

استفاده از دوربین تلفن همراه به عنوان طیفسنج در محیط آزاد

علیرضا وزیری^{۱*}، فیروز قنبری^۲، مهزبار گرجی بندپی^۳

۱- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران، صندوق پستی: ۸۴۱۵۶۸۳۱۱۱

۲- کارشناس ارشد، دانشکده شیمی، دانشگاه تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۴۱۵۵۶۶۱۹

۳- دکترا، شرکت دانش بنیان جنبش همگام و تولید و پیمان پارس، پارک علم و فناوری مازندران، ساری، مازندران، ایران، صندوق پستی: ۴۸۱۶۸۴۵۱۵۵

چکیده

برای استفاده از دوربین تلفن همراه به عنوان یک طیفسنج، غالباً نیاز به انجام دو مرحله است. در مرحله اول مقادیر RGB خروجی آن را به مقادیر رنگی مستقل از دستگاه تبدیل کرده و در مرحله بعد، مقادیر انعکاس طیفی از مقادیر مستقل از دستگاه، بازتولید می‌شوند. در این تحقیق از روش ماتریسی برای تبدیل دو فضای رنگی در مرحله اول استفاده شد. در مرحله بعد، مقادیر انعکاس طیفی با استفاده از روش تجزیه اجزا اصلی (Principal component analysis (PCA)) باز تولید شدند. در روش تجزیه اجزا اصلی، برای محاسبه بهتر مقادیر انعکاسی می‌توان از مقادیر رنگی در دو منبع نوری به جای یک منبع نوری استفاده کرد. نشان داده شد که بهترین مقادیر انعکاسی موقعی حاصل می‌شود که از مقادیر رنگی به دست آمده در منبع نوری D50 و مشاهده کننده ۱۰ درجه و مقادیر رنگی در منبع نوری A و مشاهده کننده ۲ درجه، استفاده شود. همچنین مقادیر رنگی تحت منبع نوری و مشاهده کننده دوم، باید از طریق یک ماتریس تبدیل، از مقادیر رنگی تحت منبع نوری و مشاهده کننده اول به دست آمده باشند.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۲/۱۲

در دسترس به صورت الکترونیکی: ۱۴۰۰/۱۱/۳۰

شاپا چاپی: ۱۷۳۵-۸۷۷۹

شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۲۱۶۹

DOR: 20.1001.1.17358779.1400.15.4.1.2

واژه‌های کلیدی:

روش ماتریسی

روش تجزیه اجزا اصلی

رنگ‌سنجی

طیف‌سنجی

دوربین تلفن همراه



Using Cell Phone Camera as a Spectrophotometer in Outdoor Usage

Alireza Vaziri^{*1}, Firouz Ghanbari², Mahzyar Gorji Bandpay³

1- Department of Textile Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan 8415683111, Iran

2- Department of Chemistry Engineering, University of Tehran, Tehran 141556619, Iran

3- Jonbesh Hamgam Tolid and Peiman Pars Company, MSTP, Sari 4816845155, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 10-01-2021

Accepted: 02-05-2021

Available online: 19-02-2022

Print ISSN: 1735-8779

Online ISSN: 2383-2169

DOR: 20.1001.1.17358779.1400.15.4.1.2

Keywords:

Matrix method

PCA

Colorimetry

Spectrophotometry

Cell phone camera

ABSTRACT

Two steps were usually required to use a mobile phone camera as a spectrophotometer. In the first step, the output RGB values of a camera are converted to device-independent color values. Afterward, spectral reflection values are reproduced from those device-independent values. This paper used the matrix method to convert two color spaces in the first step. Spectral reflection values were reproduced using the principal component analysis (PCA) method in the next step. It is demonstrated the best reflectance values result is obtained using light source D50/standard 10-degree observer and light source A/standard 2-degree observer. Also, the color values under the second light source and observer should be obtained through a conversion matrix from the color values of the first light source and observer.

*Corresponding author: fakoor100@gmail.com



۱- مقدمه

استفاده از دوربین دیجیتال به جای یک طیف‌سنج دارای مزایایی است. قیمت آن بسیار به صرفه‌تر بوده و در دسترس است. علاوه بر آن، اندازه‌گیری نمونه‌ها از فاصله دور امکان‌پذیر می‌باشد. در این تحقیق برای تبدیل مقادیر RGB نمونه مجهول موجود در تصویر به مقادیر انعکاسی واقعی، روشی بیان شده است که برای هر دوربین دیجیتالی بدون نیاز به داشتن منحنی‌های حساسیت طیفی ترکیب حس‌گر و فیلترهای آن قابل استفاده است.

در این تحقیق تبدیل دوربین دیجیتال به طیف‌سنج در دو مرحله انجام شده است. در مرحله اول مقادیر RGB خروجی دوربین به مقادیر رنگی مستقل از دستگاه تبدیل شده و در مرحله بعد، مقادیر انعکاسی از ارقام رنگی به دست می‌آیند. برای انجام این کار در مرحله اول نیاز است که بین دو فضای رنگی وابسته به دستگاه (فضای رنگی RGB) و مستقل از دستگاه (مانند CIEXYZ و یا CIELAB) ارتباط ایجاد شود [۱، ۲]. برای این کار، سه روش کلی وجود دارد: روش مبتنی بر جدول، روش ماتریسی و روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی. در روش ماتریسی (که در این تحقیق از آن استفاده شده است)، ایجاد ارتباط از طریق روابط چند جمله‌ای به دست می‌آید. به این صورت که ضرایب چندجمله‌ای در قالب ماتریس با داشتن مقادیر RGB و مقادیر رنگی مستقل از دستگاه (اندازه‌گیری شده از طریق اسپکتروفوتومتر) نمونه‌های معلوم محاسبه می‌شوند [۳-۱۷]. به منظور بالا بردن صحت نتایج، می‌توان در ابتدا مقادیر RGB را با استفاده از تصحیح گاما و یا سایر روش‌های خطی‌سازی، خطی کرد [۲، ۱۸]. در این تحقیق از دو روش کلی^۱ و محلی^۲ برای تصحیح گاما استفاده شده است [۱۹].

با توجه به اینکه دوربین‌های دیجیتال بر روی تصاویر یک سری اصلاحات رنگی انجام می‌دهند، ممکن است با تصویربرداری از یک صحنه ثابت، مقادیر RGB خروجی دوربین متفاوت باشند [۲۰، ۲۱]. به همین دلیل نیاز است که نمونه‌های معلوم و نمونه‌های مجهول در یک صحنه ثابت و در کنار هم تصویربرداری شوند.

به طور کلی روش‌های دیگری برای تبدیل فضا رنگ RGB به مقادیر رنگی مستقل از دستگاه وجود دارد. یکی از این روش‌های مرسوم، به دست آوردن منحنی‌های حساسیت طیفی ترکیب حس‌گر-فیلترهای دوربین دیجیتال و سپس ایجاد ارتباط آنها با مقادیر واقعی رنگی است [۲۲-۲۵]. با توجه به اینکه دوربین‌های مختلف از فیلترهای رنگی با مشخصات متفاوتی استفاده می‌کنند، به همین جهت برای استفاده از این روش‌ها، نیاز است که فرآیند کار برای هر دوربین به صورت جداگانه انجام شود. همچنین با توجه به طول عمر

فیلترهای رنگی و تغییر حساسیت طیفی فیلترها با گذشت زمان، نیاز است منحنی‌های حساسیت طیفی ترکیب حس‌گر-فیلتر آنها مجدداً در فواصل زمانی مختلف محاسبه شوند. به همین جهت در این تحقیق از این روش‌ها استفاده نشده است.

در مرحله دوم نیاز است که مقادیر انعکاس طیفی از مقادیر رنگی به دست آیند. روش‌های مختلفی برای تبدیل مقادیر رنگی به داده‌های انعکاس طیفی وجود دارد [۲۶-۲۹]. در این تحقیق از روش تجزیه اجزا اصلی استفاده شده است که مبتنی بر یک پایگاه داده از نمونه‌های رنگی است که به روشی مشابه و با اولیه‌های رنگی یکسان تهیه شده‌اند. علت نیاز به انجام این کار را می‌توان به این صورت بیان کرد که فضای رنگی شامل سه بعد و فضای طیفی (با فرض طول موج‌های ۴۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر و به فواصل ۱۰ نانومتری) شامل ۳۱ بعد است و به صورت ریاضی، بی‌نهایت فضای طیفی می‌توانند یک فضای رنگی مشابه را ایجاد کنند. به همین خاطر برای رسیدن به انعکاس طیفی درست نمونه هدف، نیاز است منحنی انعکاس طیفی نمونه‌های دیگری در دسترس باشند تا بتوان فرآیند تبدیل نمونه مجهول را با استفاده از آنها به درستی انجام داد [۲۹].

برای افزایش دقت نتایج در روش تجزیه اجزا اصلی، می‌توان از دو منبع نوری به جای یکی استفاده کرد. این بدین معناست که به جای تبدیل سه بعد (مقادیر رنگی مستقل از دستگاه) به ۳۱ بعد (ابعاد مقادیر انعکاسی)، از شش بعد استفاده می‌شود [۳۰]. مقادیر رنگی تحت منبع نوری دوم را می‌توان به روش گفته شده (خطی‌سازی و تبدیل ماتریسی)، از مقادیر RGB دوربین به دست آورد. با توجه به اینکه تبدیل مقادیر RGB به مقادیر رنگی مستقل از دستگاه دارای مقداری خطا خواهد بود، استفاده از روش گفته شده باعث جمع‌خطاها و در نتیجه کاهش عملکرد روش می‌شود. در این تحقیق برای کم کردن اثر جمع‌خطا، از روشی استفاده شده است که خطاها هم راستا شوند و در نتیجه دقت محاسبه مقادیر انعکاس طیفی به نحو چشمگیری افزایش یافت. در این روش مقادیر رنگی مستقل از دستگاه در منبع نوری و مشاهده کننده اول به دست آمده‌اند.

۲- بخش تجربی

۲-۱- تجهیزات

در این تحقیق میزان خطای تبدیل مقادیر رنگی خروجی یک دوربین دیجیتال به مقادیر انعکاس طیفی در محیط باز ارزیابی شدند.

میزان خطا با توجه به میانگین اختلاف مقادیر انعکاس طیفی محاسبه شده و واقعی بدست آمده است. همچنین اختلاف رنگ مقادیر انعکاس طیفی محاسبه شده و واقعی تحت منابع نوری و

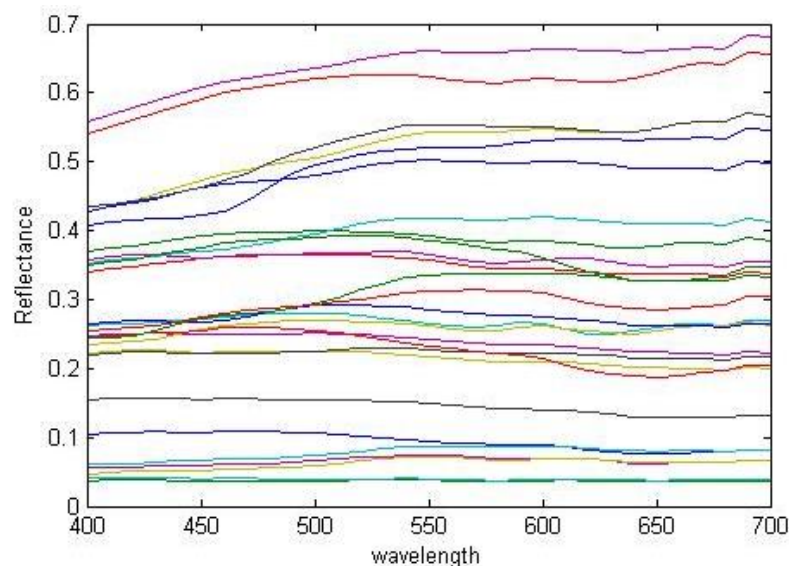
1- Global

2- Local (A piecewise linear approach)

۱۶ مگاپیکسل، از نمونه‌ها در محیط آزاد، در هنگام ظهر (ساعت ۱۲) در پنجم شهریور سال ۱۳۹۹ در آسمان صاف و در سایه (به نحوی که نور خورشید به نمونه‌ها به صورت مستقیم تابیده نمی‌شود) و به تعداد ۳ مرتبه پشت سر هم و بدون وقفه انجام شد. همچنین تصویربرداری از روبرو در زاویه صفر درجه نسبت به افق، در فاصله ۴ متری از نمونه گرفته شده است. با توجه به تفاوت جزئی مقادیر RGB در نقاط مختلف از یک رنگ ثابت، مقادیر RGB پیکسل‌های هر نمونه به دست آمده و متوسط آنها به عنوان RGB نمونه در تصویر در نظر گرفته شد. در مرحله آخر متوسط سه بار تصویربرداری به عنوان RGB نهایی گزارش شد. این فرآیند مشابه با اندازه‌گیری جسم تحت شرایط $d/0$ است [۳۲]. به همین جهت از اسپکتروفوتومتر Biuged BGD 588 در حالت در نظر گرفتن براقیت^۳ برای اندازه‌گیری نمونه‌ها استفاده شد. از هر نمونه ۳ بار اندازه‌گیری شده و متوسط آن برای محاسبات استفاده شد. برنامه‌نویسی و محاسبات نیز در محیط متلب^۴ انجام گرفت.

- 1- Federal standard 595B (7690-01-162-2210)
- 2- Huawei NXT-L29 Mate 8
- 3- included
- 4- Matlab 2013a

مشاهده کننده‌های مختلف نیز به دست آمد. برای سنجش نتایج بدست آمده می‌توان از نمونه‌های رنگی مختلفی استفاده کرد. این نمونه‌ها می‌توانند در محدوده رنگ‌های مختلفی قرار گرفته و فام‌های متفاوتی داشته باشند. با توجه به اینکه یکی از کاربردهای اصلی نتایج در بحث استتار است، از این‌رو برای بررسی و ارزیابی نتایج، نمونه‌های رنگی مشابه با دو محیط جنگلی و بیابانی بررسی شدند. نمونه‌های استاندارد فدرال^۱ که برای کاربرد نظامی از جنگ جهانی دوم توسط دولت ایالات متحده آمریکا ساخته شدند، استفاده شد [۳۱]. این نمونه‌ها شامل سه سری براق، نیمه براق و مات می‌باشند. با توجه به اینکه نمونه‌های موجود در طبیعت، اکثراً مات هستند، به همین خاطر از سری نمونه‌های مات این استاندارد در سه دسته طیف‌های سبز (۴۸ نمونه استاندارد) (برای کاربرد جنگلی) و طیف‌های قهوه‌ای (۷۸ نمونه استاندارد) و خاکستری (۲۷ نمونه استاندارد) (برای کاربرد بیابانی) استفاده شد که در مجموع شامل ۱۵۳ نمونه استاندارد می‌شود. همچنین همانطور که در بخش ۱-۱ توضیح داده شد، برای خطی‌سازی مقادیر خروجی دوربین نیاز است از نمونه‌های خاکستری استفاده شود. به همین جهت سری طیف‌های خاکستری استاندارد فدرال برای این کاربرد نیز به کار برده شدند. منحنی‌های انعکاس طیفی این نمونه‌های خاکستری در شکل ۱ نشان داده شده است. تصویربرداری با استفاده از دوربین تلفن هوای^۲ با کیفیت تصویر



شکل ۱: منحنی‌های انعکاس طیفی نمونه‌های خاکستری استفاده شده.

Figure 1: The reflectance of used gray samples.

۲-۲- روش کار

در این تحقیق ابتدا نحوه تبدیل مقادیر رنگی RGB به مقادیر مستقل رنگی و سپس تبدیل مقادیر مستقل رنگی به مقادیر انعکاس طیفی بررسی شدند. برای بررسی عملکرد روابط ارتباطی بین فضای رنگی RGB و فضاهای مستقل رنگی مشخصه‌های زیر بررسی شد:

- بررسی معادلات بین فضای رنگی RGB و CIEXYZ و بین RGB و CIELAB در منابع نوری و مشاهده‌کننده‌های مختلف.

- بررسی عملکرد معادلات مختلف در روش ماتریسی که روابط در جدول ۱ بررسی شدند.

- بررسی عملکرد خطی سازی خروجی دوربین (به دو روش کلی و محلی) و یا عدم استفاده از آن.

همچنین به منظور ایجاد ارتباط بین فضاهای رنگی مستقل از دستگاه و فضای انعکاس طیفی با استفاده از روش تجزیه اجزا اصلی، بهترین روش برای تبدیل مقادیر RGB به مقادیر رنگی مستقل از دستگاه، از روش قبل به دست آمده و مشخصه‌های زیر بررسی شدند:

- استفاده از داده‌های رنگی نمونه‌ها در بهترین منبع نوری و مشاهده‌کننده که کمترین خطای تبدیل از فضای RGB به فضای رنگی مستقل از دستگاه را حاصل می‌نمودند (که در مرحله قبل به دست آمد) برای به دست آوردن سه جز اصلی مقادیر انعکاس طیفی با استفاده از روش تجزیه اجزا اصلی.

- استفاده از مقادیر رنگی در منبع نوری و مشاهده‌کننده دوم، برای به دست آوردن شش جز اصلی مقادیر انعکاس طیفی که مقادیر رنگی آنها با استفاده از تبدیل فضای رنگی RGB به دست آمده‌اند.

- استفاده از مقادیر رنگی در منبع نوری و مشاهده‌کننده دوم، برای به دست آوردن شش جز اصلی مقادیر انعکاس طیفی که مقادیر رنگی دوم از مقادیر رنگی اول و با استفاده از روابط درجه سوم، به دست آمده است.

برای بررسی روابط و صحت نتایج، مراحل زیر انجام می‌شود:

الف - انتخاب نمونه‌های مرجع: تمامی نمونه‌های استاندارد اندازه‌گیری شده بجز یک نمونه.

ب - انتخاب نمونه برای ارزیابی عملکرد (نمونه مجهول): نمونه انتخاب نشده در مورد الف.

ج - محاسبه مقدار CIELAB نمونه مجهول از روش ماتریسی و اندازه‌گیری اختلاف رنگ آن از مقدار واقعی نمونه که با طیف‌سنج اندازه‌گیری شده است.

د - محاسبه مقدار انعکاس طیفی از طریق روش تجزیه اجزا اصلی و به دست آوردن میزان اختلاف انعکاس طیفی نسبی $E = \frac{|R_{true} - R_{pre}|}{R_{true}} * 100$ که R_{true} انعکاس طیفی واقعی نمونه و R_{pre} انعکاس طیفی محاسبه شده است.

ه - انتخاب یک نمونه دیگر به عنوان نمونه مجهول و تکرار فرآیند الف تا د، و تکرار این عملیات تا جایی که تمامی نمونه‌های استاندارد به عنوان نمونه مجهول انتخاب شوند.

و - گزارش نتایج خطای به دست آمده بر اساس رابطه اختلاف رنگ CIEDELAB در منابع نوری مختلف و میزان خطای نسبی در پیش‌گویی انعکاس طیفی.

جدول ۱: روابط بررسی شده در روش ماتریسی (در این روابط منظور از transpose یعنی ترانپوز، منظور از c یعنی مقدار ثابت و A ماتریس ارتباط بین دو فضای رنگی است. همچنین منظور از CIE value دو فضا رنگ CIEXYZ و CIELAB است).

Table 1: Investigated equations in the matrix method (in these equations c is constant value and A is the connection matrix between two color spaces. Also CIE value can be CIEXYZ or CIELAB).

شماره	رابطه
۱	$CIE\ value = A_{3 \times 3} * transpose[R\ G\ B]$
۲	$CIE\ value = A_{3 \times 3} * transpose[R^2\ G^2\ B^2]$
۳	$CIE\ value = A_{3 \times 3} * transpose[R^3\ G^3\ B^3]$
۴	$CIE\ value = A_{3 \times 3} * transpose[R^{1/2}\ G^{1/2}\ B^{1/2}]$
۵	$CIE\ value = A_{3 \times 3} * transpose[R^{1/3}\ G^{1/3}\ B^{1/3}]$
۶	$CIE\ value = A_{3 \times 6} * transpose[R\ G\ B\ R^2\ G^2\ B^2]$
۷	$CIE\ value = A_{3 \times 9} * transpose[R\ G\ B\ R^2\ G^2\ B^2\ R^3\ G^3\ B^3]$
۸	$CIE\ value = A_{3 \times 10} * transpose[R\ G\ B\ R^2\ G^2\ B^2\ RG\ GB\ RB\ c]$
۹	$CIE\ value = A_{3 \times 20} * transpose \begin{bmatrix} R^3 & G^3 & B^3 & R^2 & G^2 & B^2 & R & G & B & R^2G & R^2B \\ G^2R & G^2B & B^2R & B^2G & RG & GB & RB & RGB & c \end{bmatrix}$

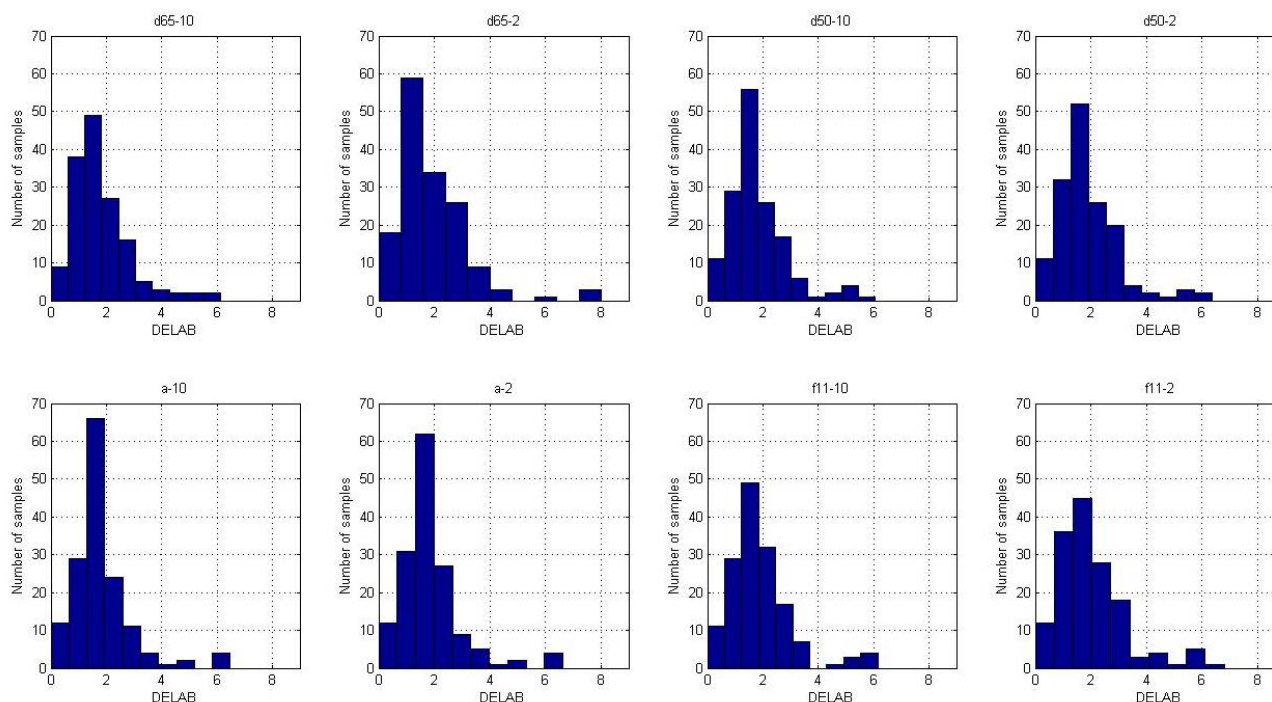
۳- نتایج و بحث

۳-۱- تبدیل مقادیر RGB به مقادیر مستقل رنگی

مقادیر خروجی یک دوربین دیجیتال در هر تصویربرداری از یک صحنه ثابت در شرایط ثابت با یک دوربین ثابت، کمی متفاوت است، به همین دلیل نیاز است که در هر بار فرآیند پیدا کردن بهترین مدل بین فضای مستقل و وابسته به دستگاه مجدداً بررسی شود. از اینرو باید همیشه نمونه‌های استاندارد انتخاب شده به عنوان نمونه‌های معلوم، در کنار نمونه مجهول قرار داشته باشند. این معادلات برای نمونه‌های استاندارد جنگلی و بیابانی (به منظور کاربرد در استتار) بررسی و بهترین روابط براساس حداقل میانگین خطا (معادله اختلاف رنگ CIEDE1976) محاسبه شد. تبدیل مقادیر RGB به مقادیر رنگی تحت منابع نوری مختلف و مشاهده کننده‌های مختلف انجام شد تا بهترین منبع نوری برای تبدیل به دست آید. نتایج نشان

می‌دهد که بهترین مدل برای رسیدن به نتیجه مناسب، استفاده رابطه توان سوم RGB (رابطه ۷ در جدول ۲) با فضای رنگی CIELAB و استفاده از روش محلی برای خطی ساختن مقادیر RGB است. در شکل ۲ میزان خطای دوباره تولید مقادیر رنگی نشان داده شده است. همچنین برای این اشکال، نتایج آماری زیر در جدول ۲ به دست آمد.

با توجه به جدول ۲، به نظر می‌رسد که برای تبدیل مقادیر RGB به مقادیر رنگی مستقل از دستگاه، بهتر است از منبع نوری D50 و مشاهده کننده ۱۰ درجه استفاده شود. با توجه به اینکه استفاده از این شرایط بیشترین دقت را دارد، پس برای دوباره تولید انعکاس طیفی با استفاده از تجزیه اجزا اصلی، از مقادیر رنگی تحت این منبع نوری و مشاهده کننده، استفاده خواهد شد.



شکل ۲: میزان خطای ۱۵۳ نمونه استاندارد در تبدیل مقادیر RGB به مقادیر CIELAB با استفاده از رابطه CIEDE1976 در منابع نوری و مشاهده کننده‌های مختلف.

Figure 2: The error value of 153 standard samples to convert RGB values to CIELAB values using CIEDE1976 in various illuminants and observers.

جدول ۲: نتایج آماری تبدیل مقادیر RGB به مقادیر CIELAB با استفاده از رابطه اختلاف رنگ CIEDELAB1976.

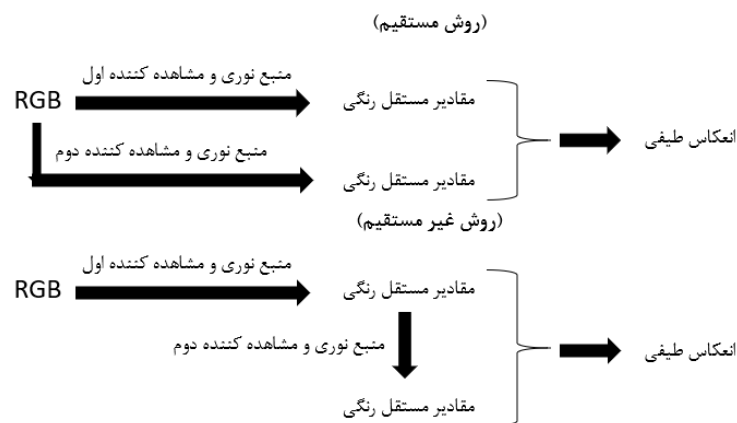
Table 2: The statistical results to convert RGB values to CIELAB values using CIEDELAB1976.

مشاهده کننده ۲ درجه				مشاهده کننده ۱۰ درجه				
F11	A	D50	D65	F11	A	D50	D65	منبع نوری
۲,۰۲	۱,۸۹	۱,۶۹	۱,۶۱	۱,۹۹	۱,۸۳	۱,۳۲	۱,۶۲	میانگین
۷,۸	۶,۶۳	۵,۳۸	۷,۰۲	۷,۱۵	۶,۴۹	۵,۰۶	۶,۱۲	حداکثر
۱,۸۳	۱,۷	۱,۶۷	۱,۵	۱,۶۱	۱,۵۸	۱,۲۰	۱,۴۳	میانه

مقادیر از طریق رابطه تبدیلی توضیح داده شده در بخش ۱-۳ و مستقیماً از مقادیر RGB به دست آمدند. در روش دوم (روش غیر مستقیم)، این مقادیر با استفاده از یک رابطه ریاضی از منبع نوری و مشاهده کننده اول به دست می‌آیند. در شکل ۳، روش مستقیم و غیر مستقیم به صورت دیاگرام نشان داده شده است. برای این کار از یک معادله درجه سوم برای ایجاد ارتباط استفاده شد و برای به دست آوردن ضرایب این ماتریس، از داده‌های رنگی نمونه‌های استاندارد که با دستگاه اسپکتروفوتومتر اندازه‌گیری شده است، استفاده شد. بعد از محاسبه ضرایب ماتریس، از آنها برای محاسبه مقادیر رنگی در منبع نوری و مشاهده کننده دوم، با استفاده از مقادیر رنگی پیشگویی شده (در بخش ۱-۳) تحت منبع نوری D50 و مشاهده کننده ۱۰ درجه استفاده شد. نتایج میزان خطای ۱۵۳ نمونه استاندارد در تبدیل مقادیر CIELAB تحت منبع نوری D50 و مشاهده کننده ۱۰ درجه، به مقادیر CIELAB با استفاده از رابطه CIEDE1976 در منابع نوری و مشاهده کننده‌های دیگر، در شکل ۴ نشان داده شده است. همچنین نتایج آماری آن در جدول ۵ نشان داده شده است.

۳-۲- تبدیل مقادیر مستقل رنگی به مقادیر انعکاس طیفی

با توجه به اینکه فضای رنگی CIEXYZ دارای یک رابطه خطی با مقادیر انعکاس طیفی است، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از این فضای رنگی، به جای فضای رنگی CIELAB می‌تواند نتایج بهتری را در بازتولید مقادیر انعکاس طیفی با استفاده از روش تجزیه اجزا اصلی به دست آورد [۳۰]. به همین جهت مقادیر CIELAB که در بخش ۱-۳ به دست آمده‌اند را باید به مقادیر CIEXYZ تبدیل کرد. در این مرحله با استفاده از روش تجزیه اجزا اصلی، مقادیر CIEXYZ تحت منبع نوری D50 و مشاهده کننده استاندارد ۱۹۳۱، به مقادیر انعکاس طیفی تبدیل شدند. در روش تجزیه اجزا اصلی، برای افزایش دقت در پیشگویی انعکاس طیفی، می‌توان به جای مقادیر رنگی در یک منبع نوری و مشاهده کننده، از دو دسته مقادیر رنگی در دو منبع نوری و مشاهده کننده متفاوت، استفاده کرد [۳۰]. به همین جهت انعکاس طیفی در این دو حالت نیز بررسی شد. در این تحقیق از دو روش برای به دست آوردن مقادیر رنگی در منبع نوری و مشاهده کننده دوم استفاده شد. در روش اول (روش مستقیم)، این



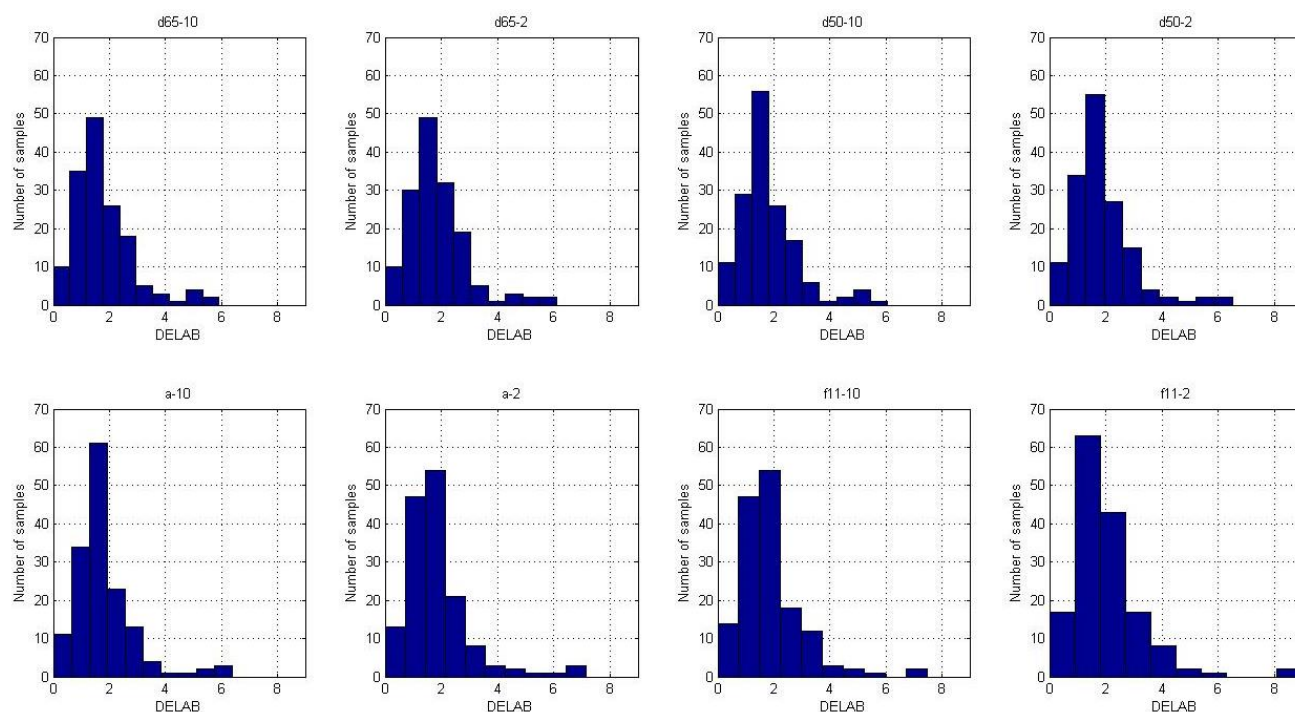
شکل ۳: نحوه عملکرد روش مستقیم و غیرمستقیم.

Figure 3: Direct and indirect method.

جدول ۳: نتایج آماری تبدیل مقادیر CIELAB تحت منبع نوری D50 و مشاهده کننده ۱۰ درجه به مقادیر CIELAB با استفاده از رابطه اختلاف رنگ CIEDELAB1976 (روش غیر مستقیم).

Table 3: Statistical results of converting CIELAB in D50 and 10 degree to CIELAB in other illuminants and observers (indirect method).

مشاهده کننده ۲ درجه				مشاهده کننده ۱۰ درجه			
F11	A	D50	D65	F11	A	D65	منبع نوری
۲,۰۲	۱,۸۷	۱,۸۶	۱,۸۵	۱,۹	۱,۸	۱,۸۱	میانگین
۸,۹۸	۷,۱۴	۶,۵۲	۶,۱۲	۷,۴۹	۶,۴	۵,۹۲	بیشینه
۱,۷۵	۱,۶۷	۱,۶۵	۱,۶۳	۱,۶۷	۱,۶	۱,۵۹	میانه



شکل ۴: میزان خطای ۱۵۳ نمونه استاندارد در تبدیل مقادیر CIELAB تحت منبع نوری D50 و مشاهده کننده ۱۰ درجه، به مقادیر CIELAB با استفاده از رابطه CIEDE1976 در منابع نوری و مشاهده کننده‌های دیگر (روش غیر مستقیم).

Figure 4: The error of 153 standard samples converting CIELAB values in D50 and observer 10 degree to other CIELAB values in observers and illuminants using CIEDE1976 (indirect method).

انعکاس طیفی از طریق روش اول و روش دوم، نشان داده شده است. مشخصه‌های آماری در جدول ۴ نیز از شکل ۵ به دست می‌آید. همانطور که در شکل ۴ و جدول ۳ نشان داده شده است، بر خلاف انتظار، وقتی به جای یک منبع نوری و مشاهده کننده، از دو منبع نوری و مشاهده کننده استفاده می‌شود، نتایج انعکاس طیفی پیشگویی شده بدتر می‌شوند. دلیل آن می‌تواند وجود خطا در تبدیل مقادیر RGB به مقادیر رنگی باشد. با توجه به اینکه در دو منبع نوری و مشاهده کننده مختلف این خطا به صورت جداگانه وجود دارد، تجمع آنها باعث افزایش قابل توجه خطای پیشگویی انعکاس طیفی شده است. نکته مورد توجه در جدول ۴، به این صورت است که در بعضی حالت‌ها میزان خطا بسیار بیشتر از بقیه حالت‌ها است در حالی که طبق جدول ۲،

با مقایسه نتایج جدول ۲ و ۳، می‌توان مشاهده کرد که استفاده از روش دوم، برای پیشگویی مقادیر رنگی تحت منبع نوری و مشاهده کننده دوم، تغییری در بهبود نتایج رنگی نمی‌دهد. هدف از انجام این تحقیق، دوباره تولید مقادیر انعکاس طیفی بوده است. این کار از سه طریق انجام شده است. در روش اول از یک سری مقادیر رنگی CIEXYZ تحت یک منبع نوری و مشاهده کننده برای تبدیل به انعکاس طیفی استفاده شد و در روش‌های بعدی از دو سری مقادیر رنگی CIEXYZ که تحت دو منبع نوری و مشاهده کننده هستند، استفاده شده است. مقادیر رنگی تحت منبع نوری و مشاهده کننده دوم نیز از دو روش مختلف به دست آمده‌اند (روش مستقیم و روش غیر مستقیم). در شکل ۵، نتایج درصد خطای نسبی

حالی است که در پیشگویی مقادیر رنگی مستقل از دستگاه از مقادیر RGB، هر دو روش مستقیم و غیر مستقیم، عملکرد تقریباً مشابهی داشتند. برای حل این مسئله، تغییرات خطای مقادیر L^* ، a^* و b^* در منبع نوری و مشاهده کننده دوم در مقابل تغییرات در منبع نوری و مشاهده کننده اول رسم و در شکل‌های ۷، ۸ و ۹ نشان داده شده است.

اختلافات تبدیل RGB به فضای رنگی CIELAB در آنها خیلی متفاوت نیست. همچنین در شکل ۶ نتایج پیشگویی انعکاس طیفی با استفاده از روش سوم نشان داده شده و با روش اول مقایسه شد. نتایج آماری شکل ۶ در جدول ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۴ و جدول ۶ مشخص است، استفاده از روش غیر مستقیم، برخلاف روش مستقیم، می‌تواند باعث بهبود نتایج نسبت به روش اول شود. این در

جدول ۴: نتایج آماری اختلاف انعکاس طیفی نسبی به دست آمده با استفاده از روش تجزیه اجزا اصلی برای روش اول و دوم.

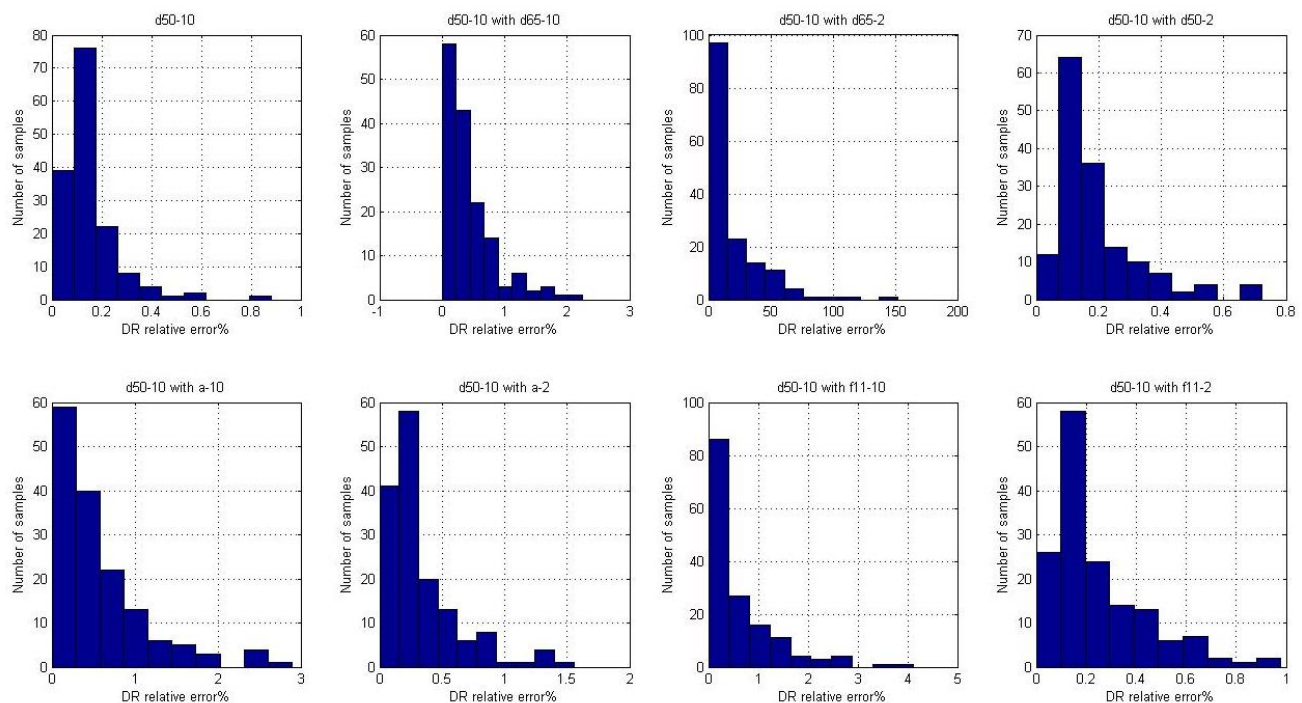
Table 4: The statistical result of reflectance differences using PCA with the first and second method.

D50-10 F11-2	D50-10 A-2	D50-10 D50-2	D50-10 D65-2	D50-10 F11-10	D50-10 A-10	D50-10 D65-10	D50-10	منابع نوری و مشاهده کننده‌ها
۰,۲۵	۰,۳۴	۰,۱۹	۱۹,۷۲	۰,۶۵	۰,۵۸	۰,۴۴	۰,۱۵	میانگین
۰,۹۸	۱,۵۵	۰,۷۲	۱۵۲,۴۷	۴,۱۲	۲,۸۹	۲,۲۵	۰,۸۸	بیشینه
۰,۱۹	۰,۲۳	۰,۱۵	۱۰,۴۷	۰,۳۵	۰,۳۷	۰,۲۹	۰,۱۱	میانه

جدول ۵: نتایج آماری اختلاف انعکاس طیفی نسبی به دست آمده با استفاده از روش تجزیه اجزا اصلی برای روش اول و سوم.

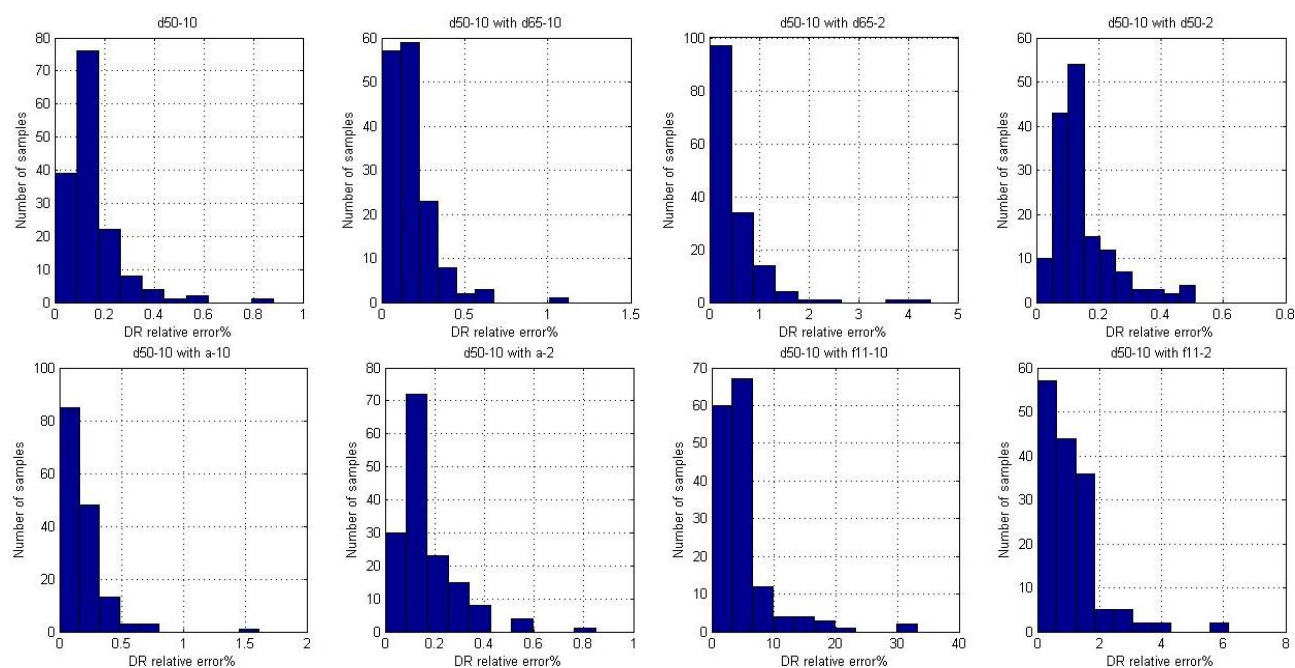
Table 5: The statistical result of reflectance differences using PCA with the first and third method.

D50-10 F11-2	D50-10 A-2	D50-10 D50-2	D50-10 D65-2	D50-10 F11-10	D50-10 A-10	D50-10 D65-10	D50-10	منابع نوری و مشاهده کننده‌ها
۱,۰۵	۰,۱۷	۰,۱۵	۰,۵۲	۵,۱۴	۰,۲	۰,۱۸	۰,۱۵	میانگین
۶,۱۶	۰,۸۵	۰,۵۱	۴,۴۴	۳۳,۱۸	۱,۶۱	۱,۱۳	۰,۸۸	بیشینه
۰,۸۱	۰,۱۳	۰,۱۲	۰,۳۳	۳,۹۴	۰,۱۴	۰,۱۳	۰,۱۱	میانه



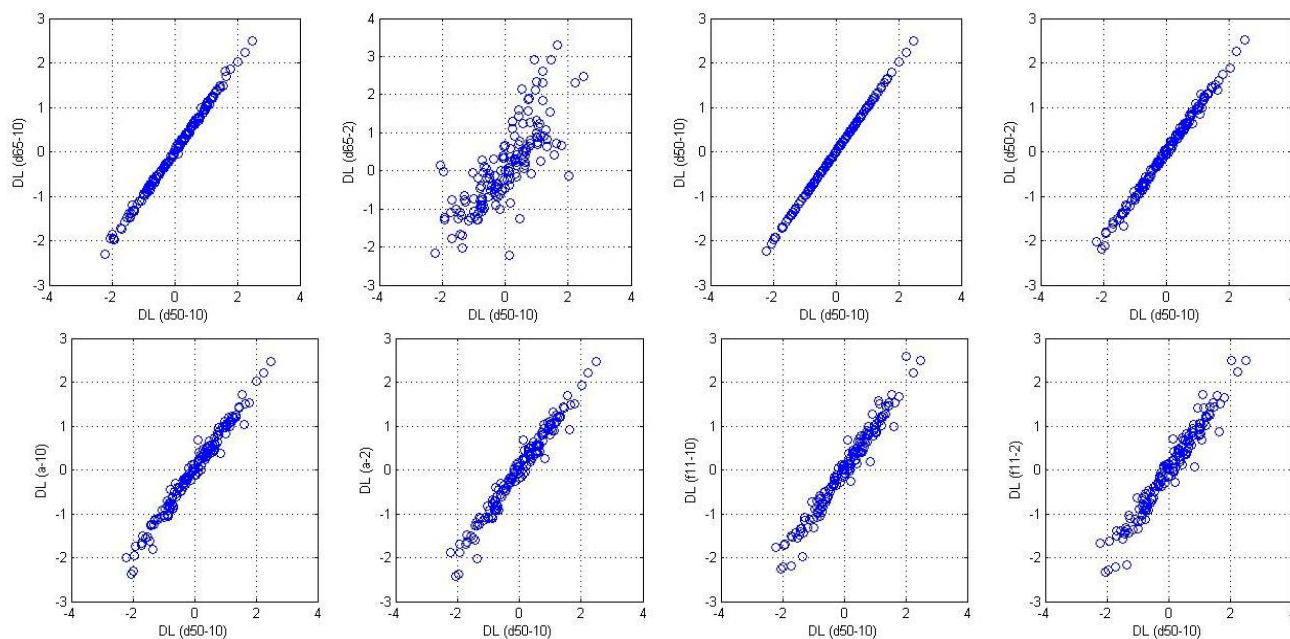
شکل ۵: نتایج اختلاف انعکاس طیفی نسبی به دست آمده با استفاده از روش تجزیه اجزا اصلی با استفاده از روش اول و دوم.

Figure 5: The result of reflectance differences using PCA with the first and second method.



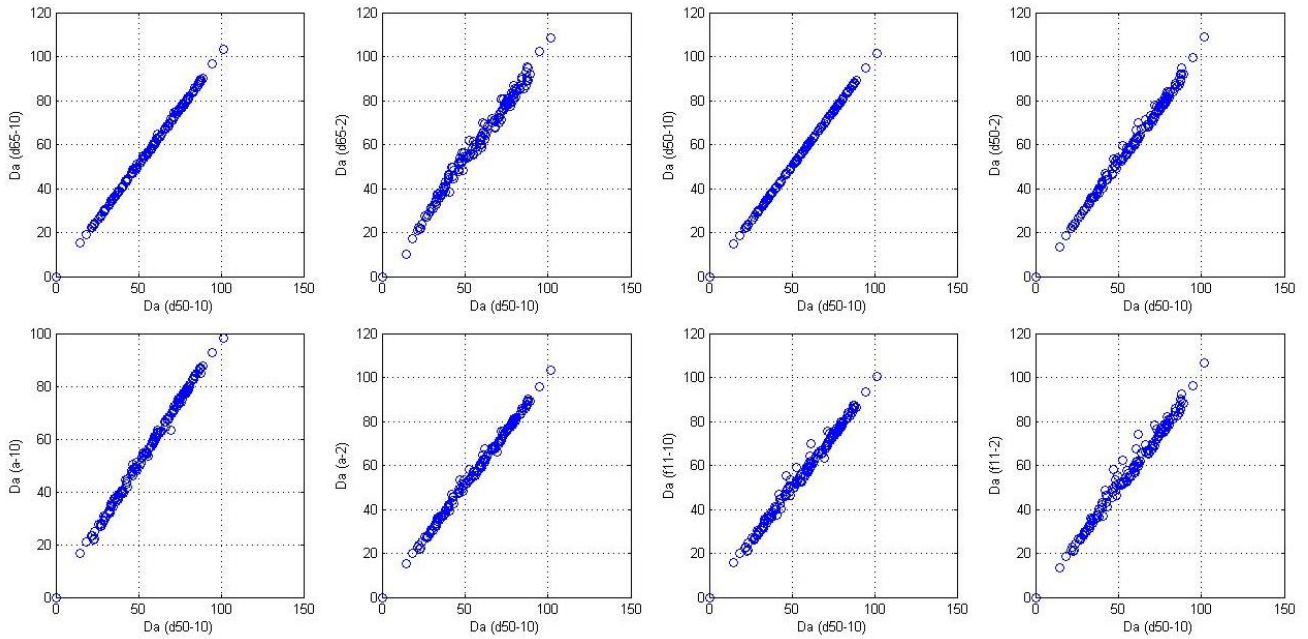
شکل ۶: نتایج اختلاف انعکاس طیفی نسبی به دست آمده با استفاده از روش تجزیه اجزا اصلی با استفاده از روش اول و سوم.

Figure 6: The result of reflectance differences using PCA with the first and third method.



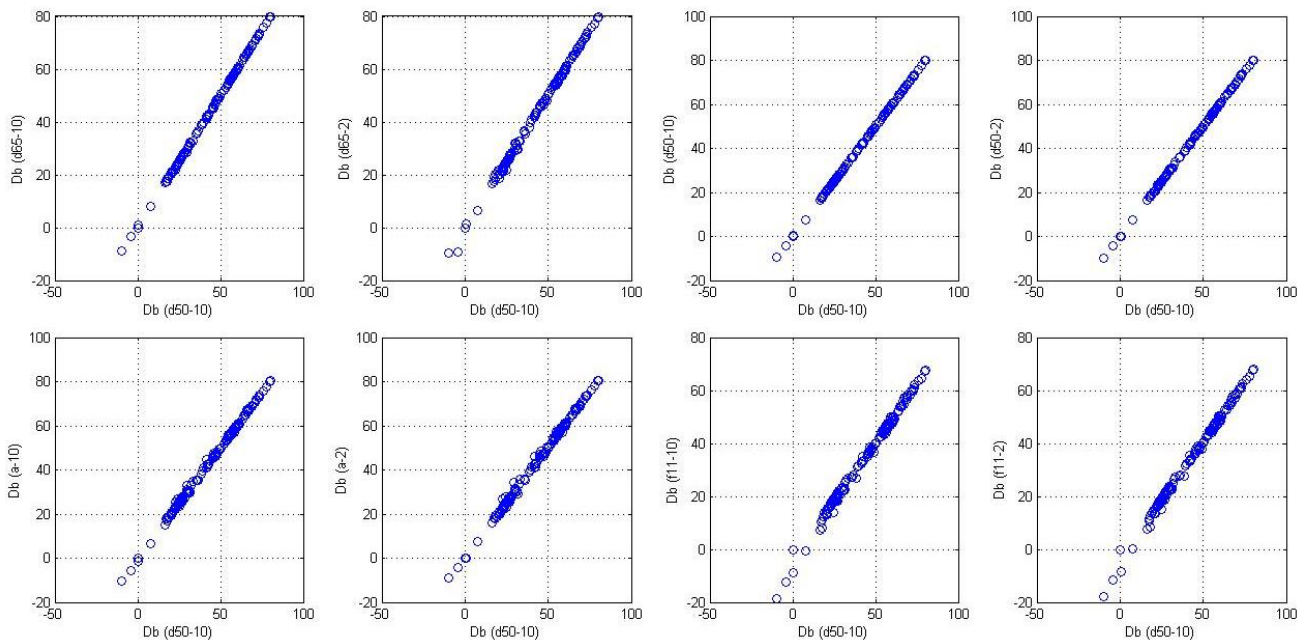
شکل ۷: تغییرات مقادیر L^* در فضای رنگی CIELAB در منابع نوری و مشاهده کننده‌های مختلف بین نمونه‌های واقعی و نمونه‌های پیشگویی شده از روش مستقیم، با اختلاف L^* به دست آمده بین نمونه واقعی و پیشگویی تحت منبع نوری D50 و مشاهده کننده ۱۰ درجه.

Figure 7: L^* changing in CIELAB color space in different illuminants and observers between experimental and predicted samples by direct method, and L^* changing in D50 and 10 degree.



شکل ۸: تغییرات مقادیر a^* در فضای رنگی CIELAB در منابع نوری و مشاهده کننده‌های مختلف بین نمونه‌های واقعی و نمونه‌های پیشگویی شده از روش مستقیم، با اختلاف a^* به دست آمده بین نمونه واقعی و پیشگویی تحت منبع نوری D50 و مشاهده کننده ۱۰ درجه.

Figure 8: a^* changing in CIELAB color space in different illuminants and observers between experimental and predicted samples by direct method, and a^* changing in D50 and 10 degree.



شکل ۹: تغییرات مقادیر b^* در فضای رنگی CIELAB در منابع نوری و مشاهده کننده‌های مختلف بین نمونه‌های واقعی و نمونه‌های پیشگویی شده از روش مستقیم، با اختلاف b^* به دست آمده بین نمونه واقعی و پیشگویی تحت منبع نوری D50 و مشاهده کننده ۱۰ درجه.

Figure 9: b^* changing in CIELAB color space in different illuminants and observers between experimental and predicted samples by direct method, and b^* changing in D50 and 10 degree.

جدول ۶: مشخصه آماری r^2 برای شکل‌های ۶، ۷ و ۸ (روش مستقیم).

Table 6: r^2 parameter for the figures of 6, 7 and 8 (direct method).

F11-2	A-2	D50-2	D65-2	F11-10	A-10	D65-10	منابع نوری و مشاهده کننده‌ها
۰,۹۴۷۹	۰,۹۶۶۱	۰,۹۹۴۱	۰,۶۰۶۷	۰,۹۶۳۲	۰,۹۷۷	۰,۹۹۷۶	L*
۰,۹۸۴۴	۰,۹۹۶۲	۰,۹۹۴۹	۰,۹۸۸	۰,۹۹۱۴	۰,۹۹۷۳	۰,۹۹۹۵	a*
۰,۹۹۵۵	۰,۹۹۷۴	۰,۹۹۹۹	۰,۹۹۸۲	۰,۹۹۴۶	۰,۹۹۸۵	۰,۹۹۹۹	b*

یکی از اهداف به دست آوردن انعکاس طیفی این است که بتوان مقادیر رنگی را در منابع نوری مختلف بدست آورد. به همین جهت برای سنجش صحت انعکاس‌های طیفی دوباره تولید شده، آنها را تحت منابع نوری و مشاهده کننده‌های مختلف به مقادیر CIELAB تبدیل کرده و میزان اختلاف رنگ آنها با مقادیر واقعی را به دست آوردیم. میانگین این نتایج در منابع نوری و مشاهده کننده‌های مختلف، در جدول ۸ نشان داده شده است.

جدول ۸ نشان می‌دهد که استفاده از روش دوم و هنگامی که از منبع نوری D50 تحت مشاهده کننده ۱۰ درجه به همراه منبع نوری A تحت مشاهده کننده ۲ درجه برای دوباره تولید انعکاس طیفی با استفاده از تجزیه اجزا اصلی استفاده شود، کمترین خطا ایجاد می‌شود. در شکل ۱۰، میانگین خطای انعکاس طیفی نمونه‌های پیشگویی شده در هر منبع نوری و مشاهده کننده، به تفکیک نشان داده شده است.

میزان پارامتر آماری r^2 این نتایج نیز در جدول ۶ نشان داده شده است. همچنین در جدول ۷، میزان یکسو بودن اختلافات مقادیر ابعاد CIELAB با استفاده از روش غیر مستقیم نشان داده شده است که نسبت به روش مستقیم، نتایج بسیار یکسوتر هستند.

از مقایسه نتایج جداول ۴ الی ۷ می‌توان مشاهده کرد که بین همسو بودن تغییرات خطای رنگی در دو منبع نوری و مشاهده کننده و بهبود انعکاس‌های طیفی پیشگویی شده، ارتباط وجود دارد. دلیل این امر را می‌توان اینگونه بیان کرد که وقتی خطاهای تبدیل مقادیر RGB به مقادیر رنگی در دو سیستم در یک سو باشند، اثرات آنها در دوباره تولید انعکاس طیفی نیز در یک سو بوده و در نتیجه باعث افزایش خطای کلی نمی‌شوند. پس در نتیجه استفاده از منبع نوری و مشاهده کننده دوم، موقعی می‌تواند باعث بهبود پیشگویی نتایج انعکاس طیفی شود که از روش غیر مستقیم برای به‌دست آوردن مقادیر رنگی استفاده شود.

جدول ۷: مشخصه آماری r^2 در اختلافات مقادیر CIELAB (روش غیر مستقیم).

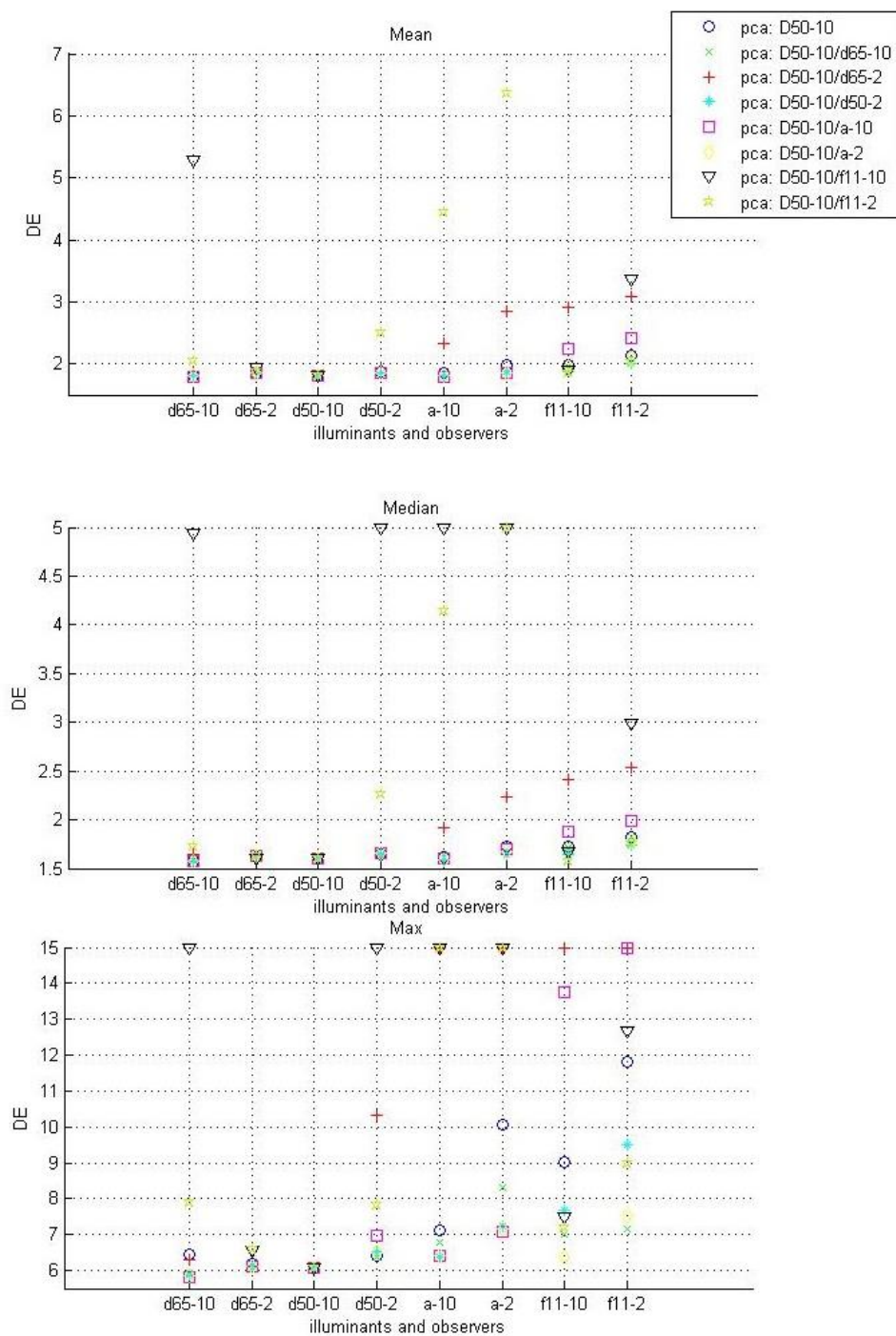
Table 7: r^2 parameter indirect method.

F11-2	A-2	D50-2	D65-2	F11-10	A-10	D65-10	منابع نوری و مشاهده کننده‌ها
۰,۹۴۸۳	۰,۹۷۸۹	۰,۹۹۶۲	۰,۹۹۷۵	۰,۹۶۲	۰,۹۸۵۵	۰,۹۹۸۶	L*
۰,۹۸۳۳	۰,۹۹۵۶	۰,۹۹۵	۰,۹۹۰۵	۰,۹۹۰۱	۰,۹۹۶۸	۰,۹۹۹۵	a*
۰,۹۹۵۲	۰,۹۹۷۲	۰,۹۹۹۹	۱	۰,۹۹۴۲	۰,۹۹۸۵	۰,۹۹۹۹	b*

جدول ۸: میانگین اختلاف رنگ‌های به دست آمده از انعکاس‌های طیفی پیشگویی شده با استفاده از روش غیر مستقیم در منابع نوری (D50, D65, A و F11) و مشاهده کننده‌های مختلف (۲ درجه و ۱۰ درجه).

Table 8: The mean of calculated color differences of predicted reflectance values using indirect method in different observers and illuminants.

D50-10 F11-2	D50-10 A-2	D50-10 D50-2	D50-10 D65-2	D50-10 F11-10	D50-10 A-10	D50-10 D65-10	D50-10	سیستم‌های استفاده شده با استفاده از روش غیر مستقیم
۲,۸۶	۱,۵۸	۱,۸۶	۲,۳۳	۹,۱۵	۱,۹۶	۱,۸۹	۱,۹۲	میانگین
۲۸,۱۳	۶,۵۱	۹,۵۲	۲۷,۵۲	۲۱۷,۸۸	۱۵,۳۹	۸,۳	۱۱,۸۳	بیشینه
۱,۷۴	۱,۳۴	۱,۶۴	۱,۷۹	۳,۹۷	۱,۶۴	۱,۶۴	۱,۶۴	میانه



شکل ۱۰: خطای اختلاف رنگ استفاده از روش تجزیه اجزا اصلی با استفاده از روش دوم در منابع نوری و مشاهده کننده‌های مختلف.

Figure 10: The error of color differences using PCA by the second method in different observers and illuminants.

می‌تواند بهترین عملکرد را نتیجه دهد. همچنین برای این کار، مقادیر رنگی تحت منبع نوری و مشاهده کننده دوم، باید از مقادیر رنگی تحت منبع نوری و مشاهده کننده اول (روش غیر مستقیم) به دست آیند. در صورتی که این مقادیر رنگی مستقیماً از مقادیر RGB خروجی دوربین محاسبه شوند (روش مستقیم)، خطای پیشگویی انعکاس طیفی زیاد می‌شود. علت را نیز می‌توان اینگونه شرح داد که در روش مستقیم، خطاهای تبدیل RGB به مقادیر رنگی مستقل از دستگاه در دو سیستم باعث افزایش خطای کلی می‌شوند در حالی که در روش غیرمستقیم، به علت همسو بودن خطاهای دو سیستم، خطای پیشگویی نهایی انعکاس طیفی را کاهش می‌دهند.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از راهنمایی‌های جناب آقای دکتر عامری برای تکمیل مقاله کمال تقدیر و تشکر را دارد.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق روش‌های مختلف برای تبدیل مقادیر RGB یک دوربین دیجیتال به مقادیر انعکاس طیفی بررسی شد. برای این کار نیاز است که در ابتدا مقادیر رنگی در فضای CIEXYZ و یا CIELAB به دست آمده و سپس این مقادیر به مقادیر انعکاس طیفی تبدیل شوند. در مرحله اول از روش ماتریسی برای تبدیل دو فضا استفاده شد و بهترین نتیجه در حالتی که از رابطه توان سوم بین فضای RGB (معادله ۷ در جدول ۲) و فضای رنگی CIELAB تحت منبع نوری D50 و مشاهده کننده ۱۰ درجه و همچنین از روش محلی برای خطی ساختن مقادیر RGB استفاده می‌شود، به دست آمد. همچنین برای دوباره تولید مقادیر انعکاس طیفی، از روش تجزیه اجزا اصلی استفاده شد و نشان داده شد که استفاده از مقادیر CIEXYZ تحت منابع نوری D50 و مشاهده کننده ۱۰ درجه به همراه مقادیر رنگی تحت منبع نوری A و مشاهده کننده ۲ درجه

۵- مراجع

1. M. Gorji, K. Ansari, F. Ameri, S. Moradian. A concise review on color match prediction models. *J. Color Sci. Tech.* 8(2014), 249-260.
2. B. Fraser, C. Murphy, F. Bunting. *Real World Color Management*. peachpit press, 2005, 79-95.
۳. م. گرجی بندپی، ارزیابی مدل‌های مرسوم برای تبدیل اختلاط افزایشی به کاهشی رنگ در چاپگرهای دیجیتال. پایان نامه کارشناسی ارشد، ایران، ۱۳۹۰
4. C. Poynton, *A Technical Introduction to Digital Video*. John Wiley & Sons., New York. 1996, 170-210.
5. K. Barnard, B. Funt, *Camera characterization for color research*. *Color. Res. Appl.* 27 (2002), 152-163.
6. H. R. Kang, *Color scanner calibration*. *JIST.* 36(1992), 162-170.
7. H. R. Kang, H. R., *Color Technology for Electronic Imaging Devices*. SPIE, 23 (1997), 23-28.
8. J. Y. Hardeberg, *Transformations and Colour Consistency for the Colour Facsimile*, MS thesis, Norway, 1995.
9. J. Y. Hardeberg, F. Schmitt, *Colorimetric characterization of a printer for the color facsimile*. Technical report, ENST / SEPT, (1996).
10. F. Schmitt, H. Maître, Y. Wu, *First progress report: tasks 2.4 (Development / procurement of basic software routines) and 3.3 (Spectrophotometric characterization of paintings)—Vasari project*. Technical Report 2649 (1990), CEE ESPRIT II.
11. F. Schmitt, Y. Wu, J. P. Cretz, G. Boulay, *Color calibration for color facsimile*. In *SID International Symposium*, Orlando, (1995).
12. F. Schmitt, J. P. Cretz, H. Brettel, J. Y. Hardeberg, I. Tastl, *Input and output device characterization in the field of color facsimile*. *CSIT*, 10 (1996), 141-143.
13. P. C. Hung, *Colorimetric calibration for scanners and media*. *CISS*, 1448(1991), 164-174.
14. B. A. Wandell, J. E. Farrell, *Water into wine: Converting scanner RGB into tristimulus XYZ*, SPIE proceedings, 1909 (1996), 92-101.
15. H. Haneishi, T. Hirao, A. Shimazu, Y. Miyake, *Colorimetric precision in scanner calibration using matrices*. *Color Imaging Conference*, (1995), 106-108.
16. G. Hong, M. R. Luo, P. A. Rhodes, *A study of digital camera colorimetric characterization based on polynomial modeling*. *Color. Res. Appl.* 26(2001), 76-84.
17. K. Liang, C. W. Chow, Y. Liu, *RGB visible light communication using mobile-phone camera and multi-input multi-output*. *Optics Express*. 24 (2016), 83-93.
18. J. Y. Hardeberg, *Acquisition and reproduction of colour images: colorimetric and multispectral approaches*, PhD thesis, France, 1999.
19. R. S. Berns, R. J. Motta, M. E. Gorzyski, (1993). *CRT colorimetry, part I: Theory and practice*. *Color. Res. Appl.* 18 (1993), 299-314.
20. A. Schmitz, M. Ye, R. Shapiro, R. Yang, B. Noehren, *Accuracy and repeatability of joint angles measured using a single camera markerless motion capture system*. *J. Biomech.* 47(2014), 587-591.
21. A. Bullas, S. Choppin, B. Heller, J. Wheat, *Validity and repeatability of a depth camera-based surface imaging system for thigh volume measurement*, *J. Sport. Sci.* 34(2016), 1998-2004.
22. N. Du-Yong, J. P. Allebach, *A subspace matching color filter design methodology for a multispectral imaging system*. *IEEE Trans. Image Process.* 15(2006), 2631-2643.
23. Y. Zheng, S. Lin, Ch. Kambhamettu, J. Yu, Sing Bing Kang *Single-Image Vignetting Correction*. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intelligence*, 31(2009), 14.
24. A. Mahmoudi Nahavandi, M. Saf. *Investigating and proving of multiplicative lighting correction in color characterization of digital camera*. *J. Color Sci. Tech.* 8(2014), 109-115.
25. S. Gutierrez, A. Wendel, J. Underwood, *Spectral filter design based on in-field hyperspectral imaging and machine learning*

- for mango ripeness estimation, *Comput. Electron. Agric.* 164 (2019), 105-112
26. C. J. Hawkyard, Synthetic reflectance curves by subtractive colour mixing, *J. Soc. Dyers Colour.* 109 (1993), 246-251
27. C. J. Hawkyard, Synthetic reflectance curves by additive mixing, *J. Soc. Dyers Colour.* 109 (1993), 323-329
28. R. S. Berns, Synthetic reflectance curve. *J. Soc. Dyers Colour.* 110 (1994), 386-389
29. I. T. Jolliffe, *Principal component analysis*, second edition, Springer series in statistic, New youk, 2002
۳۰. س. ح. امیرشاهی، ف. آگهیان، فیزیک رنگ محاسباتی، انتشارات ارکان دانش، چاپ اول، اصفهان، ۱۳۸۶
31. J. B. Feallock, J. F. Southard, M. Kobayashi, W. C. Howell, absolute judgment of colors in the Federal Standards System. *Appl.* 1966 (50), 266-272.
۳۲. ع. محمودی، توسعه یک مدل ریاضی برای یافتن حداقل تعداد فیلتر با منحنی عبوری بهینه به منظور دستیابی به بازسازی طیفی مطلوب. پایان نامه دکتری، ایران، ۱۳۹۵.

How to cite this article:

A. R. Vaziri, F. Ghanbari, M. Gorji Bandpay, Using Camera of a Cell Phone as a Spectrophotometer in Outdoor Usage, *J. Color Sci. Tech.* 15, 4(2022), 255-269.

DOR: 20.1001.1.17358779.1400.15.4.1.2