۰	۴۰/۴۰	۳۹۱/۸۲	۸/۶۰	قرمز
۸۱/۷۳	۷۹/۸۵	۱۶۳/۷۹	۴۳/۶۸	۶۶/۷۷	۶۶/۸۰	۶۸/۸۳	زرد
۸۱/۸۶	۷۹/۹۸	۱۹۹/۷۲	۲۲/۱۶	۲۴/۲۵	۳۱۰/۳۱	۲۵۸/۵۰	آبی

ویژگی‌های ظاهری به دست آمده برای هر یک از فام‌های قرمز، زرد و آبی که در جدول (۷) آمده است (در شرایط مشاهده مشابه با مراحل قبلی) به کار گرفته شد. نهایتاً با استفاده مدل در جهت معکوس، مقادیر X و Y و Z نمونه‌ها مورد محاسبه قرار گرفت و سپس خروجی‌های دو مدل با مقادیر X و Y و Z اصلی مقایسه شد. همان‌طور که مقادیر مندرج در جدول (۸) نشان می‌دهد بهینه‌سازی و ساده‌سازی انجام شده بدون بروز هرگونه اثر نامطلوب در نتایج حاصل از به کارگیری مدل در جهت معکوس و یا کاهش صحت نتایج حاصل شده است.

با توجه به مطالب ذکر شده مشاهده می‌شود نسخه بازنگری شده نه تنها بدون ایجاد تغییرات در نتایجی که از دقت کافی برخوردارند برخی معایب نسخه اصلی را مرتفع کرده است و نهایتاً در مجموع صحت پیشگویی را بهبود بخشیده است، بلکه با حذف برخی پارامترها و شرایط غیرقابل استفاده که منجر به پیچیدگی بی‌مورد نسخه اصلی می‌شد، نسخه بازنگری شده را به مدلی ساده‌تر که مطلوب تولیدکنندگان و استفاده‌کنندگان است تبدیل کرده است. همچنین با حذف توان غیرخطی در تبدیل تطبیق رنگی که در مدل اصلی کاربرد داشته است و

بین کمترین و بیشترین غلظت به کار رفته بیشتر افزایش یافته است. بنابراین بسط و گسترش محدوده کروما برای رنگ‌های با مقادیر کرومای پائین که به عنوان یک ایراد و مشکل برای مدل اصلی مطرح بود در نسخه بازنگری شده بهبود یافته و تفاوت‌های محسوستری بین مقادیر خلوص و غنای رنگی برای غلظت‌های رنگی کم و زیاد ملاحظه می‌شود که این نکته از ویژگی‌های مثبت در نسخه بازنگری شده است [۱۵].

۲-۳- قابلیت معکوس پذیری مدلها

یکی از قابلیت‌های مهم مدل‌های مطرح شده امکان به کارگیری آنها در جهت معکوس و استخراج محرکه‌های سه‌گانه در صورت معلوم بودن ویژگی‌های ظاهری نمونه است. ساده‌تر شدن مدل در نتیجه بازنگری‌های انجام شده موجب ساده‌تر شدن محاسبات در جهت عکس و نهایتاً معکوس پذیری آسان و دقیق‌تر شده لذا، امکان بروز اشتباه در به کارگیری تقریب‌های مختلف برای معکوس‌سازی مدل اصلی مورد نیاز کاهش یافته است.

برای بررسی این نکته و مقایسه دو مدل در جهت معکوس

جدول ۸- مقایسه مقادیر خروجی معکوس مدل‌های CIECAM97s اصلی و بازنگری شده برای

فام‌های مورد بررسی با غلظت ۱٪

خروجی معکوس مدل بازنگری شده			خروجی معکوس مدل اصلی			محرکه‌های سه گانه اصلی			فام
Z	Y	X	Z	Y	X	Z	Y	X	
۱۲/۸۷	۱۶/۲۸	۳۰/۳۷	۱۲/۸۶	۱۶/۲۷	۳۰/۳۷	۱۲/۸۶	۱۶/۲۷	۳۰/۳۷	قرمز
۸/۸۶	۴۳/۱۲	۴۷/۵۹	۸/۸۳	۴۳/۱۲	۴۷/۵۹	۸/۸۳	۴۳/۱۱	۴۷/۵۹	زرد
۲۸/۵۷	۹/۳۲	۹/۸۰	۲۸/۵۹	۹/۳۲	۹/۸۰	۲۸/۶۰	۹/۳۲	۹/۸۰	آبی

بازنگری شده به عنوان یک جمع بندی از بازنگری‌های انجام شده توسط فیر چایلد ارائه شده است.

نتایج ناشی از به کارگیری دو مدل ظاهر رنگی ذکر شده بر روی یک سری منسوج اکریلیکی با فام‌های قرمز و زرد و آبی نشان می‌دهد که مدل CIECAM97s بازنگری شده تمام ویژگی‌های مدل اصلی را داراست با این تفاوت که برخی از عیوب مدل اصلی مانند مسئله مربوط به پیشگویی ویژگی‌های ظاهری کروما را مرتفع کرده است. این مدل همانند مدل اصلی قابلیت به کارگیری در جهت معکوس را داراست که از مهمترین ویژگی‌های مدل‌های ظاهر رنگی محسوب می‌شود چرا که این قابلیت را به تولیدکننده می‌دهد تا بتوانند با اطلاع از ویژگی‌های ظاهری مورد نظر مصرف کننده و شرایط کاربردی مقدار اولیه‌های مور نیاز را شناسایی و رنگ مربوطه را با همان ویژگی‌های ظاهری مورد نظر تولید کند.

تبدیل کردن آن به یک تبدیل خطی برای مدل بازنگری شده موجب سهولت شدن قابلیت معکوس پذیری مدل شده است [۱۵].

۴- نتیجه گیری

علی‌رغم اینکه ارائه مدل ظاهر رنگی CIECAM97s مرهون بررسی گسترده بر روی مدل‌هایی است که در ظرف چند سال گذشته ارائه شده بودند ولی این مدل نیز به رغم مزایای عمده‌ای که در بر دارد ایراداتی از جمله پیچیدگی محاسباتی، معکوس پذیری دشوار و عدم پیشگویی صحیح برای ویژگی‌های ظاهری کروما را از خود نشان داد. معایب مدل CIECAM97s و پیشرفتهای مورد انتظار موجب شد تحقیقات و مطالعات در زمینه مدل‌های ظاهر رنگی همچنان ادامه داشته باشد به طوری که در حال حاضر با بازنگری مدل CIECAM97s اصلی مناسبترین مدل موجود تحت عنوان مدل CIECAM97s

واژه نامه

- | | | |
|-------------------------------|----------------------|---------------------------|
| 1. colour appearance | 8. chroma | 15. background |
| 2. colour appearance model | 9. colourfulness | 16. surround |
| 3. colour adaption | 10. saturation | 17. proximal field |
| 4. discounting the illuminant | 11. hue | 18. simultaneous contrast |
| 5. appearance attribute | 12. reproduction | 19. crispening |
| 6. brightness | 13. related colour | 20. colour constancy |
| 7. lightness | 14. unrelated colour | 21. memory colour |

1. MacDonald, L. W., and Luo, M. R., *Colour Imaging: Vision and Technology*, John Wiley&Sons, Chichester, 1999
2. Fairchild, M. D., *Color Appearance Models*, Addison Wesley, Massachusetts, 1997.
3. <http://www.cis.rit.edu/people/faculty/fairchild/PDFs/chiba.pdf>
4. <http://www.colour.org/tc8-01/tc8-01-fa1100.pdf>
5. <http://ziggy.derby.ac.uk/colour/info/glossary/c/ColourAppearance.html>
6. <http://www.cis.rit.edu/people/faculty/fairchild/PDFs/CAM1.pdf>
7. CIE TC1-34, "The CIE 1997 Interim Colour Appearance Model (Simple Version), CIECAM97s", Web Page, 1998. (<http://colour.derby.ac.uk/colour>)
8. Luo, M. R., "A review of Chromatic Adaptation Transform," *Rev. Prog. Coloration*, Vol. 30, PP. 77-91, 2000.
9. Hunt, R. W. G., "An improved Predictor of Colourfulness in a Model of Colour Vision," *Color Res Appl.*, Vol. 19, PP. 23-26, 1994.
10. Nayatani, Y., "Revision of the Chroma and Hue Scale of a Nonlinear Color Appearance Model," *Color Res Appl*, Vol. 20, PP. 143-155, 1995.
11. Nayatani, Y., Sobagaki, H., Hashimoto, K., and Yano, T., "Lightness Dependency of Chroma Scales of a Nonlinear Color Appearance Model and Its Formulation," *Color Res Appl*, Vol. 20, PP. 156-167, 1995.
12. Fairchild, M. D., "Refinement of the RLAB Color Space," *Color Res Appl*, Vol. 21, PP. 338-346, 1996.
13. Luo, M. R., Lo, M. C., and Kuo, W. G., "The LLAB(l:c) Colour Model," *Color Res Appl*, Vol. 21, PP. 412-429, 1996.
14. Fairchild, M. D., "The ZLAB Color Appearance Model for Practical Image Reproduction Application," Web Page, 2000. (<http://colour.derby.ac.uk/colour>)
15. Fairchild, M. D., "A Revision of CIECAM97s for Practical Application," *Color Res Appl*, Vol. 26, PP. 418-427, 2001.