

Evaluation of Color Constancy Characteristics in Selected Common National Banknotes under Different Illuminants

Mahdi Safi

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

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 18-10-2025

Accepted: 07-12-2025

Available online: 16-12-2025

Print ISSN: 1735-8779

Online ISSN: 2383-2169

DOI: 10.30509/jcst.2025.167699.1274

Keywords:

Color constancy
Color inconstancy index
Illumination, Banknotes
CIELAB color space

ABSTRACT

This study evaluated the color constancy of two Iranian banknotes (10,000 and 50,000 tomans) under four illuminants D65, A, TL84, and white LED. The largest color gamut volumes were observed under D65, with 178,757 units for the 10,000-toman note and 118,047 units for the 50,000-toman note, while the smallest volumes occurred under illuminant A (153,529 and 100,741 units, respectively). The average color inconstancy indices (CMCCON02) for the D65-A, D65-TL84, and D65-LED pairs were 2.46, 2.43, and 1.31, respectively. Two-way ANOVA confirmed significant effects of both banknote type and illuminant on color stability. These findings indicate higher color constancy under artificial white light (LED and TL84) than under tungsten light, and demonstrate the applicability of the proposed quantitative protocol for quality control in banknote printing.

ارزیابی ویژگی پایداری رنگ در برخی از اسکناس‌های رایج ملی تحت منابع نوری مختلف

مهدی صفی

دانشیار، گروه پژوهشی فیزیک رنگ، پژوهشگاه رنگ، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۷۶۵-۶۵۴

چکیده

در این پژوهش، پایداری رنگ دو اسکناس رایج ملی (۱۰ و ۵۰ هزار تومانی) با چهار روشنایی استاندارد D65، TL84، A و LED سفید بررسی شد. نتایج نشان داد بیشترین حجم گستره رنگی در روشنایی D65 به ترتیب برابر با ۱۷۸،۷۵۷ واحد برای اسکناس ۱۰ هزار تومانی و ۱۱۸،۰۴۷ واحد برای اسکناس ۵۰ هزار تومانی بود، در حالی که کمترین مقدار در روشنایی A (۱۵۳،۵۲۹ و ۱۰۰،۷۴۱ واحد) مشاهده شد. میانگین شاخص ناپایداری رنگ برای جفت روشنایی‌های D65-A، D65-TL84 و D65-LED به ترتیب ۲،۴۶، ۲،۴۳ و ۱،۳۱ محاسبه شد. آزمون ANOVA دوطرفه نشان داد که هر دو عامل نوع اسکناس و نوع منبع نوری بر پایداری رنگ اثر معنادار دارند. این نتایج بیانگر آن است که اسکناس‌ها با نورهای سفید مصنوعی (LED و TL84) پایداری رنگ بیشتری نسبت به نور تنگستن دارند و روش کمی ارائه شده می‌تواند برای کنترل کیفیت چاپ اسکناس‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۱۶

در دسترس به صورت الکترونیکی: ۱۴۰۴/۰۹/۲۵

شاپا چاپی: ۱۷۳۵-۸۷۷۹

شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۲۱۶۹

DOI: 10.30509/jcst.2025.167699.1274

واژه‌های کلیدی:

پایداری رنگ

ضریب ناپایداری رنگ

روشنایی، اسکناس

فضا رنگ CIELAB

۱- مقدمه

طراحی رنگ و انتخاب فام‌های مناسب در فرایند چاپ اسکناس، یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های تضمین کیفیت ظاهری و امنیتی پول رایج هر کشور است. اسکناس‌ها علاوه بر نقش اقتصادی، حامل مجموعه‌ای از اطلاعات دیداری و امنیتی هستند که در فرایند تشخیص صحیح و جلوگیری از جعل اهمیت دارند (۵-۱). در میان ویژگی‌های ظاهری اسکناس، رنگ جایگاه ویژه‌ای دارد؛ زیرا هم در افزایش امنیت دیداری از طریق مرکب‌های فلورسنت و ویژگی‌های نوری و هم در ارتقای قابلیت تشخیص سریع نقش دارد (۱۰-۶).

یکی از چالش‌های اساسی در ارزیابی رنگ اسکناس، تغییر ظاهر رنگ در اثر تغییر منبع نور است. مشاهده اجسام رنگی با منابع نوری مختلف می‌تواند به تغییر فام، روشنی یا خلوص رنگ منجر شود و این مسئله مستقیماً با پدیده‌ی پایداری رنگ مرتبط است. این پدیده بیان می‌کند که سیستم بینایی تلاش می‌کند رنگ اشیاء را در تغییر شرایط نوری ثابت درک کند، اما این سازوکار همواره کامل و دقیق عمل نمی‌کند. بنابراین، مواد رنگی که در چاپ اسکناس استفاده می‌شوند، باید دارای پایداری رنگ بالا نسبت به تغییر روشنایی باشند تا ظاهر اسکناس در محیط‌های نوری مختلف قابل اعتماد باقی بماند (۱۵-۱۱).

در حوزه کنترل کیفیت مواد چاپی، ارزیابی دقیق پایداری رنگ مستلزم اندازه‌گیری ویژگی‌های طیفی و کمی‌سازی تغییرات رنگی با روشنایی‌های استاندارد است. برخی منابع نوری مانند D65 (نور روز استاندارد) و A (لامپ تنگستن) دارای توزیع توان طیفی بسیار متفاوت هستند و این تفاوت می‌تواند منجر به تغییر محسوس در ظاهر رنگ اسکناس شود (۲۱-۱۶). از سوی دیگر، محیط‌های امروزی به شدت وابسته به منابع نوری LED و فلورسنت هستند و این موضوع اهمیت بررسی رفتار رنگ اسکناس تحت این دسته از نورها را افزایش می‌دهد (۲۱-۱۹). با وجود اهمیت کاربردی این مسئله، مطالعات موجود درباره پایداری رنگ در اسکناس‌ها محدود بوده و بیشتر به ویژگی‌های مواد امنیتی، مرکب‌های فلورسنت یا تحلیل‌های جرم‌شناسی پرداخته‌اند (۱۸-۱۶). بنابراین، بررسی علمی رفتار ظاهری رنگ اسکناس در برابر تغییر روشنایی می‌تواند به عنوان یک خلا پژوهشی مهم تلقی شود.

در ارتباط با بررسی ویژگی پایداری رنگ نمونه‌های اسکناس اطلاعاتی چندانی در دسترس نیست. با توجه به اینکه در طراحی یک اسکناس انتخاب رنگ یکی از شاخص‌های کلیدی کیفیت اسکناس‌ها محسوب می‌شود، لذا در این تحقیق با انتخاب دو اسکناس رایج ملی،

ویژگی پایداری رنگ آن‌ها بررسی می‌شود. هدف این مطالعه، ارزیابی پایداری رنگ و ثبات ظاهر رنگ اسکناس‌های رایج ملی با روشنایی‌ها و نورپردازی‌های مختلف همچون نور روز استاندارد CIE (D65)، نور لامپ تنگستن استاندارد CIE (A)، نور فلورسنت تجاری (TL84) و نور دیود ساطع‌کننده نور (LED) بوده است. لازم به ذکر است که این پژوهش بر ارزیابی پایداری رنگ در محدوده نور مرئی (۷۰۰-۴۰۰ نانومتر) متمرکز بوده و بررسی ویژگی‌های امنیتی فلورسنتی نزدیک با نور فرابنفش و یا فروسرخ خارج از محدوده این مطالعه است. نتایج این تحقیق می‌تواند به‌عنوان یک مبنای علمی برای طراحی و تولید اسکناس‌ها مورد استفاده قرار گیرد، به‌گونه‌ای که علاوه بر جنبه‌های زیبایی‌شناختی، قابلیت تشخیص و ویژگی‌های امنیتی اسکناس‌ها نیز بهبود یابد.

۲- بخش تجربی

۲-۱- نمونه‌ها

برای این مطالعه، دو نمونه اسکناس رایج ملی یعنی ۱۰ هزار تومانی و ۵۰ هزار تومانی انتخاب شدند (شکل ۱). برای حذف اثر زمان بر کیفیت اسکناس‌ها از انتخاب اسکناس‌های قدیمی و تا خورده و کثیف پرهیز شد. اسکناس‌های نو انتخاب شدند. انتخاب دو اسکناس ۱۰ و ۵۰ هزار تومانی که با هدف معرفی روش علمی برای ارزیابی پایداری رنگ در اسکناس، نشان دادن تأثیر منابع نوری مختلف بر ظاهر رنگ و ارائه شاخص‌های کمی (CMCCON02، حجم گستره رنگی) برای کنترل کیفیت صورت گرفته است، براساس معیارهای زیر انجام شد: الف - رایج‌ترین اسکناس‌ها: این دو اسکناس از پرکاربردترین اسکناس‌های در گردش پولی کشور هستند.



شکل ۱: نمونه اسکناس رایج ملی استفاده شده.

Figure 1: Sample of the used national currency banknote.

1. Color constancy
2. Daylight simulator
3. Incandescent

پیش‌بینی بازتولید رنگ مورد نیاز برای تغییرات در شرایط مشاهده استفاده کرد (۲۵).

۲-۲-۲ روش‌های ارزیابی پایداری رنگ

گام به گام مراحل محاسبه ضریب ناپایداری رنگ (CMCCON02) به شرح زیر معرفی می‌شوند (۲۹).

الف - تعیین مقادیر محرکه‌های سه‌گانه نمونه مورد آزمون (در این تحقیق اسکناس) زیر روشنایی D65 (X_r, Y_r, Z_r) و زیر روشنایی آزمایشی مورد توافق (X, Y, Z) مطابق اصول کلاسیک رنگ‌سنجی و از روی داده‌های انعکاسی نمونه آزمون و مقادیر توابع رنگ همانند.

ب- محاسبه پاسخ سلول‌های مخروطی چشم به نمونه آزمون (RGB) و پاسخ سلول‌های مخروطی چشم به نمونه سفید مرجع یا منعکس‌کننده پراکنده‌کننده کامل زیر روشنایی آزمایشی (R_w, G_w, B_w) و زیر روشنایی D65 (R_{wr}, G_{wr}, B_{wr}) با کمک رابطه ۱:

$$\left. \begin{aligned} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} &= M_{CAT02} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} R_w \\ G_w \\ B_w \end{pmatrix} &= M_{CAT02} \begin{pmatrix} X_w \\ 100 \\ Z_w \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} R_{wr} \\ G_{wr} \\ B_{wr} \end{pmatrix} &= M_{CAT02} \begin{pmatrix} X_{wr} \\ 100 \\ Z_{wr} \end{pmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

کمیت M_{CAT02} با کمک رابطه ۲ قابل محاسبه می‌باشد. همچنین مقادیر X_w, Y_w, Z_w و X_{wr}, Y_{wr}, Z_{wr} به ترتیب مقدار محرکه‌های سه‌گانه نمونه مرجع سفید زیر روشنایی D65 و زیر روشنایی آزمایشی را نشان می‌دهند. مقادیر Y_w, Y_{wr} نیز برابر ۱۰۰ تنظیم شده‌اند.

$$M_{CAT02} = \begin{pmatrix} 0.7328 & 0.4296 & -0.1624 \\ -0.7036 & 1.6975 & 0.0061 \\ 0.0030 & 0.0136 & 0.9834 \end{pmatrix} \quad (2)$$

ج - محاسبه پاسخ‌های سلول‌های مخروطی RGB مربوطه با استفاده از روابط (۳-۵).

$$R_c = R \left(\frac{R_{wr}}{R_w} \right) \quad (3)$$

$$G_c = G \left(\frac{G_{wr}}{G_w} \right) \quad (4)$$

$$B_c = B \left(\frac{B_{wr}}{B_w} \right) \quad (5)$$

ب- تنوع رنگی: این دو اسکناس دارای طیف رنگی و طراحی متفاوتی هستند که امکان مقایسه را فراهم می‌کند.

ج- نمونه‌برداری متنوع: از هر اسکناس، چندین ناحیه با رنگ‌های مختلف انتخاب شد (شکل ۱) که در مجموع طیف وسیعی از رنگ‌ها را پوشش می‌دهد.

اسکناس‌ها به‌طور عمده با رنگ‌ها و فام‌های مختلف طراحی شده‌اند تا عناصر امنیتی و زیبایی‌شناسی داشته باشند. بررسی یک بخش واحد نمی‌تواند پایداری رنگ کل اسکناس را نشان دهد. همچنین مطالعات علمی نشان می‌دهند که پایداری رنگ با منابع نوری مختلف می‌تواند بین بخش‌های مختلف با فام و خلوص‌های متفاوت فرق کند (۲۷، ۳۰، ۳۱). بنابراین برای یک ارزیابی جامع لازم بود نمونه‌برداری با هدف رنگ‌سنجی از نواحی متنوع اسکناس گرفته شود تا نتایج واقعی و قابل اتکا به دست آید. برای همین، به‌صورت تصادفی از نواحی با رنگ‌های متفاوت از نمونه‌های اسکناس رنگ‌سنجی انجام شد به‌گونه‌ای که حداکثر تنوع رنگی پوشش داده شود. این نواحی در شکل ۱ مشخص شده‌اند.

۲-۲ ویژگی پایداری رنگ

۲-۲-۱- تعریف

برای تضمین کیفیت بالای محصولات رنگی در صنایع مرتبط با رنگ، تمامی عوامل تولید باید بهینه شوند تا کیفیت ظاهری مطلوب حاصل گردد. یکی از عوامل مهم در این فرایند، پایداری رنگ است (۲۲). ویژگی پایداری یک رنگ یک پدیده دیداری است و توانایی و ابقا ظاهر یک رنگ با تغییرات در شرایط نوری مختلف بیان می‌شود (۲۳-۲۵). برای ارزیابی ویژگی ثبات رنگ، دو شاخص مهم ناپایداری رنگ؛ یعنی CMCCON97 و CMCCON02، توسط کمیته اندازه‌گیری رنگ، توسعه داده شده‌اند (۲۶، ۲۷). شاخص CMCCON97 توسط لو و هانت در سال ۱۹۹۷ براساس تبدیل تطبیق رنگی CMCCAT97^۳ پیشنهاد شد که می‌تواند رنگ‌های مربوطه، یعنی دو مجموعه از مقادیر سه محرک مربوط به ظاهر رنگی یکسان را برای ناظری که کاملاً تحت آزمایش و روشنایی‌های مرجع تطبیق داده شده است، به طور دقیق پیش‌بینی کند [۲۴]. پس از آن، تبدیل تطبیق رنگی CMCCAT97 اصلاح شد و یک تبدیل تطبیق رنگی جدید، CAT02، معرفی شد که بسیار ساده‌تر است زیرا برخلاف CMCCAT97 از هیچ ضریب اصلاحی برای کانال آبی استفاده نمی‌کند (۲۸). مدل‌های تطبیق رنگی، پیش‌بینی‌هایی از رنگ‌های مربوطه ارائه می‌دهند. بنابراین، می‌توان از آنها برای

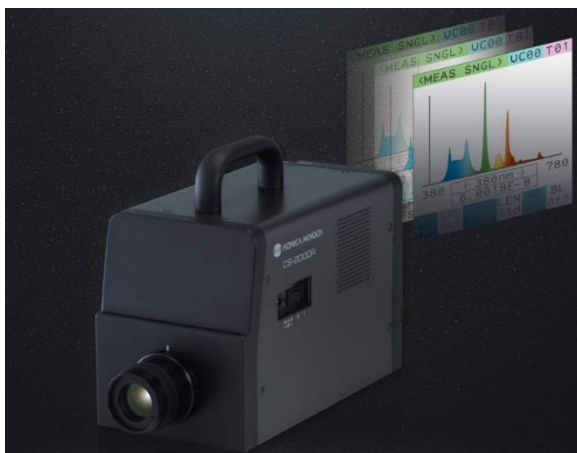
4. Tristimulus values
5. Illumination
6. Perfect reflecting diffuser
7. Corresponding

1. Color inconstancy index
2. Color Measurement Committee (CMC)
3. Chromatic adaptation transform

۴-۲- روشنایی ها مورد استفاده برای تحلیل پایداری رنگ

به منظور محاسبه میزان ناپایداری رنگ، لازم بود مشخص شود تغییرات رنگ در برابر کدام جفت روشنایی مورد ارزیابی قرار می گیرد. از آنجا که در ارزیابی ظاهر رنگ، روشنایی D65 به عنوان منبع مرجع و استاندارد بین المللی شناخته می شود، تمامی تغییرات رنگ نسبت به این روشنایی سنجیده می شود. برای بررسی رفتار نمونه ها در شرایط نوری مختلف، سه منبع نوری دیگر نیز انتخاب شدند (۳۲، ۱۹):

- روشنایی A که دارای طیف زرد و نمایانگر شرایط نوری خانگی و لامپ های تنگستن است؛
- روشنایی TL84 که یکی از پرکاربردترین لامپ های فلورسنت تجاری و نماینده محیط های فروشگاه های و اداری محسوب می شود؛
- روشنایی LED سفید که به عنوان نماینده نسل جدید منابع نوری در سال های اخیر کاربرد گسترده ای یافته است.



شکل ۲: تصویر طیف سنجی MiniScan EZ با هندسه 45°a:0°.

Figure 2: Image of the MiniScan EZ spectrophotometer with 45°a:0° geometry.



شکل ۳: نحوه قرارگیری نمونه ها داخل محفظه نوری برای رنگ سنجی.

Figure 3: Arrangement of samples inside the light cabinet for color measurement.

د - محاسبه مقادیر محرکه های سه گانه مربوطه زیر روشنایی D65 با استفاده از رابطه ۶.

$$\begin{pmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{pmatrix} = M_{CAT02}^{-1} \begin{pmatrix} R_c \\ G_c \\ B_c \end{pmatrix} \quad (6)$$

کمیت M_{CAT02}^{-1} با کمک رابطه ۷ محاسبه می گردد.

$$M_{CAT02}^{-1} = \begin{pmatrix} 1.096124 & -0.278869 & 0.182745 \\ 0.454369 & 0.473533 & 0.072098 \\ -0.009628 & -0.005698 & 1.015326 \end{pmatrix} \quad (7)$$

ه - محاسبه اختلاف رنگ بین مقادیر محرکه های سه گانه مربوطه زیر روشنایی D65 یعنی (X_c, Y_c, Z_c) و مقادیر اندازه گیری شده برای نمونه مورد آزمون زیر روشنایی D65 یعنی (X_r, Y_r, Z_r) به عنوان روشنایی مرجع. در محاسبه مقدار اختلاف رنگ معمولاً از معادله اختلاف رنگ CIELAB (ΔE_{ab}^*) استفاده می شود (رابطه ۸).

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(L_c^* - L_r^*)^2 + (a_c^* - a_r^*)^2 + (b_c^* - b_r^*)^2} \quad (8)$$

در رابطه ۸ کمیت های L^* ، a^* ، b^* و مقادیر رنگ پارامترهای رنگ (نامفهوم) در سیستم رنگ CIELAB هستند. در نهایت مقدار به دست آمده از رابطه ۸، معادل مقدار شاخص ناپایداری رنگ CMCCON02 می باشد.

۳-۲- رنگ سنجی

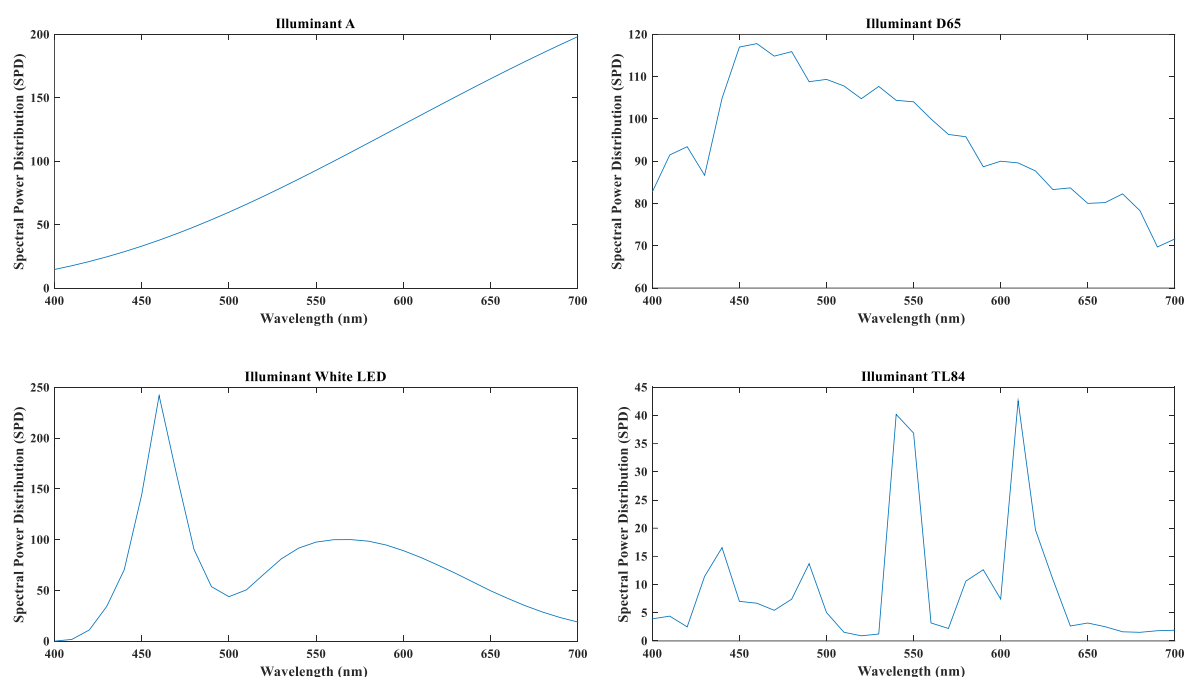
نمونه های اسکناس برای رنگ سنجی به دستگاه طیف سنج انعکاسی منتقل شدند. به دلیل کوچک بودن نواحی انتخاب شده روی اسکناس ها، رنگ سنجی با کمک دستگاه تابش سنج طیفی مدل CS-2000 ساخت کمپانی کونیکا مینولتا ژاپن (شکل ۲) با هندسه اندازه گیری 45°a:0° در محدوده ۷۰۰-۴۰۰ نانومتر با فواصل ۱۰ نانومتری از سطح نمونه ها داخل یک محفظه نوری انجام شد (شکل ۳). سپس، کمیت های رنگ در فضای رنگ CIELAB ($L^*a^*b^*$) با منبع نوری استاندارد D65 و مشاهده کننده ۱۹۶۱ (۱۰°) محاسبه گردید. برای اطمینان از تکرارپذیری نتایج، هر ناحیه رنگی ۳ بار اندازه گیری شد و میانگین مقادیر به عنوان داده نهایی در نظر گرفته شد. انحراف معیار اندازه گیری ها برای تمامی نواحی محاسبه شد و نتایج نشان دهنده تکرارپذیری مناسب اندازه گیری ها با انحراف معیار کمتر از ۰/۵ واحد CIELAB در اکثر نواحی بود. داده های رنگ سنجی حاصل برای محاسبه شاخص ناپایداری رنگ و تحلیل گستره رنگی مورد استفاده قرار گرفتند.

1. Spectroradiometer

فام‌های گرم و کاهش وضوح رنگ‌های سرد مانند آبی می‌شود.

- **نور TL84** دارای قله‌هایی در ناحیه سبز-زرد است که رنگ‌های میانی را تقویت می‌کند.
 - **نور LED سفید** با قله بارز در ناحیه آبی (حدود ۴۵۰ نانومتر)، باعث برجسته‌شدن رنگ‌های سرد و افزایش درخشندگی نواحی آبی و سبز اسکناس‌ها می‌شود.
- این تفاوت‌های طیفی منجر به تغییر در ادراک رنگ، حجم گستره رنگی و شاخص پایداری رنگ اسکناس‌ها تحت منابع نوری مختلف می‌گردد. همچنین در جدول ۱ ویژگی‌های روشنایی‌های استفاده شده گزارش شده است.

1. Spectral power distribution (SPD)



شکل ۴: منحنی توزیع انرژی طیفی چهار روشنایی‌های انتخاب‌شده (D65, A, TL84, White LED).

Figure 4: Spectral power distribution curves of the four selected illuminants used (D65, A, TL84, White LED).

جدول ۱: ویژگی‌های روشنایی‌های استفاده‌شده.

Table 1: Characteristics of the illuminants used.

Illuminant	Type	CCT (K)	CRI	Typical Application	Reference
D65	Standard daylight (synthetic daylight)	~6500	95–100	Standard colorimetric evaluations; printing; quality control	ASTM E308; CIE 015:2018; ISO/CIE 11664-2:2022
A	Incandescent tungsten filament	~2856	~100	Indoor warm lighting; classic tungsten environments	CIE 015:2018; ISO 7589:2002
TL84	Triphosphor fluorescent lamp	~4000	80–86	Retail stores; commercial lighting	CIE TN 001:2014; IEC 60081:1997
White LED	Phosphor-converted LED (pc-LED)	3000–6500 (typ. 4000–5000)	80–95	General indoor lighting; offices; modern environments	IEC 62722-2-1:2023

۵-۲- تعیین گستره رنگ و حجم آن

در این تحقیق همچنین گستره رنگ هر دو نمونه اسکناس در زیر ۴ روشنایی انتخاب شده یعنی D65, A, TL84, White LED تعیین شد. به این منظور، برای محاسبه حجم گستره رنگ به صورت یک مقدار عددی، از داده‌های رنگ در سامانه CIELAB استفاده شد. برای محاسبه حجم گستره، نقاط رنگی هر اسکناس تحت هر منبع نور به صورت مجموعه‌ای سه‌بعدی در فضای (L^*, a^*, b^*) وارد شدند و سپس حجم محدب محاسبه گردید. داده‌های رنگی هر ناحیه اسکناس ابتدا در فضای رنگ CIELAB با منبع نور مرجع D65 محاسبه شدند. دامنه محورها (L^*) مطابق استاندارد CIE در بازه ۰-۱۰۰ تنظیم شد و مختصات $(a^*$ و $b^*)$ بدون نرمال‌سازی اضافی در مقیاس عددی خروجی دستگاه طیف‌سنج استفاده شدند. این محاسبه با بهره‌گیری از کدی که در محیط برنامه‌نویسی MATLAB نوشته شده بود و با استفاده از روش حجم پوسته محدب انجام گرفت [۳۳]. نمونه‌های اسکناس ابتدا با استفاده از پویشگر Epson PERFECTION V700 PHOTO و با بزرگ‌نمایی ۲۰۰ dpi اسکن شده و در قالب فایل TIFF ذخیره شدند. سپس تصاویر به برنامه‌ای که در محیط MATLAB توسعه یافته بود وارد شدند و گستره رنگ و حجم آن تحت چهار روشنایی مختلف و در فضای رنگ sRGB محاسبه و ترسیم گردید.

گستره رنگی محدوده‌ای از رنگ‌ها را نشان می‌دهد که نمونه می‌تواند بازتاب دهد یا نمایش دهد و بیانگر تنوع و وسعت رنگ‌های موجود در طرح است. گستره رنگی نمونه‌های اسکناس، علاوه بر نمایش دامنه رنگ‌های موجود، امکان ارزیابی کیفیت چاپ و ثبات رنگ را فراهم می‌کند. مقایسه گستره رنگی نمونه‌ها با گستره رنگی مرجع نشان‌دهنده یکسانی یا اختلاف در بازتولید رنگ‌هاست و می‌تواند انحرافات ناشی از فرایند چاپ یا ترکیب جوهر را آشکار کند. همچنین، پایش تغییرات گستره رنگی پس از قرارگیری در شرایط محیطی مختلف، اطلاعاتی درباره کاهش عمق رنگ، تغییر فام و پایداری رنگ نمونه‌ها ارائه می‌دهد. بدین ترتیب، تحلیل گستره رنگی ابزار مفیدی برای کنترل فرایندهای رنگ‌سنجی و تضمین کیفیت رنگ در تولید اسکناس‌ها محسوب می‌شود.

۶-۲- تحلیل نتایج

به منظور بررسی تأثیر نوع منبع نوری بر پایداری رنگ اسکناس‌ها، داده‌ها با استفاده از آزمون‌های آماری ANOVA مورد تحلیل قرار گرفتند. در این تحلیل، دو عامل مستقل شامل نوع اسکناس (۱۰ هزار تومانی و ۵۰ هزار تومانی) و نوع منبع نوری (D65-A, D65-White LED, TL84) در نظر گرفته شدند. به همین دلیل از آزمون واریانس دوطرفه (Two-Way ANOVA) استفاده شد تا اثر هر عامل و همچنین تعامل آن‌ها بر نتایج مشخص شود.

۳- نتایج و بحث

۱-۳- تحلیل رنگ نمونه‌های اسکناس انتخاب شده

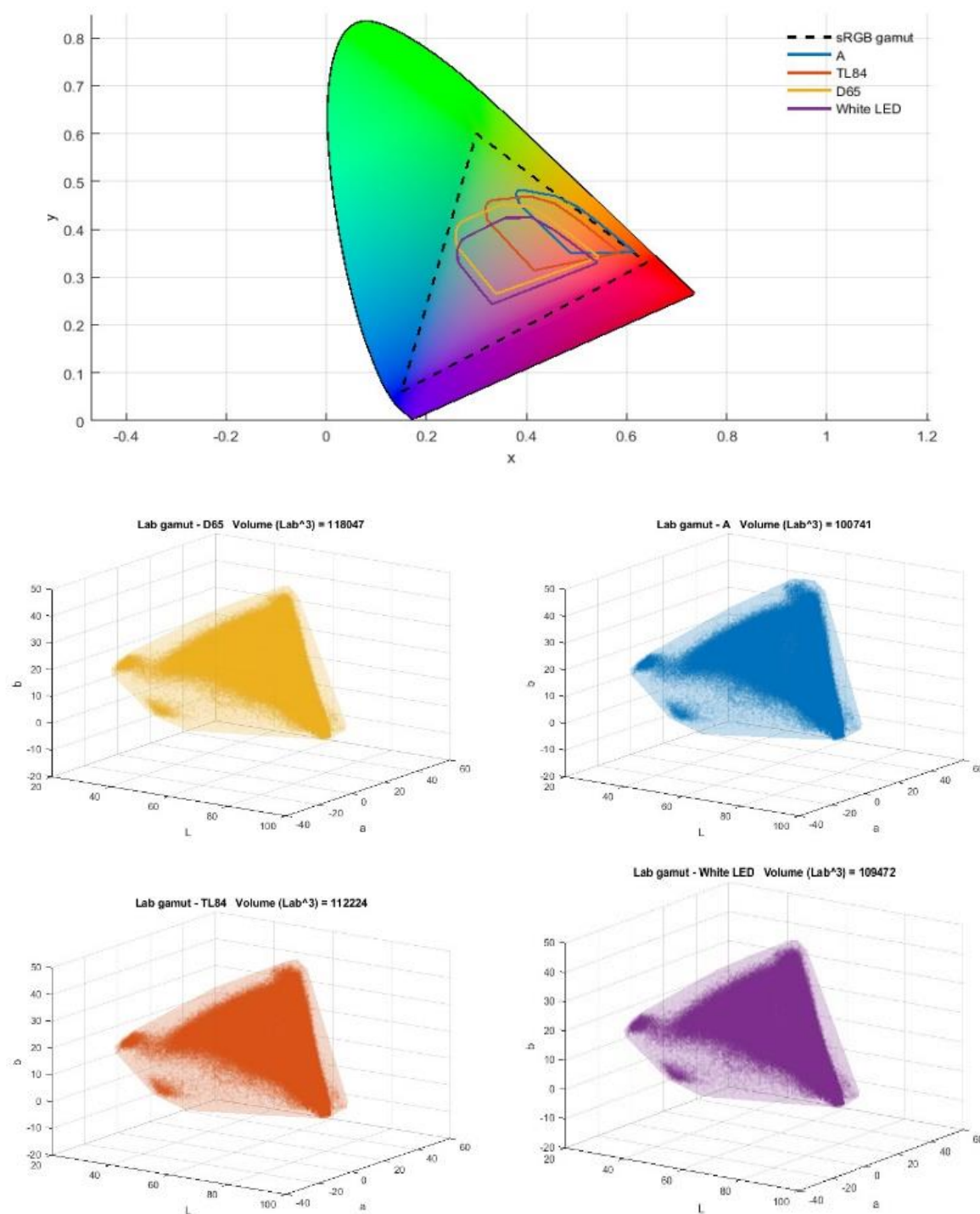
در مرحله نخست، به منظور درک جامع‌تر از گستره رنگی به‌کاررفته در طراحی اسکناس، گستره رنگ نمونه‌ها ترسیم شد (شکل‌های ۵ و ۶). در شکل ۵ و ۶ گستره رنگ نمونه‌های اسکناس زیر ۴ روشنایی D65, A, TL84, White LED رسم شده است. همچنین مقادیر حجم هر گستره رنگی در جدول ۲ برای مقایسه گزارش شده است. نتایج حاصل از بررسی گستره رنگ اسکناس‌های ۵۰ هزار و ۱۰ هزار تومانی با چهار منبع نوری D65, A, TL84, White LED نشان می‌دهد که نوع منبع نور تأثیر قابل‌توجهی بر وسعت ناحیه رنگی قابل ادراک از آنها دارد. در شکل‌های ۵ و ۶ گستره رنگ برای هر دو نمونه اسکناس در چهار روشنایی نمایش داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، بیشترین وسعت گستره رنگی در هر دو نمونه مربوط به روشنایی D65 (نور استاندارد روز) بوده و کمترین آن در روشنایی A (نور تنگستن) به دست آمده است. کاهش حجم گستره رنگی اسکناس‌ها با روشنایی A (نور تنگستن) به علت ماهیت طیفی این منبع نور قابل توضیح است. روشنایی A دارای توزیع طیفی بسیار متمایل به ناحیه قرمز و نزدیک فروسرخ است و در محدوده آبی و سبز انرژی بسیار کمتری نسبت به D65 تولید می‌کند.

1. The convex hull volume

جدول ۲: حجم گستره رنگ محاسبه‌شده برای نمونه‌های اسکناس در زیر چهار روشنایی D65, A, TL84, White LED.

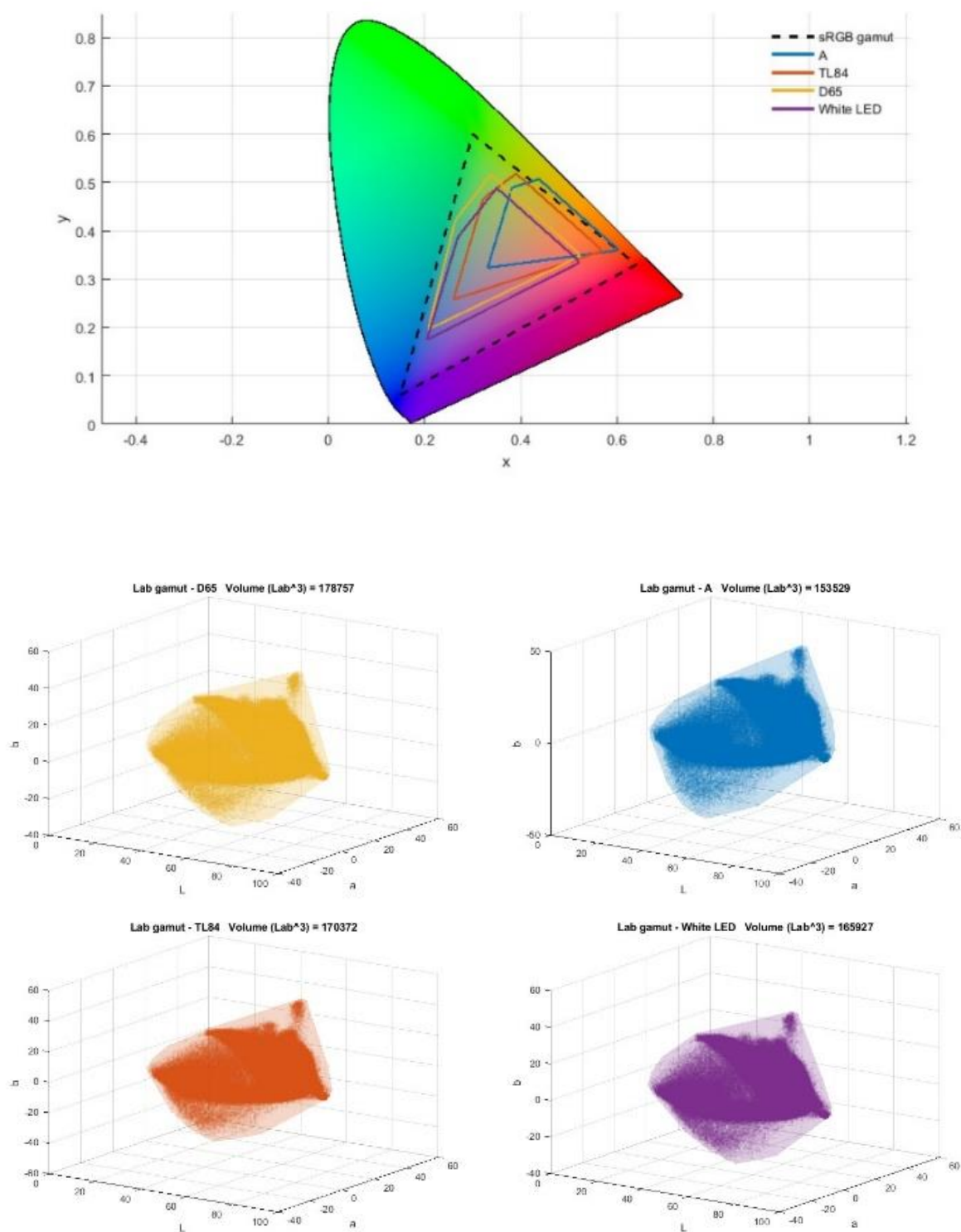
Table 2: Calculated color gamut volume for banknote samples under four illuminations: D65, A, TL84, and White LED.

Banknote	Color gamut volume			
	D65	A	TL84	White LED
10000 Tomans	178757	153529	170372	165927
50000 Tomans	118047	100741	112224	109472



شکل ۵: گستره رنگ به دست آمده برای نمونه اسکناس ۵۰ هزار تومانی در زیر چهار روشنایی D65, A, TL84, White LED.

Figure 5: Color gamut obtained for the 50,000 Toman banknote sample under four illuminations of D65, A, TL84, and White LED.



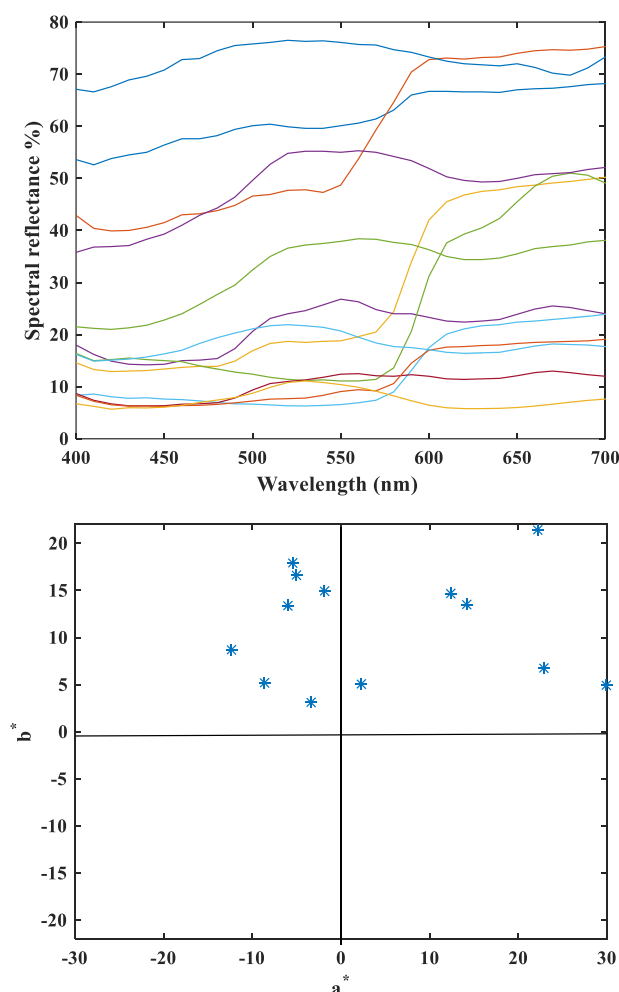
شکل ۶: گستره رنگ به‌دست آمده برای نمونه اسکناس ۱۰ هزار تومانی در زیر چهار روشنایی D65, A, TL84, White LED.

Figure 6: Color gamut obtained for the 10,000 Toman banknote sample under four illuminations: D65, A, TL84, and White LED.

بیانگر رفتار رنگی پایدار اسکناس‌ها در محیط‌های نوری روزمره است. در مجموع، رفتار تغییر گستره رنگی در هر دو اسکناس مشابه بوده و نسبت گستره رنگی در D65 به A برای هر دو نمونه تقریباً برابر (حدود ۱/۱۶-۱/۱۷) است، که نشان از پایداری نسبی رنگ در برابر تغییر منبع نور دارد. این پایداری می‌تواند به‌عنوان یکی از شاخص‌های ارزیابی کیفیت مرکب‌های امنیتی و قابلیت اطمینان چاپ اسکناس‌ها در برابر تغییر شرایط نوری مورد توجه قرار گیرد.

۲-۳- تحلیل ویژگی پایداری رنگ در نواحی مختلف

در شکل ۷ منحنی انعکاسی نواحی مختلف اسکناس‌ها (مشخص در شکل ۱) به‌همراه موقعیت آنها در صفحه a^*-b^* نشان داده شده است. نتایج شکل ۷ نشان‌دهنده بهره‌گیری از رنگ‌های متنوع و با فام‌های گوناگون در طراحی آن اسکناس‌ها می‌باشد.



شکل ۷: انعکاس طیفی نواحی مختلف بر روی نمونه‌های اسکناس و توزیع مختصات رنگ آنها در صفحه a^*-b^*

Figure 5: Spectral reflectance of the selected areas on the banknote samples and the distribution of their color coordinates in the a^*-b^* plane.

این عدم توازن طیفی موجب کاهش تحریک کانال‌های S (آبی) و M (سبز) سیستم بینایی شده و در مقابل تنها موجب تحریک بیش‌ازحد کانال L (قرمز) می‌شود. این شرایط باعث می‌شود رنگ‌هایی که بیشترین بازتاب آنها در ناحیه طول‌موج‌های کوتاه‌تر طیف مرئی قرار دارد—از جمله رنگ‌های آبی، سبز، فیروزه‌ای و بنفش—که سهم قابل‌توجهی از گستره رنگی (گاموت) منبع نوری D65 را تشکیل می‌دهند، بیش از سایر رنگ‌ها تحت تأثیر قرار گیرند. از آنجا که گستره رنگ در فضای CIELAB ناشی از تفاوت‌های ادراکی بین فام‌ها و خلوص رنگ‌هاست، کاهش توان نور آبی/سبز موجب فشرده‌شدن محسوس گستره رنگی و کوچک‌شدن محدوده قابل‌نمایش آن می‌شود. در مقابل، D65 دارای انرژی طیفی متعادل‌تری در کل طیف مرئی است و تحریک تقریباً یکنواخت سه کانال بینایی موجب تولید گستره بزرگ‌تری از رنگ‌های قابل‌تمایز و افزایش حجم گستره رنگی می‌شود. بنابراین، اختلاف زیاد بین SPD روشنایی A و D65 (شکل ۴) علت اصلی کاهش دامنه تغییرات رنگ و در نتیجه کوچک‌تر شدن حجم گستره رنگی با نور A است. این موضوع بیانگر آن است که در نور طبیعی روز، تنوع و درخشندگی رنگ‌های به‌کاررفته در اسکناس‌ها بیشترین مقدار را دارد، در حالی که با نورهای گرم‌تر مانند تنگستن، محدوده رنگی کاهش یافته و رنگ‌ها با تمایه‌ای زرد یا نارنجی و با تباین کمتر دیده می‌شوند.

مقادیر عددی حجم گستره رنگی در جدول ۱ نشان می‌دهد که اسکناس ۱۰ هزار تومانی با مقدار گستره رنگی ۱۷۸/۷۵۷ واحد در روشنایی D65، وسعت رنگ بیشتری نسبت به اسکناس ۵۰ هزار تومانی با ۱۱۸/۰۴۷ واحد دارد. این اختلاف (حدود ۵۰ درصد) می‌تواند ناشی از تفاوت در ترکیب رنگ‌دانه‌ها، ساختار چاپ، یا نوع مرکب‌های امنیتی مورد استفاده در هر اسکناس باشد. به عبارت دیگر، اسکناس ۱۰ هزار تومانی دارای تنوع رنگی بیشتر و نواحی با فام‌های اشباع‌تر (به‌ویژه در بخش‌های آبی و سبز) است، در حالی که اسکناس ۵۰ هزار تومانی عمدتاً از رنگ‌های با خلوص کمتر و طیف محدودتر استفاده می‌کند. همین گستره وسیع‌تر رنگ‌ها در اسکناس ۱۰ هزار باعث می‌شود نقاط رنگی آن در فضای CIELAB پراکندگی بیشتری داشته باشند و در نتیجه حجم گستره رنگی محاسبه‌شده بزرگ‌تر باشد. بنابراین، تفاوت مشاهده‌شده ناشی از طراحی گرافیکی و انتخاب مرکب‌های چاپی متفاوت در دو اسکناس است و صرفاً از خطای محاسباتی نیست.

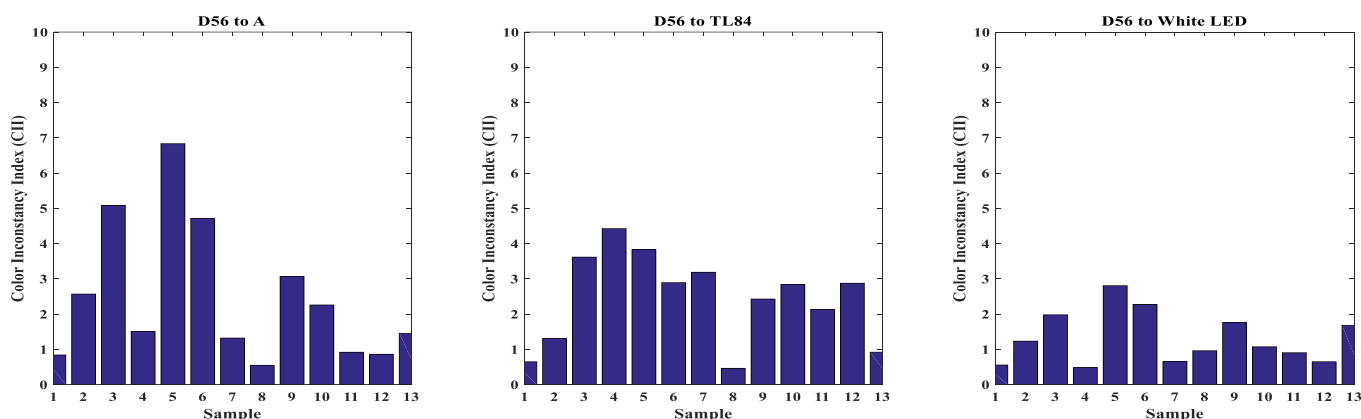
از سوی دیگر، بررسی مقادیر گستره رنگی در روشنایی‌های TL84 و White LED نشان می‌دهد که تفاوت بین این دو منبع نوری نسبتاً اندک است، اما در هر دو نمونه، گستره رنگی در TL84 اندکی بزرگ‌تر از White LED بوده است. این یافته از دیدگاه کاربردی قابل‌توجه است، زیرا روشنایی TL84 نماینده شرایط نوری در فضاهای تجاری (فروشگاهی) است و نزدیکی نتایج آن به LED

روند کاهش میانگین و دامنه از D65 → D65-TL84 → D65-A، White LED، ارتباط مستقیمی با نزدیکی طیف نوری منبع دوم به D65 دارد؛ یعنی هرچه طیف منبع دوم مشابه‌تر به D65 باشد، ناپایداری رنگ کمتر است. در شکل ۹، میزان تغییرات ظاهر رنگ نمونه‌های اسکناس در گذر از روشنایی مرجع به روشنایی آزمون (جفت روشنایی‌های D65-A، D65-TL84 و D65-White LED) نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد بیشترین تغییرات رنگ در حالت D65-A می‌باشد.

برای نمونه در شکل ۱۰ اسکناس ۱۰ هزار تومانی زیر دو منبع روشنایی D54 و A نشان داده شده است. مقدار تغییرات رنگ در برخی نواحی کاملاً محسوس است.

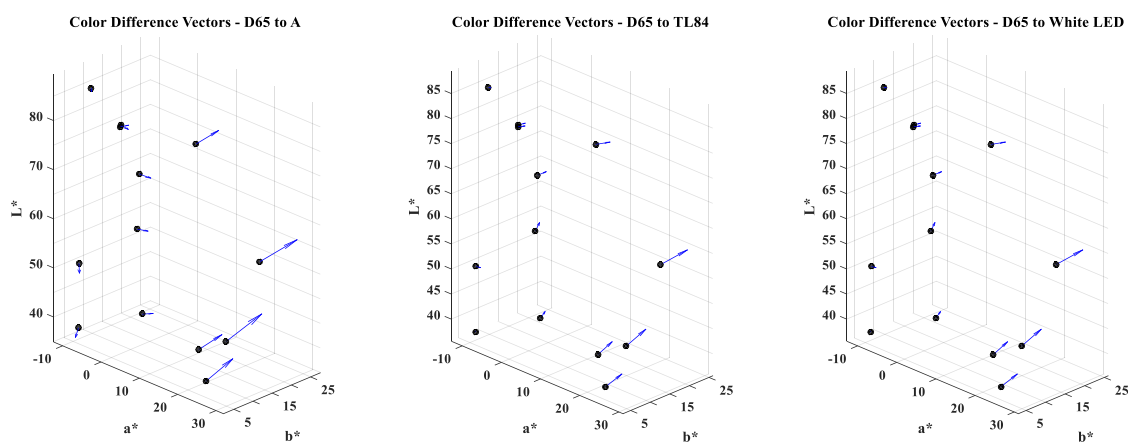
مقادیر ضریب ناپایداری رنگ برای جفت روشنایی‌های D65-A، D65-TL84 و D65-White LED در شکل ۸ رسم شده است. مبدا همه تغییرات رنگ روشنایی مرجع یعنی D65 بوده است. نتایج شکل ۸ نشان می‌دهد با گذر از روشنایی مبدا (D65) و رسید به روشنایی‌های آزمون (A، TL84 و White LED) در هر مورد تغییر در رنگ کلی رخ می‌دهد. نتایج بدست آمده از شکل ۸ در جدول ۲ تحلیل شده‌اند.

از نتایج جدول ۲ مشاهده می‌گردد بیشترین میانگین و دامنه تغییر مربوط به جفت روشنایی D65-A است، که نشان‌دهنده بیشترین تغییرات رنگ در گذر از نور روز به نور تنگستن است. در مقابل، کمترین مقادیر به جفت روشنایی D65-White LED تعلق دارد، که بیانگر پایداری رنگ بهتر در نورهای سفید مصنوعی است.



شکل ۸: مقادیر ضریب ناپایداری رنگ نمونه‌های اسکناس برای جفت روشنایی‌های D65-A، D65-TL84 و D65-White LED.

Figure 8: Values of the color inconstancy index of the banknote samples for the illuminant pairs D65-A, D65-TL84, and D65-White LED.



شکل ۹: مقدار و جهت تغییرات رنگ به‌دست آمده برای نمونه‌های اسکناس برای گذر از روشنایی مرجع D65 به روشنایی‌های A، TL84 و White LED.

Figure 9: The magnitude and direction of color changes obtained for the banknote samples when transitioning from the reference illuminant D65 to illuminants A, TL84, and White LED.

جدول ۲: شاخص‌های آماری ضریب ناپایداری رنگ برای جفت روشنایی‌های مختلف.

Table 2: Statistics of the color inconstancy index for different illuminant pairs.

Illuminant pairs	ΔE_{ab}^*			
	Mean	Minimum	Maximum	Range
D65-A	2.4583	0.5455	6.8330	6.2875
D65-TL84	2.4269	0.4603	4.4227	3.9624
D65-White LED	1.3078	0.4862	2.8041	2.3179

H₁: میانگین ناپایداری رنگ در دو اسکناس تفاوت معنی‌داری دارد.

ب- اثر نوع منبع نوری:

H₀: میانگین ناپایداری رنگ در سه منبع نوری تفاوت معنی‌داری

ندارد.

H₁: حداقل یک جفت از منابع نوری تفاوت معنی‌داری دارند.

ج - اثر تعاملی^۱

H₀: اثر تعاملی بین نوع اسکناس و منبع نوری وجود ندارد.

H₁: اثر تعاملی معنی‌داری وجود دارد.

1. Interaction

۳-۳- تحلیل آماری نتایج

نتایج در نهایت توسط آزمون ANOVA تحلیل آماری شدند (جدول ۳). این تحلیل آماری به منظور بررسی تأثیر نوع منبع نوری (D65- A, D65-TL84, D65-White LED) بر پایداری رنگ دو اسکناس رایج ملی (۱۰ و ۵۰ هزار تومانی) انجام شده است. از آنجا که داده‌ها شامل دو عامل مستقل (نوع اسکناس و نوع منبع نوری) هستند، از تحلیل واریانس دو طرفه (Two-Way ANOVA) استفاده شده است. در این آزمون عوامل نوع اسکناس (۱۰ هزار تومانی، ۵۰ هزار تومانی) در دو سطح (و نوع منبع نوری D65-A, D65-TL84, D65-White LED در سه سطح) بود. فرضیه‌های این آزمون عبارت بودند از:

الف - اثر نوع اسکناس:

H₀: میانگین ناپایداری رنگ در دو اسکناس تفاوت معنی‌داری ندارد.

جدول ۳: نتایج آماری آزمون ANOVA برای داده‌های به‌دست آمده از شاخص ناپایداری رنگ زیر منابع نوری مختلف.

Table 3: Statistical ANOVA results for the Color Inconstancy Index obtained under different illuminants.

Tests of Between-Subjects Effects					
Dependent Variable: Color		In Constancy Index			
Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	24.102 ^a	5	4.820	2.706	.037
Intercept	159.101	1	159.101	89.316	.000
Illuminant Pair	10.370	2	5.185	2.911	.069
Bank Note Type	9.239	1	9.239	5.187	.029
Illuminant Pair × Bank Note Type	3.617	2	1.809	1.015	.373
Error	58.784	33	1.781		
Total	248.922	39			
Corrected Total	82.886	38			
a. R Squared = .291 (Adjusted R Squared = .183)					
Significance Levels:					
(P > 0.05): Not significant – the difference is likely due to chance					
(P < 0.05): Significant – the difference is real with 95% confidence					
(P < 0.01): Highly significant – the difference is real with 99% confidence					
(P < 0.001): Very highly significant – the difference is real with 99.9% confidence					

تغییرات رنگ در شرایط نور مختلف مشابه است و طراحی رنگ می‌تواند مستقل از نوع نور انجام شود. این تحلیل نشان می‌دهد که در مطالعات مرتبط با پایداری رنگ اسکناس‌ها، نوع اسکناس مهم‌ترین عامل تعیین‌کننده است و مدل ارائه شده می‌تواند بخشی از تغییرات ناپایداری رنگ را توضیح دهد، در حالی که عوامل محیطی یا ترکیبات رنگی دیگر ممکن است سهم باقی‌مانده تغییرات را ایجاد کنند.

پایداری رنگ در طراحی و انتخاب رنگ برای اسکناس اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا رنگ یکی از شاخص‌های اصلی شناسایی و تمایز اسکناس‌هاست. تغییرات رنگ در شرایط نور مختلف می‌تواند باعث اشتباه در تشخیص اسکناس‌ها شود و حتی در فرایندهای نظارتی و کنترل کیفیت مشکلاتی ایجاد کند. با تحلیل داده‌های پایداری رنگ، می‌توان رنگ‌هایی را انتخاب کرد که تحت روشنایی‌های مختلف کمترین تغییر را نشان می‌دهند و بنابراین، شناسایی آن‌ها برای افراد سریع و دقیق‌تر خواهد بود. این بررسی‌ها به طراحان امکان می‌دهد تا طراحی رنگ اسکناس را به صورت علمی و مبتنی بر معیارهای کمی انجام دهند و صرفاً براساس تجربه یا قضاوت دیداری نباشد. علاوه بر این، پایداری رنگ به تضمین هماهنگی رنگ‌ها در چاپ‌های مختلف و جلوگیری از اختلاف رنگ بین نمونه‌ها کمک می‌کند و نقش مهمی در استانداردسازی و کیفیت طراحی اسکناس دارد.



شکل ۱۰: نمایش اسکناس ۱۰ هزار تومانی زیر منبع روشنایی مرجع D65 (راست) و A (چپ).

Figure 10: Representation of the 10,000-toman banknote under the reference illuminants D65 (right), and A (left).

تحلیل واریانس دوطرفه^۱ نشان داد که نوع اسکناس (۱۰ هزار و ۵۰ هزار تومانی) تأثیر آماری معناداری بر ضریب ناپایداری رنگ دارد ($P=0.029$, $F=5/187$). این نتیجه بیانگر آن است که اسکناس‌ها در برابر تغییرات روشنایی، رفتار رنگی متفاوتی دارند و طراحی رنگ آن‌ها باید با توجه به نوع اسکناس بهینه‌سازی شود. به عبارت دیگر، اسکناس‌های مختلف نسبت به منابع نور واکنش متفاوتی از خود نشان می‌دهند که این موضوع اهمیت طراحی رنگ مناسب برای هر اسکناس را تأکید می‌کند.

اثر جفت روشنایی‌ها با $F=2/911$ و $P=0.069$ نزدیک به سطح معناداری است اما از نظر آماری قابل قبول نیست. این نکته نشان می‌دهد که نوع منبع نوری می‌تواند تأثیر نسبی روی ناپایداری رنگ داشته باشد، اما تفاوت‌ها در سطحی نیستند که بتوان آن را معنادار تلقی کرد. مشاهدات جزئی نشان می‌دهد بیشترین تغییرات رنگ در جفت روشنایی D65-A و کمترین آن در D65-White LED رخ داده است، که با نتایج مقاله اصلی هم‌خوانی دارد.

تعامل بین نوع اسکناس و نوع روشنایی آئیز غیرمعنادار است ($P=0.373$, $F=1/15$). این نتیجه بیانگر آن است که الگوی تغییرات رنگ در هر دو اسکناس تحت منابع نور مختلف مشابه است و هیچ اسکناس خاصی نسبت به یک منبع نور واکنش متفاوتی نشان نمی‌دهد. این یافته با مشاهده ثابت‌بودن نسبت گستره رنگی ($1/17-1/16$) در هر دو اسکناس هم‌راستا است، به طوری که توزیع تغییرات رنگ در شرایط نوری متفاوت پایدار و مشابه است.

ضریب تعیین مدل (R^2) برابر با 0.291 و ضریب تعیین تعدیل‌شده 0.183 گزارش شده است، که نشان می‌دهد حدود ۱۸-۲۹ درصد از تغییرات ضریب ناپایداری رنگ توسط متغیرهای مستقل مدل (نوع اسکناس و جفت روشنایی‌ها) تبیین می‌شود. این مقدار R^2 نسبتاً متوسط است و نشان می‌دهد علاوه بر نوع اسکناس، عوامل دیگری نیز ممکن است بر ناپایداری رنگ تأثیرگذار باشند که در این مدل لحاظ نشده‌اند.

بنابراین نتیجه می‌شود که نوع اسکناس عامل اصلی تعیین‌کننده ناپایداری رنگ است و باید در طراحی رنگ و انتخاب مواد رنگی مدنظر قرار گیرد. تأثیر منابع روشنایی نسبت به نوع اسکناس کمتر و نزدیک به معناداری است؛ بنابراین تنظیم اختصاصی برای هر منبع نور الزامی نیست، اما می‌تواند در بهینه‌سازی رنگ لحاظ شود. عدم وجود تعامل معنادار بین اسکناس و روشنایی نشان می‌دهد که الگوی

1. Two-Way ANOVA
2. Illuminant Pair
3. Bank Note $\times$ Illuminant Pair

۴- نتیجه‌گیری

خلوص بالا رخ می‌دهد، در حالی که نواحی با منحنی انعکاس یکنواخت‌تر (مانند رنگ‌های خاکستری یا کم‌خلوص) رفتار پایداری‌تری نشان می‌دهند. این الگو با اصول تطبیق رنگی و نظریه ظاهر رنگ سازگار است و اهمیت استفاده از مرکب‌هایی با حساسیت طیفی کنترل‌شده را در طراحی اسکناس تأیید می‌کند. روش ارائه‌شده در این پژوهش — شامل محاسبه CMCCON02، تحلیل گستره رنگی و رنگ‌سنجی چندناحیه‌ای — یک چارچوب عملی و قابل تعمیم برای ارزیابی پایداری رنگ در انواع اسکناس‌ها فراهم می‌کند. این روش می‌تواند در انتخاب ترکیب رنگ، مقایسه سری‌های چاپی، بررسی تأثیر تغییرات مواد اولیه و حتی ارزیابی عملکرد دستگاه‌های شمارش و تشخیص اسکناس کاربرد داشته باشد. هرچند مطالعه حاضر محدود به دو اسکناس رایج بود، سازگاری نتایج بین نواحی مختلف نشان می‌دهد که روش پیشنهادی قابلیت تعمیم‌پذیری بالایی دارد و می‌تواند مبنای پژوهش‌های گسترده‌تر بر روی اسکناس‌های دیگر باشد. باید توجه داشت که محدوده این پژوهش ارزیابی پایداری رنگ اسکناس‌ها در طیف نور مرئی و تحت روشنایی‌های استاندارد بوده است. ویژگی‌های امنیتی فلورسنسی که با پرتو فرابنفش (UV) آشکار می‌شوند و یکی از مهم‌ترین عناصر تشخیص اصالت اسکناس هستند، در این مطالعه مورد بررسی قرار نگرفته‌اند که می‌تواند موضوع مطالعات آتی قرار گیرد.

تشکر و قدردانی

بدین وسیله از حمایت‌های مادی و معنوی پژوهشگاه رنگ تشکر و قدردانی می‌شود.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

یافته‌های این پژوهش نشان داد که رفتار رنگی اسکناس‌ها در برابر تغییر منبع نور نه تنها تابع ویژگی‌های طیفی مرکب‌هاست، بلکه به گستره رنگی و ترکیب فام‌های به‌کاررفته در طراحی نیز وابسته است. تحلیل مقادیر CMCCON02 آشکار کرد که بیشترین تغییر ظاهر رنگ در گذار از روشنایی D65 به روشنایی A رخ می‌دهد؛ این موضوع از نظر فیزیکی قابل انتظار است، زیرا تفاوت شدید در توزیع توان طیفی (SPD) این دو منبع نوری موجب جابه‌جایی قابل‌توجه در محرک‌های سه‌گانه رنگی و در نتیجه تغییر در مختصات CIELAB می‌شود. در مقابل، روشنایی TL84 و LED سفید رفتار پایداری‌تری نسبت به D65 نشان دادند، به‌ویژه روشنایی LED که کمترین مقادیر ناپایداری را ایجاد کرد. این موضوع نشان می‌دهد که شباهت طیفی منبع نور به D65 نقش تعیین‌کننده‌ای در میزان تغییر رنگ ادراک‌شده دارد. بنابراین، از منظر کاربردی می‌توان نتیجه گرفت که اسکناس‌ها در اغلب محیط‌های امروزی — که عمدتاً بر نورهای سفید LED متکی هستند — از ثبات رنگی مناسبی برخوردارند و احتمال خطای دیداری در تشخیص رنگی آن‌ها کمتر است. تحلیل حجم گستره رنگی نیز نشان داد که اسکناس ۱۰ هزار تومانی، به‌دلیل تنوع طیفی بیشتر و گستره رنگی وسیع‌تر، حساسیت بالاتری نسبت به تغییر روشنایی در مقایسه با اسکناس ۵۰ هزار تومانی دارد. اختلاف حدود ۳۰ تا ۵۰ درصدی حجم گستره رنگی بین دو اسکناس نشان‌دهنده تفاوت‌های بنیادی در مواد رنگی و طراحی چاپ آن‌هاست. این یافته از لحاظ کنترل کیفیت اهمیت دارد، زیرا گستره رنگی بزرگ‌تر لزوماً به معنای تنوع بیشتر رنگ است، اما در عین حال می‌تواند حساسیت بیشتری نسبت به تغییر روشنایی ایجاد کند و باید در انتخاب مرکب و طراحی فام‌های حساس (به‌ویژه آبی و سبز) مدنظر قرار گیرد. از منظر تحلیلی، نتایج نشان می‌دهد که تغییرات رنگ بیشتر در فام‌های دارای قله انعکاسی باریک یا رنگ‌های با

۵- مراجع

1. Sarkar S, Pal AK. Paper currency: a systematic review of design, security features, and counterfeit detection. *Acta Graphica*. 2024;32(2):84–97.
2. Penrose J. Designing the nation: banknotes, banal nationalism and alternative conceptions of the state. *Political Geography*. 2011;30(8):429–440. <https://doi.org/10.1016/j.polgeo.2011.09.007>.
3. Penrose J, Cumming C. Money talks: banknote iconography and symbolic constructions of Scotland. *Nations Nationalism*. 2011;17(4):821–842. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8129.2011.00514.x>.
4. Tomar A, Gupta RR, Mehta SK, Sharma S. An overview of security materials in banknotes and analytical techniques in detecting counterfeits. *Crit Rev Anal Chem*. 2024;54(8):2865–2878. <https://doi.org/10.1080/10408347.2023.2209185>.
5. Wang H, Sun L. Materials and society: functional chemicals and materials in banknote and security paper. *Acc Mater Res*. 2021;2(1):1–6. <https://doi.org/10.1021/accountsmr.0c00071>.
6. Ferrero R, Montrucchio B. Banknote identification through unique fluorescent properties. *IEEE Trans Dependable Secure Comput*. 2024;21(2):975–986. <https://doi.org/10.1109/TDSC.2023.3267166>.
7. Chia TH, Levene MJ. Detection of counterfeit U.S. paper money using intrinsic fluorescence lifetime. *Opt Express*. 2009;17(24):22054–22061. doi:10.1364/OE.17.022054.
8. Andrès J, Hersch RD, Moser JE, Chauvin AS. A new anti-counterfeiting feature relying on invisible luminescent full-

- color images printed with lanthanide-based inks. *Adv Funct Mater.* 2014;24(32):5029–5036. <https://doi.org/10.1002/adfm.201400298>.
9. Ojedo F, Macizo P. The value of banknotes: relevance of size, colour and design. *Psychol Res.* 2023;87:1944–1952. <https://doi.org/10.1007/s00426-022-01764-x>.
 10. van der Horst F, Snell J, Theeuwes J. Enhancing banknote authentication by guiding attention to security features and manipulating prevalence expectancy. *Cogn Res.* 2021;6:73. <https://doi.org/10.1186/s41235-021-00341-x>.
 11. Styliadis K, Wickman C, Söderberg R. Perceived quality of products: a framework and attributes ranking method. *J Eng Des.* 2019;31(1):37–67. <https://doi.org/10.1080/09544828.2019.1669769>.
 12. Kato T. Perceived color quality: the effect of light reflection brightness of a car's exterior design on consumers' purchase intentions. *Int J Eng Bus Manag.* 2022;14:1–10. <https://doi.org/10.1177/18479790221126791>.
 13. Jafari R, Ameri F, Khalili N. Effect of some appearance factors on blackness perception of automotive finishes from the customer viewpoint. *J Color Sci Technol.* 2016;10(3):185–193. <https://doi.org/10.1001.1.17358779.1395.10.3.6.0>.
 14. Giles CH, McKay RB. The lightfastness of dyes: a review. *Text Res J.* 1963;33(7):528–577. <https://doi.org/10.1177/004051756303300707>.
 15. Luo Y, Cheng W, Chen W, et al. Study of factors affecting the color fastness of high depth fiber dyed in silicon non-aqueous medium dyeing system. *Silicon.* 2023;15:459–469. <https://doi.org/10.1007/s12633-022-01753-0>.
 16. Del Hoyo-Meléndez JM, Gondko K, Mendys A, et al. A multi-technique approach for detecting and evaluating material inconsistencies in historical banknotes. *Forensic Sci Int.* 2016;266:329–337. doi:10.1016/j.forsciint.2016.06.018.
 17. van Renesse RL. Optical document security. 3rd ed. Boston: Artech House; 2005.
 18. Li H, Liu X. Study on color stability under different light sources based on color difference analysis. *J Appl Opt.* 2020;41(1):1–7.
 19. ISO/CIE. Colorimetry-Part 2: CIE standard illuminants (ISO/CIE 11664-2:2022). Vienna: CIE Central Bureau; 2022. <https://doi.org/10.25039/DS1664-2.2022>.
 20. Safi M, Ansari K, translators. Colorimetry in the textile industry. By Vik M. Tehran: Institute for Color Science and Technology Press; 2019. ISBN:978-622-95263-6-1.
 21. Kyrychok T, Shevchuk A, Nesterenko V, Kyrychok P. Banknote paper deterioration factors: circulation simulator method. *BioResources.* 2014;9(1):710–724.
 22. Wyszecki G, Stiles WS. Color science: concepts and methods, quantitative data and formulae. 2nd ed. New York: Wiley; 2000.
 23. Amirshahi H, Aghiyani F. Computational color physics. Isfahan: Arkan Danesh Publications; 2007. Persian.
 24. Luo MR. A review of chromatic adaptation transforms. *Rev Prog Color Relat Top.* 2000;30:77–92. doi:10.1111/j.1478-4408.2000.tb03784.x.
 25. Fairchild MD. Color appearance models. 3rd ed. Chichester: Wiley-IS&T; 2013. doi:10.1002/9781118653128.
 26. ISO. Textiles—tests for colour fastness—Part J05: Method for the instrumental assessment of the colour inconstancy of a specimen with change in illuminant (ISO 105-J05). Geneva: ISO; 2007.
 27. Safi M. A study of relationship between color inconstancy level and CIELAB color coordinates. *Prog Color Colorants Coat.* 2013;7(3):165–175. <https://doi.org/10.30509/pccc.2013.75832>.
 28. Bracko S, Solar A, Tavcer PF, Simoncic B. Colour constancy of vat prints on cotton fabrics. *Color Technol.* 2009;125:222–227. <https://doi.org/10.1111/j.1478-4408.2009.00200.x>.
 29. Luo MR, Li CJ, Hunt RWG, Rigga B, Smith KJ. CMC 2002 colour inconstancy index: CMCCON02. *Color Technol.* 2003;119:280–285. <https://doi.org/10.1111/j.1478-4408.2003.tb00184.x>.
 30. Karimipour H, Witzel C. Colour expectations across illumination changes. *Vision Res.* 2024;212:108451. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2024.108451>.
 31. Kraft JM, Brainard DH. Mechanisms of color constancy under nearly natural viewing. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 1999;96(1):307–312. <https://doi.org/10.1073/pnas.96.1.307>.
 32. ASTM International. Standard practice for visual appraisal of colors and color differences of diffusely-illuminated opaque materials. ASTM D1729-22. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2022.
 33. Shirahmad Haghighi S, Jafari R, Hosseini-zhad M. A review on color gamut and the methods of gamut boundaries' explanation. *J Stud Color World.* 2022;12(1):21–35. <https://doi.org/10.1001.1.22517278.1401.12.1.2.7>.

How to cite this article:

Safi M. Evaluation of Color Constancy Characteristics in Selected Common National Banknotes under Different Illuminants. *J Color Sci Tech.* 2025;19(3):213–227. <https://doi.org/10.30509/jcst.2025.167699.1274> [In Persian]