

بررسی کارایی اندیس‌های متامریزم و اثر تصحیح پارامریک بر روی جفت نمونه‌های واقعی متامریک

محمد امانی تهران

مریی

دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

سیامک مرادیان

دانشیار

دانشکده مهندسی پلیمر و رنگ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

بروز پدیده متامریزم در فرآیندهای رنگ - همانندی بکمک مواد رنگزای جدید اجتناب ناپذیر است. این پدیده به شرایطی انبساط می‌شود که یک جفت نمونه در شرایط معینی رنگ - همانند هستند اما بعلاوه وجود اختلاف در منحنی انعکاسی طیفی آن دو، در صورت تغییر شرایط، اختلاف رنگ بروز می‌نماید.

ارائه اندیس مناسبی که با تطابق مناسب با ارزیابی‌های بصری قادر به پیش‌بینی درجه متامریزم یک جفت نمونه باشد در تلاشهای عملی مورد تحقیق قرار گرفته است. در مقاله حاضر میزان انطباق دو گروه مطرح اندیسهای متامریزم که اولی بر پایه اختلاف رنگ حداکثر تحت منابع نوری و دومی بر پایه اختلاف منحنی انعکاسی طیفی است، روی جفت نمونه‌های واقعی متامریک که توسط ارزیابی‌های بصری درجه بندی شده‌اند، تحت بررسی آماری قرار گرفت و اثر تصحیح پارامریک بکمک روش تجزیه طیفی نیز مورد مطالعه قرار گرفت.

نتایج نشانگر آنست که حداکثر همسبستگی بهترین اندیسها، با نتایج بصری برابر ۳۵٪ ($PF/4=36$) است و کلیه اندیسهای بررسی شده نتایج نزدیک به هم داشته‌اند اما در این میان اندیس CIE94 در گروه اختلاف رنگ و MI6 در گروه اختلاف منحنی انعکاسی طیفی، بهترین تطابق را دارا بودند. اثر تصحیح پارامریک روی تطابق نتایج در حد خنثی و تا حدی منفی بود و کمترین تأثیر منفی آن روی اندیس MI6 مشاهده گردید.

Accuracy of Conventional Metameric Indices and Effect of Parameric Correction on Real Metameric Pairs

M. Amani Tehran

Lecturer Professor

Department of Textile Engineering,
Amirkabir University of Technology

S. Moradian

Associate Professor

Department of Polymer Engineering,
Amirkabir University of Technology

Abstract

The present focuses on the performance of metameric indices in relation to visual assessments. To this end, 98 real pairs of metameric samples were prepared using computer colour match predictions and the differences between the pairs were assessed visually against a prepared Grey scale under three different light sources. The correlation of these data obtained from two different kinds of metameric indices (one based on colour differences under different illuminants and the other based on the difference in spectral reflectance data) were obtained using statistical parameters. For each metameric pair the parameric correction using the matrix-R decomposition were also carried out. The results show that the maximum correlation between the indices and visual assessments were approximately 35% ($PF/4 = 36$). All indices performed similarly, but the CIE94 index in the colour difference group of indices and MI6 in the spectral difference group of indices gave maximum correlation and hence best performances. Parameric correction led to poorer correlation with the least effect on the MI6 index.

Keyword

Visual assessment, Grey scale, Metameric Indices, Reflectance decomposition, Parameric correction.

مقدمه

پدیده متاماریزم به زبان ساده عبارتست از رنگ-هماندی یک جفت نمونه که دارای منحنی انعکاس طیفی مختلفی می باشند تحت یک شرایط معین و ظهور اختلاف رنگ به هنگام تغییر برخی از عوامل مؤثر این شرایط [1] عوامل اصلی مؤثر در ظهور متاماریزم عبارتند از [2, 3]:

۱- منبع نوری LIGHT SOURCE

۲- مشاهده کننده OBSERVER

۳- میدان دید VISUAL FIELD

۴- هندسه مشاهده VIEWING GEOMETRY

۵- بافتار سطح SURFACE TEXTURE

۶- طرح دستگاه رنگ سنجی COLORIMETRIC DESIGN

از میان عوامل فوق تأثیر منبع نوری از همه برجسته تر و اجتناب ناپذیرتر است زیرا ایجاد استاندارد و تغییر در موارد دیگر سهل تر است اما در مورد منبع نوری، چون به شرایط محیط اطراف باز می گردد اجتناب ناپذیر است و از سوی دیگر بررسی اثر منبع نوری بخوبی در مقالات علمی مورد علاقه و بحث قرار گرفته است. [4-10] در فرآیند های رنگ-هماندی هنگامیکه تولید رنگ یک نمونه با مواد رنگزای جدید مد نظر باشد (عملی که در رنگ-هماندی جهت حصول یک مختصات رنگ از قبل تعیین شده بر روی منسوجات و دیگر کالاهای تجاری انجام می گیرد) بروز پدیده متاماریزم مشکلات عدیده ای را ایجاد می نماید زیرا در عمل نسخه رنگرزی برای ایجاد یک رنگ همانند تحت شرایط استاندارد تولید می گردد (مثلاً تحت منبع نوری D65 میدان بصری ۱۰ درجه و غیره)، در این شرایط تغییر منبع نوری می تواند منجر به مشاهده اختلاف رنگ فاحش بین استاندارد و نمونه رنگرزی شده گردد.

پیش گویی اندیس متاماریزم در جهت تعیین درجه متاماریزم و تعیین اندازه این اختلاف و تلاش در محدود کردن آن طی سالهای متوالی مورد توجه متخصصین بوده است و تحقیقات وسیعی در این ارتباط انجام گردیده است. [4-10] موضوع اصلی در این تحقیقات مشکل بودن انطباق نتایج برای نمونه های واقعی بوده است. از آنجائیکه تهیه جفت نمونه های واقعی متاماریک کار مشکل و زمانبری است اغلب تحقیقات انجام شده مبتنی بر نمونه های تئوریک بوده که بطور جامع منجر به واضح سازی مشکل نگردیده است. در این مقاله سعی شده است اندیسه های عرضه شده در تحقیقات

قبلی بر روی ۹۸ نمونه واقعی تهیه شده در طی یک پروژه دکتر [17] مورد بررسی قرار گرفته و نتایج تطبیق آن با مشاهدات بصری افراد واقعی مورد ارزیابی قرار گیرد.

۱- اندیسه های متاماریزم مطرح علمی

بررسی اندیسه های ارائه شده جهت محاسبه میزان متاماریزم می تواند بطور مستقیم به روشهای محاسبه اختلاف رنگ مربوط شود زیرا در اغلب موارد، مقدار اختلاف رنگ ایجاد شده در اثر تغییر منبع نوری بعنوان اندیس متاماریزم قلمداد می شود.

بطور کلی اندیسه های متاماریزم به دو گروه اصلی تقسیم بندی می شوند.

۱- اندیسه های که بر پایه اختلاف بین مختصات رنگی یک جفت نمونه رنگی ایجاد گردیده اند و اختلاف صفر را در شرایط استاندارد فرض کرده و از معادلات اختلاف رنگ جهت تعیین میزان متاماریزم تحت شرایط بعدی استفاده بعمل می آورند.

۲- اندیسه های که بر پایه اختلاف بین مقادیر انعکاسی طیفی یک جفت نمونه رنگی ایجاد شده اند.

طبیعتاً اعداد گزارش شده بعنوان مختصات رنگی در اندیسه های سری اول وابسته به یک منبع نوری مورد استفاده در محاسبات است در صورتیکه اندیسه های سری دوم مستقل از منابع نوری عمل می کند.

مورد قبول ترین معادلات اختلاف رنگ در گروه اول عبارتند از:

$$TCI - 29, CIE94, BFD (1:c), CMC (1:c), [18 - 24]$$

استخوان بندی اصلی هر سه معادله فوق بر حسب مقادیر ΔL , ΔC , ΔH استوار است، بعنوان مثال فرمول CMC مطابق معادله شماره ۱ است.

$$\Delta E_{CMC} = \left[(\Delta L / S_L)^2 + (\Delta C / c S_C)^2 + (\Delta H / S_H)^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

مقادیر L و C برای منسوجات برابر یک انتخاب شده و توابع S_L, S_C, S_H بر حسب مقادیر H و C تعریف شده اند. [18, 21, 22]

فرمول BFD نیز شبیه به معادله CMC (فرمول ۱) و بشکل معادله زیر است.

$$\Delta E_{BFD} = \left[(\Delta L_{BFD} / L)^2 + (\Delta C / c D_c)^2 + (\Delta H / D_H)^2 + R_T (\Delta C / D_c) (\Delta H / D_H) \right]^{1/2} \quad (2)$$

در معادله ۲ مقادیر L_{BFD} بر حسب Y و پارامترهای D_H ، D_C بر حسب H و C تعریف شده اند. فرمول CIE94 کاملاً شبیه به CMC می باشد بجز آنکه تغییراتی در نحوه محاسبه توابع S داده شده است [18, 21, 22].

فرمول TCI-29 نیز مطابق CIE94 است با این اختلاف که توابع S علاوه به وابستگی به C و H به میزان روشنایی نیز وابسته گردیده اند [18, 21].

سری دوم یعنی سری وابسته به مقادیر انعکاس طیفی جسم شامل معادلات سری MI3-6 بشرح ذیل هستند. ساده ترین فرم این گروه اندیس بریجمن [25] (BRIDGMANN) است که بدون وزن دهی مجموع مجذور اختلاف انعکاس را محاسبه نموده است.

$$(MI)_3 = \left[\sum (R_{1,\lambda} - R_{2,\lambda})^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

معادلات نیمورف ویارو [5] شامل جمع زدن اختلاف مقادیر انعکاسی با وزن دادن با فاکتورهای \bar{x}_λ ، \bar{y}_λ ، \bar{z}_λ و یا \bar{u}_λ ، \bar{v}_λ ، \bar{w}_λ بعنوان مثال با وزن دهی سری \bar{x}_λ معادله بشکل زیر خواهد بود.

$$(MI)_4 = \left\{ \sum \left[\bar{x}_\lambda (\Delta R_\lambda) \right]^2 + \sum \left[\bar{y}_\lambda (\Delta R_\lambda) \right]^2 + \sum \left[\bar{z}_\lambda (\Delta R_\lambda) \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (4)$$

در معادله پیشنهادی مرادیان وریگ [4] بجای استفاده مستقیم از ΔR_λ از مقادیر تغییر شکل یافته آن استفاده شده است.

$$(MI)_6 = \left\{ \sum \left[\bar{u}_\lambda (\Delta L_\lambda) \right]^2 + \sum \left[\bar{v}_\lambda (\Delta L_\lambda) \right]^2 + \sum \left[\bar{w}_\lambda (\Delta L_\lambda) \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (5)$$

$$\Delta L_\lambda = 25(L_{1,\lambda} - L_{2,\lambda})^{1/3} \quad (6)$$

۲- جفتهای پارامریک و روش تجزیه طیفی

یک پارامتر محدود کننده در محاسبه اندیسهای متاماریزم شرط رنگ - همانندی با اختلاف رنگ برابر با صفر در زیر منبع نوری مرجع (مثلاً D65) است. این امر در شرایط واقعی کمتر امکان وقوع دارد. لذا نمونه های واقعی دارای یک اختلاف

رنگ جزئی تحت منبع نوری مرجع و اختلاف رنگهای قابل ملاحظه تحت منابع نوری دیگر می باشند. جهت غلبه بر مشکل فوق بهترین پیشنهاد استفاده از روش تجزیه طیفی یعنی تئوری تجزیه پارامریک (ماتریس R) که شرح آن در ذیل می آید می باشد.

تئوری تجزیه پارامریک توسط کاهن و کاپوف [26] تکمیل گشته است، مطابق این تئوری انعکاس طیفی هر جسم از دو جزء یعنی انعکاس طیفی پایه و انعکاس طیفی متاماریک تشکیل شده است بطوریکه جزء متاماریک تحت منبع نوری با طیف انرژی برابر، یک سیاه مطلق است و مقادیر محرکهای رنگی به تنهایی از جزء پایه تولید می گردد. اما تحت منابع نوری واقعی، جزء متاماریک موجود باعث تغییر در محرکهای رنگی جسم می شود.

در مراجع مختلف [27, 28] روش محاسبه انعکاس های طیفی پایه و متاماریک از روی مقادیر انعکاس طیفی جسم توضیح داده شده است. در این محاسبات ماتریسی بنام R نقش کلیدی بازی می کند بطوریکه N^* (انعکاس طیفی پایه) برابر حاصل ضرب R در Ni (انعکاس طیفی جسم) است و Bi (جزء متاماریک) بسادگی از کم کردن N^* از Ni بدست می آید. R مطابق فرمول (۷) تعریف شده است که در این فرمول ماتریس A بصورت $3 \times n$ برابر حاصل ضرب توابع مشاهده کننده استاندارد CIE در توزیع انرژی طیفی منبع نوری است.

$$R = A (A A)^{-1} A \quad (7)$$

در روش پیشنهادی جهت غلبه بر مشکل پارامریک [29]، ابتدا طیفهای جفت پارامریک به انعکاسهای طیفی پایه و متاماریک تجزیه شده و منحنی انعکاس استاندارد (Ns) با منحنی انعکاس طیفی رنگ - همانندی که از اضافه نمودن طیف متاماریک جفت پارامریک به طیف پایه استاندارد بدست آمده مورد مقایسه قرار گیرد.

$$N_C = RN_S + (I-R) N_I \quad (8)$$

در معادله (۸) N_C طیف تصحیح شده، I ماتریس واحد و N_I منحنی انعکاس طیفی رنگ - همانند است. بنابراین در عمل منحنی انعکاس طیفی استاندارد با منحنی انعکاس طیفی تصحیح شده جفت متاماریک در محاسبات مدنظر قرار می گیرد. بدیهی است در صورتی که ΔE دو جسم تحت منبع نوری مرجع صفر باشد، این تصحیح تغییری در نتایج ایجاد نمی کند اما در شرایط پارامریک موجب حذف اثر اختلاف رنگ تحت منبع نوری مرجع می گردد.

۴- ارزیابی تحقیقات قبلی پیرامون صحت اندیسه‌های متاماریزم

همانگونه که در مقدمه ذکر شد، محققین مختلف از جمله ارائه کنندگان معادلات اختلاف رنگ و اندیسه‌های متاماریزم مبادرت به ارزیابی صحت اندیسه‌های ارائه شده جهت پیشگویی صحیح درجه متاماریزم [31، 30، 12، 4] نموده اند. گرچه در کنار مسائل مطروحه در این ارزیابی‌ها نتایج چندان درخشان نبوده اما مشکلاتی نیز بطور عمومی در این ارزیابیها دخیل بوده اند.

مهمترین مشکل مربوط به نداشتن جفت نمونه های واقعی متاماریک و تهیه گزارش مبتنی بر نمونه های محاسباتی است [31، 9، 6]. در محدود مواردی که نمونه های واقعی در دست بوده، اغلب تعداد نمونه ها کمتر از ۳۰ عدد بوده و تنها مقاله با تعداد نمونه های قابل توجه مربوط به سال ۱۹۹۹ است که ۷۶ جفت نمونه واقعی متاماریک را مورد بررسی قرار داده است [6]. مسئله بعدی مربوط به تمرکز انجام ارزیابی های بصری تحت منبع نوری D65 است و این ارزیابی ها کمتر تحت منابع نوری دیگر مورد بررسی قرار گرفته اند.

بعنوان جمع بندی مقالات بررسی شده، می توان ادعا نمود که معادلات مطروحه سوای بحث تصحیح پارامتریک، تطابق رضایت بخشی با مشاهدات بصری ندارند. اما در میان پیشنهادات موجود معادله CIE94، TCI-29 دارای بهترین تطابق هستند [31، 30، 8]. از میان اندیسه‌های متاماریزم نیز اندیس مرادیان وریگ [4] بهترین تطابق را دارند گرچه ضعیفتر از معادلات اختلاف رنگ برآورد شده اند [9].

مرجع [30، 8] اثر تصحیح پارامریک را روی ۱۲ نمونه واقعی بررسی و نتیجه گیری نموده که این تصحیح برتری معادله CIE94 را تغییر نداده ولی بطور نسبی منجر به ارائه تطابق بهتر با نتایج بصری می گردد گرچه بلحاظ محدودیت تعداد نمونه ها این نتیجه بایستی عمیق تر مورد بررسی قرار گیرد. با عنایت به تئوری تجزیه طیفی می توان بجای اینکه مقادیر انعکاس طیفی نمونه های پارامریک را در محاسبات بکار برد، از مقادیر تصحیح شده آنها توسط تجزیه طیفی استفاده نمود. در بررسی های حاضر به هر دو روش یعنی مقادیر تصحیح شده و تصحیح نشده توجه شده است.

۵- ارزیابی بصری نمونه ها

همانگونه که در مقدمه ذکر شد، تطابق اندیسه‌های ارائه شده با ارزیابی های بصری مهمترین موضوع این مقاله می باشد. نحوه ارزیابی بعدی و مطالعه پارامترهایی چون تکرارپذیری فردی و اثر فرد در ارزیابی بطور مفصل مورد توجه مقالات علمی قرار گرفته است [24، 7، 6] و در این زمینه ها اختلاف

نظر بین محققین وجود دارد. این زمینه ها عبارتند از وجود نظرات نسبتاً متفاوت درباره یک جفت نمونه (Cv٪ بالا ارزیابی بصری)، خطا در تکرار پذیری مشاهدات توسط یک فرد، داشتن یک اختلاف دائمی در اعداد بین افراد مختلف، نحوه ارائه نمونه ها جهت ارزیابی بصری، روش تغییر منابع نوری و نحوه بیان اعداد توسط مشاهده کنندگان. [32، 8، 6] در مجموع مقالات مورد بررسی تقریباً موارد ذیل مورد وثوق همگانی بوده است.

۱- استفاده از مقیاس خاکستری با توزیع لگاریتمی بعنوان مبنای ارزیابی

۲- قرار دادن جفت نمونه واقعی متاماریک و جفت مقیاس خاکستری در کنار یکدیگر در درون کابینت نوری جهت انجام ارزیابی

۳- زمان دادن کافی جهت وفق چشمان فرد به منبع نوری

۴- بیان ارزیابی بکمک شماره های مقیاسهای خاکستری و اینکه اگر بین دو شماره است به کدامیک نزدیک تر است.

۵- متوسط گیری از اعداد گزارش شده ارزیابی بصری جهت دستیابی به میانگین واقعی

با رعایت موارد توافقی فوق و با استفاده از مقیاس خاکستری تهیه شده در پروژه آقای پروانه [8] که در آن ۷ نمونه مقیاس خاکستری نسبت به استاندارد تحت منابع نوری [33] D65، TL84، A مقادیر ΔL^* و ΔE^* برابر داشتند روش اندازه گیری بشرح ذیل می باشد:

۱- انجام تست بینایی رنگی نرمال توسط کتاب ایشی هارا [34] جهت اطمینان از بینایی رنگی طبیعی فرد و عدم وجود نقص رنگی یا کور رنگی.

۲- شرح دستورالعمل کار و انجام چند نمونه بصورت آزمایشی و تمرینی برای هر مشاهده کننده.

۳- وفق دادن چشمان فرد به منبع نوری اول (D65) و انجام ارزیابی بصری برای ۹۸ نمونه

۴- تعویض منبع نوری و تکرار ارزیابی برای دو منبع نوری دیگر یعنی TL84 و A.

در مجموع پانزده نفر ارزیابی بصری را به انجام رساندند که ۷ نفر آنها مرد و ۸ نفر آنها زن بودند محدوده سنی بین ۲۰ الی ۴۰ سال و میانگین سن ۳۰ انتخاب شده بود.

نتایج مطالعات آماری این آزمایشات بشرح زیر است. برای هر ۹۸ نمونه تحت سه منبع نوری مقادیر میانگین، انحراف معیار استاندارد و تفرانس طبق فرمولهای آماری محاسبه گردیدند [35].

رنگ جزئی تحت منبع نوری مرجع و اختلاف رنگهای قابل ملاحظه تحت منابع نوری دیگر می باشند. جهت غلبه بر مشکل فوق بهترین پیشنهاد استفاده از روش تجزیه طیفی یعنی تئوری تجزیه پارامریک (ماتریس R) که شرح آن در ذیل می آید می باشد.

تئوری تجزیه پارامریک توسط کاهن و کاپوف [26] تکمیل گشته است، مطابق این تئوری انعکاس طیفی هر جسم از دو جزء یعنی انعکاس طیفی پایه و انعکاس طیفی متماریک تشکیل شده است بطوریکه جزء متماریک تحت منبع نوری با طیف انرژی برابر، یک سیاه مطلق است و مقادیر محرکهای رنگی به تنهایی از جزء پایه تولید می گردد. اما تحت منابع نوری واقعی، جزء متماریک موجود باعث تغییر در محرکهای رنگی جسم می شود.

در مراجع مختلف [27, 28] روش محاسبه انعکاس های طیفی پایه و متماریک از روی مقادیر انعکاس طیفی جسم توضیح داده شده است. در این محاسبات ماتریسی بنام R نقش کلیدی بازی می کند بطوریکه N^* (انعکاس طیفی پایه) برابر حاصل ضرب R در Ni (انعکاس طیفی جسم) است و Bi (جزء متماریک) بسادگی از کم کردن N^* از Ni بدست می آید. R مطابق فرمول (V) تعریف شده است که در این فرمول ماتریس A بصورت $3 \times n$ برابر حاصل ضرب توابع مشاهده کننده استاندارد CIE در توزیع انرژی طیفی منبع نوری است.

$$R = A (\hat{A} A)^{-1} \hat{A} \quad (V)$$

در روش پیشنهادی جهت غلبه بر مشکل پارامریک [29]، ابتدا طیفهای جفت پارامریک به انعکاسهای طیفی پایه و متماریک تجزیه شده و منحنی انعکاس استاندارد (Ns) با منحنی انعکاس طیفی رنگ - همانندی که از اضافه نمودن طیف متماریک جفت پارامریک به طیف پایه استاندارد بدست آمده مورد مقایسه قرار گیرد.

$$N_C = RN_S + (I-R) N_I \quad (A)$$

در معادله (A) N_C طیف تصحیح شده، I ماتریس واحد و N_I منحنی انعکاس طیفی رنگ - همانندی است.

بنابراین در عمل منحنی انعکاس طیفی استاندارد با منحنی انعکاس طیفی تصحیح شده جفت متماریک در محاسبات مدنظر قرار می گیرد. بدیهی است در صورتی که ΔE دو جسم تحت منبع نوری مرجع صفر باشد، این تصحیح تغییری در نتایج ایجاد نمی کند اما در شرایط پارامریک موجب حذف اثر اختلاف رنگ تحت منبع نوری مرجع می گردد.

$$\Delta E_{BFD} = \left[(\Delta L_{BFD} / L)^2 + (\Delta C / c D_c)^2 + (\Delta H / D_H)^2 + R_T (\Delta C / D_c) (\Delta H / D_H) \right]^{1/2} \quad (2)$$

در معادله 2 مقادیر L_{BFD} بر حسب Y و پارامترهای D_H ، D_C بر حسب H و C تعریف شده اند. فرمول CIE94 کاملاً شبیه به CMC می باشد بجز آنکه تغییراتی در نحوه محاسبه توابع S داده شده است [18, 21, 22].

فرمول TCI-29 نیز مطابق CIE94 است با این اختلاف که توابع S علاوه به وابستگی به C و H به میزان روشنایی نیز وابسته گردیده اند [18, 21].

سری دوم یعنی سری وابسته به مقادیر انعکاس طیفی جسم شامل معادلات سری MI3-6 بشرح ذیل هستند. ساده ترین فرم این گروه اندیس بریجمن [25] (BRIDGMANN) است که بدون وزن دهی مجموع مجذور اختلاف انعکاس را محاسبه نموده است.

$$(MI)_3 = \left[\sum (R_{1,\lambda} - R_{2,\lambda})^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

معادلات نیمورف ویارو [5] شامل جمع وزن اختلاف مقادیر انعکاسی با وزن دادن با فاکتورهای \bar{x}_λ ، \bar{y}_λ ، \bar{z}_λ و \bar{x}_λ و \bar{w}_λ ، \bar{v}_λ ، \bar{u}_λ بعنوان مثال با وزن دهی سری \bar{x}_λ معادله بشکل زیر خواهد بود

$$(MI)_4 = \left\{ \sum \left[\bar{x}_\lambda (\Delta R_\lambda) \right]^2 + \sum \left[\bar{y}_\lambda (\Delta R_\lambda) \right]^2 + \sum \left[\bar{z}_\lambda (\Delta R_\lambda) \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (4)$$

در معادله پیشنهادی مرادیان وریگ [4] بجای استفاده مستقیم از ΔR_λ از مقادیر تغییر شکل یافته آن استفاده شده است.

$$(MI)_6 = \left\{ \sum \left[\bar{u}_\lambda (\Delta L_\lambda) \right]^2 + \sum \left[\bar{v}_\lambda (\Delta L_\lambda) \right]^2 + \sum \left[\bar{w}_\lambda (\Delta L_\lambda) \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (5)$$

$$\Delta L_\lambda = 25(L_{1,\lambda} - L_{2,\lambda})^{1/3} \quad (6)$$

2- جفتهای پارامریک و روش تجزیه طیفی

یک پارامتر محدود کننده در محاسبه اندیسهای متماریک شرط رنگ - همانندی با اختلاف رنگ برابر با صفر در زیر منبع نوری مرجع (مثلاً D65) است. این امر در شرایط واقعی کمتر امکان وقوع دارد. لذا نمونه های واقعی دارای یک اختلاف

۴- ارزیابی تحقیقات قبلی پیرامون صحت اندیسه‌های متاماریزم

همانگونه که در مقدمه ذکر شد، محققین مختلف از جمله ارائه کنندگان معادلات اختلاف رنگ و اندیسه‌های متاماریزم مبادرت به ارزیابی صحت اندیسه‌های ارائه شده جهت پیشگویی صحیح درجه متاماریزم [4, 12, 30, 31] نموده اند. گرچه در کنار مسائل مطروحه در این ارزیابی‌ها نتایج چندان درخشان نبوده اما مشکلاتی نیز بطور عمومی در این ارزیابیها دخیل بوده اند.

مهمترین مشکل مربوط به نداشتن جفت نمونه های واقعی متاماریک و تهیه گزارش مبتنی بر نمونه های محاسباتی است [6, 9, 31]. در محدود مواردی که نمونه های واقعی در دست بوده، اغلب تعداد نمونه ها کمتر از ۳۰ عدد بوده و تنها مقاله با تعداد نمونه های قابل توجه مربوط به سال ۱۹۹۹ است که ۷۶ جفت نمونه واقعی متاماریک را مورد بررسی قرار داده است [6]. مسئله بعدی مربوط به تمرکز انجام ارزیابی های بصری تحت منبع نوری D65 است و این ارزیابی ها کمتر تحت منابع نوری دیگر مورد بررسی قرار گرفته اند.

بعنوان جمع بندی مقالات بررسی شده، می توان ادعا نمود که معادلات مطروحه سوای بحث تصحیح پارامتریک، تطابق رضایت بخشی با مشاهدات بصری ندارند. اما در میان پیشنهادات موجود معادله TCI-29, CIE94 دارای بهترین تطابق هستند [8, 30, 31]. از میان اندیسه‌های متاماریزم نیز اندیس مرادیان وریگ [4] بهترین تطابق را دارند گرچه ضعیفتر از معادلات اختلاف رنگ برآورد شده اند [9].

مرجع [8, 30] اثر تصحیح پارامتریک را روی ۱۲ نمونه واقعی بررسی و نتیجه گیری نموده که این تصحیح برتری معادله CIE94 را تغییر نداده ولی بطور نسبی منجر به ارائه تطابق بهتر با نتایج بصری می گردد گرچه بلحاظ محدودیت تعداد نمونه ها این نتیجه بایستی عمیق تر مورد بررسی قرار گیرد. با عنایت به تئوری تجزیه طیفی می توان بجای اینکه مقادیر انعکاس طیفی نمونه های پارامتریک را در محاسبات بکار برد، از مقادیر تصحیح شده آنها توسط تجزیه طیفی استفاده نمود. در بررسی های حاضر به هر دو روش یعنی مقادیر تصحیح شده و تصحیح نشده توجه شده است.

۵- ارزیابی بصری نمونه ها

همانگونه که در مقدمه ذکر شد، تطابق اندیسه‌های ارائه شده با ارزیابی های بصری مهمترین موضوع این مقاله می باشد. نحوه ارزیابی بعدی و مطالعه پارامترهایی چون تکرارپذیری فردی و اثر فرد در ارزیابی بطور مفصل مورد توجه مقالات علمی قرار گرفته است [6, 7, 24] و در این زمینه ها اختلاف

نظر بین محققین وجود دارد. این زمینه ها عبارتند از وجود نظرات نسبتاً متفاوت درباره یک جفت نمونه (Cv) بالا ارزیابی بصری، خطا در تکرار پذیری مشاهدات توسط یک فرد، داشتن یک اختلاف دائمی در اعداد بین افراد مختلف، نحوه ارائه نمونه ها جهت ارزیابی بصری، روش تغییر منابع نوری و نحوه بیان اعداد توسط مشاهده کنندگان. [6, 8, 32] در مجموع مقالات مورد بررسی تقریباً موارد ذیل مورد وثوق همگانی بوده است.

۱- استفاده از مقیاس خاکستری با توزیع لگاریتمی بعنوان مبنای ارزیابی

۲- قرار دادن جفت نمونه واقعی متاماریک و جفت مقیاس خاکستری در کنار یکدیگر در درون کابینت نوری جهت انجام ارزیابی

۳- زمان دادن کافی جهت وفق چشمان فرد به منبع نوری

۴- بیان ارزیابی بکمک شماره های مقیاسهای خاکستری و اینکه اگر بین دو شماره است به کدامیک نزدیک تر است.

۵- متوسط گیری از اعداد گزارش شده ارزیابی بصری جهت دستیابی به میانگین واقعی

با رعایت موارد توافقی فوق و با استفاده از مقیاس خاکستری تهیه شده در پروژه آقای پروانه [8] که در آن ۷ نمونه مقیاس خاکستری نسبت به استاندارد تحت منابع نوری [33] D65, TL84, A, مقادیر * ΔL و * ΔE برابر داشتند روش اندازه گیری بشرح ذیل می باشد:

۱- انجام تست بینایی رنگی نرمال توسط کتاب ایشی هارا [34] جهت اطمینان از بینایی رنگی طبیعی فرد و عدم وجود نقص رنگی یا کور رنگی.

۲- شرح دستورالعمل کار و انجام چند نمونه بصورت آزمایشی و تمرینی برای هر مشاهده کننده.

۳- وفق دادن چشمان فرد به منبع نوری اول (D65) و انجام ارزیابی بصری برای ۹۸ نمونه

۴- تعویض منبع نوری و تکرار ارزیابی برای دو منبع نوری دیگر یعنی TL84 و A.

در مجموع پانزده نفر ارزیابی بصری را به انجام رساندند که ۷ نفر آنها مرد و ۸ نفر آنها زن بودند محدوده سنی بین ۲۰ الی ۴۰ سال و میانگین سن ۳۰ انتخاب شده بود.

نتایج مطالعات آماری این آزمایشات بشرح زیر است. برای هر ۹۸ نمونه تحت سه منبع نوری مقادیر میانگین، انحراف معیار استاندارد و تلرانس طبق فرمولهای آماری محاسبه گردیدند [35].

گرفته است [36] معادله (۱۱) نشانگر نحوه محاسبه این پارامتر است.

$$PF = \left[\lambda + V_{AB} + \frac{Cv}{100} - \tau \right] * 100 \quad (11)$$

در معادله (۱۱)، τ معرف ضریب زگرسیون، Cv ، λ کمیت های پیشنهاد شده توسط کوتز و همکارانش [37] بوده و V_{AB} توسط شولتز [38] محاسبه شده است. در مدل PF/4، از ۴ کمیت آماری با وزن دهی مناسب جهت تخمین استفاده شده بطوریکه مقدار صفر آن معرف تطابق و همبستگی صددرصد است. اشکال اصلی PF/4 در آنست که یک انحراف کلی در ابتدا یا انتهای خط و شرایطی که اندازه گیریها دارای خطاست، منجر به نتایج یکسان می گردد [6]. مقدار PF/4 برابر ۳۰ معرف ۳۰٪ انحراف استاندارد بین نمونه هاست.

۱-۶-۱- ارزش گذاری سطوح خاکستری

روش معمول تحقیقات علمی جهت ارزش گذاری نمونه های خاکستری بدین صورت است که به کمک مقادیر انعکاس طیفی هر نمونه خاکستری در معادله مورد نظر، مقدار اختلاف رنگ با نمونه استاندارد محاسبه شده و سپس در یک انطباق داده (معمولاً چند جمله ای با درجات ۳ الی ۵) برای تبدیل شماره نمونه خاکستری به عدد متناظر محاسبه شده، استفاده می شود [6-8]. بعنوان مثال معادله مربوط برای معادله CIE94 بصورت زیر است.

$$\Delta E = 0.0164 G_S^3 - 0.06 G_S^2 + 0.31 G_S - 0.0813 \quad (12)$$

در معادله (۱۲) G_S معرف شماره مقیاس خاکستری و ΔE مقدار اختلاف رنگ معادل، طبق معادله CIE94 است. اشکال ظاهری این روش آنست که اعتماد به عدد تولیدی معادله در دو سو ایجاد شده بدان معنا که اگر معادله اختلاف رنگ، دو جفت نمونه خاکستری را نسبت به استاندارد ۲ برابر محاسبه نمود در صورتیکه ارزیابی بصری فاصله این دو جفت نمونه و استاندارد را برابر شناخت، اجباراً می باید نسبت فاصله رنگی را دو برابر قبول نماییم. جهت اجتناب از مسئله فوق سعی شد روش جدیدی در کنار مشی جاری آزمایش شود.

در این روش بکمک تعدادی از ارزیابان بصری نسبت اختلاف رنگ مقیاسهای خاکستری اندازه گیری شد بدین صورت که افراد فاصله بین نمونه اول و استاندارد را مثلاً برابر فاصله بین نمونه اول و دوم گزارش نمودند. این کار بصورت ضربدری و با تکرار زیاد در زیر سه منبع نوری TL84, D65

$$S = \left[\frac{n \sum xi^2 - (\sum xi)^2}{n(n-1)} \right]^{1/2} \quad (9)$$

$$Tol = ts / \sqrt{n} \quad (10)$$

مقدار t طبق جدول آزمون استودنت با قطعیت ۹۵٪ و تعداد نمونه ها $n(15)$ ، برابر با $1/761 \pm$ حاصل گردید. حداکثر مقدار تolerانس (TOL) محاسبه شده در کل نمونه ها برابر $0/678$ و متوسط آن $0/4$ است که حد کاملاً قابل قبولی برای اختلافات رنگ در محدوده ۲ الی ۷ است. این مسئله کافی بودن انتخاب ۱۵ نفر جهت آزمون ها را ثابت می نماید.

۳- نتایج و بحث پیرامون آن

بطور کلی تطبیق معادلات با ارزیابی بصری از دو جنبه می تواند مورد بررسی قرار گیرد. اول توافق روندی و دوم توافق فاصله ای. منظور از توافق روندی آنست که اگر اعداد گزارش شده توسط ارزیابی بصری در مورد یکسری نمونه روند صعودی یا نزولی داشت، معادله نیز مؤید نظر فوق باشد و به عبارت دیگر اگر نمونه ای مورد قبول رنگ - همانندی توسط چشم قرار گرفت، توسط معادله نیز در محدوده رواداری قرار گیرد.

اما توافق فاصله ای مکمل توافق روندی است این توافق وقتی حاصل می شود که اگر ارزیابی بصری، فاصله دو نمونه را دو برابر فاصله دو نمونه دیگر احساس نمود معادله نیز اعدادی ۲ برابر یکدیگر گزارش نماید.

برای روشن شدن بیشتر مطلب به نتایج محاسبه اختلاف رنگ برای ۷ نمونه خاکستری در جدول ۱ توجه شود.

به لحاظ توافق روندی هر ۴ معادله توافق مناسبی با یکدیگر داشته و روند صعودی در تمام معادلات صادق است. در حالی که تا نمونه پنجم در سه معادله اول توافق فاصله ای وجود دارد اما در نمونه های بعدی چنین توافقی از بین می رود منحنی شماره ۱ نمایش رسم مقادیر بدست آمده از معادلات CIE94, CMC بر حسب مقادیر گزارش شده BFD است. توافق فاصله ای با ابقای شکل خطی در این منحنی به ثبوت می رسد ولی در حواله $BFD = 5$ انحراف از خط راست مشاهده می گردد.

از جنبه محاسباتی روشهای مختلفی جهت تعیین توافق دو معادله مورد استفاده قرار گرفته است. بعنوان مثال روش حداقل مجزورات خطا بهترین خط را از داده ها عبور داده و جمع مربعات خطای هر نقطه (فاصله عمودی هر نقطه از خط بدست آمده) یا χ^2 را بعنوان معیار تطابق استفاده می نماید. اما مدل PF/4 در مقالات مختلف مورد توجه بیشتری قرار

و A انجام گرفت و انحراف معیار اندازه گیری ها در ذکر نسبتها و ۵/۳٪ در صد بود. بدین صورت یک عدد اختلاف رنگ جهت نمونه ای خاکستری مطابق جدول شماره (۲) تهیه گردید. در این جدول فاصله استاندارد و نمونه شماره ۳ که توسط همه افراد قابل تشخیص بود بعنوان واحد در نظر گرفته شده است.

۲-۶. محاسبات تصحیح پارامریک

همانگونه که در بخش ۳ شرح داده شد جهت اعمال تصحیح پارامریک لازم است منحنی های انعکاسی طیفی تصحیح شده محاسبه شده و در مراحل بدست آوردن اندیس متامریزم و اختلاف رنگ بکار رود.

اصلی ترین عامل در انجام تجزیه طیفی بدست آوردن عناصر ماتریس R است. روش محاسبه ماتریس R در معادله ۷ نشان داده شد. با توجه به اینکه اندازه گیری های منحنی انعکاس طیفی نمونه ها در ۱۶ نقطه با فاصله ۲۰ نانومتر انجام شده بود، مقادیر \bar{x} , \bar{y} , \bar{z} توابع مشاهده کننده استاندارد CIE 10 در طول موجهای ۴۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر با فاصله ۲۰ نانومتر از جدول مرجع [24] استخراج گردید. مقادیر توزیع انرژی طیفی منبع نوری استاندارد D65 نیز به ترتیب فوق از مرجع [2] استخراج شده است.

پس از ضرب کردن تک تک این عوامل در یکدیگر و نرمال سازی، ماتریس A بصورت 3×16 تولید گردید و مطابق معادله ۷ ماتریس R محاسبه گردید. جدول ۳ نشانگر نتایج محاسباتی ماتریس A برای منبع نوری D65 است.

در پایان با داشتن عناصر ماتریس R و معادله (۸) می توان منحنی انعکاس طیفی رنگ - همانند را تصحیح نمود. شکل های ۲ و ۳ نشانگر اثر انجام تصحیح پارامریک روی دو جفت با حداکثر و حداقل اندیس متامریزم است. نزدیکی دو منحنی نشانگر تأثیر ضعیف تصحیح پارامریک روی جفت های واقعی متامر است.

۳-۶. روش بررسی آماری نتایج

همانگونه که در مبحث روش بررسی میزان توافق اندیسه های متامریزم و اندازه گیری بصری شرح داده شد، کمیت های آماری مهم یعنی ضریب همبستگی r ، در صد خطا (%E) و ضریب کارایی (PF/4) برای معادلات مختلف محاسبه شدند. جدول ۴ معرف این مقادیر بدون اعمال تصحیح پارامریک و پس از اعمال تصحیح پارامریک می باشد.

با بررسی نتایج مندرج در جدول ۴ می توان بحث های ذیل را مطرح نمود.

الف - کلیه پارامترهای آماری مثل درصد خطا (%E)، گاما (λ)، انحراف استاندارد (CV)، ضریب همبستگی خط راست

(r) و ضریب کارایی (PF/4) در مورد هر اندیس دارای توافق نظر هستند یعنی اندیسی که کمترین درصد خطا را داراست بقیه پارامترها نیز مؤید همبستگی مناسب آن و دارای اعدادی نزدیک به عدد ارائه شده توسط معیار فوق می باشد.

ب - بجز اندیس MI4 که بنظر می رسد بعلت عدم در نظر گیری وزن دهی مناسب روی اختلاف منحنی انعکاس طیفی دارای عملکرد ضعیفی است، بقیه اندیسه ها با اختلاف اندک تطابق نزدیک بهم و ارائه دهنده ۳۰ تا ۴۰ درصد انحراف با ارزیابی های بصری هستند. این محدوده اختلاف توسط مراجع بحث شده در طی مقاله نیز تأیید شده بود.

ج - در میان اندیس های بررسی شده بهترین نتایج متعلق به اندیس CIE94 در گروه وابسته به اختلاف رنگ و MI6 در گروه وابسته به منحنی انعکاس طیفی است.

د - اثر تصحیح پارامریک حتی در شرایطی که حدود ۴۰ جفت پارامتر بوده اند، خنثی و حدوداً منفی بوده است و کمترین تأثیر منفی آن روی اندیسه های وابسته به منحنی انعکاس طیفی مشاهده می شود که بعلت استقلال این اندیسه ها از اختلاف مختصات رنگی است.

شکل های ۴ و ۵ نشان دهنده مقایسه نتایج معادله CIE94 و معادله MI6 در برابر مشاهدات بصری به همراه بهترین خط عبور کننده از داده ها می باشند.

۷- نتیجه گیری

همانگونه که در بخش های مختلف مقاله اشاره گردید، بررسی نحوه تطبیق اندیسه های متامریزم مختلف روی تعداد قابل توجه و متنوع جفت نمونه های واقعی متامریک که مورد ارزیابی بصری قرار گرفته اند می تواند کمک مؤثری در برآورد کارایی عملی این اندیسه ها داشته باشد. نتایج بدست آمده نشان داد که حداکثر همبستگی در مرز ۳۰٪ محدود می گردد و این میزان انحراف حتی با اعمال تصحیح پارامریک نیز جبران نگردید. در ارتباط با تفسیر موضوع فوق می توان دلایل ذیل را محتمل دانست که نیازمند تحقیق بیشتر است.

الف) ضعف معادلات مبتنی بر اختلاف رنگ جهت تخمین اندیس متامریزم می تواند مربوط به تکیه صحت این معادلات تحت منبع نوری D65 باشد در حالی که اختلاف رنگ حداکثر تحت منبع نوری A یا TL84 اتفاق می افتد.

ب) معادلات مبتنی بر اختلاف منحنی انعکاس طیفی نیز کاملاً مستقل از رفتار منابع نوری هستند و مقایسه نتایج آنها با ارزیابی های بصری که تابع تغییر منبع نوری بوده اند بنوعی می تواند منشأ اختلاف نتایج باشد.

است. شاید این عملکرد ناشی از نتایج ارائه شده در بند (ج) باشد زیرا تصحیح پارامریک با تغییر منحنی انعکاس طیفی جفت متامار موجب صفر شدن اختلاف رنگ تحت منبع نوری D65 و نهایتاً ارائه درجه متاماریزم کوچکتر می گردد و این امر می تواند باعث کاهش کارایی اندیس گردد. در پایان بنظر می رسد در کنار فعالیت جهت ارائه مدل جدیدتر جهت تولید اندیس متاماریزم با همبستگی بیشتر با ارزیابی های بصری، لازم است روی روش ارزیابی بصری توسط افراد و منابع نوری مختلف نیز مطالعه وسیعتری صورت پذیرد.

(ج) در کنار دلایل بالا شاید بتوان بارزترین دلیل را مربوط به نتایج میانگین اعداد خاکستری حاصل از مشاهدات بصری دانست زیرا اعداد گزارش شده توسط افراد دارای پراکندگی است بطوریکه حتی تحت منبع نوری D65 که برخی نمونه ها طبق اندازه گیری دستگاهی مختصات رنگی برابر داشته اند، میانگین مشاهدات بصری قابل ملاحظه است این موضوع می تواند منجر به تولید یک اختلاف پایه (عرض از مبدأ) بین نتایج بصری و محاسباتی گردد. (د) عملکرد خنثی یا تا حدودی منفی تصحیح پارامریک نشانگر عدم نیاز به انجام محاسبات مربوطه در نمونه های واقعی

جدول (۱) مقادیر اختلاف رنگ اعضا مقیاس خاکستری.

ΔE شماره نمونه	CMC (1:1)	BFD (1:1)	CIE94	TCI-29
1	0.33	0.79	0.15	0.09
2	1.0	2.31	0.49	0.36
3	1.54	3.43	0.74	0.55
4	2.56	6.12	1.26	0.9
5	3.9	9.8	1.84	1.21
6	7.13	18.5	3.36	2.2
7	9.9	26.0	4.7	3.16

جدول (۲) فاصله نمونه های خاکستری با استاندارد.

شماره نمونه خاکستری	1	2	3	4	5	6	7
متوسط ارزش اختلاف رنگ با نمونه استاندارد	0.3	0.7	1	1.8	2.5	4	6

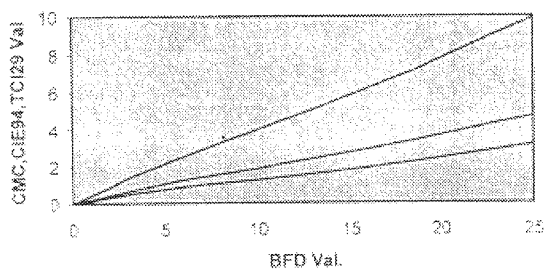
جدول (۳) عناصر ماتریس A تحت منبع نوری D65.

ستون سوم	ستون دوم	ستون اول
1.227	0.0285	0.272
15.65	0.344	3.29
35.56	1.122	6.93
353	2.60	6.13
15.42	5.06	1.61
4.12	8.69	0.072
1.09	13.76	2.13
0.246	17.30	6.76
0	16.84	12.15
0	14.34	16.74
0	10.21	17.43
0	6.02	12.94
0	2.59	6.22
0	0.83	2.11
0	0.21	0.55
0	0.046	0.12

جدول شماره (۴) مقادیر کمیت های آماری معرف میزان همبستگی اندیس های متامریزم با ارزیابی های بصری.

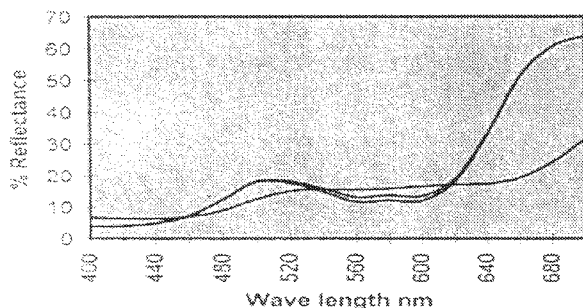
نام اندیس	بدون تصحیح پارامریک					پس از تصحیح پارامریک				
	%Err	r	%Cv	γ	PF/4	%Err	r	%Cv	γ	PF/4
ΔE CMC	40.	0.70	39	1.47	39	51	0.72	43	1.60	44
ΔE BFD	42	0.71	45	1.52	42	46	0.73	49	1.63	47
ΔE CIE94	35	0.71	36	1.43	36	49	0.71	41	1.61	45
ΔE TCI29	38	0.72	37	1.45	37	48	0.72	41	1.61	46
MI4	57	0.11	60	2.05	81	59	0.16	62	2.07	82
MI6	37	0.53	29	1.46	40	38	0.53	29	1.48	41

CMC, CIE94 and TCI29 VS. BFD Val.

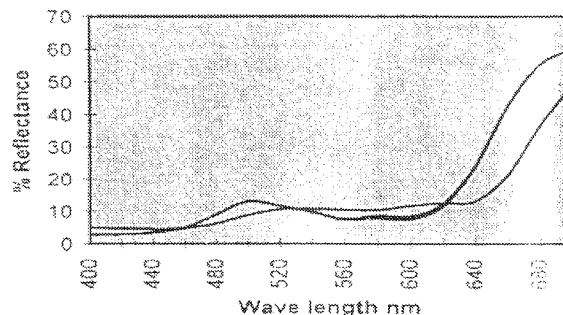


شکل (۱) رسم اختلاف رنگ مقایسه‌ای خاکستری طبق معادلات CMC، CIE94 و TCI29 بر حسب معادله BFD.

1b-D-80, P-80, C-80
With Max MET Index

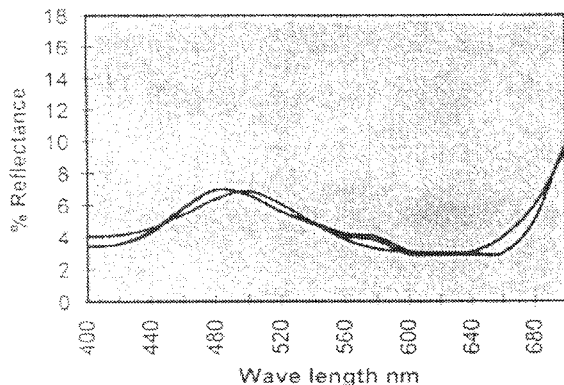


1a-D-15, P-15, C-15
With Max MET Index

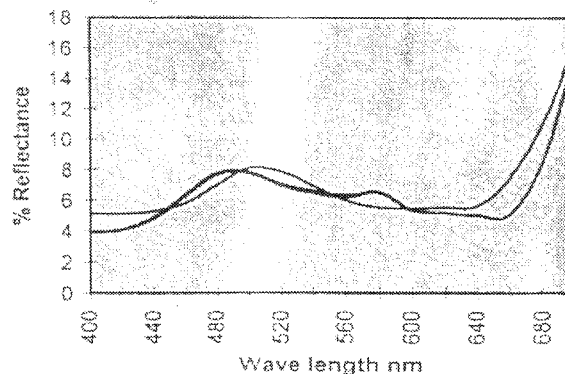


شکل (۲) منحنی انعکاسی دو جفت متامر که دارای حداکثر اندیس متامریزم هستند به همراه منحنی تصحیح پارامریک شده رنگ - همانند.

2b-D-61, P-61, C-61
With Min MET Index



2a-D-93, P-93, C-93
With Min MET Index



شکل (۳) منحنی انعکاسی دو جفت متامر که دارای کمترین اندیس متامریزم هستند به همراه منحنی تصحیح پارامریک شده رنگ - همانند.