الگوریتمی برای رنگ همانندی منسوجات با لغو محدودیت در تعداد رنگهای به کار رفته

هاله خلیلی* و سید حسین امیرشاهی **

دانشکدهٔ مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله: ۱۳۷۶/۳/۱۳ - دریافت نسخهٔنهایی: ۱۳۷۶/۸/۱۳)

چکیده - *در این مقاله الگوریتمی برای تعیین نسبت ضرایب جذب و انتشار (K/S) رنگها به روش حداقل مربعات[1] ارائه شده است. علاوه بر آن با استفاده از شبه معکوس ماتریس[2]، محدودیت موجود در تعداد اولیه‌ها در نظریهٔ یک ثابتی کیوبلکا- مانک حذف شده است. در روش پیشنهادی انتخاب رنگینه‌ها برای رنگ همانندی کالریمتری[3]، براساس یک رنگ همانندی اولیه اسپکتروفوتومتری[4] صورت گرفته است. کاربرد روشهای پیشنهاد شده در یک رنگ همانندی رایانه‌ای[5] با بیشتر (یا کمتر) از سه اولیه مورد آزمایش قرار گرفته است.*

An Algorithm for Color Matching of Textiles With Elimination of Limitation on Primaries

H. Khalili S.H. Amirshahi

Department of Textile Engineering, Isfahan University of Technology

ABSTRACT- ***The proposed algorithm suggests a new method for determination of K/S value of primaries based on linear least Squares Technique. By applying the matrix pseudoinverse, a modification is introduced to eliminate the limitation on the numbers of applied dyes in one - constant Kubelka-Munk theory. The selection of dyes for tristimulus matching are also done on the basis of the initial spectrophotometric results. The applicability of suggested methods are tested through a computer colour matching attempt with more/less than three primaries.***

۱- مقدمه

اگر چه رنگ همانندی منسوجات برای سالیان متمادی یک هنر بوده است، ولی امروزه موضوع استفاده از روشهای رایانه‌ای به عنوان جایگزینی برای این نوع رنگ همانندی مطرح است و در مقاله‌های متعددی مورد بحث قرار گرفته است. در این مقاله‌ها نظریه یک‌ثابتی کیوبلکا- مانک [۱] به عنوان بهترین نظریه برای پیش‌بینی دقیق غلظت رنگها در رنگ همانندی منسوجات به تفصیل مورد بحث واقع شده است. به طور کلی دو روش رنگ همانندی در منسوجات به کار می‌روند. در روش اول که رنگ همانندی اسپکتروفتومتری [۲] نامیده می‌شود، هدف تقلید هر چه کاملتر

* کارشناس ارشد ** استادیار

[DOR: 20.1001.1.2251600.1377.17.1.15.9]

فهرست علائم

A^+	شبه معکوس‌ماتریس A		هر رنگ	T	ماتریس توابع رنگ همانندی
C	غلظت هر رنگ	X,Y,Z	محرکهای رنگی	ΔE	مقدار اختلاف رنگ
E	انرژی نسبی منبع نوری	$(K/S)_{sub}$	نسبت ضریب جذب به انتشار زمینه	Δt	اختلاف بین محرکهای رنگی نمونه و استاندارد
$(K/S)_{mix}$	نسبت ضریب جذب به انتشار مخلوط	$\bar{x},\bar{y},\bar{z}$	توابع رنگ همانندی	λ	طول موج
$(K/S)_n$	نسبت ضریب جذب به انتشار	R	انعکاس		

منحنی انعکاسی استاندارد است و از نقطه نظر تعداد رنگهای به کار رفته محدودیتی وجود ندارد. روش دوم رنگ همانندی کالریمتری نامیده می‌شود و هدف از آن به حداقل رساندن اختلاف محرکهای رنگی هدف و نمونه است. در این روش تعداد رنگها طبق روش پیشنهادی آلن [۳] به سه رنگ محدود می‌شود و رنگ همانندی از درجهٔ آزادی[۶] پایینی برخوردار است. در رنگ همانندی منسوجات برای به دست آوردن نتیجهٔ دقیقی با هزینهٔ کمتر، انطباق بهتر منحنیهای انعکاسی و حصول رنگ همانندی شرطی[۷] با اندیس پایینتر اغلب اوقات به بیش از سه رنگ احتیاج است. لذا، استفاده از سه رنگ قادر نخواهد بود که همواره نمونه‌ها را به بهترین صورت همانند سازد. در خصوص روشهای رنگ همانندی و لغو محدودیت در تعداد رنگهای به کاررفته در نظریه دو ثابتی مقاله‌هایی منتشر شده است [۴و۵]. لذا یکی از اهداف این مقاله ارائه الگوریتمی برای رنگ همانندی منسوجات که از نظریه یک ثابتی پیروی کنند به روشی جدید با لغو محدودیت در تعداد رنگهای اولیه است. علاوه بر این در رنگ همانندی منسوجات و برای تعیین مقدار K/S واحد[۸] رنگها ضروری است تا با استفاده از غلظتهای مختلفی از هر رنگ به تنهایی، منحنی K/S در مقابل غلظت رسم شود [۶]. اگر چه این منحنی باید تا محدودهٔ وسیعی خطی باشد ولی به دلایل مختلفی این آرمان هیچ‌گاه عملی نشده و ضروری است تا مناسبترین خط از بین اطلاعات حاصله رسم شود که بروز خطا در مراحل بعدی را موجب می‌شود. لذا به منظور رفع این مشکل، در پژوهش حاضر تعیین نسبت ضرایب جذب به انتشار (K/S) هر رنگ برای اولین بار در نظریه یک ثابتی به روش حداقل مربعات انجام شده است. به علاوه نحوهٔ انتخاب رنگ از کل بستهٔ رنگی موجود نیز توسط رنگ همانندی اولیه اسپکتروفتومتری صورت گرفته به نحوی که اطلاعات به دست آمده از این روش به عنوان غلظتهای اولیه به حلقه تکرار برای رنگ همانندی کالریمتری معرفی شده‌اند. در این تحقیق، برای نمونه‌هایی که با بیشتر از سه رنگ نیز قابل همانند شدن هستند با استفاده از روش شبه معکوس ماتریسها نسخه‌های مناسب به دست آمده است. علاوه بر این سعی شده است تا روشهای مناسبتر و عملیتری در مرحلهٔ اصلاح شیدرنگی[۹] نیز به کارگرفته شوند. لذا به طور دقیقتر هدف این مقاله لغو محدودیت در تعداد اولیه‌های به کار رفته در سیستم یک ثابتی کیوبلکا-مانک، محاسبه K/S اولیه‌ها با استفاده از مخلوط آنان و همچنین ارائه روشهای ساده‌تر و عملیتر در اصلاح شید است. کلیه برنامه‌های رنگ همانندی در این پژوهش توسط برنامه متلب[۱۰] نوشته شده و با استفاده از تکنیکهای خاص این زبان برنامه ریزی شده‌اند.

۲- روش جدیدی برای تعیین مقادیر K/S اولیه‌ها

واولویت و همکارانش روش ویژه‌ای را از طریق روش حداقل مربعات برای تعیین مقادیر K و S هر رنگ در نظریه دو ثابتی کیوبلکا - مانک برای مخلوط الیاف از قبل رنگرزی شده ارائه کرده‌اند [۷]. در این روش تعیین ضرایب جذب و انتشار کیوبلکا- مانک توسط رگرسیون خطی حداقل مربعات انجام شده است. فرض می‌شود که یک سری معادله‌های خطی مستقل به صورت زیر در دسترس است:

[DOR: 20.1001.1.2251600.1377.17.1.15.9]

$$\left\{\begin{array}{l} Y_1 = B_0 x_{1,0} + B_1 x_{1,1} + B_2 x_{1,2} + \ldots\ldots\ldots\ldots + B_n x_{1,n} \\ \vdots \\ Ym = B_0 x_{m,0} + B_1 x_{m,1} + B_2 x_{m,2} + \ldots\ldots\ldots\ldots + B_n x_{m,n} \end{array}\right\}$$

در این دستگاه معادله‌ها m تعداد مشاهده‌ها و n تعداد مجهولهاست. این سیستم را می‌توان به شکل ماتریسی زیر نوشت:

$$Y = X.B \qquad (1)$$

که در آن :

Y : ماتریس مشاهده‌ها

X : ماتریس ضرایب و

B : ماتریس مجهولها هستند.

اگر تعداد مشاهده‌ها از مجهولها بیشتر باشد بهترین جوابها با تحلیل واریانس قابل محاسبه بوده و بنابراین می‌توان نوشت :

$$B = (X'.X)^{-1}.X'.Y \qquad (2)$$

که $X' = X^T$ ماتریس ترانهادهٔ X[11] است.

در پژوهش حاضر، روش ارائه شده توسط آنان با اصلاحاتی برای محاسبهٔ K/S رنگها به نظریه یک ثابتی تعمیم داده شده است. الگوریتم به کار رفته را می‌توان به این صورت بیان کرد:

گام ۱ - معادلهٔ زیر در سیستم یک ثابتی در هر طول موج برقرار است :

$$(K/S)_{mix} = (K/S)_{sub} + C_1(K/S)_1 + C_2(K/S)_2 + \ldots\ldots + C_n(K/S)_n \qquad (3)$$

و لذا:

$$(K/S)_{mix} - (K/S)_{sub} + C_1(K/S)_1 + C_2(K/S)_2 + \ldots\ldots + C_n(K/S)_n \qquad (4)$$

گام ۲ - معادلهٔ (۴) را برای m مخلوط و n رنگ در ۱۶ طول موج حل کرده و ماتریس ضرایب به صورت ماتریس (۵) تعریف می‌شود:

$$KSCOEF = \begin{bmatrix} C_{1,1} & C_{1,2} & \cdots & C_{1,n} \\ C_{2,1} & C_{2,2} & \cdots & C_{2,n} \\ \cdot & \cdot & \cdots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdots & \cdot \\ C_{m,1} & C_{m,2} & \cdots & C_{m,n} \end{bmatrix}_{(m\times n)} \qquad (5)$$

گام ۳ - سمت چپ معادلهٔ (۴) به عنوان ماتریس مشاهده‌ها و به صورت ماتریس (۶) تعریف می‌شود:

$$OBS = \begin{bmatrix} (K/S)_{mix,1,400} - (K/S)_{sub,400} \\ (K/S)_{mix,2,400} - (K/S)_{sub,400} \\ \vdots \\ (K/S)_{mix,m,400} - (K/S)_{sub,400} \end{bmatrix}_{(m\times 1)} \qquad (6)$$

آن گاه معادلهٔ (۴) را می‌توان به صورت معادلهٔ (۷) نشان داد:

$$OBS = KSCOEF.KoverS \qquad (7)$$

گام ۴ - بنابراین براساس روش حداقل مربعات می‌توان ماتریس KoverS را به شکل معادلهٔ (۸) نوشت:

$$KoverS = (KSCORF'.KSCOEF)^{-1}.KSCOEF^{-1}.OBS \qquad (8)$$

گام ۵ - معادلهٔ (۸) در ۱۶ طول موج باید تکرار شود تا مقادیر K/S برای n رنگ در ۱۶ طول موج با فواصل ۲۰ نانومتری به دست آیند. از آنجاکه تأثیر متقابل رنگها بر یکدیگر در روش فوق‌الذکر در نظر گرفته شده است لذا استفاده از این روش منجربه کسب نتایج مناسبتر نسبت به روشهای معمول می‌شود.

۳-نحوهٔ انتخاب رنگ

نحوه انتخاب رنگ در یک رنگ همانندی همواره از سؤالات اصلی بوده است و انتخاب رنگینه‌های صحیح تا حد زیادی موجب کاهش خطا و باعث کوتاهتر شدن فرایند رنگ همانندی می‌شود. در پژوهش حاضر نحوهٔ انتخاب رنگ از طریق رنگ همانندی اسپکروفتومتری انجام گرفته است[۵].

[DOR: 20.1001.1.2251600.1377.17.1.15.9]

در ایـــن روش ابـــتدا نـــمونهٔ اسـتاندارد بـــه یک بـرنامهٔ اسپکتروفتومتری مـعرفی شـده است و غـلظتهای لازم از اولیـه‌ها محاسبه می‌شوند. غلظتهای منفی به دست آمده برای هر رنگ در هر دوره[12] به معنی عدم نیاز و ضرورت حذف رنگ مربوطه از سیستم رنگ همانندی است. در کار فعلی این روش به همراه آزمایش آماری F[13] به خدمت گرفته شده است، به نحوی که پس از حذف رنگهای با غلظت منفی، رنگهای باقیمانده که مقدار غلظت آنها مقادیر مثبت ولی کوچکی بودند با استفاده از آزمـایش F مـورد ارزیـابی قـرار گرفتند. مقدار اطمینان[14] در نظر گرفته شده برابر ۰/۰۵ = α بوده و لذا مقادیر با خطای ۵٪ حذف شد. رنگهای انـتخاب شـده از ایـن طریق به عنوان اولیه‌ها به سیستم رنگ همانندی کالریمتری معرفی شده‌اند. استفاده از رنگهای انـتخاب شـده بـا ایـن روش و مـعرفی غـلظتهای حـاصله از رنگ هـمانندی اسـپکتوفتومتری بـه عـنوان غلظتهای اولیه در روش رنگ همانندی آلن باعث می‌شود تا تعداد حلقه‌های تکرار به مراتب کاهش یافته و از طـرفی رنگ هـمانندی بسیار دقیقتر و مناسبتری به علت انتخاب صحیح رنگینه‌ها صورت پذیرد.

از آنجا که رنگ همانندی کالریمتری منسوجات بـا اسـتفاده از روش آلن محدود به استفاده از سه رنگ می‌شود، لذا تنها مشکـل انتخاب رنگ با روش ذکر شده این می‌توانست باشد که در صورت انتخاب بیش از سه اولیه امکان رنگ هـمانندی کـالریمتری مـیسر نباشد. از این رو اصلاح روش آلن به منظور رفع محدودیت در تعداد اولیه‌های به کار رفته الزامی بود.

۴- لغو محدودیت در تعداد رنگهای اولیه مورد استفاده

در رنگ هـــمانندی مـــنسوجات بـرای بـه دست آوردن نـتایج مناسبتر با درجهٔ متاماریزم[15] پایینتر گاهی اوقات نیاز به بیش از سه رنگ اولیه احساس مـی‌شود. اسـتفاده از روش پـیشنهادی آلن کـه براساس معکوس پذیر بودن ماتریسها استوار بود باعث می‌شد تـا تعداد رنگهای اولیه در سیستم یک ثابتی به سه رنگ محدود شوند. به بیان دیگر در صورتی که استفاده از بـیش از سـه رنگ ضـروری تشخیص داده می‌شد تـنها راه مـمکن، اسـتفاده از رنگ هـمانندی اسپکتروفتومتری می‌بود که الزاماً به اختلاف بـرابـر صـفر و یـا در محدودهٔ حدرواداری توافق شده منجر نمی‌شد. لغو محدودیت در تعداد رنگهای اولیه در رنگ همانندی کالریمتری در سیستم دو ثابتی کیوبلکا-مانک قـبلاً گـزارش شـده است [۴و۵]. در ایـن روش بـا استفاده از شـبه مـعکوس مـاتریسها بـر مشکـل عـدم رسـیدن بـه ماتریسهای مربع که منجر به معکوس ناپذیر بودن آنها می‌شد غلبه شده و بدین وسیله استفاده از روش آلن عمومیتر شده است.

در مقالهٔ حاضر این پیشنهاد به رنگ هـمانندی مـنسوجات بـا استفاده از نظریه یک ثابتی تعمیم داده شده است به نحوی که امکان استفاده از n اولیه در رنگ همانندی کالریمتری به روش آلن میسر شده است.

۵- توضیح الگوریتم پیشنهادی

مراحل پیشنهادی در این نحوه رنگ همانندی عبارت‌اند از :

گام ۱ - محاسبهٔ شبه ضرایب K/S کیوبلکا- مـانک [16] بـراسـاس روش جدید،

گام ۲ - رنگ همانندی اسپکتروفتومتری براساس نظریه یک ثابتی کیوبلکا- مانک برای انتخاب رنگهای مناسب با حـذف غـلظتهای منفی و غلظتهای بسیارکم توسط آزمایش F،

گام ۳ - در نظر گرفتن غلظتهای رنگ محاسبه شده در گام دوم بـه عنوان نقطهٔ شروع رنگ همانندی کالریمتری،

گام ۴ - تشکیل معادلهٔ تکرار:

از آنجا که ریشهٔ مـحدودیت در روش آلن در حـصول مـاتریسهای معکوس‌پذیر است، بااستفاده از شبه معکوس ماتریسها محدودیتی که در روش آلن برای تعداد اولیه‌ها وجـود دارد از بـین مـی‌رود و معادلهٔ تکرار به صورت معادلهٔ (۹) ظاهر می‌شود:

$$A_{(3\times N)}.\Delta C_{(N\times 1)}=\Delta t_{(3\times 1)} \qquad (9)$$

در ایـن مـعادله N نشـاندهندهٔ تـعداد رنگـهای کـاندیدا بـرای رنگ همانندی است و لذا مقدار تغییرات غـلظت (ΔC) را مـی‌توان بـه صورت معادلهٔ (۱۰) نوشت :

$$\Delta C=A^{-1}.\Delta t \qquad (10)$$

از آنجا که ماتریس A می‌تواند با چنین تعریف کلی یک مـاتریس

[DOR: 20.1001.1.2251600.1377.17.1.15.9]

غیرمربع باشد لذا به منظور معکوس کردن ماتریس غیرمربع A از شبه معکوس ماتریس استفاده کرده و آن را با A^+ نشان داده، لذا می‌توان نوشت:

$$\Delta C = A^+ . \Delta t \qquad (11)$$

A در معادلهٔ (۹) عبارت است از :

$$A = (T.E.D.\Phi) \qquad (12)$$

که در معادلهٔ (۱۲) ماتریسهای T وD وE همان ماتریسهای تعریف شده توسط آلن هستند که عبارت‌اند از :

$$T = \begin{bmatrix} \bar{x}_{۴۰۰} & \bar{x}_{۴۲۰} & \cdots & \bar{x}_{۷۰۰} \\ \bar{y}_{۴۰۰} & \bar{y}_{۴۲۰} & \cdots & \bar{y}_{۷۰۰} \\ \bar{z}_{۴۰۰} & \bar{z}_{۴۲۰} & \cdots & \bar{z}_{۷۰۰} \end{bmatrix}_{(۳\times۱۶)} \qquad (13)$$

$$D = \begin{bmatrix} d_{۴۰۰} & \cdot & \cdots & \cdot \\ \cdot & d_{۴۲۰} & \cdots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdots & d_{۷۰۰} \end{bmatrix}_{(۱۶\times۱۶)} \qquad (14)$$

که در آن :

$$d_{(\lambda)} = \frac{۲\times R^{۲}_{(\lambda)}}{(R^{۲}_{(\lambda)} - ۱)} \qquad (15)$$

$$E = \begin{bmatrix} E_{۴۰۰} & \cdot & \cdots & \cdot \\ \cdot & E_{۴۲۰} & \cdots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdots & E_{۷۰۰} \end{bmatrix}_{(۱۶\times۱۶)} \qquad (16)$$

و تنها تغییر در ماتریس Φ صورت پذیرفته است که از یک ماتریس ۱۶×۳ به یک ماتریس ۱۶×n تغییر اندازه داده است و به صورت ماتریس (۱۷) نوشته می‌شود:

$$\Phi = \begin{bmatrix} (K/S)_{۱,۴۰۰} & (K/S)_{۲,۴۰۰} \cdots\cdots & (K/S)_{n,۴۰۰} \\ (K/S)_{۱,۴۲۰} & (K/S)_{۲,۴۲۰} \cdots\cdots & (K/S)_{n,۴۲۰} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ (K/S)_{۱,۷۰۰} & (K/S)_{۲,۷۰۰} \cdots\cdots & (K/S)_{n,۷۰۰} \end{bmatrix}_{(۱۶\times n)} \qquad (17)$$

که در آن :

T : ضرایب رنگ همانندی،

E : توزیع نسبی طیفی منبع نوری،

R : انعکاس طیفی و

t : به هدف اشاره می‌کند.

گام ۵ - تعیین ΔC با استفاده از معادلهٔ (۱۸)

$$\Delta C_{(N\times۱)} = A^+_{(۳\times N)} . \Delta t_{(۳\times۱)} \qquad (18)$$

مجدداً تأکید می‌شود که از معادلهٔ (۹) که بر مبنای استفاده از شبه معکوس ماتریسهاست بدون هیچ محدودیتی در تعداد رنگهای مورد استفاده در رنگ همانندی کالریمتری می‌توان استفاده کرد،

گام ۶- حلقه‌های تکرار[۱۷] تا زمانی که ΔE بین نمونهٔ استاندارد و همانند شده به حداقل ممکن برسد و یا شرط ذکر شده معادلهٔ (۱۹) برقرار شود ادامه می‌یابد.

$$(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z) \rightarrow (۰,۰,۰) \qquad (19)$$

۶- آزمایشات

در پژوهش حاضر ابتدا ۵ رنگ کاتیونیک (بازی) به عنوان یک بستهٔ رنگی انتخاب شدند که اسامی و شمارهٔ شاخص رنگ [۱۸] آنها به صورت زیر است:

1. Youhaocryl Yellow X-8GL (C.I.Basic Yellow 13)
2. Youhaocryl Golden Yellow X-GL(C.I.Basic Yellow 28)
3. Youhaocryl Red X-GRL (C.I.Basic Red 46)
4. Youhaocryl Blue X-GRL (C.I.Basic Blue 41)
5. Youhaocryl Red 2G (C.I.Basic Red 18)

[DOR: 20.1001.1.2251600.1377.17.1.15.9]

جدول ۱ - اختلاف رنگ (ΔE) بین نمونه‌های همانند شده و استاندارد پس از اولین رنگرزی

نمونه	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE	تعداد رنگهای بکار رفته در رنگرزی
همانند ۱	۳/۰۵۶۶	۰/۳۶۷۷	۰/۵۰۰۹	۳/۱۱۳۲	۳ رنگی
همانند ۲	۳/۰۰۸۶	۰/۶۸۸۱	۰/۹۰۱۰	۳/۲۱۱۵	۳ رنگی
همانند ۳	-۰/۴۲۱۴	۱/۴۳۰۵	-۱/۵۸۸۵	۲/۱۷۸۸	۲ رنگی
همانند ۴	-۰/۱۶۳۰	-۱/۴۰۲۶	-۰/۱۷۴۸	۱/۴۲۲۸	۳ رنگی
همانند ۵	-۰/۶۸۹۷	-۱/۶۹۳۱	-۱۲/۱۵۲۷	۴/۴۵۵۴	۴ رنگی

رنگهای شمارهٔ ۲ و ۳ و ۴ به دلیل امکان حصول رنگهای متنوع با مخلوط کردنشان ، به عنوان یک سیستم سه رنگی [19] در صنعت استفاده می‌شود و از رنگهای شمارهٔ ۱ و ۵ نیز برای حصول فامهای خاصی در ترکیب با سایر رنگها استفاده می‌شود.

نمونه‌های کالیبراسیون توسط رنگرزی ۸ نمونه با درصدهای مختلف با هر یک از ۵ رنگ ذکر شده به دست آمدند. این نمونه‌ها با غلظتهای زیر رنگرزی شده و به منظور به دست آوردن مقدار نسبت ضرایب جذب و انتشار هر رنگینه (K/S) بهترین خط در هر طول موج رسم شد. غلظتهای استفاده شده بدین منظور عبارت از ۱/۵، ۱ ، ۰/۵، ۰/۱۵، ۰/۱، ۰/۰۵، ۰/۰۲۵، ۰/۰۰۵ درصد بر مبنای وزن کالا[20] بودند. به منظور تعیین (K/S) هر رنگ با استفاده از روش پیشنهادی در این پژوهش ۴۳ نمونهٔ مختلف از ترکیب ۵ رنگ نام برده شده در ترکیبهای کاملاً تصادفی ۲ تا ۵ رنگی رنگرزی شده و به عنوان نمونه‌های واقعی به الگوریتم مورد نظر معرفی شدند. از این نمونه‌ها در مراحل بعدی به عنوان استاندارد نیز استفاده شد. در این رنگ همانندی کلیه نمونه‌ها در زیر منبع نوری D_{65} و مشاهده کنندهٔ استاندارد ۱۹۶۴ CIE همانند شده و از سیستمهای CIELAB و CMC برای بیان اختلاف رنگ استفاده شده است. همچنین رنگ همانندی با استفاده از رنگینه‌های اولیه ذکر شده بر روی اکریلیک انجام پذیرفته است. به منظور کنترل نسخه‌های ارائه شده توسط رایانه، برخی از نسخه‌های پیشنهادی به طور عملی در رنگرزی به کار گرفته شدند. جدول ۱ اختلاف بین نمونه‌های رنگرزی شده توسط نسخه‌های پیشنهادی رایانه‌ای را با استانداردها نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود اختلاف بین نمونه‌ها و نمونهٔ استاندارد برای اولین رنگرزی مناسب بوده و این نتایج نشاندهندهٔ این واقعیت است که نحوهٔ تعیین K/S به روش جدید و انتخاب رنگینه‌ها مناسب بوده است. برای مقایسهٔ بین مقادیر K/S رنگهای اولیه به کار رفته از طریق روش جدید و روش کلاسیک قبلی که رسم بهترین خط بین مقادیر K/S در غلظتهای متفاوت در هر طول موج است نمونه‌های کالیبراسیون معرفی شدند. سپس بهترین خط، از بین ۸ غلظت براساس انعکاس نمونه‌ها در هرطول موج رسم شدند. ضریب زاویه این خط مقدار K/S واحد هر رنگ در هر طول موج را نشان می‌دهد. با استفاده از مقادیر K/S حاصله از این طریق، رنگ همانندی برروی تعدادی از نمونه‌ها که در روش قبل نیز به عنوان استاندارد معرفی شده بودند صورت گرفت که نتایج حاصله پس از انجام اولین رنگرزی در جدول ۲ نشان داده شده‌اند. از بررسی میانگین اختلاف رنگ[21] (ΔE) بین نمونه‌های استاندارد و همانند شده در دو روش می‌توان نتیجه گیری کرد که تعیین K/S به روش حداقل مربعات منجر به این نتیجه می‌شود که اولین نسخه‌های آزمایشگاهی به دست آمده از این روش دارای میانگین اختلاف رنگ (ΔE) برابر ۲/۸۷۶۳ پس از اولین رنگرزی به روش جدید است، در حالی که میانگین اختلافها برای همین نمونه‌ها در روش کالیبراسیون پس از اولین رنگرزی برابر ۷/۷۸۵۴ است. بنابراین با استفاده از روش حداقل مربعات برای تعیین K/S اولیه‌ها می‌توان نسخه‌های پیشنهادی اولیه مناسبتری به دست آورد که در مراحل بعد نیاز به تصحیح کمتری داشته باشند و یا حتی در مواردی مانند استاندارد شماره ۳ که اختلاف رنگی (ΔE) برابر ۱/۴۲۲۸ دارد تقریباً نیازی به تصحیح نداشته باشد.

به نظر می‌رسد که علت کسب چنین نتیجه‌ای ناشی از این نکته باشد که در روش تعیین K/S به روش جدید، هر گونه اثر متقابل رنگها و بلوکه شدن احتمالی آنان توسط سایر رنگها در مقدار K/S

[DOR: 20.1001.1.2251600.1377.17.1.15.9]

جدول ۲ - مقایسهٔ نتایج رنگ همانندی بین نمونه‌های به دست آمده از روش کالیبراسیون و روش جدید

نمونه	ΔE نمونه با استاندارد پس از رنگرزی به روش کالیبراسیون	ΔE نمونه با استاندارد پس از رنگرزی به روش جدید
همانند ۱	۵/۶۸۰۵	۳/۱۱۳۲
همانند ۲	۱۱/۵۸۰۳	۳/۲۱۱۵
همانند ۳	۹/۹۹۲۹	۲/۱۷۸۸
همانند ۴	۴/۹۷۳۱	۱/۴۲۲۸
همانند ۵	۶/۷۰۰۱	۴/۴۵۵۴
میانگین اختلافات	۷/۷۸۵۴	۲/۸۷۶۳

جدول ۳ - نتایج به دست آمده از اولین رنگرزی برای نمونه‌هایی که با کمتر از سه رنگ همانند می‌شوند

نمونه	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	CMC	تعداد رنگهای به کار رفته در رنگرزی
همانند ۳	-۰/۴۲۱	۱/۴۳۰۵	-۱/۵۸۸	۱/۱۴۹۱	۲ رنگی
همانند ۷	-۰/۹۴۳	۱/۴۸۹۰	۰/۷۱۴۹	۱/۱۸۱۲	۲ رنگی
همانند ۸	۲/۰۲۴	-۰/۲۰۹	-۰/۳۷۵	۰/۹۵۱۲	۲ رنگی
همانند ۱۳	۱/۷۵۸۷	-۰/۵۰۲	۰/۲۱۲۴	۰/۹۲۱۱	۲ رنگی
همانند آبی	۱/۰۵۸۲	-۰/۷۹۷	-۱/۰۸۶	۱/۵۸۱۰	۱ رنگی
همانند قرمز	۱/۴۸۰۵	-۳/۱۷۰	۲/۳۹۰	۳/۷۳۰	۱ رنگی

به دست‌آمده مستتر باشند در حالی که حصول چنین تأثیراتی در هنگام تعیین مقدار K/S به روش کالیبراسیون میسر نیست.

۷- رنگ همانندی منسوجات با کمتر از سه رنگ

در این حالت نیز اساس الگوریتم به کار رفته روش آلن بوده، فقط با این تفاوت که به علت کاهش رنگها به ۲ یا ۱ رنگ ماتریس تکرار در روش آلن از حالت مربعی خارج شده و در این حالت نیز مجدداً از سیستم شبه معکوس ماتریسها استفاده می‌شود. پس از انتخاب رنگها توسط روش رنگ همانندی اسپکتروفتومتری، غلظتهای پیشنهادی به عنوان اولیه‌ها به یک برنامه کالریمتری دو رنگی معرفی می‌شوند و غلظتهای مورد نیاز تا حدی که ΔE نمونه‌ها به حداقل رسانده شود محاسبه می‌شوند. برای نمونه‌های تک رنگی ابتدا غلظت تک رنگ از همانندی اسپکتروفتومتری به دست می‌آید و این رنگ به همراه دو رنگ دیگر به عنوان اولیه‌ها به سیستم سه رنگی آلن معرفی می‌شوند با این تفاوت که غلظتهای دو رنگ دیگر دائماً صفر در نظر گرفته می‌شوند. از نتایج به دست آمده در جدول ۳ می‌توان مشاهده کرد که در مورد نمونه‌های دو رنگی می‌توان در بعضی از نسخه‌ها به مقادیر اختلاف رنگ بسیار کم و یا حتی صفر رسید. از سوی دیگر برای برخی از نمونه‌ها بهترین جوابها نتایج رنگ همانندی اسپکتروفتومتری‌اند و و ورود به مرحلهٔ رنگ همانندی کالریمتری باعث افزایش اختلاف رنگ می‌شود. قابل ذکر است با روش پیشنهادی اغلب نمونه‌های مورد

[DOR: 20.1001.1.2251600.1377.17.1.15.9]

آزمایش همانند می‌شوند و اختلاف رنگ کالریمتری آنها کمتر از اختلاف رنگ در رنگ همانندی اسپکتروفتومتری می‌شود.

۸- تصحیح نسخه‌های رنگرزی

در هر رنگ همانندی غالباً اختلافی بین نسخه‌های محاسبه شده از طریق رایانه و نمونهٔ استاندارد پس از اولین رنگرزی وجود دارد. به همین منظور روشهای تصحیحی در این خصوص باید مطرح باشند که پس از اعمال آنان در رنگرزی بعدی نمونه را حتی‌الامکان به نمونه استاندارد نزدیکتر کند. روش تصحیحی که توسط آلن [۸] پیشنهاد شده به این صورت است که در یک رنگ همانندی کالریمتری ابتدا نمونهٔ رنگرزی شده آزمایشگاهی به عنوان استاندارد به برنامه معرفی و با استفاده از یک برنامه رنگ همانندی رایانه‌ای غلظتهای مورد نیاز به دست می‌آیند. این غلظتها به عنوان C_c شناخته می‌شوند. سپس نمونهٔ استاندارد و نمونهٔ آزمایشگاهی را در برنامهٔ دیگری معرفی کرده و از طریق محاسبهٔ Δt بین این دو نمونه ΔC جدیدی به دست می‌آید و پس از افزودن این ΔCها به غلظتهای قبلی غلظتهای جدیدی به دست می‌آید که می‌باید در یک فاکتور تصحیح نیز ضرب شوند. فاکتور تصحیح عبارت از نسبت غلظتهای آزمایشگاهی عمل شده (C_b) به غلظتهای رایانه‌ای (C_c) است. معادله‌های (۲۰) و (۲۱) مطالب ذکر شده را به نحو ساده‌تری بیان می‌کنند.

$$f=\begin{bmatrix} f_1=\dfrac{C_{b1}}{C_{c1}} \\ f_2=\dfrac{C_{b2}}{C_{c2}} \\ f_3=\dfrac{C_{b3}}{C_{c3}} \end{bmatrix} \qquad C_{new}=\begin{bmatrix} C_{1old}+\Delta C_1 \\ C_{2old}+\Delta C_2 \\ C_{3old}+\Delta C_3 \end{bmatrix} \qquad (۲۰)$$

و در نهایت غلظتهای نهایی عبارت‌اند از :

$$C_{final}=\begin{bmatrix} f_1 * C_{new\,1} \\ f_2 * C_{new\,2} \\ f_3 * C_{new\,3} \end{bmatrix} \qquad (۲۱)$$

تصحیح اولین نمونه‌های آزمایشگاهی رنگرزی شده برای نمونه‌هایی با $\Delta E > 2/5$-۲ طبق روش توضیح داده شده در بالا و تصحیح دوم نسخه‌های رنگرزی نیز به همین روش انجام شد. همان گونه که از نتایج مندرج در جدول ۴ مشاهده می‌شود مقدار (ΔE) به میزان قابل توجهی کاهش یافته است و می‌توان نتیجه گیری کرد که روش تصحیح پیشنهادی توسط آلن برای این نمونه‌ها مناسب بوده است.

۹- ارائه روش جدیدی در تصحیح نسخه‌هایی که اختلاف رنگ آنها با استاندارد کم است

عملاً در انجام عمل تصحیح مشاهده شد که نمونه‌هایی که دارای $\Delta E \leq 2/5$ هستند با استفاده از روش پیشنهادی آلن قابل تصحیح نیستند. به عبارت دیگر نمونه‌هایی که دارای اختلاف رنگ بسیار کمی بودند پس از عمل تصحیح تغییری در اختلاف رنگ آنان ایجاد نمی‌شود. برای این نمونه‌ها از روش دیگری استفاده شد. به طور خلاصه روش تصحیح به کار رفته به صورت زیر است :

گام ۱ - معرفی انعکاس نمونه رنگرزی شده به عنوان انعکاس زمینه،

گام ۲ - استفاده از یک برنامه کالریمتری برای همانندی استاندارد توسط نمونهٔ بالا،

گام ۳ - به حداقل رساندن اختلاف بین نمونهٔ استاندارد و نمونهٔ همانند شده ($\Delta E \to 0$) و

گام ۴ - جمع جبری غلظتهای قبلی با غلظتهای حاصله از تصحیح و تعیین غلظت جدید.

جدول ۵ نشاندهندهٔ نتایج به دست آمده از این روش است.

۱۰- نتیجه‌گیری

الف - بر مبنای نتایج حاصله به نظر می‌رسد که تعیین K/S به روش جدید نسخه‌های مناسبتری را عاید می‌سازد که نیاز به تصحیح کمتر داشته و حتی برخی از نمونه‌ها در اولین رنگرزی همانند می‌شوند. به نظر می‌رسد که علت کسب چنین نتیجه‌ای ناشی از این نکته باشد که در روش جدید هر گونه اثر متقابل رنگها و بلوکه شدن احتمالی آنان توسط سایر رنگها در مقدار K/S به دست آمده محسوب شده است. بدیهی است حصول چنین تأثیراتی در هنگام تعیین مقدار K/S به روش کالیبراسیون میسر نیست.

ب - نحوهٔ انتخاب رنگهای اولیه به روش توضیح داده شده باعث انتخاب مناسبتر رنگینه‌ها در رنگ همانندی، کاهش خطا و تسریع در به دست آوردن نسخه‌های مناسبتر رنگ همانندی در مراحل بعدی می‌شود.

ج - با لغو محدودیت در تعداد رنگهای به کار رفته، رنگ

[DOR: 20.1001.1.2251600.1377.17.1.15.9]

جدول ۴ - نمونه‌های تصحیح شده با استفاده از روش آلن

نمونه	ΔE نمونه قبل از تصحیح	ΔE نمونه بعد از تصحیح	CMC نمونه قبل از تصحیح	CMC نمونه پس‌از تصحیح
تصحیح همانند ۹	۱۰/۵۴۸	۶/۰۴۴۹	۱۱/۱۲۱	۶/۱۳۷۶
تصحیح همانند ۵	۴/۴۵۵۴	۳/۵۲۹۵	۴/۳۶	۳/۷۷۹۶
تصحیح همانند ۱۰	۷/۲۴۳۸	۴/۴۱۴۲	۷/۹۳	۳/۷۷۲۶
تصحیح همانند ۱۱	۱۲/۲۸۹۴	۵/۴۷	۷/۷۸	۳/۳۷۶۰
تصحیح همانند قرمز	۴/۷۳	۲/۶۸۲۰	۳/۷۳	۱/۱۵۵۳

جدول ۵ - نمونه‌های تصحیح شده با استفاده از روش جدید

نمونه	ΔE نمونه قبل از تصحیح	ΔE نمونه بعد از تصحیح	CMC نمونه قبل از تصحیح	CMC نمونه پس‌از تصحیح
تصحیح همانند ۳	۲/۱۷۸۸	۲/۰۶۳۳	۱/۱۴۹۱	۱/۱۷۸۷
تصحیح همانند ۲	۳/۳۱۱۵	۱/۲۷۷۶	۱/۹۴۱۶	۰/۸۳۱۷
تصحیح همانند ۴	۱/۴۲۲۸	۱/۵۶۸۷	۱/۸۵۱۶	۱/۴۹۹۶
تصحیح همانند ۱۲	۱/۹۰۲۱	۲/۱	۱/۱۸۱۲	۱/۳۸۹۶

همانندی کالریمتری از محدودیت سه رنگی خارج شده و درجهٔ آزادی رنگ همانندی از ۳ رنگ به n رنگ افزایش (کاهش) می‌یابد. به بیان دیگر با استفاده از روش شبه معکوس ماتریسها هیچ نوع محدودیتی در تعداد رنگهای اولیه وجود نخواهد داشت.

د- انجام تصحیح به روش جدید برای نمونه‌هایی که از مقدار اختلاف رنگ کمتری نسبت به استاندارد برخوردارند منجر به کسب نتایج مطلوبی در رنگ همانندی می‌شود.

واژه نامه-

1. least squares technique
2. matrix pseudo invers
3. colorimetric color matching
4. spectrophotometric color matching
5. computer color matching
6. degree of freedom
7. metamarism
8. unit K/S
9. shade correction
10. Matlab
11. matrix transpose
12. cycle
13. F-Test
14. confidence interval
15. metamarism index
16. Kubelka-Munk
17. iteration loop
18. color index
19. three chromatic
20. on weight of fabric (o.w.f)
21. color difference

مراجع

1. Kubelka, P., and Munk, F., "Ein Beitrag Zur Optik der Farbanstriche", Zeitung Technische Physiks, Vol. 12, PP. 593-601, 1931.
2. McGinnis, P. H., Jr., "Spectrophotometric Color Matching with the Least Squares Techinaue, Journal of Color Engineering, Vol. 5, No. 6, PP.

[DOR: 20.1001.1.2251600.1377.17.1.15.9]

22-27, 1967.

3. Allen, E., "Basic Equations Used in Computer Color Matching, "Journal of Optical Society of Amrica, Vol. 56, No. 9, PP. 1256-1259, 1974.

۴. امیر شاهی، س.ح.، "استفاده از شبه معکوس برای رفع محدویت در تعداد رنگهای به کار رفته در رنگ همانندی کالریمتری، نشریه استقلال، دانشگاه صنعتی اصفهان، سال ۱۴، شمارهٔ ۲، ص ۱۳ - ۲۰، اسفند ۱۳۷۴.

5. Amirshahi, S.H., and Pailthorpe, M. T., "An Algorithm for Optimizing Color Prediction in Blends, "Textile Research Journal, Vol. 65, No. 11, PP. 632-637, 1995.

6. McDonald, R., Color Physics for Industry, (R. McDonald, Ed.), Chapter 5, Dyers' Company Publications Trust, Bradford, 1987.

7. Walowit, E., McCarthy, C. J., and Berns, R. S.,"An Algorithm for the Optimization Absorption and Scattering Coefficients , "Color Research and Application Journal, Vol. 12, No. 6, PP. 340-343, 1987.

8. Allen, E., Optical Radiation Measurements, (F. Grum and C.J. Bartleson , Eds), Vol. 2, Chapter 7, Academic Press. New York, 1980.

[DOR: 20.1001.1.2251600.1377.17.1.15.9]