

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۰۶/۱۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۰۱/۲۶

## بازسازی دید کوررنگی برای افراد با دید رنگ طبیعی

شیدا عنبری

گروه مهندسی رایانه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران  
پست الکترونیکی: anbarisheida22@gmail.com

حمیدرضا حمیدی\*

گروه مهندسی رایانه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران  
پست الکترونیکی: hamidreza.hamidi@eng.ikiu.ac.ir

شکوه کرمانشاهانی

گروه مهندسی رایانه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران  
پست الکترونیکی: kermanshahani@eng.ikiu.ac.ir

### چکیده

بهتر بوده است. همچنین بین ارزیابی داوطلب‌های زن و مرد نیز تفاوت قابل توضیح وجود دارد. همچنین در این مطالعه درک رنگ افراد مبتلا به آبی-زردکوری نیز در نظر گرفته شده است.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی کوررنگی، سه رنگ‌بینی ناهنجار، دو رنگ‌بینی، آزمون دید رنگ ایشیهارا، آبی‌کوری.

### ۱- مقدمه

سیستم بینایی انسان مبتنی بر سلول‌های گیرنده‌ای است که فتوگرامتر نامیده شده و بخشی از شبکه در چشم است. در شبکه چشم، سلول‌های مخروطی<sup>۱</sup> و میله‌ای<sup>۲</sup> بسیاری، توزیع شده است. میله‌ها مسئول تشخیص روشنایی هستند اما درک رنگ توسط سلول‌های مخروطی به دست می‌آید که حساس به طول موج هستند و در طول موج‌های مختلفی فعال می‌شوند. در افراد مبتلا به

کوررنگی اثرات مهمی در فعالیت روزانه افراد دارد زیرا اکثر فعالیت‌ها نیاز به تشخیص بین رنگ‌ها دارند. فهم این‌که افراد مبتلا به کوررنگی چگونه رنگ‌ها را درک می‌کنند، برای مهندسان و طراحان حائز اهمیت است. لذا روش‌های بسیاری برای شبیه‌سازی درک رنگ افراد مبتلا به دورنگ‌بینی و سه رنگ‌بینی ناهنجار پیشنهاد شده است. در این مقاله، بر پایه یک روش ترکیبی درک رنگ افراد مبتلا به درجات مختلف قرمزشواری و سبزشواری نسبت به برند ۲۴ بشقاب آزمون دید رنگ ایشیهارا شبیه‌سازی شده است. سپس تصاویر شبیه‌سازی شده در اختیار افراد با دید رنگ طبیعی قرار گرفت. برداشت افراد با دید طبیعی نسبت به تصاویر شبیه‌سازی شده آزمون ایشیهارا، سنجیده شد تا میزان دقت شبیه‌سازی ارزیابی شود. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که عملکرد شبیه‌سازی نسبت به تصاویر شبیه‌سازی شده با درجات بالای کوررنگی

\* نویسنده مسئول

1- Cone  
2- Rod

کوررنگی این سلول‌ها آسیب دیده است [۲].

نقص دید رنگ که به‌عنوان کوررنگی شناخته می‌شود به‌عنوان عدم توانایی در تشخیص بین رنگ‌ها و در موارد حادث‌تر ندیدن کامل رنگ تعریف می‌شود. نقص دید رنگ حدود ۲۰۰ میلیون فرد در سراسر جهان را تحت تاثیر قرار داده است [۱].

کوررنگی به سه دسته تک رنگ‌بینی، دورنگ‌بینی و سه رنگ‌بینی ناهنجار تقسیم می‌شود. تک رنگ‌بینی، کوررنگی کامل است که شخص فقط یک رنگ را تشخیص می‌دهد. دو رنگ‌بینی به خاطر نبودن یا از دست دادن یکی از سلول‌های مخروطی اتفاق می‌افتد و به سه دسته قرمزکوری، سبزکوری و آبی‌کوری تقسیم می‌شود. در سه رنگ‌بینی ناهنجار هر سه نوع سلول مخروطی فعال هستند ولی در اثر جهش، حساسیت یکی از آن‌ها به طیف نور تغییر یافته است که به سه دسته قرمز دشواری‌بینی، سبز دشواری‌بینی و آبی دشواری‌بینی تقسیم می‌شود [۳].

در حدود ۸٪ از مردان و ۰.۵٪ از زنان در اروپای شمالی مرسوم‌ترین کوررنگی قرمز - سبز را دارند. مردان نسبت به زنان با احتمال بالاتری کوررنگی دارند [۱]. تشخیص کوررنگی از طریق انجام آزمون‌های مختلفی ممکن است. آزمون آنومالوسکوپ<sup>۳</sup>، بشقاب‌های ایشیهارا<sup>۴</sup> و آزمون آرایش رنگ<sup>۵</sup> که به آزمون فرانسفورت منزل<sup>۶</sup> معروف است [۲].

کوررنگی اثرات مهمی در فعالیت روزانه افراد دارد زیرا اکثر فعالیت‌ها نیاز به تشخیص بین رنگ‌ها دارند، برای مثال آشپزی، کمک‌های اولیه، هنر، پزشکی و کار با رایانه [۴]. فهم این‌که افراد مبتلا به کوررنگی چگونه رنگ‌ها را درک می‌کنند بسیار حائز اهمیت است. طراحان سامانه‌ها و ابزارها عموماً بدون توجه به نحوه درک رنگ افراد مبتلا به کوررنگی، اقدام به طراحی و ساخت می‌کنند. عموماً سامانه‌های نرم‌افزاری امکان کار کاربران را از طریق

واسط‌های گرافیکی به‌وجود می‌آورند. استفاده نامناسب از رنگ می‌تواند برای افراد مبتلا به کوررنگی هنگام کار با رایانه مشکل ایجاد کند. لذا مناسب است به طراحان امکان داد تا دید رنگ افراد مبتلا به کوررنگی را مشاهده کنند. شبیه‌سازی کوررنگی به شیوه‌هایی گفته می‌شود که دید افراد مبتلا به کوررنگی را بازسازی می‌کنند.

روش‌های بسیاری برای شبیه‌سازی درک رنگ افراد مبتلا به دورنگ‌بینی و سه رنگ‌بینی ناهنجار پیشنهاد شده است [۵، ۶]. اگرچه نتایج شبیه‌سازی شده حاصل از بعضی روش‌ها با گزارش‌های افراد مبتلا به کوررنگی متفاوت بوده است [۷]. ماچادو و همکارانش مدلی مبتنی بر نظریه مرحله برای شبیه‌سازی درک رنگ افراد مبتلا به کوررنگی مطرح کردند. این مدل درک رنگ را با ترکیب کردن یک مرحله پاسخ طیفی فتوگرامترها و یک مرحله حریف-رنگ<sup>۷</sup> شبیه‌سازی می‌کند [۱].

در طراحی و ساخت تجهیزات و سامانه‌های نرم‌افزاری، بیان رنگ در فضاهای رنگ متعددی صورت می‌گیرد. تجهیزات مشابه تلویزیون و صفحه نمایش رایانه‌ها از فضای رنگ آر.جی.بی. (RGB)<sup>۸</sup> بهره می‌برند که در آن یک رنگ بسته به میزانی که از سه رنگ اصلی قرمز، سبز و آبی دارد، بیان می‌شود [۸]. فضای رنگ اچ.اس.آی. (HSI)<sup>۹</sup> نمایش یک رنگ را با سه مولفه «رنگ»، «اشباع» و «شدت» نمایش می‌دهد و نمایش توسعه یافته مدل رنگ آر.جی.بی. است که در دهه ۱۹۷۰ توسط محققان گرافیک رایانه‌ای طراحی شد تا دقیق‌تر با بینایی انسان، ویژگی‌های رنگ را درک کند. در این مدل، اطلاعات رنگ از شدت جدا شده است و فرض می‌شود که تمام مقادیر رنگ در فاصله [۰، ۱] است [۸].

از آنجا که چشم انسان دارای سه نوع حسگر رنگی است که به دامنه‌های مختلف طول موج (کوتاه، متوسط و بلند) پاسخ می‌دهند، یک نقشه کامل از تمام رنگ‌های قابل مشاهده، یک شکل سه بعدی است. نمودار رنگ سی.آی.ای

7- Opponent-color theory.

8- Red, Green and Blue (RGB).

9- Hue, Saturation, Intensity (HSI).

3- RGB Anomaloscope.

4- Ishihara test.

5- Color Arrangement test.

6- D-15 dichotomous test.

(CIE)<sup>۱۰</sup> یک راه برای توصیف رنگ است. سه مولفه رنگ (قرمز، سبز و آبی) می‌توانند به فضای سه بعدی دیگری تبدیل شوند که در آن یک محور، تابش/روشنایی است که مستقل از رنگ است و دو محور دیگر که رنگ را توصیف می‌کند. این نمودار از مختصات X و Y برای نشان دادن رنگ استفاده می‌کند، بنابراین اصطلاح رنگ XY برای تعیین محور استفاده می‌شود. نمودار رنگ سی.آی.ای. به صورت دوبعدی روی صفحه  $X+Y+Z=1$  مجسم می‌شود [۴]. و فضای رنگ ال.ام.اس. (LMS)<sup>۱۱</sup> بر مبنای مدل درک رنگ شبکه چشم در پاسخ به طول موج‌های بلند (L)، متوسط (M) و کوتاه (S) کار می‌کند [۹].

در این مقاله بر روی دقت شبیه‌سازی برای سطوح مختلف قرمز-سبزکوری تمرکز شده است. از طرفی اکثر کارهای انجام شده برای نوع خاصی از کوررنگی (قرمزکوری، سبزکوری) انجام شده و آبی‌کوری به ندرت در نظر گرفته شده است. در این مطالعه درک رنگ افراد مبتلا به آبی-زردکوری نیز بررسی شده است.

در ادامه در بخش دوم، مطالعات انجام شده در زمینه شبیه‌سازی و بهبود دید رنگ افراد مبتلا به کوررنگی شرح داده شده است. بخش سوم شامل شیوه ترکیبی پیشنهادی برای شبیه‌سازی سه رنگ‌بینی ناهنجار و دورنگ‌بینی است. در بخش چهارم دو مطالعه انجام شده در این پژوهش برای سنجش دقت شبیه‌سازی مطرح می‌شوند. و در آخر بحث و نتیجه کلی این پژوهش ارائه شده است.

## ۲- پژوهش‌های مرتبط

کارهای کمی در شبیه‌سازی انواع کوررنگی و با شدت‌های متغیر انجام شده است. روش‌های طراحی شده برای شبیه‌سازی دورنگ‌بینی مبتنی بر گزارش‌های یک جانبه افراد مبتلا به دورنگ‌بینی است (افرادی که از یک چشم دورنگ‌بین و از چشم دیگر سه رنگ بین طبیعی بودند). بریتل و همکارانش نیز محاسبات شبیه‌سازی را

10- CIE 1931 XYZ.  
11- Long, Medium, Short (LMS).

در فضای رنگ LMS<sup>۱۲</sup> انجام دادند [۵]. میر و گرینبرگ نیز روشی را معرفی کردند که در فضای XYZ<sup>۱۳</sup> شبیه‌سازی می‌کند [۶]. این روش‌ها نتایج خوبی را تولید می‌کنند اما تنها برای دورنگ‌بینی ارائه شده‌اند و نمی‌توانند به سه رنگ‌بینی ناهنجار تعمیم داده شوند. کندو و همکارانش نیز مدلی برای شبیه‌سازی سه رنگ‌بینی ناهنجار مبتنی بر دورنگ‌بینی ارائه دادند اما نتایج این مدل رنگ‌های شفاف را حفظ نمی‌کند [۱۰].

در زمینه بهبود دید رنگ افراد مبتلا به کوررنگی نیز روش‌های بسیاری ارائه شده‌اند که شامل روش‌های فیزیکی مانند استفاده از لنزها و عینک‌های خاص است. کروما<sup>۱۴</sup>، یک سیستم واقعیت افزوده مبتنی بر عینک گوگل است که به کاربران امکان می‌دهد تصویری پالایش شده از صحنه فعلی را در زمان واقعی ببینند. زمانی که برنامه راه‌اندازی می‌شود یک جریان ویدئوی زمان واقعی روی یک صفحه کوچک نمایش داده می‌شود که از دوربین عینک، دید را نشان می‌دهد. کاربر می‌تواند یک حالت را انتخاب کرده و عینک دید تغییر یافته بر اساس پالایه موردنظر را نمایش خواهد داد [۴]. برنامه‌های کاربردی بسیاری نیز برای گوشی‌های هوشمند توسعه یافته که از الگوریتم‌های رنگ‌آمیزی مجدد برای اصلاح دید رنگ استفاده می‌کنند [۸]. [۱۱-۱۳]. تلاش شده است تا با اصلاح رنگ و یا اطلاعات افزوده بر تصاویر به افراد مبتلا به کوررنگی کمک کنند تا درک بهتری نسبت به تصاویر داشته باشند.

## ۳- شبیه‌سازی کوررنگی

یک تصویر رنگی از دید افراد با کوررنگی متفاوت از دید افراد با دید طبیعی است. بسته به نوع و شدت کوررنگی، نواحی رنگی تصویر با رنگ متفاوتی دیده می‌شوند. افراد با دید طبیعی عموماً درک درستی از دید افراد با کوررنگی ندارند. شبیه‌سازی کوررنگی عبارت است از ارائه دید رنگ

12- LMS color space: normalized spectral sensitivity of human cone cells: Short, Middle and Long-wavelength types.

13- The International Commission on Illumination (CIE) created CIE 1931 XYZ color space in 1931.

14- Chroma.

افراد مبتلا به کوررنگی برای افراد با دید طبیعی. یا به عبارت دیگر می‌خواهیم به افراد با دید طبیعی نشان دهیم که افراد با دید کوررنگی تصاویر را چگونه می‌بینند.

هر نقطه از یک تصویر رنگی بسته به فضای رنگ مورد نظر، به صورت چند مولفه (یک بردار) بیان می‌شود. به عنوان مثال، در فضای رنگ RGB یک نقطه تصویر رنگی دارای سه مشخصه رنگ قرمز R، سبز G و آبی B است که به صورت بردار رنگ سه تایی (R, G, B) بیان می‌شود. برای شبیه‌سازی کوررنگی، نیاز به ماتریس تبدیلی است که بردار رنگ دید طبیعی را به بردار رنگ افراد مبتلا به کوررنگی نگاشت کند. در ادامه ماتریس‌های تبدیلی که مورد استفاده قرار گرفته‌اند، معرفی می‌شوند.

### ۳-۱- شبیه‌سازی سه رنگ‌بینی ناهنجار

نظریه سه مولفه یانگ‌هلم‌هولتز<sup>۱۵</sup> فضای رنگ LMS را مطرح می‌کند [۹]. فضای رنگ LMS که بر مبنای مدل درک رنگ شبکیه چشم انسان است، بخوبی می‌تواند نحوه تاثیر ناهنجاری دید رنگ را شرح دهد. اما نمی‌تواند برخی از مسائل ادراکی را توضیح دهد، مثل این که چرا بعضی از رنگ‌ها هرگز با یکدیگر درک نمی‌شوند (مانند آبی و ارغوانی - قرمز و قهوه‌ای - سبز و قهوه‌ای)، در حالی که دیگر رنگ‌ها (مانند سبز و زرد - سبز و آبی - قرمز و زرد - قرمز و آبی) را به راحتی می‌توان در کنار هم دید [۱۶]. این مشکلات را می‌توان با نظریه حریف-رنگ هرینگ<sup>۱۶</sup> که وجود شش رنگ پایه (سفید، سیاه، قرمز، سبز، آبی و زرد) را در نظر می‌گیرد، رفع نمود. فضای حریف-رنگ (Opp = WS, YB, RG)، مشابه سیستم ادراکی انسان، تنها از سه مجرای مخالف سفید-سیاه (WS)، قرمز-سبز (RG) و زرد-آبی (YB) استفاده می‌کند [۱۶].

در این پژوهش برای شبیه‌سازی سه رنگ‌بینی ناهنجار از مدل دو-مرحله‌ای ماچادو استفاده کرده‌ایم [۱]. مدل دو-مرحله‌ای ماچادو برای درک بهتر ناهنجاری دید رنگ،

15- Young-Helmholtz three-component theory  
16- Hering's Opponent color spaces.

(در مرحله اول) ابتدا اثر ناهنجاری را در فضای LMS اعمال می‌کند سپس جهت نزدیکی به درک بصری انسان، (در مرحله دوم) تبدیل رنگ را در فضای حریف-رنگ (Opp = WS, YB, RG) انجام می‌دهد.

در این پژوهش تصاویر اولیه در فضای رنگ RGB بوده‌اند و نتیجه نهایی شبیه‌سازی نیز در همین فضای رنگ نمایش داده شده است. لذا الگوریتم شبیه‌سازی سه رنگ‌بینی ناهنجار این پژوهش شامل گام‌های زیر است:

۱- محاسبه تاثیر ناهنجاری در فضای LMS: در مقایسه با افراد با دید رنگ طبیعی، نقص دید رنگ موجب می‌شود تا دید رنگ چشم فرد مبتلا به کوررنگی میزانی انحراف ( $\lambda$ ) روی پاسخ سلول‌های مخروطی چشم (بلند "L"، متوسط "M" و کوتاه "S") نسبت به دید طبیعی داشته باشد. اگر فرض کنیم توابع  $L(\lambda)$ ،  $M(\lambda)$  و  $S(\lambda)$  حساسیت طیفی سلول‌های مخروطی یک فرد سه رنگ بین طبیعی را نشان می‌دهند آنگاه  $\Delta\lambda_L$ ،  $\Delta\lambda_M$  و  $\Delta\lambda_S$  نشان دهنده میزان انحراف در سلول‌های مخروطی ناهنجار است. بنابراین پاسخ طیفی افراد مبتلا به سه رنگ‌بینی ناهنجار به صورت معادلات زیر مدل می‌شود (به عنوان نمونه La تبدیل یافته سیگنال بلند L است):

$$L_a(\lambda) = L(\lambda + \Delta\lambda_L) \quad \text{سلول‌های مخروطی} \quad (1) \quad \text{ناهنجاری در} \quad L$$

$$M_a(\lambda) = M(\lambda + \Delta\lambda_M) \quad \text{سلول‌های مخروطی} \quad (2) \quad \text{ناهنجاری در} \quad M$$

$$S_a(\lambda) = S(\lambda + \Delta\lambda_S) \quad \text{سلول‌های مخروطی} \quad (3) \quad \text{ناهنجاری در} \quad S$$

۲- انتقال تاثیر ناهنجاری از فضای LMS به فضای حریف-رنگ: حال باید پاسخ طیفی سلول‌های مخروطی افراد مبتلا به سه رنگ‌بینی ناهنجار از فضای LMS به فضای حریف-رنگ (Opp = WS, YB, RG) نگاشت شود (معادلات ۱-۶)، برای این کار از ماتریس تبدیل  $T_{LMS2Opp}$  استفاده

می‌شود که در مدل دو-مرحله‌ای ماچادو مطرح شده است [۱]:

$$\begin{bmatrix} WS(\lambda) \\ YB(\lambda) \\ RG(\lambda) \end{bmatrix}_{pa} = T_{LMS2Opp} \begin{bmatrix} L_a(\lambda) \\ M(\lambda) \\ S(\lambda) \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} \text{(۴) تاثیر ناهنجاری} \\ \text{در فضای} \\ \text{حریف-رنگ:} \end{array}$$

$$\begin{bmatrix} WS(\lambda) \\ YB(\lambda) \\ RG(\lambda) \end{bmatrix}_{da} = T_{LMS2Opp} \begin{bmatrix} L(\lambda) \\ M_a(\lambda) \\ S(\lambda) \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} \text{(۵) تاثیر ناهن.} \\ \text{جاری در فضای} \\ \text{حریف-رنگ:} \end{array}$$

$$\begin{bmatrix} WS(\lambda) \\ YB(\lambda) \\ RG(\lambda) \end{bmatrix}_{ta} = T_{LMS2Opp} \begin{bmatrix} L(\lambda) \\ M(\lambda) \\ S_a(\lambda) \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} \text{(۶) تاثیر ناهنجاری} \\ \text{در فضای} \\ \text{حریف-رنگ:} \end{array}$$

۳- انتقال تاثیر ناهنجاری در فضای حریف-رنگ روی تصویر RGB: برای آن‌که بتوان درک رنگ افراد مبتلا به سه رنگ‌بینی ناهنجار روی تصاویر RGB را شبیه‌سازی کرد باید یک نگاشت از فضای رنگ RGB به فضای حریف-رنگ انجام شود. برای این کار از توابع پایه  $WS(\lambda)$ ،  $YB(\lambda)$  و  $RG(\lambda)$  که در مرحله دوم محاسبه شد و نیز توزیع توان طیفی<sup>۱۷</sup> مقادیر اولیه قرمز، سبز و آبی، مطرح شده در مدل دو-مرحله‌ای ماچادو، استفاده می‌شود (معادلات ۷) [۱]:

$$\begin{aligned} WS_R &= \rho_{WS} \int \varphi_R WS(\lambda) d\lambda \quad (i) \\ WS_G &= \rho_{WS} \int \varphi_G WS(\lambda) d\lambda \quad (ii) \\ WS_B &= \rho_{WS} \int \varphi_B WS(\lambda) d\lambda \quad (iii) \\ YB_R &= \rho_{YB} \int \varphi_R YB(\lambda) d\lambda \quad (iv) \\ YB_G &= \rho_{YB} \int \varphi_G YB(\lambda) d\lambda \quad (v) \\ YB_B &= \rho_{YB} \int \varphi_B YB(\lambda) d\lambda \quad (vi) \\ RG_R &= \rho_{RG} \int \varphi_R RG(\lambda) d\lambda \quad (vii) \\ RG_G &= \rho_{RG} \int \varphi_G RG(\lambda) d\lambda \quad (viii) \\ RG_B &= \rho_{RG} \int \varphi_B RG(\lambda) d\lambda \quad (ix) \end{aligned} \quad (7)$$

توزیع توان طیفی  $\varphi_R(\lambda)$ ،  $\varphi_G(\lambda)$  و  $\varphi_B(\lambda)$  مقادیر اولیه RGB را بر روی مجموعه‌ای از توابع پایه  $WS(\lambda)$ ،  $YB(\lambda)$  و  $RG(\lambda)$  تصویر می‌کند. عوامل نرمال‌سازی

17- Spectral Power Distributions.

$\rho_{WS}$ ،  $\rho_{YB}$  و  $\rho_{RG}$  برای برآورده کردن محدودیت‌های زیر (معادلات ۸) انتخاب می‌شوند تا تضمین کنند رنگ‌های شفاف<sup>۱۸</sup> (سایه‌های خاکستری) دقیقاً همان مختصات را از مشکی خالص (0,0,0) تا سفید خالص (1,1,1) هم در RGB و هم در فضاهاى حریف-رنگ (سه رنگ‌بینی طبیعی، سه رنگ‌بینی ناهنجار و دورنگ‌بینی) دارند [۴]:

$$\begin{aligned} WS_R + WS_G + WS_B &= 1 \\ YB_R + YB_G + YB_B &= 1 \\ RG_R + RG_G + RG_B &= 1 \end{aligned} \quad (8)$$

به کمک محاسبات این مرحله (معادلات ۷) ماتریس تبدیل  $\Gamma$  (معادله ۹) به دست می‌آید که فضای رنگ RGB را به فضای حریف-رنگ افراد مبتلا به سه رنگ‌بینی ناهنجار نگاشت می‌کند [۱]:

$$\Gamma = \begin{bmatrix} WS_R & WS_G & WS_B \\ YB_R & YB_G & YB_B \\ RG_R & RG_G & RG_B \end{bmatrix} \quad (9)$$

۴- انتقال تصویر از فضای حریف-رنگ به فضای RGB: در پایان درک رنگ افراد مبتلا به سه رنگ‌بینی ناهنجار در فضای حریف-رنگ که در مرحله قبل محاسبه شد، به فضای RGB انتقال داده می‌شود. در مدل دو-مرحله‌ای ماچادو ماتریس  $\Gamma_{normal}$  معرفی شده است که فضای رنگ RGB را به فضای حریف-رنگ یک فرد سه رنگ‌بین طبیعی نگاشت می‌کند. بنابراین، شبیه‌سازی درک رنگ یک فرد مبتلا به سه رنگ‌بینی ناهنجار برای یک فرد سه رنگ‌بین طبیعی با معادله زیر به دست می‌آید که در مطالعه اول بخش بعد استفاده کرده‌ایم (معادله ۱۰) [۱]. بردار حاصل نهایی شبیه‌سازی دید ناهنجاری بردار اولیه (R, G, B) است.

$$\begin{bmatrix} R_s \\ G_s \\ B_s \end{bmatrix} = \Gamma_{normal}^{-1} * \Gamma * \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (10)$$

### ۲-۳ شبیه‌سازی دورنگ‌بینی آبی کوری

در بخش قبل روش شبیه‌سازی پیاده سازی شده در این پژوهش شرح داده شد که برای سه رنگ‌بینی ناهنجار

18- Achromatic colors.

a و b استفاده می‌شود (معادلات ۱۵) [۱۴].

$$\begin{aligned} S_w &= aL_w + bM_w \\ S_b &= aL_b + bM_b \end{aligned} \quad (15)$$

برای محاسبه a و b به مقادیر LMS برای دو رنگ سفید و آبی نیاز است. این مقادیر با ضرب کردن بردار رنگ سفید و بردار رنگ آبی (در فضای RGB) در ماتریس تبدیل T (مقدار آن از الگوریتم تبدیل رنگ دالتونیز<sup>۱۹</sup> است که فضای RGB را به فضای LMS تبدیل می‌کند [۱۷]) به دست می‌آید. معادلات ۱۶ و ۱۷ نحوه محاسبه مقادیر L, M, S برای دو رنگ سفید و آبی را نشان می‌دهند [۱۴].

$$T * \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_w \\ M_w \\ S_w \end{bmatrix} \quad (16)$$

بردار رنگ سفید در فضای RGB

$$T * \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_b \\ M_b \\ S_b \end{bmatrix} \quad (17)$$

بردار رنگ آبی در فضای RGB

$$T = \begin{bmatrix} 0.31399022 & 0.63951294 & 0.04649755 \\ 0.15537241 & 0.75789446 & 0.08670142 \\ 0.01775239 & 0.10944209 & 0.87256922 \end{bmatrix}$$

با جایگذاری مقادیر a و b به دست آمده در مرحله چهارم در ماتریس تبدیل (معادله ۱۲)، ماتریس شبیه‌سازی درک رنگ آبی‌کوری (معادله ۱۸) به دست می‌آید [۱۴].

$$S_t = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -0.86744736 & 1.867227089 & 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

از ماتریس تبدیل به دست آمده در معادله ۱۸ برای شبیه‌سازی درک رنگ افراد مبتلا به آبی‌کوری در مطالعه دوم بخش بعد استفاده می‌شود. در ادامه به تشریح دو مطالعه کاربری از شیوه شبیه‌سازی پیشنهادی می‌پردازیم.

#### ۴- مطالعه کاربری شبیه‌سازی کوررنگی

در این پژوهش برای سنجش میزان دقت شبیه‌سازی پیشنهاد شده، دو مطالعه کاربری انجام شده است. مطالعه

است. همچنین این روش برای دو رنگ‌بینی نوع قرمز و سبز نیز قابل تعمیم است. در قرمزکوری، ناهنجاری قرمز کامل است و در سبزکوری نیز ناهنجاری سبز کامل است. اما آبی‌کوری (یا آبی-زردکوری) اکتسابی است و روش مطرح شده در بخش قبل برای آبی‌کوری قابل استفاده نیست. در ادامه به نحوه شبیه‌سازی آبی‌کوری می‌پردازیم که شامل مراحل زیر است:

۱- در فضای رنگ LMS اگر آبی‌کوری به عنوان نبود کامل سلول مخروطی کوتاه S در نظر گرفته شود، ماتریس تبدیل S به دست می‌آید (معادله ۱۱). مشکلی که وجود دارد این است که اگر این ماتریس تبدیل S به تصویری اعمال شود رنگ سفید، به رنگ آبی شبیه‌سازی می‌شود و افراد مبتلا به آبی‌کوری نمی‌توانند دو رنگ سفید و آبی را از هم تشخیص دهند [۱۴].

$$\underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_S \begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_c \\ M_c \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

برای حل مشکل بالا به جای آن که سلول مخروطی کوتاه برابر صفر باشد، جایگزینی از ضریب دو سلول مخروط بلند L و متوسط M در نظر گرفته می‌شود (a, b) دو ضریب مجهول معادله ۱۲) و ماتریس تبدیل S<sub>p</sub> را داریم [۱۴].

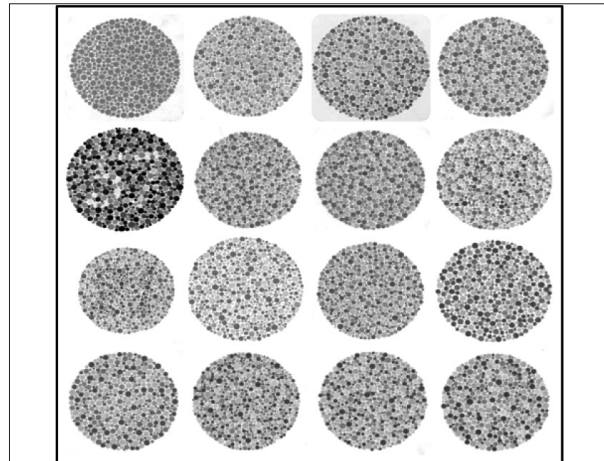
$$\underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ a & b & 0 \end{bmatrix}}_{S_p} \begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_c \\ M_c \\ aL_c + bM_c \end{bmatrix} \quad (12)$$

برای به دست آوردن مجهول‌های a, b، سپس ماتریس را به دو رنگ خاص سفید (معادله ۱۳) و آبی (معادله ۱۴) در فضای رنگ LMS اعمال می‌کنیم [۱۴].

$$\begin{aligned} (13) \text{ اعمال } S_p & \text{ به رنگ سفید} \\ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ a & b & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_w \\ M_w \\ S_w \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} L_w \\ M_w \\ aL_w + bM_w \end{bmatrix} & :w \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (14) \text{ اعمال } S_p & \text{ به رنگ آبی } :b \\ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ a & b & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_b \\ M_b \\ S_b \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} L_b \\ M_b \\ aL_b + bM_b \end{bmatrix} \end{aligned}$$

۴- از دو معادله به دست آمده در مرحله قبل برای محاسبه



شکل ۱: نمونه بشقاب های آزمون ایشیهارا [۱۵].

کاربری اول مبتنی بر یکی از روش‌های معروف آزمون دید رنگ است که برای کوررنگی سه رنگ‌بینی ناهنجار و دو رنگ‌بینی نوع قرمز و سبز مناسب است. مطالعه دوم برای آبی کوررنگی انجام شده است.

#### ۴-۱ مطالعه اول: بشقاب‌های ایشیهارا

در این مطالعه تلاش کردیم همه دامنه دید رنگ افراد با انواع (قرمز-سبز) و درجات مختلف کوررنگی را شبیه‌سازی کنیم. آزمون دید رنگ ایشیهارا به‌عنوان بستر اولیه سنجش صحت شبیه‌سازی انجام شده مدنظر قرار گرفته است. آزمون دید رنگ ایشیهارا دارای تعدادی بشقاب با تصاویر رنگی است که در داخل این تصاویر یک عدد یا یک مسیر قرار دارد (مشابه شکل ۱). از آزمون‌شوندگان خواسته می‌شود تا عدد یا مسیر داخل تصاویر را شناسایی کنند. بر اساس پاسخ آن‌ها، نقص دیدشان سنجیده می‌شود [۱۵]. در مطالعه اول این مقاله نمونه ۲۴ بشقابی آزمون دید رنگ ایشیهارا با استفاده از ماتریس‌های شبیه‌سازی یکبار برای قرمزکوری و بار دیگر برای سبزکوری شبیه‌سازی شده است.

#### ۴-۱-۱ اعتبارسنجی با نمونه گیری

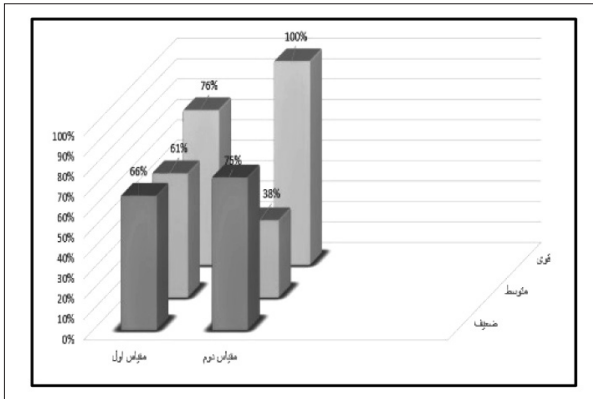
ابتدا شبیه‌سازی سه رنگ‌بینی ناهنجار روی بشقاب‌های آزمون ایشیهارا توسط الگوریتم بخش ۳-۱ انجام شد و سپس تصاویر تبدیل شده در اختیار افراد دارای دید رنگ

طبیعی قرار گرفت. از افراد خواسته شد تا عددی را که در تصاویر شبیه‌سازی شده می‌بینند مشخص کنند. نتیجه مطلوب این است که افراد با دید رنگ سالم، در تصاویر شبیه‌سازی شده عددی را ببینند که افراد مبتلا به کوررنگی آن عدد را می‌بینند.

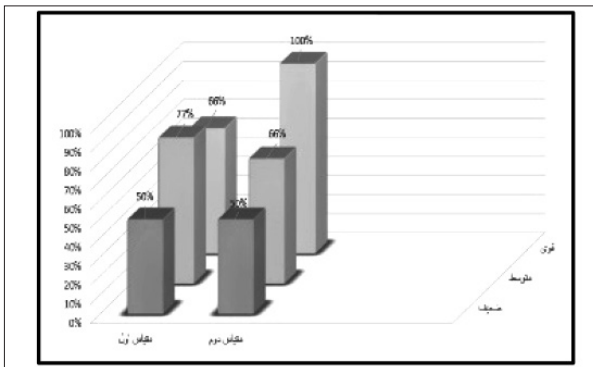
در مرحله اول باید نوع دید رنگ داوطلبان را تعیین کرد. برای این کار از یک آزمون دید رنگ ایشیهارا که به‌صورت برخط<sup>۲۰</sup> موجود است، استفاده کردیم. در مرحله دوم از تصاویر شبیه‌سازی شده برای افراد با دید رنگ طبیعی استفاده شده است. از داوطلبانی که در مرحله اول توانستند در آزمون دید رنگ ایشیهارا نتیجه مورد نظر (مبتلا به کوررنگی قرمز-سبز نباشند) را به‌دست آورند، ادامه آزمون گرفته شده است. در شبیه‌سازی این پژوهش، شدت کوررنگی را با میزان انحراف  $\lambda$  در معادلات ۱ تا ۳ بخش ۳-۱ مشخص کردیم. شدت کوررنگی یا میزان ناهنجاری/انحراف ( $\lambda$ )، مقدار عددی اعشاری بین صفر تا یک است که توسط آزمون کننده تعیین می‌شود. برای هر شدت کوررنگی، تصاویر شبیه‌سازی شده مربوط به آن شدت گنجانده شده است. از داوطلبان خواسته شد با توجه به تصاویر پیش رو، عددی که می‌بینند را مشخص کنند. مطالعه سبزکوری و قرمزکوری بر روی ۱۲۰ فرد با دید رنگ طبیعی، شامل ۳۰ مرد و ۳۰ زن در محدوده سنی ۱۰-۵۵ سال برای سبزکوری و ۳۰ مرد و ۳۰ زن در محدوده سنی ۲۱-۶۳ برای قرمزکوری انجام شده است.

برای تحلیل نتایج، ابتدا میزان شدت قرمز-سبز کوری (۱، ۰، ۲، ۰، ...، ۱) در سه رده قوی، متوسط و ضعیف طبقه‌بندی کرده‌ایم به طوری که شدت‌های بالای ۶،۰ در رده قوی، شدت‌های ۳،۰ - ۵،۰ در رده متوسط و شدت‌های ۱،۰ و ۲،۰ در رده ضعیف قرار دارند. در آزمون ایشیهارا تعیین شدت کوررنگی بر اساس تعداد پاسخ صحیح از کل بشقاب‌ها ممکن است. لذا داوطلبان بر اساس تعداد پاسخ‌های صحیح به ۱۵ بشقاب اول شبیه‌سازی شده از برند ۲۴ بشقاب، در یکی از سه رده قوی، متوسط و

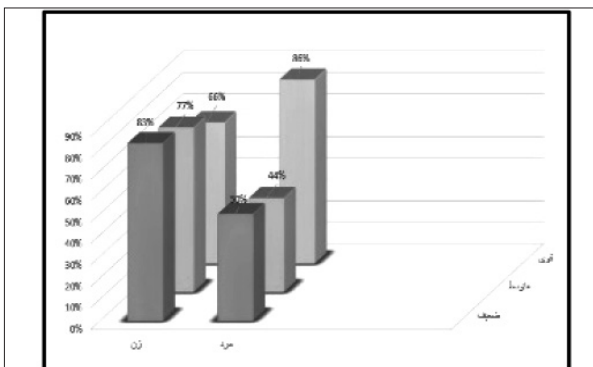
20- <https://www.color-blindness.com/ishihara-38-plates-cvd-test/>



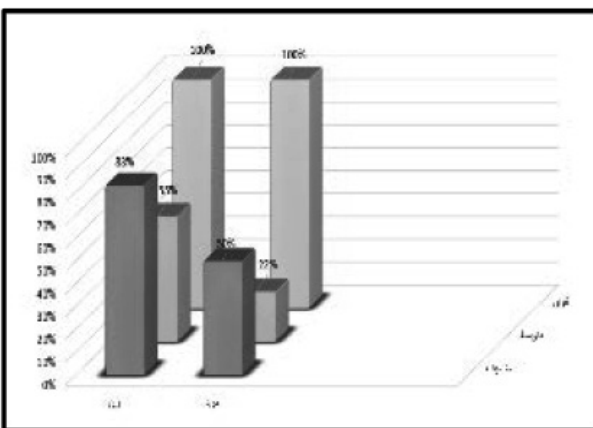
نمودار ۱ درصد درستی آزمون قرمزکوری بر اساس مقیاس اول و دوم



نمودار ۲ درصد درستی آزمون سبزکوری بر اساس مقیاس اول و دوم



نمودار ۳ درصد درستی آزمون قرمزکوری به تفکیک زن و مرد بر اساس مقیاس اول



نمودار ۴ درصد درستی آزمون قرمزکوری به تفکیک زن و مرد بر اساس مقیاس دوم

ضعیف طبقه‌بندی می‌شوند. از دو مقیاس برای تعیین رده هر داوطلب جهت ارزیابی شدت کوررنگی استفاده شد: طبق مقیاس اول اگر تعداد پاسخ‌های صحیح داوطلب به تصاویر شبیه‌سازی شده بین ۱-۳ پاسخ صحیح باشد در شدت قوی، اگر بین ۴-۱۰ پاسخ صحیح باشد در شدت متوسط و اگر بین ۱۱-۱۴ پاسخ صحیح باشد در شدت ضعیف طبقه‌بندی می‌شود.

مقیاس دوم با نتایج یک آزمون دیگر که به صورت برخط<sup>۲۱</sup> قابل دسترس است، در نظر گرفته شده که اگر تعداد پاسخ صحیح بین ۱ تا ۵ باشد کوررنگی قوی، بین ۶ تا ۱۰ پاسخ صحیح، کوررنگی متوسط و بین ۱۱ تا ۱۴ پاسخ صحیح دسته ضعیف است.

#### ۴-۱-۲ ارزیابی نتایج

دقت روش پیشنهادی شبیه‌سازی را بر اساس میزان (درصد) درستی پاسخ داوطلبان، سنجیده‌ایم. نمودارهای ۱-۶ نتایج به دست آمده آزمون قرمزکوری و آزمون سبزکوری را نشان می‌دهند. این نمودارها درصد درستی شبیه‌سازی انجام شده بر حسب سه دسته شدت کوررنگی قوی، متوسط و ضعیف ارائه می‌کنند. نمودارهای ۱ و ۲ تفاوت مقیاس‌های انتخاب شده برای سنجش شدت کوررنگی قرمزکوری و سبزکوری را بیان می‌کنند. مقیاس دوم در شدت قوی کوررنگی توانسته است دقت ۱۰۰٪ را هم برای قرمزکوری و هم سبزکوری به دست آورد.

نمودارهای ۳ و ۴ تفاوت زن و مرد برای سنجش شدت کوررنگی قرمزکوری را بیان می‌کنند. در هر شدت کوررنگی، داوطلبان زن از دقت بیشتری نسبت به داوطلبان مرد برخوردار بوده‌اند.

نمودارهای ۵ و ۶ تفاوت زن و مرد برای سنجش شدت کوررنگی سبزکوری را بیان می‌کنند. در هر شدت کوررنگی، داوطلبان زن از دقت بیشتری نسبت به داوطلبان مرد برخوردار بوده‌اند. همچنین مقیاس دوم نتایج یکسانی بر حسب جنسیت داشته است.

21- [https://colorliteles.com/color-blindness-test.html#About\\_test](https://colorliteles.com/color-blindness-test.html#About_test)



کوبلیس<sup>۲۲</sup> یکی از نرم افزارهای شبیه‌سازی آبی-زردکوری است که مورد استفاده پژوهشگران قرار گرفته است [۱۴]. نتیجه شبیه‌سازی آبی-زردکوری روش پیشنهادی این مقاله با خروجی این نرم‌افزار مقایسه شده است.

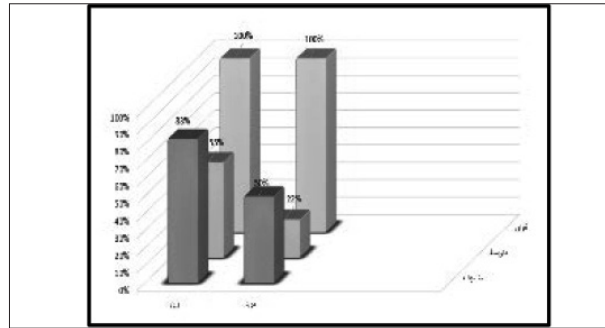
اعتبارسنجی شیوه شبیه‌سازی دو رنگ‌بینی آبی-زردکوری این مقاله را از طریق سنجش میزان شباهت تصاویر با خروجی کوبلیس بر اساس ضریب بتاتاکاریا<sup>۲۳</sup> هیستوگرام، فاصله اقلیدسی هیستوگرام، میانگین مربع خطا، شاخص شباهت ساختاری دو تصویر و در آخر استخراج رنگ‌های موجود در هر تصویر با استفاده از الگوریتم خوشه‌بندی کا-مینز<sup>۲۴</sup> انجام شده است.

#### ۴-۲-۱ ارزیابی نتایج

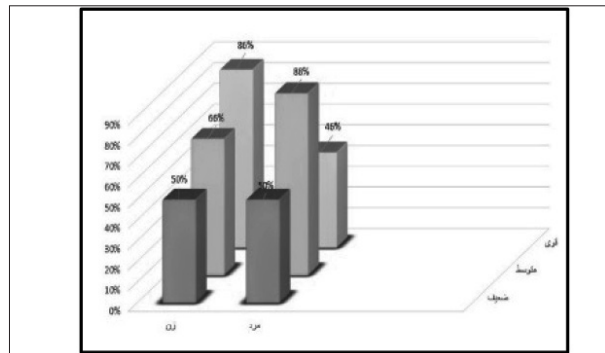
در شکل (۲) دو تصویر شبیه‌سازی شده (نتیجه شبیه‌سازی این پژوهش و کوبلیس) از نظر میزان همپوشانی شدت نقاط آن‌ها ارزیابی شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود از نظر هیستوگرام شباهت خوبی بین دو تصویر وجود دارد.

در جدول (۱) دو تصویر (نتیجه شبیه‌سازی این پژوهش و کوبلیس) از نظر معیارهای دیگر مقایسه شده‌اند. ضریب بتاتاکاریا در محدوده [۱، ۰] است و هرچه به ۱ نزدیکتر باشد، نشان دهنده شباهت بیشتر دو تصویر است. فاصله اقلیدسی در محدوده [۱، ۰] است و هرچه به صفر نزدیکتر باشد، نشان دهنده شباهت بیشتر دو تصویر است. شاخص شباهت ساختاری در محدوده [۱، -۱] است و هرچه به ۱ نزدیکتر باشد، نشان دهنده شباهت بیشتر دو تصویر است. و میانگین مربع خطا هرچه به صفر نزدیکتر باشد، نشان دهنده شباهت بیشتر دو تصویر است.

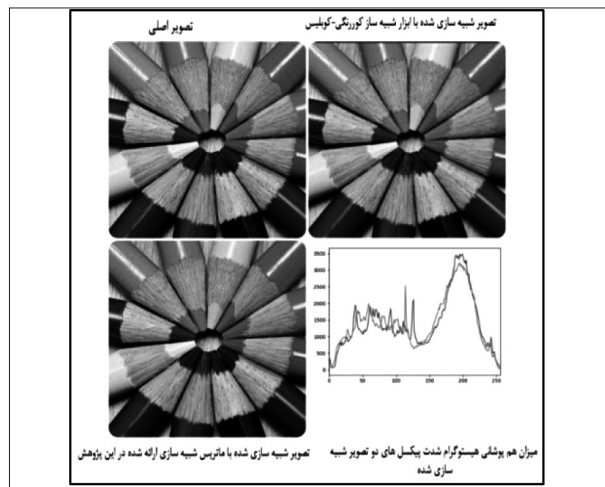
در شکل (۳) دو تصویر شبیه‌سازی شده (نتیجه شبیه‌سازی این پژوهش و کوبلیس) توسط الگوریتم خوشه‌بندی کا-مینز با هم مقایسه شده‌اند. برای آن که بتوان رنگ‌های موجود در تصویر را استخراج کرد



نمودار ۵ درصد درستی آزمون سبزکوری به تفکیک زن و مرد بر اساس مقیاس اول



نمودار ۶ درصد درستی آزمون سبزکوری به تفکیک زن و مرد بر اساس مقیاس دوم



شکل ۲: مقایسه تصاویر شبیه‌سازی از نظر هیستوگرام.

#### ۴-۲-۲ مطالعه دوم: شبیه‌سازی آبی‌کوری

چون آزمون دید رنگ ایشیهارا برای شبیه‌سازی دو رنگ‌بینی آبی-زردکوری طراحی نشده است، بنابراین برای سنجش میزان نزدیکی تصاویر شبیه‌سازی شده با تصاویری که افراد مبتلا به آبی-زردکوری درک می‌کنند، اعتبارسنجی شبیه‌سازی به‌گونه دیگری انجام شده است.

22- Color blindness simulator (coblis).

23- Bhattacharya coefficient.

24- K-means clustering.



- ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing. 2014. ACM.
5. Brettel, H., F. Viénot, and J. D. Mollon, Computerized simulation of color appearance for dichromats. Vol. 14. 1997. 2647-55.
6. Meyer, G.W., D.P.J.I.C.G. Greenberg, and Applications, Color-defective vision and computer graphics displays. 1988. 8(5): p. 28-40.
7. Yang, S., et al., Quantification and standardized description of color vision deficiency caused by anomalous trichromats-Part I: Simulation and measurement. 2008. 2008: p. 7.
8. Chung, M. and H. Choo, A real-time color-matching method based on SmartPhones for color-blind people. 2014. 184-188.
9. Malacara, D. Color vision and colorimetry: theory and applications. 2011. SPIE Bellingham, WA.
10. Kondo, S.J.C.V.D., A computer simulation of anomalous color vision. 1990: p. 145-159.
11. Almagambetov, A., S. Velipasalar, and A. Baitassova, Mobile Standards-Based Traffic Light Detection in Assistive Devices for Individuals with Color-Vision Deficiency. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015. 16(3): p. 1305-1320.
12. Kim, Y.K., K.W. Kim, and X. Yang. Real Time Traffic Light Recognition System for Color Vision Deficiencies. in 2007 International Conference on Mechatronics and Automation. 2007.
13. Poret, S., R.D. Dony, and S. Gregori. Image processing for colour blindness correction. in 2009 IEEE Toronto International Conference Science and Technology for Humanity (TIC-STH). 2009.
14. ixora.io, color blind simulation research. 2018.
15. Ishihara, D.S., the series of plates designed as a test for color-blindness. 1971.
16. Fairchild, M.D., Color appearance models and complex visual stimuli. Journal of Dentistry, 2010. 38: p. e25-e33.
17. Khurge, D.S. and B. Peshwani. Modifying image appearance to improve information content for color blind viewers. in Computing Communication Control and Automation (IC-CUBE), 2015 International Conference on. 2015. IEEE.