



وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
موسسه پژوهشی علوم و فناوری رنگ و پوشش

Available online @ www.jschw.icrc.ac.ir

نشریه علمی ترویجی مطالعات در دنیای رنگ، جلد ۴ / تابستان (۱۳۹۳) / ۴۳-۴۷

Journal of Studies in Color World, Vol.4/ Summer (2014) / 43-47

نشریه علمی ترویجی
مطالعات در دنیای رنگ
Journal of Studies in Color World
www.jschw.icrc.ac.ir

شاخص ضریب تاثیر منبع نوری بر ظاهر رنگی اجسام

مژده صبا^۱، سعیده گرجی کندی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی پلیمر و رنگ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، صندوق پستی: ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵

۲- استادیار، دانشکده مهندسی پلیمر و رنگ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، صندوق پستی: ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵

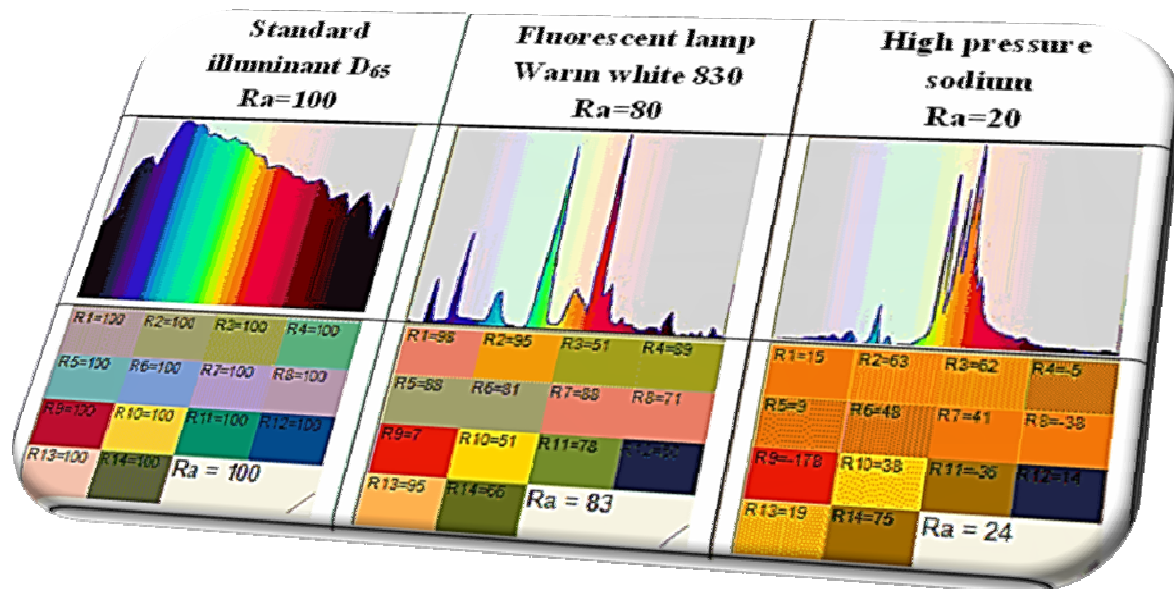
تاریخ دریافت: ۹۲/۶/۱۰ تاریخ بازبینی نهایی: ۹۲/۱۱/۱۸ تاریخ پذیرش: ۹۲/۱۰/۱۷ در دسترس بصورت الکترونیک: ۹۲/۱۲/۱۸

چکیده

از جمله ویژگی‌های مهم یک منبع نوری، تاثیر منبع نوری بر ظاهر رنگی اجسام در مقایسه با منبع نوری استاندارد با دمای رنگ هم‌بسته مشابه می‌باشد که به اختصار سی-آر-آی نامیده می‌شود. برای محاسبه سی-آر-آی، کمیته CIE رابطه‌ای ارائه نموده است. مطالعات فراوان برای منابع نوری مختلف نشان داده است که شاخص معرفی شده توسط CIE در بسیاری موارد نتیجه مورد قبولی ارائه نمی‌دهد و تلاش جهت جایگزینی یک شاخص مناسب تر و یا بهبود شاخص موجود همچنان ادامه دارد. هر چند هیچ یک از روش‌های پیشنهادی هنوز مورد پذیرش CIE واقع نشده است.

واژه‌های کلیدی

شاخص ضریب تاثیر منبع نوری، منابع نوری استاندارد، دمای رنگ.



*Corresponding author: s.gorji@aut.ac.ir
Color Rendering Index, M. Saba, S. Gorji Kandi

۱- مقدمه

در واقع دسته اول صرفاً روش‌هایی محاسباتی هستند که احتمال عدم تطبیق CRI با نتایج چشمی زیاد است. در روش‌هایی بر پایه دسته اول منحنی SPD دو منبع نوری استاندارد مورد آزمایش مورد بررسی قرار می‌گیرد و عدم تطبیق این دو منحنی بیانگر تاثیر منبع نوری مورد آزمایش بر ظاهر رنگی اشیا در مقایسه با منبع نوری مرجع است [۴]. لازم به ذکر است که روش‌های معمول محاسبه بر پایه دسته دوم هستند (روش‌هایی که در ادامه این مقاله ارائه می‌شوند).

در شبیه‌سازی نور روز به‌وسیله منابع نوری مصنوعی، خصوصیات مختلفی مد نظر می‌باشد که از جمله مهم‌ترین آنها شاخص تاثیر منبع نوری بر رنگ اجسام^۱ (CRI) است [۱، ۲].

۱-۱- تعریف

طبق تعریف تاثیر یک منبع نوری بر ظاهر رنگی اجسام در مقایسه با منبع نوری استاندارد با دمای رنگ هم‌بسته مشابه (دمای رنگ، دمای جسم سیاهی است که در آن دما هم‌رنگ منبع نوری مورد بررسی دیده می‌شود). شاخص تاثیر منبع نوری بر رنگ اجسام نامیده می‌شود [۱، ۲].

۲-۱- اهمیت بررسی

اهمیت بررسی این اندیس از آن حیث است که ما همواره به دنبال رنگ طبیعی اجسام هستیم حال آن که وجود منابع نوری متنوع با منحنی‌های توزیع انرژی طیفی (SPD)^۲ مختلف سبب تغییر ظاهر رنگی اجسام می‌شود. برای حل این مشکل یکسری منابع نوری استاندارد توسط CIE پیشنهاد شد و شرکت‌های مختلف سعی در ساختن این لامپ‌های استاندارد کردند. به‌عنوان مثال لامپ‌های تنگستن به‌عنوان بهترین شبیه‌ساز برای منبع نوری استاندارد A و لامپ آرک زنون به‌عنوان بهترین شبیه‌ساز برای منبع نوری D₆₅ معرفی شدند. در این بین شاخص تاثیر منبع نوری بر ظاهر رنگی اجسام تاثیر این لامپ‌ها بر روی ظاهر رنگی اجسام در مقایسه با منابع نوری استاندارد ارائه شده توسط CIE را نشان می‌دهد [۱، ۲].

در سال ۱۹۹۳، ذو^۳ بیان نمود که ما در مورد هر منبع نوری با دو سری سوال مواجه می‌شویم [۳]:

- ۱) آیا ظاهر رنگی جسم در مقایسه با منبع نوری استاندارد تغییر کرده است؟
- ۲) زیر یک منبع نوری مشخص چه تعداد رنگ متمایز می‌توان مشاهده نمود؟
- سوالات سری اول اهمیت بررسی شاخص CRI را نشان می‌دهد و سوالات سری دوم منجر به معرفی شاخص ظرفیت رنگ^۴ برای یک منبع نوری شد [۳].

۳-۱- روش‌های محاسبه CRI

روش‌های محاسبه CRI به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند [۱].

۱- روش‌هایی که بر پایه تغییرات توزیع انرژی طیفی هستند.

۲- روش‌هایی که بر پایه تغییرات ظاهر رنگی نمونه‌های آزمایشگاهی هستند.

۱-۴- عوامل موثر در به‌دست آوردن سی آر آی

آنها برای محاسبه CRI چند عامل را باید مدنظر قرار داد، که از مهم‌ترین این فاکتورها می‌توان به انتخاب مجموعه نمونه استاندارد (از نمونه‌های مانسل^۵، مکبس^۶ و غیره)، انتخاب مدل تطبیق (نظیر مدل تطبیق ون کریز^۷ و غیره)، انتخاب فضا رنگ (CIE L*a*b*، CIE L*u*v* و غیره) و انتخاب فرمول اختلاف رنگ مناسب (CIE1976 و غیره) اشاره کرد [۱، ۲]. در محاسبه فرمول CRI پذیرفته شده توسط CIE در سال ۱۹۶۵ از ۱۴ نمونه مانسل، فرمول اختلاف رنگ CIE1964 و فضا رنگ CIE^{*}U^{*}V^{*} برای محاسبات استفاده شده است. پس از آن در سال ۱۹۷۲ با اعمال مدل تطبیق ون کریز، CRI به روز شد و رابطه ۱ به‌دست آمد [۱].

$$R_i = 100 - 4.6\Delta E_i \quad (1)$$

لازم به ذکر است که ΔE_i اختلاف رنگ نمونه‌های استاندارد زیر منبع نوری مورد آزمایش و منبع نوری مرجع با دمای رنگ هم‌بسته مشابه است. در صورتی که دمای منبع نوری مورد آزمایش کمتر از 5000 k باشد از جسم سیاه به عنوان منبع نوری استاندارد استفاده می‌شود و اگر دمای منبع نوری مورد آزمایش بیشتر از 5000 k باشد، از لامپ‌های استاندارد CIE نظیر لامپ‌های سری D به عنوان منبع نوری مرجع استفاده می‌شود [۱، ۲]. یکی از مشکلات CRI، نبودن یک منبع نوری مرجع واحد برای مقایسه است. (همان طور که در ابتدای همین مقاله گفته شد، منبع نوری مرجع باید دمای رنگ هم‌بسته مشابه با منبع نوری مورد آزمایش داشته باشد لذا از آنجایی که منابع نوری مورد آزمایش دارای دمای رنگ هم‌بسته متفاوت هستند امکان تعریف یک منبع نوری واحد به عنوان مرجع وجود ندارد) [۵].

همچنین لازم به ذکر است که مقادیر این اندیس بازه صفر تا ۱۰۰ را در بر می‌گیرد و بهترین منابع نوری از نظر این مشخصه دارای CRI بالاتر از ۹۰ هستند [۶].

شاخص عمومی CRI از رابطه ۲ به‌دست می‌آید.

$$Ra = (\sum_{i=1}^8 100 - 4.6\Delta E_i) / 8 \quad (2)$$

در رابطه Ra ضریب ۴/۶ به نحوی محاسبه شده است که مقدار این اندیس برای لامپ فلورسنت سفید گرم، ۵۰ شود [۶]. در سال ۱۹۸۱،

¹ Color Rendering Index (CRI)

² Spectral power distribution

³ Xu

⁴ Color rendering capacity

⁵ Munsell

⁶ Macbeth

⁷ Von kries

پیش‌بینی کند. او یک ماتریس برای رنگ نمونه‌ها زیر منبع نوری مرجع و یک ماتریس برای رنگ نمونه‌ها زیر منبع نوری مورد آزمایش در نظر گرفت. سپس ماتریسی را به‌دست آورد که در ماتریس مرجع ضرب شده و ماتریس مورد آزمایش حاصل شده است و بدین ترتیب ماتریس تبدیل را برای منابع نوری مورد آزمایش به‌دست آورد و پیش‌بینی تغییرات رنگی ناشی از تغییر منبع نوری برای نمونه‌های رنگی مختلف (به غیر از نمونه‌های استاندارد) امکان‌پذیر شد [۱۱]. لی^۴ در سال ۲۰۱۰ اندیس جدیدی برای CRI به نام CRI-CAM02UCS ارائه داد که مطابقت آن با نتایج به‌دست آمده از شواهد چشمی بیشتر از CIE-CRI-Ra است. به‌دست آوردن این اندیس شامل ۵ مرحله است [۶]:

مرحله ۱) اندازه‌گیری توزیع انرژی طیفی منبع نوری (SPD).

مرحله ۲) محاسبه مقادیر مولفه‌های سه‌گانه رنگی برای ۸ نمونه اول از ۱۴ نمونه مانسل (محاسبه مقادیر محرکه‌های رنگی نمونه‌ها زیر منبع نوری مرجع و منبع نوری مورد آزمایش).

مرحله ۳) محاسبه مقادیر محرکه‌های سه‌گانه ۸ نمونه زیر منبع نوری مورد آزمایش پس از اعمال مدل تطبیق CIECAM02.

مرحله ۴) محاسبه اختلاف رنگ بین نمونه‌ها زیر منبع نوری مرجع و منبع نوری مورد آزمایش با استفاده از فرمول اختلاف رنگ CAM02-UCS.

مرحله ۵) جایگذاری در رابطه ۴ برای به‌دست آوردن شاخص تاثیر منبع نوری بر رنگ اجسام [۶].

$$CRI-CAM02UCS = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 (100 - 8\Delta E_i) \quad (4)$$

نکته حائز اهمیت آن است که این فرمول توسط CIE پذیرفته نشد. در سال ۲۰۰۷ رئا و همکارانش^۵ با انجام آزمون چشمی با استفاده از نمونه‌های فرانسفوس^۶ و یک نمونه آزمایشی جدید نشان دادند اندیس سی آر آی ارائه شده توسط CIE برای منابع نوری LED مناسب نیست. آنها نشان دادند چنانچه بحث تمایز رنگی در میان باشد بهتر است از شاخص کلی طیف رنگی^۷ FSCI (معیاری است از میزان انحراف توزیع انرژی طیفی یک منبع نوری از منبع نوری انرژی برابر^۸) به‌جای CRI استفاده شود و چنانچه بحث خلوص رنگی در میان باشد استفاده از شاخص محدوده رنگی^۹ GAI (مساحت محدوده رنگی تشکیل شده تحت منبع نوری انرژی برابر مقدار ۱۰۰ در نظر گرفته می‌شود و برای دیگر منابع نوری به‌صورت GAI نمایش داده می‌شود که می‌تواند کمتر یا بیشتر از ۱۰۰ باشد) نتایج بهتری می‌دهد [۱۲]. به‌همین دلیل، اندیس‌های دیگری را برای نمایش تاثیر منبع نوری بر رنگ اشیا پیشنهاد دادند [۱۲]. در سال ۲۰۰۷ ماehler و همکارانش^{۱۰} با استفاده از نمونه‌های

شاندای^۱ با استفاده از فضا رنگ‌های CIE L*a*b* و CIE L*u*v* و استفاده از فرمول اختلاف رنگ CIE 1976 در پی یافتن تاثیرات فضا رنگ، فرمول‌های اختلاف رنگ و مدل‌های تطبیق بر عملکرد رابطه CRI بود. او نشان داد تغییرات در سی آر آی با جای‌گذاری فضا رنگ CIE L*u*v* به‌جای فضا رنگ CIE W*U*V* اتفاق نمی‌افتد این در حالی است که تاثیرات تعویض مدل تطبیق بر این شاخص به وضوح قابل رویت است. او همچنین نشان داد استفاده از فضا رنگ‌های دیگر به همراه استفاده از مدل‌های تطبیق بهتر هم‌چون بارتلسون^۲، مقدار CRI را برای برخی از منابع نوری تغییر می‌دهد [۷]. پس از ۲۰ سال تصحیحات زیادی بر روی رابطه ارائه شده توسط CIE صورت گرفت اما هیچ کدام مورد قبول این کمیته واقع نشد. در سال ۱۹۹۵ فرمول قبلی CIE (۱۹۷۴-۱۳۰۲) (این فرمول همان رابطه ۲ است زمانی که تطبیق در نظر گرفته نمی‌شود). به صورت ۱۳۰۳-۱۹۹۵ به روز شد (این بار هم همان رابطه ۲ استفاده شد با این تفاوت که ΔE_i پس از تطبیق زیر منبع نوری مورد آزمایش محاسبه گردید) [۸]. در سال ۱۹۹۹ کمیته TC1-33 توسط CIE برای تصحیح اندیس CRI تشکیل شد. این کمیته با تغییر نمونه‌ها از نمونه‌های مانسل به نمونه‌های مکبس به همراه دو رنگ پوست، تغییر فضا رنگ از CIE W*U*V* به CIE L*a*b* و همچنین استفاده از مدل تطبیق CIE 1994 به جای مدل تطبیق ون کریز فرمول CRI را به صورت رابطه ۳ اصلاح نمود [۹].

$$R_i = 100 - c\Delta E_i \quad (3)$$

اما آنچه در این رابطه بحث برانگیز است، ثابت C است که با وجود تلاش‌های بسیار هنوز مقداری برای آن ارائه نشده که مورد قبول CIE باشد [۱۰].

۲- مروری بر کارهای انجام شده

عمده‌ترین ایرادهای CRI ارائه شده توسط CIE را می‌توان در سه گروه دسته‌بندی کرد:

۱) در به‌دست آوردن رابطه CRI از یک سری نمونه استاندارد استفاده شده است و در نتیجه هنگامی که نمونه مورد آزمایش به یک مجموعه دیگر تبدیل می‌شود این اندیس پاسخگو نخواهد بود.

۲) این اندیس برای افراد با دید طبیعی طراحی شده و تاثیرات نقص بینایی بر آن به‌دست نیامده است.

۳) این اندیس برای برخی منابع نوری نظیر منابع نوری LED پاسخگو نخواهد بود [۱۰].

در سال ۲۰۰۲، ورسی^۳ ماتریسی بر پایه سیستم رنگ‌های متضاد ارائه نمود که با در اختیار داشتن مقادیر مولفه‌های رنگی نمونه زیر منبع نوری مرجع، مقادیر مولفه‌های رنگی نمونه را زیر منبع نوری مورد آزمایش

⁴ Li

⁵ Rea

⁶ Fransworth

⁷ Full spectrum color index

⁸ Equal Energy

⁹ Gamut area index

¹⁰ Mahler

¹ Schanda

² Bartleson

³ Worthy

عملکرد اندیس CRI برای منابع نوری LED کار کرد. نتایج آزمایشات او نشان داد که تغییر مدل تطبیق در محاسبه سی آر آی برای منابع نوری LED تغییری ایجاد نمی‌کند و بهترین روش اصلاح رابطه CRI برای منابع نوری LED استفاده از مدل‌های ظاهر رنگی همچون CAM02-UCS است. بدین ترتیب وی مجدداً تأکید کرد که رابطه ۴ برای منابع نوری LED عملکرد بهتری را نشان می‌دهد [۱۸].

۳- نتیجه‌گیری

آنچه از مطالعات انجام شده به دست می‌آید آن است که امروزه منابع نوری به عنوان یکی از مطرح‌ترین موضوعات روز دنیا شناخته شده‌اند و یکی از مهم‌ترین مواردی که در مورد یک منبع نوری باید مدنظر قرار گیرد CRI است. رابطه‌ای که در حال حاضر مورد استفاده می‌باشد دارای اشکالاتی است که می‌توان به عدم کارایی آن برای برخی منابع نوری از جمله LEDها اشاره نمود همچنین در محاسبه این فرمول تنها از تعداد محدودی نمونه از مجموعه استاندارد مانسل استفاده شده است حال آن که پاره‌ای از مطالعات از وابستگی این اندیس به مجموعه نمونه مورد استفاده در اندازه‌گیری حکایت می‌کند و در مجموع اندیس CRI ارائه شده توسط CIE دارای اشکالاتی بوده و نیاز به تصحیح دارد. در حال حاضر بهبود شاخص CRI، مطلوب تحقیقات فراوانی در سراسر دنیا است. اما با وجود تلاش‌های فراوان هنوز نتوانسته‌اند این اندیس را به گونه‌ای اصلاح نمایند که مورد پذیرش CIE قرار گیرد. اگرچه رابطه ارائه شده توسط لی با توجه به تطبیق بهتر و استفاده از مدل‌های ظاهر رنگی قابل توجه است اما هنوز مزایای مدل ارائه شده CIE بیشتر بوده چنان چه مدل لی علی‌رغم کارایی بالا اما هنوز مورد تأیید نیست. سایر مدل‌های ارائه شده به علت داشتن معایب واضح و یا عدم ارائه فرمول اصلاح شده مورد توجه قرار نگرفتند.

فرانسفوس رابطه جدیدی برای محاسبه اندیس CRI برای منابع نوری LED به صورت رابطه ۵ ارائه کردند [۱۳].

$$R_{c32} = (\sum_{i=1}^{32} 100 - 4.6\Delta E_i) / 32 \quad (5)$$

در سال ۲۰۰۹ رئا و همکارش مجدداً با استفاده از آزمون چشمی نشان دادند که نتایج به دست آمده از مشاهدات چشمی با نتایج به دست آمده از رابطه CRI یکسان نیست، همچنین آنها دریافتند که محاسبه CRI بالا به تنهایی، معیار خوبی برای قضاوت در مورد تأثیر منبع نوری بر ظاهر رنگی اجسام نیست و بهتر آن است که از دو اندیس CRI و GAI به صورت توأمان استفاده شود. بر طبق نتایج آنها، یک منبع نوری زمانی بر روی ظاهر رنگی نمونه در مقایسه با منبع نوری استاندارد تغییرات زیادی ایجاد نمی‌کند که CRI بیشتر از ۸۰ و همچنین GAI بیشتر از ۸۰ داشته باشد و بالا بودن هر یک از این دو اندیس به تنهایی کافی نیست [۱۴]. در همان سال بادروگی و همکارانش^۱ با استفاده از آزمون‌های چشمی با نمونه‌های مکس به بررسی کارایی روابط موجود برای محاسبه CRI برای منابع نوری LED پرداختند. نتایج حاصل از آزمایش‌های چشمی آنها همبستگی خوبی با محاسبات CAM02-CIE UCS داشت [۱۵]. مردر و همکارانش^۲ با استفاده از فضا رنگ CIE $L^*a^*b^*$ به جای فضا رنگ CIE $W^*U^*V^*$ ، مدل تطبیق بردفورد^۳ به جای مدل تطبیق ون کریز و همچنین استفاده از فرمول اختلاف رنگ 2000 CIEDE به جای فرمول اختلاف رنگ 1964 CIE ثابت C در رابطه (۳) را با مقدار ۳/۲۴۸ (زمانی که منبع نوری استاندارد برای مقایسه از میان تعدادی منبع نوری از پیش تعیین شده باشد.) یا ۳/۰۳۲ (زمانی که منبع نوری استاندارد دارای دمای رنگ همبسته مشابه با منبع نوری مورد آزمایش باشد) جایگزین نمودند [۹]. در سال ۲۰۱۰ وایت هید و همکارش^۴ با استفاده از منحنی توزیع انعکاسی منبع نوری و آزمون‌های چشمی، اندیس CRI راه‌کاری متفاوت بر پایه روش مونت کارلو^۵ برای ارزیابی CRI پیشنهاد نمودند که وابسته به تعداد نمونه‌های محدودی نباشد [۱۶]. نوآ^۶ استفاده هم‌زمان از دو اندیس GAI و CRI را برای پیش‌بینی مولفه‌های مهم منبع نوری مطرح کرد و هاشیموتو^۷ استفاده هم‌زمان از دو اندیس CRI و FCT^۸ را برای پیش‌بینی خصوصیات بیشتری از منبع نوری پیشنهاد داد [۱۷]. در سال ۲۰۱۱ لی^۹ بر روی

۴- مراجع

1. N. Ohta, "Colorimetry fundamentals and Applications", Association with the Society for Imaging Science and Technology, 229-236, 2005.
2. R. McDonald, "Colour physics for Industry", Soc. Dyers Colour., 119-120, 1997.
3. H. Xu, "Color-Rendering capacity of Light", Color Res. Appl., 16, 8, 267-69, 1993.
4. R. Hirschler, D. F. Oliveira, L. C. Lopes, "Quality of The daylight sources for Industrial colour control", Color. Technol., 127, 88-100, 2011.
5. C. Van Trigt, "Color rendering, A reassessment", Color research and Application, 24, 3, 197-206, 1999.
6. C. Li, M. R. Luo, Ch. Li, G. Cui, "The Cri-Cam02ucs colour rendering index", Color research and Application, 37, 3, 160-167, 2010.
7. J. Schanda, "The effect of Chromatic adaptation on Color rendering", Color research and Application, 6, 4, 221-227, 1981.
8. R. S. Berns, "Color science education in the 1990's", Color research and Application, 19, 74-76, 1994.
9. D. G. Moroder, "Color-rendering indices in Global illumination methods", J. Electron. Imaging, 18, 4, 1-12, 2009.

10. J. M. M. Linhares, P. E. R. Felgueiras, P. D. Pinto, S. M. C. Nascimento, "Colour rendering of Indoor lighting with CIE illuminants and White LEDs for Normal and Colour deficient observers", *Ophthalmic and Physiological optics*, 5, 618-625, **2010**.
11. J. A. Worthey, "Color rendering: A calculation that Estimates colorimetric shifts", *Color research and Application*, 29, 1, 43-56, **2002**.
12. M. S. Rea, "A tale of Two metrics", *Color research and Application*, 33, 3, 192-202, **2007**.
13. E. Mahler, J-J. Ezrati, F. Vienot, "Testing LED lighting for Colour discrimination and Colour rendering", *Color research and Application*, 34, 1, 8-17, **2007**.
14. M. S. Rea, J. P. Freyssinier, "Color rendering: Beyond pride and Prejudice", *Color research and Application*, 35, 6, 401-409, **2009**.
15. P. Bodrogi, S. Bruckner, T. Q. Khanh, "Ordinal scale based description of Colour rendering", *Color research and Application*, 36, 4, 272-285, **2011**.
16. L. A. Whitehead, M. A. Mossman, "A monte carlo method for Assessing color rendering quality With Possible application to Color rendering standards", *Color research and Application*, 37, 1, 13-22, **2010**.
17. M. S. Rea, J. p. Freyssenier-Nova, "Color rendering: A tale of Two metrics", *Color research and Application*, 33, 192-202, **2008**.
18. C. Li, "Evaluation of The CIE colour renderingindex", *Color. Technol.*, 127, 129-135, **2011**.