



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

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

نشریه علمی ترویجی مطالعات در دنیای رنگ، جلد ۴ / تابستان (۱۳۹۳) / ۵۶-۴۹
Journal of Studies in Color World, Vol.4/ Summer (2014)/ 49-56

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

سفیدی: تعاریف، مفاهیم و اندیس‌ها

راضیه جعفری*

استادیار، گروه پژوهشی فیزیک رنگ، مؤسسه پژوهشی علوم و فناوری رنگ و پوشش، تهران، ایران، صندوق پستی: ۶۵۴-۱۶۷۶۵

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

چکیده

آکروماتیک‌ها یا همان غیررنگی‌ها به نمونه‌های سفید، سیاه و خاکستری اطلاق می‌گردد. از منظر علوم رنگ، این دسته نمونه‌ها در حالت ایده‌آل با دارا بودن منحنی انعکاسی هموار و به دلیل ویژگی فاقد فام و رنگ بودن به‌عنوان نمونه‌های خنثی نیز تعبیر می‌گردند. جالب آنکه اطلاق واژه رنگ به نمونه‌های آکروماتیک هنوز هم موضوع اختلاف اندیشمندان حوزه علوم رنگ است. از میان آکروماتیک‌ها نمونه‌های سفید با اهمیت تجاری بالا در صنایعی همچون نساجی، چاپ، رنگ‌های پوشاننده سطوح و غیره تولید و مصرف می‌شوند. با توجه به نیاز صنایع به کنترل کیفیت محصولات، اندیس‌هایی جهت ارزیابی سفیدی پیشنهاد گردید. با پیدایش مواد سفیدکننده نوری و افزایش سفیدی محصولات فرمول‌های پیشین جوابگو نبوده و اندیس‌های جدیدی ارائه شدند. در ادامه، عیوب و کاستی‌های اندیس‌های ارزیاب در سنجش نمونه‌ها حوزه مطالعات بسیار قرار گرفت. تحقیقات اخیر علاوه بر بررسی توانایی فرمول‌های پیشنهادی یا پذیرش شده در ارزیابی سفیدی، به مطالعه رفتار طیفی نمونه‌های سفید نیز می‌پردازد تا توزیع نمونه‌های مذکور را در فضاهای کاهش یافته بررسی نماید.

واژه‌های کلیدی

آکروماتیک‌ها، سفیدی، اندیس سفیدی CIE، ارزیابی سفیدی.



*Corresponding author: jafari-ra@icrc.ac.ir

Whiteness: Definitions, concepts and indices, R. Jafari

۱- مقدمه

می‌داند. اما از لحاظ روان شناسانه سیاه و سفید رنگ هستند زیرا آنها ادراکات و احساسات چشمی را برمی‌انگیزند و به واسطه مخلوط شدن با رنگ‌های دیگر دارای تاثیرات شگرف بر آنها می‌باشند [۳، ۲]. نظیر چنین دسته‌بندی‌های جداگانه‌ای از سفیدی و سیاهی به‌عنوان غیررنگی‌ها در کنار رنگ‌ها در سیستم‌های رنگی هم‌چون سیستم آزوآلد^۷ مشاهده می‌گردد. این شیمیدان آلمانی، سیستم رنگ-منظم خود را بین سال‌های ۱۹۱۶-۱۹۱۵ ارائه نمود. در این سیستم، آزوآلد هر رنگی را مخلوطی از رنگ، سیاهی و سفیدی می‌شناسد و آنها را با منحنی‌های انعکاسی ایده‌آلی که با نمونه‌های واقعی قابل تولید نیستند معرفی می‌کند. این سیستم برای طراحان، نقاشان و جوهرسازان که مخلوط مواد رنگی را با سفید و سیاه به‌کار می‌برند مناسب است [۴-۲].

نمونه‌های سفید به‌دلیل اهمیت تولیدشان در صنایع نساجی، کاغذسازی، پلاستیک‌سازی، دندانپزشکی، رنگ‌های پوشاننده سطوح و غیره مورد توجه بسیاری محققین قرار گرفته و از جنبه‌های مختلف بررسی و مطالعه گردیدند. این تحقیقات منجر به ارائه اندیسی‌هایی برای ارزیابی سفیدی گردید که در ادامه کارایی اندیسی‌های مزبور نیز در خصوص ارزیابی بهینه نمونه‌های سفید و مطابقت با نتایج ارزیابی‌های چشمی موضوع تحقیقات دیگری قرار گرفت [۵-۱۰]. این مقاله نگاهی است اجمالی بر توصیف نمونه‌های سفید و تعریف آنها از نظر مباحث فیزیک رنگ. همچنین در این گذار سیر ارائه اندیسی‌های سفیدی و مطالعات انجام شده پیرامون آنها با لحاظ نمودن عیوب اندیسی‌های پیشنهادی و تلاش محققین در جهت رفع آنها تشریح می‌گردند.

۲- سفیدی

۲-۱- تعریف سفیدی

سفیدی، ویژگی رنگ‌هایی با روشنایی بالا و خلوص پایین است [۱۲، ۱۱، ۵]. در مباحث رنگ درمانی توصیه می‌شود از سفید برای شروع و پایان مرحله درمان استفاده شود زیرا این رنگ به‌شدت بر سیستم انرژی فرد اثرگذار بوده و در روند درمان تأثیر به‌سزایی دارد [۱۱]. در مباحث فیزیک رنگ، سفیدها به‌طور تقریبی، ناحیه‌ای باریک از فضا رنگ را در امتداد طول موج‌های حاکم مابین ۴۷۰-۵۷۰ نانومتر تصرف می‌کنند [۵]. در فضا رنگ‌های سه‌بعدی، سفیدها ناحیه‌ای نزدیک به قله (رأس) فضا رنگ را به خود اختصاص می‌دهند [۳]. از واژه سفید به منظور بیان خلوص، تازگی و پاکیزگی استفاده می‌شود. در واقع سفیدی، یک احساس نگاهی است و با این ذهنیت که ظاهر جسم سفید عاری از فام و یا خاکستری بودن است، مطابقت می‌کند. به‌نظر می‌رسد به‌دلیل ارتباط روانی سفیدی با مفهوم خلوص، یکی از راه‌های کنترل کیفیت بعضی از محصولات از نظر پاک‌بودن و عاری از هرگونه آلاینده‌گی، اندازه‌گیری سفیدی آنان انتخاب گردیده است [۱۳، ۳].

این پرسش که آیا سیاهی و سفیدی نیز رنگ به‌شمار می‌آیند از دیرباز ذهن بشر را به‌خود معطوف ساخته است. ارسطو در کتاب کالوریسی^۱ رنگ‌ها را در تناظر با عناصر چهارگانه معرفی نموده و می‌نویسد: «رنگ‌های ساده، رنگ‌های مناسب عناصر یعنی آتش، باد، آب و خاک هستند. باد و آب وقتی خالص باشند سفید هستند. همان‌طور که خاکستر پس از این که رطوبت آن می‌سوزد به رنگ سفید در می‌آید. اما در جریان اشتعال بار دیگر توسط دود که سیاه است رنگ‌آمیزی می‌شود. سیاه رنگ مناسب عناصر در فرآیند تغییر و تبدیل‌هاست». لئوناردو داوینچی در رساله‌ای در باب نقاشی از منظر تردید و ابهام به سفید و سیاه به‌عنوان رنگ می‌نگرد و می‌نویسد: «ساده‌ترین رنگ‌ها سفید است، هر چند فلاسفه سفید یا سیاه را به‌عنوان رنگ نمی‌پذیرند زیرا سیاه علت و دریافت‌کننده رنگ‌هاست و سفید به‌کلی عاری از رنگ‌ها. اما چون بدون این دو نمی‌توان نقاشی کرد آنها را بین رنگ‌های دیگر قرار می‌دهیم» [۱]. بنظر می‌رسد آزمون "جزیره دور افتاده"^۲ جاد^۳ (۱۹۷۵) از جمله نخستین تعابیر از نحوه دسته‌بندی رنگ‌ها باشد. با تصور شخصی که هیچ تجربه‌ای در خصوص موضوع رنگ ندارد در یک جزیره دور افتاده مملو از سنگ‌ریزه‌های رنگی، چنین فرض می‌شود که او در نخستین تقسیم‌بندی، سنگ‌ریزه‌های رنگی^۴ را از غیررنگی‌ها^۵ (سیاه، سفید و خاکستری) جدا کند. برخلاف سنگ‌های رنگی، دسته‌بندی غیررنگی‌ها ساده‌تر به‌نظر می‌رسد و تصور می‌شود وی آنها را به‌گونه‌ای منطقی از سفید تا خاکستری روشن تا خاکستری تیره و سرانجام سیاه نظم دهد. این آرایش که بر اساس میزان روشنایی^۶ انجام گرفته منجر به اختصاص مکانی مجزا برای هر نمونه غیررنگی می‌گردد. در ادامه، این دسته‌بندی در خصوص سنگ‌ریزه‌های رنگی ابتدا با جداسازی فام‌ها از یکدیگر قابل تصور است. سپس فام‌های یکسان در دسته‌های کوچک‌تری از لحاظ تهرنگ دسته‌بندی می‌شوند. هر یک از فام‌ها همچنین از نظر کم‌رنگ یا پررنگ‌تر بودن می‌توانند با هم مقایسه شوند (روشنایی) و به این ترتیب هر فام مشخص یک نظیر در سری خاکستری‌ها از نظر روشنایی خواهد داشت. دسته‌بندی قابل تصور دیگر مقایسه دو نمونه هم فام است که از نظر روشنایی معادل یک خاکستری یکسان هستند اما شخص آنها را متفاوت در می‌یابد. این دو نمونه بر اساس اینکه چقدر نسبت به آن خاکستری، رنگی‌ترند قابل مقایسه می‌باشند، این مقدار که اشباع رنگی یا خلوص رنگی نیز نامیده می‌شود نمونه‌های رنگی و غیررنگی را به یکدیگر مربوط می‌سازد [۲].

این آزمایش و فرضیات مطرح شده در آن به‌خوبی آشکار می‌سازد که از نظر یک فیزیکیان، سیاه، سفید و خاکستری رنگ محسوب نمی‌شوند، چنانکه سیاهی را فقدان رنگ و سفیدی را ترکیب مناسبی از تمام نورها

¹ Coloribus

² Desert Island Experiment

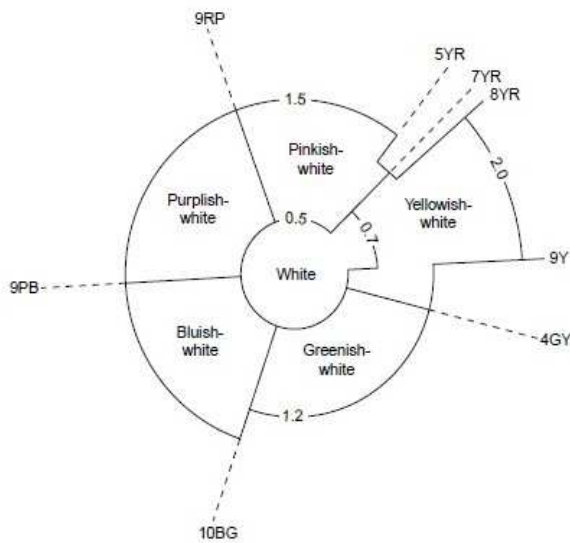
³ Judd

⁴ Chromatic

⁵ Achromatic

⁶ Lightness

⁷ Ostwald



شکل ۱- دیاگرام خلوص-فام (CH) مانسل که محدوده رنگ‌هایی که سفید نامیده می‌شوند را نشان می‌دهد. (ارزش مانسل $\leq 1/5$) [۶].

۲-۲-۲- اندازه‌گیری دستگاهی سفیدی

سفیدی، همچون درخشندگی و رنگ اجسام، جلوه‌ای از خواص نوری است. چنین پدیده‌هایی هیچگاه به طور مستقل قابل اندازه‌گیری نیستند [۱۴]. تنها مشخصه فیزیکی قابل اندازه‌گیری انعکاس طیفی نمونه است که آن هم یک مقدار مطلق و استاندارد نمی‌باشد حتی اگر انعکاس مربوط به سفید کامل باشد [۱۵].

به طور کلی ارزیابی سفیدی با روش‌های دستگاهی طی دو مرحله انجام می‌شود: نخست طیف انعکاسی نمونه‌ها اندازه‌گیری می‌شود و سپس ارزیابی‌های سفیدی با انواع روش‌های گرافیکی یا عددی از روی اطلاعات به دست آمده، صورت می‌پذیرد. در ارزیابی‌های دستگاهی سفیدی، عوامل مختلفی مانند هندسه کامل نحوه روشنائی نمونه، اندازه دهانه روزنه، در نظر گرفتن یا در نظر نگرفتن برق، هندسه مشاهده، نوع منبع روشنائی و توزیع انرژی طیفی آن، فیلترهای مورد استفاده و ... بر نتایج حاصله موثرند [۱۵]. بدین دلیل طراحی و کالیبره‌نمودن دستگاه‌ها از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. در صورتی که نمونه مورد ارزیابی حاوی مواد سفیدکننده نوری باشد لازم است منبع نوری مورد استفاده در هر دو ناحیه مری و فرابنفش طیفی قادر باشد توزیع انرژی استاندارد روشنائی D_{65} را تا حد مطلوبی شبیه‌سازی نماید زیرا تهیه مواد سفیدکننده نوری، تنها بوسیله جذب انرژی UV انجام می‌شود [۱۴]. پس از طراحی و کالیبراسیون دستگاه‌های اندازه‌گیری، گام بعدی به‌کارگیری فرمول سفیدی مناسب و ارائه مقادیر کمی است.

بر اساس تعریف ISCC-NBS^۱، رنگ‌هایی که ارزش^۲ مانسل آنها بیشتر از ۸/۵ باشد به‌عنوان سفید تعریف می‌شوند. طبق این تعریف علاوه بر نمونه‌های واقع بر محور خنثی که دارای ارزش مذکور هستند در تمام دسته فام‌های مانسل، رنگ‌هایی با خلوص مانسل کمتر از ۱/۲ تا ۱/۵ با داشتن مقدار ارزش بالای ۸/۵ می‌توانند سفید نامیده شوند [۶]. طبق سند ASTM E313، رنگ‌هایی با ارزش مانسل بزرگ‌تر از ۸/۳ (روشنائی بالاتر از ۶۵) نمونه‌های نزدیک به سفید معرفی می‌شوند با این شرط که خلوص مانسل برای فام‌های آبی، بیشتر از ۰/۵ و برای فام‌های زرد بیشتر از ۰/۸ و برای سایر فام‌ها بیشتر از ۰/۳ نباشد [۳]. بدین ترتیب با توجه به وابستگی درک سفیدی و نمونه‌های نزدیک به سفید به شرایط مشاهده و ادراک، در حدود ۵۰۰۰ نمونه به‌طور مشخص سفید و ۳۰۰۰۰ نمونه نزدیک به سفید وجود دارد. در زبان انگلیسی نمونه‌های نزدیک به سفید همانند سفید ته‌قرمز^۳ و سفید ته‌آبی^۴ با پسوند "ish" با دلالت بر ته‌رنگ سفید موجود، مشخص می‌شوند [۳]. از آنجا که هیچ خط مرز مشخصی میان سطوح سفید و رنگ‌های روشن نزدیک به سفید وجود ندارد [۳]، لذا حدود ۳٪ از کل حجم فضا رنگ مانسل به رنگ‌هایی اختصاص دارد که ممکن است به عنوان سفید تشخیص داده شوند. شکل ۱ این رنگ‌ها را نشان می‌دهد [۶].

۲-۲-۲- ارزیابی سفیدی

ارزیابی سفیدی به دو روش چشمی و دستگاهی انجام می‌شود.

۲-۲-۱- ارزیابی چشمی سفیدی

یکی از روش‌های ارزیابی چشمی سفیدی، مقایسه نمونه‌های سفید با نمونه‌های یک مقیاس سفیدی به عنوان مرجع می‌باشد. سیباگایگی^۵ دو مقیاس سفیدی از جنس‌های پلاستیک و پنبه را با استفاده از غلظت‌های مختلفی از مواد سفیدکننده نوری ارائه نموده است. مقیاس پلاستیکی از ۱۲ صفحه پلاستیکی دارای مقادیر مختلف سفیدی تشکیل شده که با واحدهای سفیدی سیبا بیان می‌شوند و در محدوده‌ای مابین ۲۰- تا ۲۱۰+ کدگذاری شده‌اند. فاصله بین این نمونه‌ها یکسان نمی‌باشد. در این روش، نقطه مرجع از نظر فیزیکی معادل سولفات باریوم یا اکسیدمنیزیم با سفیدی ایده‌آل برابر با ۱۰۰ است. مقیاس سفیدی پنبه‌ای سیباگایگی، شامل ۱۸ نمونه است که در فواصل ۱۰ واحدی (کمترین اختلاف سفیدی قابل درک)، تهیه شده‌اند. پایین‌ترین حد (با ارزش اسمی ۷۰) برای نمونه پنبه‌ای سفیدگری شیمیایی شده‌ای است که با مواد سفیدکننده نوری عمل نشده است. بالاترین حد (با ارزش اسمی ۲۴۰) متعلق به یک سفید بسیار خوب است که با عمل نمودن نمونه با مقدار مناسبی از ماده سفیدکننده نوری به‌دست آمده است [۳، ۶].

^۱ سیستمی برای نامگذاری رنگ‌ها: ISCC-NBS system

^۲ Value

^۳ Reddish white

^۴ Bluish white

^۵ Ciba-Geigy

۲-۳- مروری بر روند ارائه فرمول‌های سفیدی

فرمول‌های سفیدی متعددی مبتنی بر اندازه‌گیری ساده یک کمیت فیزیکی تا الگوریتم‌های پیچیده‌ای بر اساس داده‌های کالریمتریک، ارائه شده‌اند [۳]. این فرمول‌ها در دو جهت گسترش یافتند:

الف: فرمول‌هایی که با هدف رسیدن به یک سفید ایده‌آل یا همان سفید ترجیح داده شده، ارائه شدند. این دسته فرمول‌ها، سفیدی را به صورت نزدیک‌بودن نمونه به سفید ترجیح داده شده در فضا رنگ یکنواخت توصیف می‌کنند به نحویکه تا قبل از پیدایش مواد سفیدکننده نوری، پراکنده‌کننده ایده‌آل به عنوان سفید ترجیح داده شده معرفی شده و مبنای مقایسه با نمونه‌ها قرار می‌گرفت [۵].

ب: دسته دوم فرمول‌ها، زمانی ارائه شدند که کسب سفیدی بیشتر با عمل سفیدگری، آبی‌کردن و یا کاربرد مواد سفیدکننده نوری میسر شد. این دسته فرمول‌ها بر اساس اندازه‌گیری انعکاس با فیلتری که در طول موج ۴۵۷ نانومتر بیشترین انتقال را داشته باشد (روش تپی^۱) یا با استفاده از فیلترهای R، G و B برای تعیین تقریبی محرکه‌های سه‌گانه (T_i) عمل می‌کردند. پس از آن فرمول‌هایی که روشنایی^۲ و مختصات رنگی^۳ را با هم ترکیب می‌کردند نیز مورد آزمون قرار گرفتند [۵].

بطور کلی روند پیدایش فرمول‌های سفیدی و چگونگی توسعه و تکمیل آنها را می‌توان به چند بخش تقسیم نمود:

فرمول‌های اولیه: که برای تفسیر سفیدی و کمی نمودن آن از مقادیری هم‌چون روشنایی (رابطه ۱)، زردی و یا آبی‌بودن (رابطه ۲) بهره می‌گرفت.

$$W=Y \quad (1)$$

$$W=B \quad (2)$$

فرمول‌های ارائه شده بر اساس فضاهای رنگی یکنواخت: با پی بردن به عدم کارایی رابطه‌های اولیه در توصیف سفیدی نمونه‌هایی که به روش آبی‌کردن سفید شده‌اند، مسیر دیگری برای ارائه فرمول‌های سفیدی دنبال شد. این رابطه‌ها با تکیه بر استفاده از مزایای فضارنگ‌های یکنواخت، به اهمیت روشنایی به دلیل نقش مهمی که در درک سفیدی داشت توجه نمودند [۷].

یکی از رابطه‌هایی که بر این اساس ارائه شد، فرمول سفیدی مک‌آدام^۴ (رابطه‌های ۳ و ۴) بود.

$$WI = f(\text{Brightness, Purity}) \quad (3)$$

$$WI = (Y - KP_C)^{0.5} \quad (4)$$

که در این رابطه‌ها P_C خلوص کالریمتریک و K ثابتی است که به زمینه کاربردی نمونه بستگی دارد. رابطه مذکور بر مبنای ارزیابی پارچه‌های غیرفلورسنتی شستشو شده با شوینده‌های متفاوت می‌باشد [۷، ۱۳]. از دیگر فرمول‌های مهم ارائه شده بر مبنای سیستم رنگی یکنواخت، فرمول سفیدی هانتز^۵ (رابطه ۵) بود [۷، ۱۵].

$$W_{\text{Hunter}} = L - 3b \quad (5)$$

در این رابطه، L و b به ترتیب مقادیر روشنایی و زردی در فضا رنگ هانتز هستند (در این فضا رنگ مقدار منفی b بر آبی بودن دلالت دارد). رابطه هانتز علی‌رغم سادگی به روشنی اهمیت بالای روشنایی و آبی خنثی را (با احتساب b) نشان می‌دهد [۷]. هانتز در مطالعات خود بدین نتیجه دست یافت که بهترین اندیس سفیدی بر اساس رابطه‌ای خواهد بود که سفید ایده‌آل را یک سفید ته‌آبی و نه یک پراکنده‌کننده ایده‌آل (یا سفید خنثی) معرفی نماید. همچنین در این رابطه، سفیدی باید به صورت فاصله میان نمونه تا سفید ایده‌آل در فضا رنگ بیان شود [۱۵]. در نتیجه هانتز رابطه اصلی خویش را بصورت رابطه ۶ بیان نمود.

$$W = 100 - \sqrt{(L_p - L)^2 + (a^2 + b^2)^2} \quad (6)$$

که L_p روشنایی سفید ترجیح داده شده می‌باشد. این رابطه بر مبنای محورهای Lab فضارنگ یکنواخت هانتز است و در واقع یک رابطه غیرخطی است که سطح سفیدی یکسان آن حالت بیضی مانندی دارد. هانتز چنین فرض نمود که فواصل مساوی بین نقاط در فضا رنگ Lab، اختلافات قابل درک یکسانی ایجاد می‌کنند. این رابطه نیز بر اساس ارزیابی نمونه‌های غیرفلورسنتی استوار بود [۷، ۱۳].

فرمول‌های ارائه شده برای نمونه‌های سفید حاوی مواد سفیدکننده نوری: یکی از روش‌های اصلاح و بهبود میزان سفیدی، کاربرد مواد سفیدکننده نوری است. با این روش، میزان آبی‌بودن نمونه بدون کاهش در روشنایی آن افزایش می‌یابد و بدین ترتیب ضمن افزایش روشنایی نمونه، سفیدی آن نیز افزایش می‌یابد [۷، ۶، ۳]. متناسب با ساختار شیمیایی مواد سفیدکننده نوری، میزان فلورسنسی که با کاربرد این مواد ایجاد می‌شود منجر به ایجاد سفید خنثی، سفید ته‌قرمز یا سفید ته‌سبز می‌گردد [۷]. رابطه‌هایی که بر این اساس ارائه شدند به نوعی ارجحیت فامی موردنظر را در ارزیابی‌های سفیدی مطرح ساختند. رابطه ۷ ارجحیت سفید ته‌آبی را نشان می‌دهد [۷]:

$$WI_{\text{(CDML)}} = \frac{L - 3b + 10\sqrt{Y} - 21(Y - Z)}{\sqrt{Y}} \quad (7)$$

⁵ Hunter

¹ TAPPI

² Luminance

³ Chromaticity coordinates

⁴ MacAdam

۲-۴- اندیس سفیدی CIE

در سال ۱۹۸۲، CIE رابطه ارائه شده توسط گنز را با مقادیر P و Q مبتنی بر فام خنثی پذیرفت و لذا فرمول سفیدی CIE به صورت رابطه ۹ ارائه گردید.

$$W_{CIE} = Y + 800(x_0 - x) + 1700(y_0 - y) \quad (9)$$

به نحوی که x ، y مولفه‌های کروماتیستی نمونه و x_0 ، y_0 نیز مختصات پراکنده کننده ایده آل (نقطه آکروماتیک) همواره زیرمنبع نوری D_{65} هستند. مؤلفه‌ها با توجه به شرایط مشاهده کننده استاندارد ۲ و ۱۰ درجه، قابل تغییر هستند. در همین زمان CIE با پذیرفتن فرمول پیشنهادی گنز-گرایزر، فرمول سفیدی خود را با ارائه فرمول‌های تهرنگ به ترتیب برای دو شرایط مشاهده کننده ۱۰ و ۲ درجه، کامل نمود:

$$T_{CIE} = 900(x_0 - x) - 650(y_0 - y) \quad (10)$$

$$T_{CIE} = 1000(x_0 - x) - 650(y_0 - y) \quad (11)$$

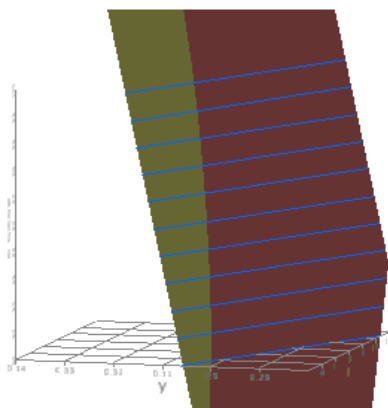
مقادیر مثبت T ، بیانگر تهرنگ سبز بوده و مقادیر منفی آن تهرنگ قرمز را نشان می‌دهد و در صورتیکه $T=0$ محاسبه شود تهرنگ نمونه سفید، آبی می‌باشد [۶، ۷، ۱۵].

۲-۴-۱- محدودیت‌ها و ضوابط فرمول‌های CIE

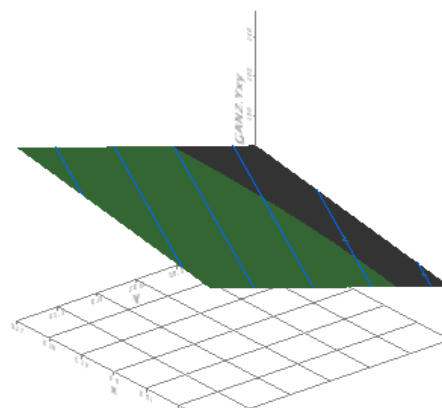
CIE محدوده کاربردی فرمول‌های سفیدی و تهرنگ خود را به ترتیب به صورت رابطه‌های ۱۲ و ۱۳ بیان می‌نماید.

$$40 < W_{CIE} < 5Y - 280 \quad (12)$$

$$-3 < T_{CIE} < +3 \quad (13)$$



$z = Y, x = x, y = y, WI = \text{constant}$
(a)



$z = WI, x = x, y = y, Y = \text{constant}$
(b)

شکل ۲- (a) سطح سفیدی یکسان در دیاگرام Yxy ، (b) سطح روشنایی یکسان، خطوط روشنایی یکسان در این سطح با اندیس‌های سفیدی متفاوت ملاحظه می‌شوند. [۱۳، ۱۶]

بیشترین گسترش در رابطه‌های خطی توسط گنز^۱ انجام شد. وی رابطه خطی خود (رابطه ۸) را به صورت کلی ارائه نمود.

$$W_{Ganz} = Y + P(x_0 - x) + Q(y_0 - y) \quad (8)$$

ارجحیت فام توسط مقادیر P و Q معین می‌شود. این پارامترها در جدول (۱) نشان داده شده‌اند.

جدول ۱- مقادیر P و Q بیان شده در رابطه ۸

ارجحیت فامی			
	قرمز	خنثی	سبز
P	-۸۰۰	+۸۰۰	+۱۷۰۰
Q	+۳۰۰۰	+۱۷۰۰	+۹۰۰

x_0 و y_0 مولفه‌های کروماتیستی منبع نوری D_{65} می‌باشند [۶، ۷]. این رابطه در یک فضای بسیار محدود سفید، مطابقت خوبی با ارزیابی‌های بصری (به ویژه زمینه‌های سفید شده با غلظت‌های متفاوتی از مواد سفیدکننده نوری) نشان می‌دهد [۱۳]. شکل ۲ نشان می‌دهد که سطح سفیدی یکسان توصیف شده با این رابطه یک صفحه می‌باشد. در شکل (a)، خطوط سفیدی یکسان در نمودار Yxy نمایش داده شده است به نحویکه محورهای x ، y و z به ترتیب محورهای x ، y و Y را نمایش می‌دهند. شکل (b)، سطح روشنایی یکسان را نشان می‌دهد. خطوط با روشنایی یکسان در این سطح، اندیس‌های سفیدی متفاوتی را دارا می‌باشند [۱۳، ۱۶].

^۱ Ganz

نمی‌شد، یوچی‌دا مقدار بهینه برای اندیس سفیدی بیشینه را به صورت رابطه ۱۴ تعریف نمود.

$$W_{\max} = 5Y - 275 \quad (14)$$

این تصحیح به دلیل گستردگی بیشتر محدوده کاربردی جدید (رابطه ۱۵) نسبت به تعریف قبلی (رابطه ۱۲) باعث گردید تا بخشی از نمونه‌های خارج از محدوده تعریف شده CIE نیز به عنوان سفید تلقی شوند [۸].

$$40 < W_{CIE} < 5Y - 275 \quad (15)$$

در گام بعدی یوچی‌دا رابطه سفیدی جدید خود را به صورت دو رابطه، برای دو سری نمونه دارای نقطه پایه داخلی^۲ و نقطه پایه خارجی^۳ تعریف کرد [۸]. مبنای این تعاریف، خط پایه^۴ توصیفی در اندیس سفیدی (W) CIE بود. در این اندیس خط پایه (خط مبنا) خطی است در راستای آبی-زرد با طول موج حاکم ۴۶۶ نانومتر که تهرنگ نمونه‌های سفید واقع بر آن صفر می‌باشد. کروماتیسیته نقطه‌ای واقع بر این خط که با اندیس سفیدی بیشینه (5Y-275) برای فاکتور روشنایی هر نمونه به دست می‌آید نقطه پایه^۵ آن نمونه نامیده می‌شود. بدین ترتیب چنانچه اندیس سفیدی CIE نمونه در محدوده رابطه ۱۵ واقع شود، این نمونه به عنوان نمونه دارای نقطه پایه داخلی تلقی شده و اندیس سفیدی آن طبق فرمول سفیدی یوچی‌دا از رابطه ۱۶ محاسبه می‌گردد.

$$W_{10} = W_{CIE,10} - 2(T_{W_{CIE,10}})^2 \quad (16)$$

در غیر این صورت ($W_{CIE,10} > 5Y_{10} - 275$)، نمونه به عنوان یک نمونه خارج از نقطه پایه تلقی شده و اندیس سفیدی آن طبق فرمول سفیدی جدید از رابطه ۱۷ بدست می‌آید.

$$W_{10} = P_{W,10} - 2(T_{W,10})^2 \quad (17)$$

به صورتی که:

$$P_{W,10} = (5Y_{10} - 275) - \{800[0.2742 + 0.00127(100 - Y_{10}) - x_{10}]^{0.82} + 1700[0.2762 + 0.00176(100 - Y_{10}) - y_{10}]^{0.82}\} \quad (18)$$

در این روابط Y_{10} روشنایی نمونه و x_{10} ، y_{10} مؤلفه‌های کروماتیسیته نمونه می‌باشند [۸].

² In base point

³ Out base point

⁴ Baseline

⁵ Base point

بدین ترتیب، تنها نمونه‌هایی از نظر CIE سفید محسوب می‌شوند که اندیس‌های مربوط به سفیدی و تهرنگ آنها در محدوده‌های فوق واقع شوند به نحویکه هر دو شرط هم‌زمان برقرار باشد [۸، ۱۵]. در واقع اندیس سفیدی CIE، یک خط در راستای آبی-زرد با طول موج حاکم ۴۶۶ نانومتر را در دیاگرام کروماتیسیته توصیف می‌کند. رابطه‌های ۱۲ و ۱۳ نیز محدوده‌ای را که یک نمونه می‌تواند در جاتی از تهرنگ آبی یا زرد داشته باشد یا اثری از ته‌سبزی - یا ته‌قرمزی در آن باقی بماند اما هنوز سفید تلقی شود را نشان می‌دهد. طبق این تعریف، پراکنده‌کننده ایده‌آل، یک اندیس سفیدی ۱۰۰ و مقدار تهرنگ ۰ دارد [۱۵]. در سال ۱۹۸۷ رابطه سفیدی و تهرنگ CIE تحت کد ISO 105 بخش J02 با عنوان روش دستگاهی در ارزیابی سفیدی به ثبت رسید. ۲ سال بعد، فرمول سفیدی CIE (به تنهایی) در روش آزمایش AATCC به شماره 110-1989 (تکرار در سال ۱۹۹۴) تحت عنوان اندیس سفیدی منسوجات تدوین و جایگزین رابطه انعکاس آبی (رابطه ۲) گردید [۶، ۱۲].

۲-۴-۲- کار آبی اندیس سفیدی CIE

از معایب عمده اندیس سفیدی CIE عدم توانایی ارزیابی کاغذهای سفید با ته‌رنگ‌های متفاوت می‌باشد. به‌عنوان مثال در پاره‌ای موارد مقدار سفیدی محاسبه شده توسط رابطه CIE، با افزایش مقدار رنگ‌ها در لایه پوشاننده شده از مواد سفیدکننده نوری، افزایش می‌یابد در حالی‌که کاغذها از نظر مشاهده‌کنندگان تیره‌تر و یا قرمزتر می‌شدند. از سوی دیگر وجود انحرافات کوچک در مقادیر محرکه‌های سه‌گانه CIE (XYZ) اندازه‌گیری شده، اغلب منجر به تفاوت‌های معنی‌داری در مقادیر سفیدی CIE و گنز می‌گردید [۱۴]. همچنین علامت‌های مثبت و منفی به دست آمده در فرمول ته‌رنگ CIE، به ترتیب بر تهرنگ سبز و قرمز دلالت داشتند لذا سیستم معادلات CIE، به روشنی نشان نمی‌داد که آیا نمونه سفید ارزیابی شده، جزیی از آبی بودن و یا زرد بودن را در خود دارد یا نه؟ مسأله دیگر محدود بودن کارایی فرمول‌های سفیدی و تهرنگ ارائه شده توسط CIE در ارزیابی نمونه‌هایی بود که از نظر تهرنگ و فلورسنس، تفاوت ناچیزی داشتند [۱۵].

۲-۵- اندیس سفیدی یوچی‌دا^۱

در اواسط دهه ۹۰، یوچی‌دا اصلاحیه‌ای برای اندیس‌های پیشنهادی CIE ارائه نمود تا نمونه‌های سفیدی که شروط استفاده از رابطه CIE را برآورده نمی‌ساختند دارای اندیس سفیدی گردند. وی مدعی بود این رابطه که بر اساس ارزیابی‌های مشاهده‌کنندگان ژاپنی به دست آمده است، نسبت به اندیس CIE، مطابقت بیشتری با ارزیابی‌های چشمی برای نمونه‌های سفید ته‌رنگ‌دار نشان داده است [۷، ۸، ۱۳]. در اولین قدم از آنجاکه طبق محدودیت ذکر شده برای اندیس سفیدی CIE (۱۲)، یک نمونه با میزان روشنایی بالا برغم سفید بودن به دلیل عدم تأمین شرط مذکور ($W_{\text{Sample}} > 5Y_{\text{Sample}} - 280$)، از نظر این فرمول سفید محسوب

¹ Uchida

۲-۵-۱- کارایی اندیس سفیدی یوچی‌دا

بدیهی است که میزان اعتبار یک اندیس سفیدی بستگی به میزان مطابقت رابطه ارائه شده با نتایج ارزیابی‌های چشمی دارد. از این رو ادعای یوچی‌دا مبنی بر برتری فرمول ارائه شده وی در خصوص ارزیابی نمونه‌های خارج از محدوده سفیدی CIE از نقطه نظر میزان انطباق با نتایج ارزیابی‌های چشمی مورد بررسی قرار گرفت [۹، ۱۶]. در تحقیق مورد بحث، نمونه‌های سفیدی که هم از نظر سفیدی و هم از نظر ته رنگ شرایط فرمول سفیدی CIE را تأمین نمی‌نمودند انتخاب شده و با یک‌بارگیری روش مقایسه جفت‌ها ارزیابی شدند. بررسی‌ها نشان داد که فرمول سفیدی CIE در ارزیابی نمونه‌هایی که از نظر این فرمول سفید محسوب نمی‌شوند مطابقت بیشتری با نتایج ارزیابی‌های چشمی دارد. در ادامه کارایی اندیس سفیدی یوچی‌دا در خصوص نمونه‌های سفیدی که شرایط رابطه سفیدی CIE را تأمین می‌کردند نیز مورد مطالعه قرار گرفت [۱۰، ۱۶]. نمونه‌های سفید انتخابی به روش رتبه‌بندی منظم ارزیابی شده و میزان مطابقت دو اندیس سفیدی CIE و یوچی‌دا با نتایج ارزیابی‌های چشمی مورد مقایسه قرار گرفت. بررسی‌ها حاکی از انطباق بیشتر فرمول سفیدی CIE نسبت به اندیس پیشنهادی یوچی‌دا بود.

۲-۶- بسط فرمول‌های ارائه شده بر اساس تقسیم فضای سفید به نواحی کوچک‌تر

از دیگر مطالعات انجام شده در خصوص سفیدی می‌توان به ارائه اندیس‌هایی مبتنی بر تقسیم فضای سفیدی به زیر فضاهای کوچک‌تر بر اساس تهرنگ اشاره نمود. گرچه این بررسی‌ها به صورت گزارشی در شبکه اینترنتی ارائه گردیدند و هنوز به صورت مقاله در مجلات معتبر به طبع نرسیده‌اند مع‌هذا به عنوان یکی از تحقیقات انجام شده در زمینه اندیس‌های سفیدی به آنها اشاره می‌گردد [۱۳، ۱۵]. چنانچه بررسی‌ها و ارزیابی‌ها به ناحیه کوچک‌تری از فضا رنگ منحصر گردد، بر مطابقت نتایج اندازه‌گیری‌های دستگاهی با ارزیابی‌های چشمی افزوده می‌گردد. این امر را می‌توان در استفاده از مقیاس‌های تک‌محوری در بیان رنگ مشاهده نمود. این سیستم‌ها به منظور بیان اختلاف رنگ یک‌سری اجسام بهم وابسته که تنها در یک جهت با هم اختلاف دارند ارائه گردیده‌اند [۱۷]. چنانچه این نظریه‌ها در ارائه روابط برای محاسبه اندیس سفیدی دنبال شود لازم است ناحیه سفید در فضا رنگ به نواحی کوچک‌تری تقسیم شود تا ارزیابی‌ها در این نواحی کوچک، ساده‌تر شوند. بدیهی است در چنین شرایطی همانند مقیاس‌های تک‌محوری، ارزیابی‌ها تنها در یک راستا انجام می‌گیرد. آکسوی و همکارانش فضای سفید را به دو ناحیه شامل نمونه‌های سفید ته‌آبی و سایر نمونه‌های سفید تقسیم نمودند و در ناحیه اول سفید ته‌آبی و در ناحیه دوم مختصات یک سفید ایده‌آل (خنی) را مبنای مقایسه قرار دادند [۱۵]. بدیهی است ارائه اندیس‌های سفیدی مبتنی بر چنین دسته‌بندی‌هایی فاقد توان ارزیابی همه نمونه‌های سفید با تهرنگ‌های متفاوت بوده و از ارزش چندانی برخوردار نخواهد بود.

۲-۷- بررسی رفتار طیفی نمونه‌های سفید

اخیراً با استفاده از روش تجزیه اجزاء اصلی که اختصاراً PCA^۱ [۲۲-۱۸] نامیده می‌شود خصوصیات طیفی نمونه‌های سفید فلورسنسی مورد بررسی قرار گرفت [۲۳]. در این تحقیق نشان داده شد که با به‌کارگیری دو بردار ویژه نخست، در حدود ۹۹/۵۷٪ تشعشعات کلی نمونه‌های سفید فلورسنسی قابل بازسازی می‌باشد. به بیان دیگر یک فضای دو بعدی برای توصیف نمونه‌های سفید فلورسنسی کافی به‌نظر می‌رسد [۲۴، ۲۳]. همچنین میزان هم‌بستگی فرمول سفیدی CIE با نخستین جزء اصلی^۲ بررسی گردید و ضریب همبستگی بالای به‌دست آمده (۰/۹۹۶۶) بر تک بعدی بودن اندیس سفیدی CIE دلالت نمود. این نتایج مبنای کار جعفری و امیرشاهی [۲۵] قرار گرفت تا رفتار ابعادی اندیس سفیدی یوچی‌دا را مورد بررسی قرار دهند. تحقیقات آنها نشان دهنده بالاتر بودن ضریب همبستگی به‌دست آمده میان فرمول سفیدی CIE و بردار ویژه نخست (۰/۹۲۴) نسبت به اندیس سفیدی یوچی‌دا (۰/۸۵۱) برای نمونه‌های سفید مورد پذیرش فرمول سفیدی CIE بود و از آنجا که بیشترین پراکندگی نمونه‌ها حول بردار ویژه نخست رخ می‌دهد همبستگی بدست آمده نشان دهنده آن است که اندیس سفیدی CIE حامل اطلاعات بیشتری نسبت به رابطه پیشنهادی یوچی‌داست [۲۵]. این تحقیق به نوعی نتایج تحقیقات قبلی مؤلفان را مبتنی بر رد ادعای یوچی‌دا در کارایی بیشتر اندیس پیشنهادی وی در خصوص ارزیابی نمونه‌های سفید تأیید می‌کرد.

۳- نتیجه‌گیری

نمونه‌های آکروماتیک یا همان غیررنگی‌ها مشتمل بر نمونه‌های سفید، سیاه و خاکستری هستند. سفیدی، مشخصه رنگ‌هایی با روشنایی بالا و خلوص پایین است. در مباحث فیزیک رنگ، ناحیه باریکی از فضا رنگ تقریباً در امتداد طول موج‌های حاکم ۴۷۰ تا ۵۷۰ نانومتر به سفیدها اختصاص دارد. به دلیل اهمیت تجاری بالای نمونه‌های سفید در صنایعی همچون نساجی و چاپ و با توجه به نیاز صنایع به کنترل کیفیت محصولات، ارزیابی سفیدی ضروری به‌نظر می‌رسد. از بین فرمول‌های متعددی که جهت ارزیابی نمونه‌های سفید ارائه گردید اندیس سفیدی CIE با تعیین دو محدوده کاربردی سفیدی و تهرنگ برای نمونه‌های سفید، مورد پذیرش جوامع علوم رنگ قرار گرفت. پس از آن یوچی‌دا اصلاحیه‌ای برای اندیس سفیدی CIE ارائه نمود و مدعی شد که رابطه پیشنهادی وی قادر به ارزیابی نمونه‌هایی است که شروط اندیس مزبور را تأمین نمی‌نمایند. در تحقیقی جداگانه عدم کارایی فرمول پیشنهادی یوچی‌دا از نظر میزان انطباق با نتایج ارزیابی‌های چشمی به اثبات رسید. اخیراً نیز مطالعاتی با هدف تحلیل رفتار طیفی نمونه‌های سفید در فضاهای با ابعاد کاهش یافته در حال انجام است.

^۱ Principal Component Analysis
^۲ PC1

۴- مراجع

1. F. Karkia, "Color: innovation, efficiency", University of Tehran, **1996**.
2. R. S. Berns, "Principles of Color technology", 3rd Ed, New York, John Wiley & Sons, **2000**.
3. A. K. R. Choudhury, "Modern Concepts of Color and Appearance", New Hampshire, Science publishers Inc, **2000**.
4. D. B. Judd, G. Wyszecki, "Color in Business, Science and industry", 3rd Ed, New York, John Wiley & Sons, **1975**.
5. E. Ganz, "Whiteness: photometric specification and Colorimetric evaluation", J. Appl. Opt. 15, 2039-2058, **1976**.
6. R. McDonald, "Color Physics for Industry", 2nd Ed, Bradford, Dyers company publication trust, **1997**.
7. Axiphose GmbH, "On whiteness formulas", (2002).<http://www.axiphos.com/WhitenessFormulas.pdf>.
8. H. Uchida, "A new whiteness formula ", J. Color Res. Appl. 23, 202-209, **1998**.
9. R. Jafari, S. H. Amirshahi, "A comparison of the CIE and Uchida whiteness formulae as predictor of Average visual whiteness evaluation of textiles", Text. Res. J., 77, 756-763, **2007**.
10. R. Jafari, S. H. Amirshahi, "Using the rank ordering method in visual evaluation of whiteness formulae", 6th National Iranian Textile Engineering Conference, Isfahan, Iran, **2007**.
11. T. Andrews, "How To: Heal with Color", translated by: N. Motakef, Alborz publication, **2001**.
12. R. Hayhurst, K. Smith, "Instrumental evaluation of whiteness", J. Soc. Dyers Color. 111, 263-266, **1995**.
13. Modelling whiteness perceptions. Whiteness formulas (WI), (2006).www.D&T_%20DETERTEC_%20wHITENESS%20Formulas.htm.
14. B. Aksoy, M. K. Joyce, P. D. Fleming, "Comparative study of Brightness/whiteness using various analytical methods on Coated papers containing colorants", (2006). <http://wmich.edu/pci/faculty/Publication/fleming/29-3%20Aksoy.pdf>.
15. B. Aksoy, P. D. Fleming, M. K. Joyce, "Whiteness evaluations on Tinted and FWA added papers", (2006).<http://wmich.edu/pci/faculty/Publication/fleming/Whiteness%20Evaluation%20on%20Tinted%20and%20FWA%20Added%20Papers.pdf>.
16. R. Jafari, "Comparing of selected whiteness formulae in Assessment of samples out of CIE1982 whiteness formula restricted boundaries", MS thesis, Amirkabir University of Technology, Iran, **2006**.
17. M. Ghane, "Determination of perfect white by using of the whiteness formulae and visual assessments", MS thesis, Isfahan University of Technology, Iran, **2005**.
18. I. T. Jolliffe, "Principal component analysis", 2nd Ed, New York, Springer Series in Statistics, **2002**.
19. L. I. Smith, "A tutorial on Principal components analysis", (2002). http://www.cs.otago.ac.nz/cosc453/student_tutorials/principal_components.pdf
20. D. Y. Tzeng, R. S. Berns, "A review of Principal component analysis and Its applications to Color technology", Color Res Appl. 30, 84-98, **2005**.
21. J. Shlens, "A tutorial on Principal component analysis derivation, discussion and singular value decomposition", (2003).http://www.cs.princeton.edu/picasso/mats/PCA-Tutorial-Intuition_jp.pdf
22. H. S. Fairman, M. H. Brill, "The principal components of Reflectances", Color Res. Appl. 29, 104-110, **2004**.
23. S. H. Amirshahi, F. Agahian., "Basis functions of The total radiance factor of Fluorescent whitening agents", Text. Res. J., 76, 197-207, **2006**.
24. R. Jafari, S. H. Amirshahi, S. A. Hosseini Ravandi, "A comparison on Spectral dimensionality of Blacks and Whites", 5th International Color and Coatings Congress (ICCC 2013), Isfahan, Iran, **2013**.
25. R. Jafari, S. H. Amirshahi., "Interpretation of Whiteness formulae in Spectral space", 1st International and the 7th National Conference on Textile Engineering, Rasht, Iran, **2009**.