



## مروری اجمالی بر مدل‌های پیشگویی رنگ

مهزیار گرجی<sup>۱</sup>، کیوان انصاری<sup>۲</sup>، فرهاد عامری<sup>۳</sup>، سیامک مرادیان<sup>۴</sup>

- ۱- دانشجوی دکتری، موسسه پژوهشی علوم و فناوری رنگ و پوشش، تهران، ایران، صندوق پستی: ۶۵۴-۱۶۷۶۵
- ۲- استادیار، گروه پژوهشی نمایش رنگ و پردازش تصویر، موسسه پژوهشی علوم و فناوری رنگ و پوشش، تهران، ایران، صندوق پستی: ۶۵۴-۱۶۷۶۵
- ۳- استادیار، گروه پژوهشی فیزیک رنگ، موسسه پژوهشی علوم و فناوری رنگ و پوشش، تهران، ایران، صندوق پستی: ۶۵۴-۱۶۷۶۵
- ۴- استاد، قطب علمی رنگ، موسسه پژوهشی علوم و فناوری رنگ و پوشش، تهران، ایران، صندوق پستی: ۶۵۴-۱۶۷۶۵
- تاریخ دریافت: ۹۳/۱/۲۴ تاریخ پذیرش: ۹۳/۷/۲۰ در دسترس به صورت الکترونیکی از: ۱۳۹۳/۹/۲۰

### چکیده

برای آن که یک مدل رنگ همانندی بتواند پیشگویی صحیح و دقیقی از مقادیر مواد رنگی اولیه مورد نیاز ارائه دهد، نیاز به شناخت عوامل موثر و لحاظ شرایط سیستم رنگ در آن است. از جمله این عوامل، تعیین ضرایب جذب و انتشار مواد رنگی، ارتباط میان انعکاس کلی و انعکاس داخلی لایه رنگ، فرض‌های اولیه در خصوص نور تابیده به لایه رنگ، هندسه انتشار و اندازه ذرات و سایر موارد می‌باشد. همچنین یک لایه رنگ، ممکن است شفاف، نیمه‌شفاف و یا پشت‌پوش باشد. مدل‌های مختلف همچون مدل‌های فیزیکی، مدل‌های عددی و مدل‌های هوشمند و هیبریدی با تعیین عوامل موثر و ارائه فرمول‌های جدید، سعی در مدل‌سازی و در نتیجه ارائه یک پیشگویی صحیح از رنگ نهایی در شرایط خاص تعریف شده دارند. در این مطالعه سعی در بررسی این مدل‌ها و شرایط استفاده از آنها در کاربردهای مختلف شده است. برخی از شناخته‌شده‌ترین این مدل‌ها مانند کیوبلکا-مانک، تئوری چهار پرتویی، تئوری چند پرتویی، چاندراکشار، افزایشگر دوتایی معکوس، مونت کارلو، لایه نماینده و امکان استفاده از روش‌های هوشمند مانند شبکه عصبی نیز که به نظر می‌رسد نتایج خوبی را ارائه می‌دهند، مورد بررسی اجمالی قرار گرفته و شرایط اولیه لازم برای استفاده بهینه از آنها بیان شده است.

واژه‌های کلیدی: مدل‌های پیشگویی رنگ همانندی، کیوبلکا-مانک، تئوری تجزیه طیفی، شبکه عصبی.

## A Concise Review on Color Match Prediction Models

M. Gorji<sup>1</sup>, K. Ansari<sup>\*2</sup>, F. Ameri<sup>1</sup>, S. Moradian<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Department of Color Physics, Institute for Color Science and Technology, P.O.Box:16765-654, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Department of Color Imaging and Color Image Processing, Institute for Color Science and Technology, P.O.Box:16765-654, Tehran, Iran

<sup>3</sup> Center of Excellence for Color Science and Technology, Institute for Color Science and Technology, P.O.Box:16765-654, Tehran, Iran

Received: 13-04-2014

Accepted: 12-10-2014

Available online: 11-12-2014

### Abstract

In order for a color matching model to be able to predict the correct and precise amounts of colorants to achieve a certain color, numerous sets of information regarding the effective parameters of the colored system is required. These parameters include the absorbance and scattering coefficients of colorants, relations between total and internal reflection of a colored layer, basic assumptions relating to incident light interactions with and without the colored layer, geometry and size of the scattering particles, etc. Additionally a colored layer could be transparent, translucent or opaque. Various models such as physical, numerical, intelligent and hybrid models attempt to present a correct prediction of the amounts of components to give the precise color through determining the contribution of each effective parameter which may lead to new formulae. In the present study, a variety of such models and their various applications are reviewed. Most of the well-known physical models such as Kubelka-Munk, Four-Flux, Many-Flux, Chandrasekhar, inverse adding doubling, Monte Carlo, representative layer theory and even intelligent models such as artificial neural network models for optimal usage are herewith described. *J. Color Sci. Tech.* 8(2014), 249-260©. Institute for Color Science and Technology.

**Keywords:** Color match prediction models, Kubelka-Munk, Spectral decomposition theory, Neural network.

## ۱- مقدمه

جواب رساند. پس از آن گروه تحقیقاتی ICI این روش‌ها را برای صنعت نساجی و سامانه‌های چاپ نیز کاربردی نمودند.

اما از سویی دیگر در آن زمان، به علت قیمت بالای رایانه‌های مرکزی<sup>۷</sup> دو روش آنالوگ نیز برای حل معادلات پیشنهاد شد. روش COMIC توسط داویدسون<sup>۸</sup> و همندیگر<sup>۹</sup> در آمریکا و روش ردیفون<sup>۱۰</sup> که در انگلیس ارایه گردید. اجرای این روش‌ها در حدود ۳۰ دقیقه زمان می‌برد. سپس با پیدایش رایانه‌های مدرن شخصی که چندین برابر قدرتمندتر از رایانه‌هایی بودند که توسط گروه پژوهشی ICI استفاده می‌شد، سرعت محاسبات چندین برابر افزایش یافت و عملاً مشکل زمان‌بری محاسبات حل گردید [۱].

امروزه عمل پیش‌گویی رنگ همانندی پیشرفت زیادی کرده و ریاضیات مورد نیاز آن در سطح نظری خوبی تدوین شده است. با این حال هنگام پیاده‌سازی الگوریتم‌ها، مواد رنگی که برای اختلاط و رنگ همانندی مورد نیاز هستند، به طور کامل از مبانی نظری پیشنهاد شده تبعیت نمی‌کنند. لذا در جهت کاهش انحراف از حالت ایده‌آل روش‌های متنوعی ابداع گردیده است [۶-۲]. مدل‌های مختلف رنگ همانندی هرکدام بر اساس برخی پیش فرض‌های اولیه می‌توانند پیش‌گویی مناسبی را صورت دهند که همین باعث ایجاد محدودیت در استفاده از مدل می‌شود. برای مثال بسته به این که جسم پشت‌پوش باشد یا نباشد و یا بخاطر اثر زیرآیند، توانایی عمل پیش‌گویی مدل‌ها متفاوت خواهد بود [۷]. از نیمه دوم قرن بیستم مدل‌های رنگ همانندی بسیاری ارائه شده‌اند. در این مطالعه هدف آن است که برخی از شناخته‌شده‌ترین این مدل‌ها مانند کیوبلکا-مانک<sup>۱۱</sup>، مدل چهار پرتویی<sup>۱۲</sup>، مدل چند پرتویی<sup>۱۳</sup>، چاندراسخار<sup>۱۴</sup>، افزایشگر دوتایی معکوس<sup>۱۵</sup>، مونت کارلو<sup>۱۶</sup>، لایه نماینده<sup>۱۷</sup> و امکان استفاده از روش‌های هوشمند مانند شبکه عصبی، که به نظر می‌رسد نتایج خوبی را ارایه می‌دهند، مورد بررسی اجمالی قرار گرفته و شرایط اولیه لازم برای استفاده بهینه از آنها بیان شود.

## ۲- الگوریتم رنگ همانندی بر پایه مدل‌های فیزیکی

این الگوریتم‌ها با مشخصه‌های مختلف فیزیکی رنگ مانند انعکاس طیفی و سایر خواص نوری کار می‌کنند و با تعیین ضریب وزن هر مشخصه و ترکیب‌های مختلفی از مشخصه‌ها، اثرگذاری مناسب روی

هدف در رنگ همانندی آن است که رنگ نمونه تهیه شده با رنگ هدف، تحت منابع نوری توافق شده، در حد قابل قبول ارزیابی شود. برای این منظور باید بتوان یک پیش‌گویی قابل قبول از مقادیر لازم مواد رنگی که بر روی یک زیرآیند مشخص و تحت منبع نوری و مشاهده‌گر معلوم، رنگ هدف را بازتولید نماید، انجام داد. رنگ همانندی چشمی و رایانه‌ای دو رویکردی هستند که در این رابطه وجود دارند.

رنگ همانندی چشمی با ارزیابی چشمی فرد مجرب و برآوردی ذهنی از رنگ هدف انجام می‌گیرد. در این حالت به مجرد رسیدن به اولین رنگ همانندی قابل قبول از نظر چشمی، فعالیت متوقف می‌شود. با این وجود معلوم نیست که مقادیر به دست آمده حداقل‌های لازم بوده و ممکن است بخاطر خطای انسانی، مقادیر بیشتری از مواد رنگی اولیه جهت خنثی‌سازی اثرهای اضافی به کار برده شده باشند. همچنین لزوماً فرمول رنگ همانندی ارایه شده، ممکن است ارزان‌ترین حالت فرمولاسیون نیز نباشد. از سوی دیگر دستیابی به یک فرمولاسیون رنگ همانندی توسط عامل انسانی در کارخانه‌هایی که در آنها تقاضا و تنوع برای رنگ همانندی رو به افزایش است، موجب بروز خطای انسانی بالاتر و مشکل کمبود زمان می‌گردد. نکته حائز اهمیت دیگر این است که در ارزیابی چشمی تنها زمانی شرایط مناسب برقرار است که رنگ ایجاد شده کاملاً پشت‌پوش بوده و تمامی عوامل موثر مانند منبع نوری و غیره ثابت باشند. لذا در مواردی که رنگ پشت‌پوش نباشد (در صنایع مختلف از جمله صنعت چاپ چنین امری بسیار رایج است)، عمل رنگ همانندی تابع شرایط دیگری مانند اثر زمینه، ضخامت و غیره نیز خواهد شد که عملاً رنگ همانندی چشمی را به سمت ناممکن شدن سوق می‌دهد.

در خصوص رنگ همانندی رایانه‌ای، اگرچه در سال ۱۹۳۱ کیوبلکا<sup>۱</sup> و مانک<sup>۲</sup> برخی تئوری‌های مورد نیاز برای این کار را ارایه دادند و پارک<sup>۳</sup> و استرنز<sup>۴</sup> نیز در ۱۹۴۴ اولین کسانی بودند که معادلاتی در تخمین رنگ همانندی و یک روش تکرارپذیر برای بهبود رنگ همانندی ارائه دادند، با این وجود سال‌های زیادی طول کشید تا تکنیک رنگ همانندی در صنعت توسعه یابد. با عمومی شدن رایانه‌ها، مشکل محاسبات زیاد و پیچیده در الگوریتم‌های رنگ همانندی دیگر زمان‌بر نبود. در اوایل دهه ۶۰ میلادی توسط آرتون و کوگیل<sup>۵</sup> نشان داده شد که با کمک رایانه‌های دیجیتال، یک روش پیشنهاد شده توسط آرتون<sup>۶</sup> در سال ۱۹۵۵ را می‌توان در کمتر از یک دقیقه به

7- Mainframe

8- Davidson

9- Hammendiger

10- Redifon

11- Kubelka- Munk

12- Four- Flux

13- Many- Flux

14- Chandrasekhar

15- Inverse Adding Doubling (IAD)

16- Monte Carlo

17- Representative Layer Theory

1- Kubelka

2- Munk

3- Park

4- Stearns

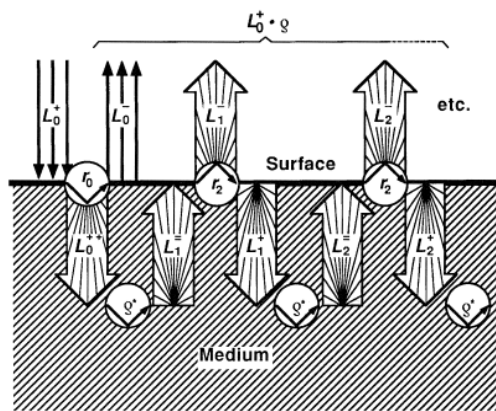
5- Cowgill

6- Atherton

همانندی کالاهای رنگ‌رزی شده توسط تئوری تک ثابتی کیوبلکا-مانک موثر باشد. البته در این روش اثر نور بازگشتی که از سیستم رنگ به هوا وارد می‌شود، در نظر گرفته نشده است. این در حالی است که به علت بیشتر بودن ضریب شکست سیستم رنگ نسبت به هوا، میزان انعکاس سطحی در این موقعیت بسیار بیشتر است. در تصحیح ساندرسون، این کمبود رفع شده است.

### ۱-۱-۲- تصحیح انعکاس کلی با روش ساندرسون<sup>۳</sup>

این روش تصحیح اولین بار توسط ساندرسون در سال ۱۹۴۲ بیان شد. نکته‌ای که در روش تصحیح ساندرسون نسبت به روش تصحیح قبلی (کم کردن یک مقدار ثابت از انعکاس کلی) در نظر گرفته می‌شود، لحاظ انعکاس سطحی وقتی نور از سیستم رنگ وارد هوا می‌شود، می‌باشد که شکل ۱ این روش تصحیح را به خوبی توضیح می‌دهد [۸].



شکل ۱: بیان تصویری ضرایب تصحیح ساندرسون که در آن  $Q$  میزان انعکاس کل،  $Q^*$  انعکاس داخلی،  $L_0^+$  نور ورودی و بقیه نمادها حرکت بازگشتی نور در درون لایه و خروج نور از لایه را نشان می‌دهند.

با توجه به شکل ۱ همچنین می‌توان مقدار انعکاس سطحی را با توجه به روابط فرسnel مشخص نمود. لازم به ذکر است که در این تصحیح یک سری شرایط اولیه به عنوان فرض در نظر گرفته می‌شود:

- سیستم رنگ باید کاملاً پشت‌پوش باشد.
  - نور تابیده شده نباید به زاویه برخورد نور وابسته باشد، زیرا در این صورت میزان انعکاس تابعی از زاویه می‌شود.
  - نور ورودی به درون سیستم رنگ باید کاملاً پراکنده باشد.
- رابطه ۱ تصحیح ساندرسون را نشان می‌دهد [۹].

$$\rho = r_0 + \frac{(1-r_0)(1-r_2)\rho^*}{1-r_2\rho^*} \quad (1)$$

خروجی مدل بالاتر برده می‌شود. به طور معمول در یک الگوریتم رنگ همانندی براساس مدل فیزیکی، می‌توان مراحل را به صورت مجزا در نظر گرفت که در هر مرحله، برای یافتن روابط بین انعکاس با دیگر عوامل موثر، راه‌حلهایی منظور می‌گردد.

این روابط را می‌توان به سه دسته کلی تقسیم‌بندی نمود:

۱. دسته اول به رابطه بین انعکاس کلی (مجموع انعکاس داخلی و انعکاس سطحی) و انعکاس داخلی می‌پردازد که در آن عوامل اثرگذار بر این رابطه همچون هندسه نور ورودی به سیستم رنگ، تفاوت در ضریب شکست بین سیستم رنگ و محیط، زاویه برخوردی و میزان نایکنواختی و زبری سطح بررسی می‌شوند.
۲. دسته دوم به رابطه بین انعکاس داخلی و خواص نوری لایه رنگ (ضریب‌های جذب و انتشار) می‌پردازد. دسته دوم را می‌توان به عنوان هسته اصلی در یک الگوریتم رنگ همانندی در نظر گرفت.
۳. دسته سوم به رابطه بین خواص نوری سیستم رنگ و غلظت می‌پردازد که این مرحله را شاید بتوان مهم‌ترین عامل موثر در این بخش از الگوریتم رنگ همانندی دانست.

### ۱-۱-۲- الگوریتم رنگ همانندی مبتنی بر رابطه انعکاس کلی و

#### انعکاس داخلی

طیف‌سنج<sup>۱</sup> دستگاهی است که برای اندازه‌گیری انعکاس طیفی در محدوده مرئی به کار برده می‌شود. اما در واقع مقدار این انعکاس طیفی همان مقدار انعکاس کلی است که گزارش می‌شود. در این جا انعکاس طیفی کلی مجموع انعکاس طیفی نوری (که از سطح برگشته) و انعکاسی طیفی داخلی (نور برآمده از داخل سیستم رنگ) است. انعکاس داخلی نیز سهمی از نور تابیده شده است که قادر به ورود به سیستم رنگ شده و در تعامل با ذرات رنگی پدیده‌های جذب و انتشار را باعث گردیده و سپس از سطح خارج می‌شود. لذا به منظور تصحیح میزان انعکاس کلی و تبدیل آن به انعکاس داخلی چند روش مختلف در مقاله‌های مرتبط با بحث رنگ همانندی پیشنهاد شده است.

### ۱-۱-۲- تصحیح انعکاس کلی با روش کاهش از انعکاس کلی

بر پایه قانون فرسnel<sup>۲</sup> از آنجا که همواره مقداری از نور به خاطر اختلاف ضریب شکست به درون سیستم رنگ وارد نمی‌شود، لذا می‌توان میزان انعکاس کلی را به طور تجربی کمی کاهش داده و سپس این میزان کاهش داده شده را برای رابطه‌های رنگ همانندی استفاده کرد، به عبارتی  $R_i = R_i - R_0$  را محاسبه نمود که در آن  $R_i$  انعکاس داخلی،  $R_i$  انعکاس کلی و  $R_0$  انعکاس کاسته‌شده می‌باشد [۱]. گفته شده که استفاده از این تصحیح می‌تواند برای الگوریتم‌های رنگ

1- Spectrophotometer

2- Fresnel

3- Sanderson correction

ضریب‌های جذب می‌باشند. همچنین میزان  $H(\mu')$  برای انتشار ایزوتروپیک برابر ۰.۵ می‌باشد. میزان  $H(\mu)$  در جداول مرجع آمده است. به طور کلی این مدل دارای قدرت پیش‌گویی بالایی است ولی در عین حال نسبتاً پیچیده است. از این مدل نیز برای اصلاح رابطه کیوبلکا-مانک به منظور رسیدن به پیش‌گویی‌های دقیق‌تر استفاده شده است.

#### ۲-۲-۲-۲ مدل کیوبلکا-مانک

این مدل در سال ۱۹۳۱ توسط کیوبلکا و مانک برای حالتی که نور ورودی کاملاً پراکنده<sup>۲</sup> باشد، ارائه گردید [۱۳]. انعکاس (R) در این معادله با در اختیار داشتن ضریب جذب (K) و ضریب انتشار (S) قابل محاسبه است. شکل کلی رابطه به صورت رابطه‌های ۴ و ۵ است [۱۴].

$$R = \frac{1 - R_g (a - b \coth(bSX))}{a - R_g + b \coth(bSX)} \quad (۴)$$

$$a = 1 + \frac{K}{S}, b = (a^2 - 1)^{0.5} \quad (۵)$$

که در آن  $R_g$  درصد انعکاس زمینه و X ضخامت سیستم رنگ است. این مدل براساس فرض دو پرتویی بودن مطرح شده است. توضیحات کامل در مورد رابطه کیوبلکا-مانک در حالت پشت‌پوش و نیمه پشت‌پوش و همچنین نحوه به دست آوردن ضریب‌های جذب و انتشار را می‌توان در مراجع [۱۶-۱۴] مشاهده نمود. فرم کلی رابطه کیوبلکا-مانک برای سیستم‌های نیمه‌شفاف با عنوان دو ثابتی مطلق به کار برده می‌شود (رابطه ۶). این نام از این جهت بر آن گذاشته شده است که ضرایب جذب و انتشار در آن بر خلاف روابط ساده شده که بر اساس ضریب انتشار سفید بیان می‌شوند، به صورت کاملاً مستقل استفاده می‌شوند. از آنجا که این رابطه در سال ۱۹۳۱ ارائه شد، لذا با توجه به نبود رایانه، حل رابطه بسیار سخت بود، به همین لحاظ فرم‌های ساده شده آن تحت شرایط خاص ارائه شد. بدین ترتیب در حالتی که سیستم رنگ پشت‌پوش باشد، مدل کیوبلکا-مانک به فرم رابطه ۷ ساده می‌شود. در این حالت می‌توان بین نسبت ضریب‌های نوری و انعکاس یک رابطه ساده ایجاد نمود که به آن فرم دو ثابتی نسبی گفته می‌شود. در صورتی که مسئولیت انتشار تنها بر عهده یک ماده (معمولاً دی‌اکسید تیتانیم در پوش‌رنگ‌ها و الیاف در منسوجات) باشد، فرم تک ثابتی ایجاد شده که تنها نسبت جذب مواد رنگی موجود در سیستم رنگ به انتشار ماده پشت‌پوش‌کننده دارای اهمیت می‌شود (روابط ۶ و ۷).

که در آن  $\rho^*$  انعکاس داخلی (انعکاس واقعی)، Q انعکاس کلی (انعکاس اندازه‌گیری شده توسط طیف‌سنج)،  $\tau_0$  ضریب انعکاس سطح برای نور مستقیم برخوردی از بیرون و  $\tau_2$  ضریب انعکاس سطح برای نور برخوردی پراکنده از درون است.

#### ۲-۲-۲-۲ الگوریتم‌های مبتنی بر رابطه بین انعکاس داخلی و خواص نوری سیستم رنگ

تعیین ارتباط میان انعکاس داخلی و خواص نوری سیستم رنگ را می‌توان به عنوان هسته اصلی روابط پیش‌گویی رنگ در نظر گرفت. تحقیقات بسیاری در این زمینه انجام شده است. در میان مدل‌های فیزیکی می‌توان به مدل‌های چاندراسخار، کیوبلکا-مانک، مدل چهار پرتویی، مدل چندپرتویی، افزایش‌گر دوتایی معکوس، مونت کارلو و تئوری لایه نماینده اشاره نمود. همچنین روش‌هایی بر اساس سیستم‌های هوشمند وجود دارند که برای پیش‌گویی رنگ می‌توان از آنها استفاده کرد.

#### ۲-۲-۲-۱ مدل چاندراسخار

مدل چاندراسخار و یا به عبارت دقیق‌تر انتقال تابش چاندراسخار یک مدل نسبتاً پیچیده است که تنها با روش‌های عددی قابل حل است. این مدل مانند مدل کیوبلکا-مانک از ضرایب جذب و انتشار به عنوان متغیر ورودی در محاسبه انعکاس استفاده می‌کند. برای به دست آوردن انعکاس از طریق این مدل ابتدا نیاز به حل یک رابطه انتگرالی غیرخطی  $H(\mu)$  است ( $\mu$  میزان انتشار ایزوتروپیک در جهتی خاص است). در مرحله بعد باید مقدار  $M = \int_0^1 d\mu \mu H(\mu)$  به دست آید تا بتوان میزان انعکاس کلی را محاسبه نمود که چاندراسخار آن را در کتاب Radiative Transfer ارائه داد [۱۱، ۱۰].

در سال ۱۹۵۵، جیووانلی<sup>۱</sup> [۱۲] از این مدل برای بدست آوردن انعکاس سطوح نیمه‌شفاف استفاده کرد. انعکاس نهایی به شکل رابطه ۲ ارائه شد.

$$\rho_c = 1 - 2\sqrt{1 - \omega_c} M(\omega_c) \quad (۲)$$

همانطور که نشان داده شد  $M(\omega_c)$  تابع  $H(\mu)$  می‌باشد که در رابطه ۳ آورده شده است.

$$H(\mu) = 1 + \frac{1}{2} \omega_c \mu H(\mu) \int_0^1 \frac{d\mu' H(\mu')}{\mu + \mu'} \quad (۳)$$

و  $\omega_c = \frac{\sigma}{\sigma + \alpha}$  که در آن  $\sigma$  و  $\alpha$  به ترتیب ضریب‌های انتشار و

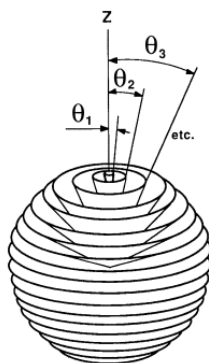
2- Diffuse

1- Giovanelli

رابطه حاصل از این مدل پیچیده‌تر از تئوری کیوبلکا-مانک می‌باشد. ولی با توجه به این که انجام محاسبات توسط رایانه انجام می‌شود، پیچیدگی روابط در سختی کار تأثیری ندارد. تنها مشکل وجود ضریب‌های جذب و انتشار بیشتر، هم برای نور مستقیم (ضریب انتشار به سمت جلو، ضریب انتشار به سمت عقب و ضریب جذب) و هم برای نور پراکنده (ضریب انتشار و ضریب جذب) می‌باشد، که نتیجه آن نیاز به تعداد آزمایش‌های بیشتر نسبت به رابطه کیوبلکا-مانک برای محاسبه ضرایب می‌باشد [۸]. تعداد بیشتر آزمایش به معنی ایجاد خطای آزمایشگاهی بالاتر است. این خطا می‌تواند آنقدر زیاد شود که تأثیر قدرت فراوان این مدل نسبت به مدل کیوبلکا-مانک را تحت الشعاع قرار دهد. لذا اگر بتوان بین ضریب‌های جذب و انتشار برای نور مستقیم و پراکنده یک ارتباط ریاضی مناسبی پیدا کرد، می‌توان تعداد آزمایش‌های مورد نیاز را به تعداد آزمایش‌های کیوبلکا-مانک کاهش داد [۱۹-۲۲] که نتیجه آن ایجاد شرایط عملی‌تر برای اجرای این مدل خواهد بود.

#### ۲-۲-۴- مدل چند پرتویی<sup>۲</sup>

این مدل صرفاً به عنوان یک بحث تئوریک مورد استفاده قرار گرفته است. اما از سوی دیگر باید اذعان کرد که مدل‌هایی همچون چهار پرتویی، دو پرتویی (کیوبلکا-مانک) و تک پرتویی (قانون بیر) را می‌توان حالت خلاصه شده‌ای از این مدل دانست که قابلیت اجرا در دنیای واقعی را دارا هستند. سیستم کار مدل چند پرتویی براساس تقسیم‌بندی فضا به نواحی مختلف است که در هر تقسیم‌بندی نور تابیده شده و برگشت داده شده در یک زاویه خاص بیان می‌شود. شکل ۳ این مدل را برای حالتی که از ۲۲ کانال استفاده شده، نشان می‌دهد [۸].



شکل ۳: نمایش تئوری چندپرتویی با تقسیم فضا به ۲۲ ناحیه (در زوایای مختلف برخورد نور) [۸].

$$R_{\infty} = 1 + K/S - \sqrt{K/S^2 + 2K/S} \quad (6)$$

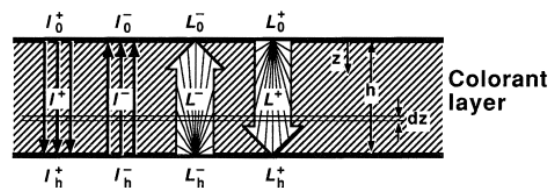
$$K/S = \frac{(1 - R_{\infty})^2}{2R_{\infty}} \quad (7)$$

بزرگ‌ترین علتی که مدل کیوبلکا-مانک را به معروف‌ترین مدل رنگ همانندی تبدیل کرده است، سادگی آن نسبت به دیگر معادلات و در عین حال کارایی نسبی آن می‌باشد [۱۱]. البته در تحقیقی که در سال ۲۰۰۹ توسط برنز [۱۵] منتشر شد و همچنین در کاتالوگ فنی منتشر شده توسط شرکت GretagMacbeth که در توضیح نرم‌افزار Color iMatch [۷] و نیز مراجع [۱۱، ۱۷] عنوان شده است، مدل کیوبلکا-مانک برای پیش‌گویی رنگ در اجسام نیمه‌شفاف مناسب نبوده و منجر به جواب‌هایی با خطای بالا می‌شود. شاید بتوان منشأ اصلی خطا را رعایت نشدن شرط‌های اولیه کیوبلکا-مانک دانست که مهم‌ترین آن شرط پراکنده بودن نور ورودی است.

مدل کیوبلکا-مانک با وجود سادگی نسبت به مدل‌های دیگر (که در بخش‌های بعدی در مورد آنها صحبت می‌شود)، مدلی است که تقریباً همه شرایط سیستم‌های رنگی (مانند حالت پشت‌پوش، نیمه-شفاف با زمینه و نیمه‌شفاف بدون زمینه) را پوشش می‌دهد.

#### ۲-۲-۳- مدل چهار پرتویی<sup>۱</sup>

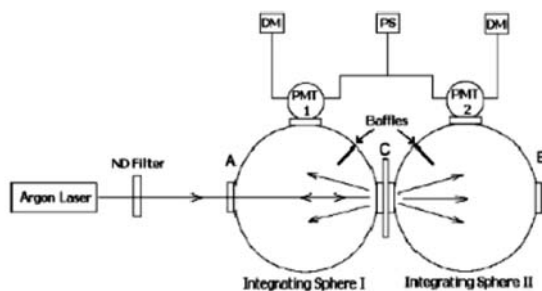
این مدل بر اساس دو پرتو ورودی (مستقیم و پراکنده) و دو پرتو خروجی (مستقیم و پراکنده) همان‌طور که در شکل ۲ مشخص شده است، کار می‌کند [۸]. با توجه به این که نور ورودی طیف‌سنج‌ها (چه سیستمی که از کره نور جمع‌کن استفاده می‌کند و چه طیف‌سنج‌های مخصوص چاپ که دارای هندسه نوری با نور ورودی مستقیم در زاویه صفر درجه نسبت به خط عمود بر سطح و نور دریافتی مستقیم در زاویه ۴۵ درجه یعنی هندسه ۰/۴۵ می‌باشند) از تابش نور مستقیم استفاده می‌کنند و با توجه به اینکه عملاً نور وارد شده به سیستم رنگ به علت زبری سطح، مخلوطی از نور مستقیم و نور پراکنده است لذا به نظر می‌رسد که این مدل نسبت به مدل کیوبلکا-مانک بر پایه فرض‌های اولیه واقعی‌تری قرار گرفته باشد [۱۸].



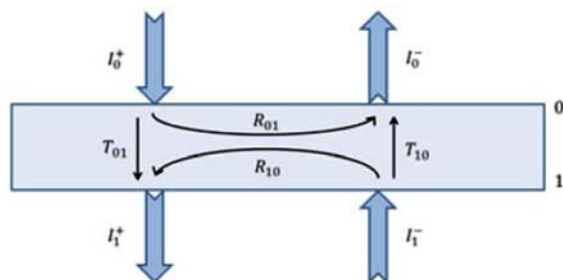
شکل ۲: نمایش مسیرهای عبور نور تعریف شده در تئوری چهار پرتویی (نور مستقیم (I) و پراکنده (L) در دو جهت بالا و پایین) [۸].

2- Many-flux

1- Four-flux



شکل ۴: ساختار طیف‌سنج مورد نیاز برای استفاده در مدل افزایش گر دوتایی [۲۳].



شکل ۵: نمایش نحوه انعکاس و انتقال نور در سیستم رنگی [۲۴].

به همین جهت اندازه قطر رنگدانه‌ها نیز در رابطه نهایی آورده می‌شود. در نتیجه برای لایه‌های رنگی غیریکنواخت (لایه‌هایی حاوی مواد رنگی با اندازه ذرات مختلف) و یا چند لایه بر روی هم نیز این مدل پاسخگو می‌باشد. در حالی که مدل‌های گفته شده به طور مستقیم چنین قابلیتی را از خود نشان نمی‌دهند [۲۸].

در این مدل ضریب‌های جذب و انتشار (K و B) از طریق روابط ۱۰-۸ محاسبه می‌شوند [۲۹].

$$K = \frac{R \cdot A(R, T)}{S \cdot d}, B = \frac{-2 \ln(1 - \frac{A}{S})}{d \cdot A(R, T)} \quad (۸)$$

$$A(R, T) = \frac{((1-R)^2 - T^2)}{R} \quad (۹)$$

$$R = \sum_j S_j B_j d, A = 1 - R - T = \sum_j S_j (1 - e^{-K_j d}) \quad (۱۰)$$

که در آن S درصدی از سطح یک لایه که با ذره ز پوشیده شده است، ضخامت نمونه، A میزان جذب، R میزان انعکاس، T میزان انتقال و A(R, T) تابع انعکاس/جذب می‌باشند [۲۹]. به نظر می‌رسد اگر توزیع اندازه ذرات رنگدانه رنگی در درون لایه مشخص باشد، می‌توان به خوبی از این مدل برای عمل پیشگویی استفاده کرد.

در عمل اندازه‌گیری توزیع اندازه ذرات در یک لایه رنگی بسیار پرهزینه و تخصصی است. به همین جهت برای انجام عمل

آنچه که استفاده از این مدل را غیرعملی می‌سازد، ضریب‌های جذب و انتشار بی‌شماری است که نیاز است تا به عنوان داده‌های اولیه محاسبه گردند. به طور مثال تعداد ضریب‌های مورد نیاز برای محاسبه n کانال برابر با  $n^2/2$  است لذا اگر خواسته شود که از ۸ کانال استفاده شود، باید ۳۲ ضریب را محاسبه نمود که برای محاسبه آن نیاز به حداقل ۳۲ آزمایش اولیه است. از این تعداد،  $n/2$  آن مربوط به ضریب‌های جذب و بقیه مربوط به ضریب‌های انتشار هستند [۸].

## ۲-۲-۵- مدل افزایشگر دوتایی معکوس<sup>۱</sup>

در این مدل، نیاز است تا برخی خواص نوری همچون ضریب انتشار، ضریب جذب و انتشار ناهمسان‌گرد<sup>۲</sup> با استفاده از انعکاس کل، انتقال غیرپراکنده و انتقال کل بدست آید. برای این که بتوان میزان انتقال را نیز محاسبه کرد، نیاز به طیف‌سنجی با ساختار شکل ۴ می‌باشد [۲۳]. با داشتن این خواص نوری می‌توان انعکاس و انتقال را در این مدل محاسبه نمود (شکل ۵) [۲۴]. در این مدل، انعکاس و انتقال به صورت تابعی از یکدیگر بیان می‌شوند در نتیجه این مدل برای پیش‌گویی میزان انعکاس اجسام نیمه‌شفافی که فاقد زمینه هستند (مانند فیلم‌های رنگی)، مناسب است. در حال حاضر کاربرد اصلی این مدل پیش‌گویی رنگ‌همانندی فلورسنت‌ها بوده و در این خصوص بهبودهایی نیز بر روی آن در سال‌های اخیر انجام گرفته است [۲۵]. شکل ۵ پایه مدل‌سازی این مدل می‌باشد.

## ۲-۲-۶- مدل مونت کارلو

مدل مونت کارلو برای تخمین میزان انتقال نور در یک سیستم رنگ مناسب است. بر خلاف قانون بیر این مدل برای حالتی که سیستم رنگ علاوه بر جذب، انتشار هم دارد نیز بکار می‌رود. در این مدل اثر زاویه در نظر شده و میزان انعکاس سطح با توجه به زاویه به دست آورده می‌شود [۲۶، ۲۷]. اساس این مدل بر مبنای طبیعت تصادفی نور تابیده شده به سطح است. همانند تمام مدل‌های گفته شده ضرایب جذب و انتشار در این مدل نیز تعریف می‌شود. همچنین به علت بررسی موجی، این مدل مناسب پیش‌گویی برای اجسام فلورسنت می‌باشد [۲۷]. روابط مورد نیاز برای این مدل بر مبنای روابط بنیادی نور بوده و لذا بسیار پیچیده و انباشته از ترم‌های فیزیکی متعدد است.

## ۲-۲-۷- مدل تئوری لایه نماینده<sup>۳</sup> (داهم<sup>۴</sup>)

تفاوتی که مدل تئوری لایه نماینده با تمام مدل‌های بیان شده دارد در این است که فرض می‌شود که ذرات با قطرهای مختلف در تعامل با نور قرار می‌گیرند.

- 1- IAD (Inverse adding doubling)
- 2- Anisotropic scattering
- 3- Representative layer theory
- 4- Dahm

### ۲-۳-۱- بررسی رابطه ضریب‌های جذب و انتشار در مدل کیوبلکا-مانک

با توجه به این مسئله که رابطه کیوبلکا-مانک کاربردی‌ترین مدل پیش‌گویی رنگ است، در این بخش روابطی که در مراجع مختلف بین ضریب‌های جذب و انتشار در رابطه کیوبلکا-مانک و غلظت آورده شده‌اند، بیان می‌شود. ساده‌ترین رابطه، ایجاد یک رابطه خطی بین این دو است (رابطه ۱۱) [۱۶-۱۴].

$$S = s_s + cs, K = k_s + ck \quad (11)$$

که در آن  $S, K$  ضریب‌های جذب و انتشار سیستم لایه رنگ،  $s, k$  ضریب‌های جذب و انتشار مستقل از غلظت مربوط به ماده رنگی و  $s_s, k_s$  ضریب‌های انتشار و جذب زمینه (بدون حضور ماده رنگی) می‌باشند. هنگامی که از چند ماده رنگی به جای یک ماده رنگی استفاده شود، این معادلات به صورت رابطه ۱۲ نوشته می‌شوند [۱۶-۱۴]:

$$S = s_s + c_1s_1 + \dots + c_ns_n, K = k_s + c_1k_1 + \dots + c_nk_n \quad (12)$$

رابطه کیوبلکا-مانک به‌خصوص برای اجسام نیمه‌شفاف، عمل پیشگویی رنگ را به خوبی انجام نمی‌دهد [۱۶، ۱۵]. برای بهتر شدن نتایج، بهترین کاری که می‌توان انجام داد، تصحیح‌هایی در روابط مذکور به صورت تجربی است. روابط ۱۳ الی ۱۷ اصلاحات تجربی به دست آمده در مراجع مختلف را بیان می‌کنند [۱۴].

$$\left(\frac{K}{S}\right)^P = \left(\frac{k}{s}\right)_s + c \frac{k}{s} \quad (13)$$

که در آن توان  $P$  به طور تجربی به دست می‌آید (رابطه آلن<sup>۱</sup>) [۳۰] در عین حال نسبت جذب به انتشار را می‌توان بدین ترتیب بدست آورد:

$$\frac{K}{S} = a_0 + a_1c + a_2c^2 + a_3c^3 \quad (14)$$

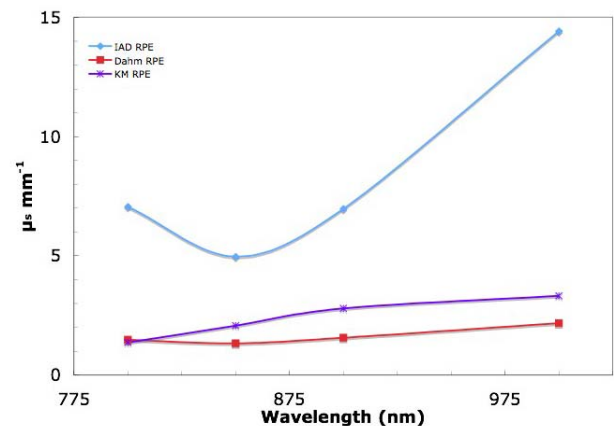
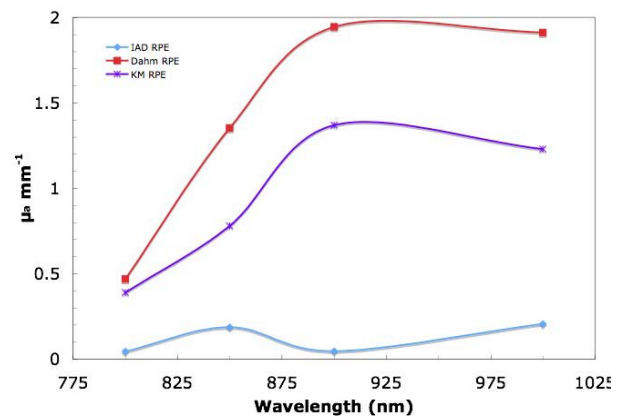
که در آن همگی ضریب‌ها به صورت تجربی محاسبه می‌شوند. همچنین محاسبه دیگری نیز به صورت رابطه ۱۵ وجود دارد.

$$\left(\frac{K}{S}\right) = (a_1c_1^{b_1})c_1 + (a_2c_2^{b_2})c_2 + (a_3c_3^{b_3})c_3 + \left(\frac{k}{s}\right)_s \quad (15)$$

رنگ‌هماندی استفاده از این روش کاری غیرمعقول به نظر می‌رسد. لذا از این مدل در شرایطی خاص، مثلاً زمانی که هدف بررسی اندازه ذرات بر رنگ نهایی است، مفید می‌باشد.

### ۲-۳-۲- الگوریتم‌های مبتنی بر رابطه بین خواص نوری لایه و غلظت

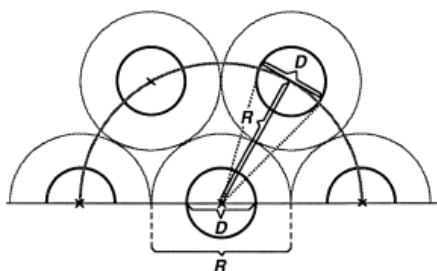
وقتی هدف رنگ هماندی باشد، در نهایت موضوعی که اهمیت دارد، بدست آوردن رابطه‌ای میان غلظت و انعکاس است. لذا همه عوامل موثر بر رابطه میان این دو باید در مدل مربوطه لحاظ شوند، زیرا آخرین بخش از عمل پیش‌گویی رنگ باید به مشخص نمودن غلظت‌های لازم برای اختلاط منجر شود. از سویی دیگر ضریب‌های جذب و انتشار (در کل خواص نوری) که در مدل‌های پیشگویی رنگ به آن‌ها اشاره شد، هر کدام، متفاوت از دیگری هستند. در نتیجه وقتی صحبت از ضریب جذب و یا انتشار می‌شود، باید توجه داشت که مربوط به کدام مدل گفته شده است [۲۳]. در شکل ۶، تفاوت ضریب‌های جذب و انتشار در سه مدل مختلف پیش‌گویی رنگ در ناحیه زیر قرمز نزدیک (NIR) نشان داده شده است.



شکل ۶: ضریب‌های جذب (شکل بالا) و انتشار (شکل پایین) در سه مدل مختلف افزایشگر دوتایی، داهم و کیوبلکا-مانک برای ARPE19 cell cultures در ناحیه NIR [۲۳].

1- Allen

اندازه ذرات برابر هستند. همچنین غلظت حجمی رنگدانه در نقطه بالای حد بحرانی یا CPVC در جایی که همه ذرات کاملاً در کنار یکدیگر هستند، در نظر گرفته می‌شود. شکل ۷ این نکته را بیان می‌کند.



شکل ۷: هندسه قرار گیری ذرات رنگدانه در کنار یکدیگر به منظور تعریف یک رابطه فیزیکی بین ضریب انتشار و غلظت حجمی رنگدانه [۸].

با توجه به این هندسه و همچنین با توجه به این که انتشار وابسته به اندازه ذرات و فشردگی ذرات است، روابط ۱۸ و ۱۹ بدست می‌آیند.

$$S = s\sigma(1 - \gamma s\sigma^{2/3}) \quad (18)$$

$$\gamma = \frac{3}{4} \left( \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \right)^{2/3} \eta \quad (19)$$

که در آن  $\sigma$  میزان PVC و  $\eta$  تابع میرایی<sup>۵</sup> می‌باشد [۸]. همچنین برای بررسی دقیق‌تر ضریب‌های جذب و انتشار باید میزان وابستگی این دو ضریب به هم و همچنین وابستگی این دو ضریب به ساختار ذرات و عوامل دیگر به دست آیند، تا بتوان روابط قوی‌تری پیدا نمود.

### ۳- مدل‌های عددی

در این‌گونه از مدل‌ها، ماتریسی از ضرائب که به طور معمول با استفاده از رگرسیون تعیین می‌شوند با توجه به نمونه‌گیری‌های اولیه بدست می‌آید. در مدل‌های عددی به مشخصه‌های فیزیکی مواد مورد آزمایش توجه نمی‌شود و تنها برقراری یک ارتباط آماری بین مولفه‌های مختلف مورد نظر است.

روش‌های زیادی برای بیان این ارتباط ارائه شده است که از آن جمله می‌توان به رگرسیون خطی، رگرسیون چند متغیره، روش‌های درون‌یابی و توابع قطبی اشاره نمود [۳۴]. معمولاً مدل‌های عددی که بر پایه روش‌های رگرسیون هستند نسبت به مدل‌های عددی بر پایه روش درون‌یابی نیاز به نمونه‌های کمتری دارند. ولی در کل مدل‌های عددی نسبت به مدل‌های فیزیکی نیاز به نمونه‌های بیشتری به منظور ارتباطی میان عوامل موثر دارند. لازم به ذکر است که مدل‌های

که در آن نیز باز ضریب‌ها به صورت تجربی به دست می‌آیند (رابطه لاو<sup>۱</sup>) [۳۱]. همچنین در روش قطعه‌ای هافنبرگ<sup>۲</sup> که به صورت رابطه ۱۶ می‌باشد.

$$\left( \frac{K}{S} \right) = m_1 c_1 + m_2 c_2 + b_1 + b_2 + \left( \frac{k}{s} \right)_s \quad (16)$$

ابتدا روابط برای هر ماده رنگی نوشته شده و سپس برای ادغام می‌توان از روش قبلی استفاده کرد [۳۲].

جلر<sup>۳</sup> و گولاب<sup>۴</sup> از یکی از پنج فرمول دوتایی ارائه شده در رابطه ۱۷ برای بیان ارتباط تابع انعکاس و غلظت مواد رنگی در هر طول موج استفاده نمودند.

$$a) \left( \frac{K}{S} \right) = \frac{x}{ax + b}$$

$$b) \left( \frac{K}{S} \right) = ax \exp(xb)$$

$$c) \left( \frac{K}{S} \right) = ax + bx^2 \quad (17)$$

$$d) \left( \frac{K}{S} \right) = a \ln(x + 1) + bx$$

$$e) \left( \frac{K}{S} \right) = ax + b$$

در هر طول موج معادله‌ای که به بهترین نحو این ارتباط را بیان نماید به منظور بکارگیری در پیش‌گویی رنگ مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳۳].

رابطه کیوبلکا-مانک معادله‌ای فیزیکی است که بر اساس شرایط فیزیکی و نه بر اساس شرایط تجربی بدست آمده است. ولی همان‌طور که بیان شد روش‌های بدست آوردن ضرایب جذب و انتشار در آن به صورت تجربی و با توجه به داده‌های آزمایشگاهی است. علت این امر محقق نشدن فرض‌های اولیه رابطه کیوبلکا-مانک در هنگام اجرا می‌باشد. لذا به علت پیچیده بودن شرایط فیزیکی در حالت واقعی، عملاً مدل‌سازی تنها برای شرایط بسیار ساده تعریف می‌شود. در ادامه برخی از ساده‌سازی‌های شرایط ارائه می‌شود.

یکی از روش‌هایی که برای اصلاح محاسبه رابطه انتشار با غلظت استفاده می‌شود، استفاده از مبنای فیزیکی ساختاری ذرات ماده رنگی در درون سیستم رنگ می‌باشد که البته تنها برای ضریب انتشار است. در این حالت فرض مسئله این است که تمامی ذرات به صورت کره ایده‌آل با

- 1- Love
- 2- Hoffenberg
- 3- Jeler
- 4- Golob

5- Attenuation factor



وستلند<sup>۷</sup> که پیشرو در استفاده از شبکه عصبی در الگوریتم‌های رنگ همانندی است، بر این عقیده است که همچنان ساختار مناسبی برای ایجاد یک عملکرد مناسب برای شبکه ایجاد نشده است. پیشنهاد وستلند برای ایجاد یک پیشگویی مناسب، استفاده از یک رابطه هیبریدی از شبکه عصبی و رابطه کیوبلکا-مانک است [۳۷] که این پیشنهاد در حد نظریه بوده و هنوز مدلی براساس آن ارائه نشده است. از سوی دیگر در استفاده از سیستم‌های هوشمند با توجه به نوع مسئله رنگ همانندی و یا محدوده نیاز می‌توان از ورودی‌های متفاوتی استفاده کرد. برای مثال اگر نیاز به طراحی شبکه‌ای باشد که برای تمام انواع رنگ‌رزی پاسخگوست، باید شرایط رنگ‌رزی را نیز جزو ورودی‌های شبکه قرار داد [۳۸].

همچنین عمل پیش‌گویی رنگ را می‌توان با استفاده از الگوریتم ژنتیک نیز به تنهایی انجام داد [۴۱]. از این روش می‌توان همچون روش شبکه عصبی، هم برای رنگ همانندی اسپکتروفوتومتریک و هم برای رنگ همانندی کالریتریک به همراه هر تعداد ماده رنگی اولیه استفاده نمود. اصولاً یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های استفاده از سامانه‌های هوشمند نسبت به روش‌های فیزیکی امکان استفاده از تعداد نامحدود ماده رنگی اولیه بوده، به طوری که در یک تحقیق تا ۱۸ ماده رنگی اولیه نیز گزارش شده است [۳۹]. همچنین الگوریتم ژنتیک توانایی کاهش اختلاف رنگ تحت منبع نوری دوم و کاهش مسئله متامریزم با به کارگیری یک تابع برازندگی<sup>۸</sup> برپایه اختلاف رنگ دو منبع نوری را دارا است [۴۱].

از سوی دیگر باید در نظر داشت که استفاده از شبکه عصبی دارای محدودیت‌هایی نیز است. از جمله آن که برای رسیدن به یک نتیجه مناسب، نیاز به تهیه نمونه‌های اولیه بیشتری نسبت به روش‌های فیزیکی است. پیدا نمودن معماری بهینه نیز به خاطر آموزش شبکه عصبی زمان‌بر است زیرا با توجه به وجود عوامل متعددی که در تنظیم معماری موثرند، معمولاً رسیدن به یک ساختار مناسب متکی به تجربه و سیستم سعی و خطا است [۴۴، ۴۵]. همچنین هر بار اجرای شبکه با توجه به تغییر اندکی که در وزن‌های شبکه رخ می‌دهد ممکن است که موجب تفاوتی در نتیجه نهایی پیش‌گویی گردد.

### ۳-۲- به‌کارگیری تئوری تجزیه طیفی

در حالت کلی می‌توان گفت که در عمل، رنگ‌همانندی اسپکتروفوتومتریک، فاقد توانایی انطباق کامل محرک‌های سه‌گانه رنگ با نمونه هدف در زیر یک منبع نوری خاص می‌باشد، اما در عوض مقادیر اختلاف رنگ‌های پیش‌گویی شده در زیر منابع نوری مختلف دارای تفاوت فاحش با یکدیگر نیستند. بدین ترتیب می‌توان گفت که بیشتر عملیات رنگ همانندی منجر به جفت‌های متامر خواهند شد که در

عددی عموماً در نواحی مرزی ضعیف عمل نموده و شامل خطای سیستماتیک بیشتری هستند. همچنین باید در نظر داشت که هنگام اجرای یک مدل عددی خصوصیات و روابط فیزیکی مورد بررسی قرار نمی‌گیرند، لذا در صورت ایجاد هر گونه تغییر در هر یک از مواد اولیه، عمل پیاده‌سازی الگوریتم باید به طور کامل دوباره انجام شود. نکته مثبت استفاده از مدل‌های عددی برای شرایطی است که اصولاً سنجش عوامل موثر فیزیکی را یا نمی‌توان انجام داد و یا با دقت مناسب سنجش‌ها به دست نمی‌آیند [۸].

### ۳-۱- الگوریتم رنگ همانندی بر مبنای سامانه‌های هوشمند

بر اساس مقاله منتشر شده توسط فوناهاشی<sup>۱</sup>، هر رابطه غیرخطی را می‌توان توسط یک شبکه عصبی با روش پس انتشار خطا<sup>۲</sup> و تابع انتقال سیگموید<sup>۳</sup> شبیه‌سازی کرد [۶].

از جمله روش‌های سیستم‌های هوشمند می‌توان به استفاده از شبکه عصبی<sup>۴</sup>، الگوریتم ژنتیک<sup>۵</sup> و منطق فازی<sup>۶</sup> اشاره نمود. هدف از استفاده از یک سیستم هوشمند و یا ادغام چند سیستم هوشمند، تقلید رفتار یک رنگ همانندکن حرفه‌ای (تینتر) برای رسیدن به یک پیش‌گویی مناسب است [۳۵]. برای استفاده از سیستم‌های هوشمند در پیش‌گویی رنگ، معمولاً یا از شبکه عصبی به تنهایی [۳۶-۴۰] و یا از ادغام آنها با الگوریتم ژنتیک و یا منطق فازی به منظور بهینه‌کردن عملکرد شبکه استفاده می‌شود [۴۱، ۴۲].

شبکه عصبی مرسوم‌ترین روش نسبت به روش‌های دیگر در سیستم‌های هوشمند برای پیش‌گویی رنگ می‌باشد. از لحاظ تئوریک اثبات شده است که با استفاده از یک شبکه عصبی با روش پس انتشار خطا با تابع انتقال سیگموید می‌توان هر فضای پیوسته‌ای را بر فضای دیگری مطابقت داد [۴۳]. با این وجود به نظر می‌رسد که تاکنون شبکه‌ای با ساختار مناسب برای یک پیش‌گویی قابل قبول در رنگ همانندی، ارائه نشده است. اما با این وجود به نظر می‌رسد که امکان رسیدن به یک جواب مناسب منطقی باشد.

اکثر مقالات برای بررسی قدرت عملکرد شبکه عصبی از مقایسه نتایج آن با رابطه کیوبلکا-مانک استفاده کرده‌اند [۳۵]. برخی مطالعات نیز به بررسی ساختارهای مختلف شبکه عصبی با در نظر گرفتن توابع انتقال و سرعت آموزش مختلف و مقایسه آنها پرداخته‌اند [۳۷].

در مورد قدرت پیش‌گویی این سیستم‌ها نتایج متناقض است. برخی از محققین با بررسی ساختارهای مختلف شبکه عصبی ادعا کرده‌اند که به نتایج خوبی رسیده‌اند، با این وجود افرادی مانند

- 1- Ken- Ichi Funahashi
- 2- Back- error propagation
- 3- Sigmoid transfer function
- 4- Neural network
- 5- Genetic algorithm
- 6- Fuzzy algorithm

7- Westland  
8- Fitness function

صورت زمان‌بری محاسبات تک تک حالت‌ها را می‌توان با به کارگیری روش‌های درون‌یابی برطرف ساخت [۱۰، ۳، ۲].

### ۵- نتیجه‌گیری

به نظر می‌رسد بررسی عواملی که در پیش‌گویی رنگ نهایی تاثیر گذار هستند، گاهی آنقدر پیچیده هستند که عملاً ایجاد یک رابطه واحد برای مدل کردن تمامی آنها بسیار سخت می‌نماید. لذا مدل‌های مختلف مجبورند که با ساده‌سازی شرایط، محدودیت در توانایی و یا محدود ساختن گستردگی پیش‌گویی رنگ، ارائه شوند. لذا بسته به این که نسبت به پیش‌گویی رنگ در کدام سیستم رنگ صحبت می‌شود لازم است که مدل مناسب با آن انتخاب شود. مراجع مختلف سعی در بیان کاربرد مدل‌های بیان شده در صنایع مختلف داشته‌اند. در مورد مدل‌های پیچیده‌تر مانند مونت‌کارلو، معمولاً بررسی صرفاً در حد تئوری بوده و گزارشات آزمایشگاهی خاصی بیان نشده است. همچنین هرگاه هدف نشان دادن برتری و مزیت‌های یک مدل خاص بوده است، عمل مقایسه تنها با روابط کیوبلکا-مانک (عمدتاً مدل ساده شده آن) انجام می‌شده است و در نتیجه‌گیری مقالات نیز، محققین اذعان به برتری مدل خود داشته‌اند. به نظر می‌رسد که این نتیجه‌گیری‌ها بر پایه موارد زیر بوده است:

۱. اغلب مقایسه‌ها بین مدل پیشنهادی توسط محقق و فرم ساده شده رابطه کیوبلکا-مانک صورت گرفته که در آن شرایط اولیه رابطه کیوبلکا-مانک رعایت و یا لحاظ نشده است.
  ۲. برای این که بتوان از طریق اجرای مدل کیوبلکا-مانک به نتایج نسبتاً مناسبی رسید، روش‌های آزمایشگاهی متعددی برای به دست آوردن ضرایب جذب و انتشار و همچنین الگوریتم‌های رنگ‌همانندی مختلف بیان شده است که هر یک از این الگوریتم‌ها جهت کاربرد در حوزه خاصی توصیه شده تا نتایج بهتری بدست آید. لذا از آنجایی که در اکثر تحقیقات منتشر شده از بیان الگوریتم استفاده شده در اجرای مدل کیوبلکا-مانک خودداری شده است، لذا اطمینان به نتایجی که در آن روش پیشنهادی محقق برتری نسبی نسبت به مدل کیوبلکا-مانک را نشان داده است، معقول به نظر نمی‌رسد.
- با توجه به پیشرفت‌های رایانه‌ای، حل مدل‌های پیچیده لزوماً دارای مشکل خاصی نیست، لذا در سال‌های آتی انتظار ارائه مدل‌های پیچیده‌تر و در عین حال دقیق‌تر، غیرمنطقی به نظر نمی‌رسد. از طرفی استفاده از سیستم‌های هوشمند مانند شبکه عصبی در عمل پیش‌گویی رنگ می‌تواند باعث رسیدن به جواب‌های دقیق‌تر از طریق روشی متفاوت (بدون نیاز به بررسی عوامل موثر به صورت مجزا) شود. همچنین با توجه به پیچیدگی اختلاط رنگ کاهشی، مخصوصاً در سیستم‌های نیمه‌شفاف، رسیدن به یک پیش‌گویی رنگ بهتر از طریق بهبود سیستم‌های هیبریدی می‌تواند مد نظر محققین قرار گیرد.

نتیجه منحنی انعکاس طیفی این جفت‌ها با یکدیگر برابر نیستند [۶]. در سال ۱۹۵۳ ویشسکی تئوری ارائه داد که براساس آن هر منحنی انعکاس طیفی از دو جزء تشکیل می‌گردد. یک جزء مشترک میان متامرها که به عنوان محرک پایه رنگ<sup>۱</sup> شناخته شده و عامل تولید مقادیر محرکه‌های سه‌گانه رنگ یکسان تحت منبع روشنایی و مشاهده‌گر تعریف شده است و یک جزء ثانویه که ویشسکی آنها را سیاه‌های متامریک<sup>۲</sup> نامید. این جزء منحصر به فرد برای هر کدام از جفت‌های متامر، دارای مقادیر محرکه‌های سه‌گانه یکسان و البته تماماً برابر با صفر است. لذا منحنی هر سیاه متامریک ضرورتاً باید دارای مقادیر منفی در برخی از طول موج‌ها به همراه مقادیر مثبت در سایر طول موج‌ها باشد که بدین ترتیب موجب می‌شود که هیچ‌گونه اثری بر روی ارقام رنگ و یا ادراک رنگ نداشته باشد [۴۳]. روش‌های ریاضی استخراج سیاه‌های متامریک در مقالات مختلف بررسی شده است [۴۶]. استفاده از تئوری تجزیه طیفی در رنگ‌همانندی می‌تواند دارای مزایایی از قبیل مستقل بودن روابط رنگ همانندی از مواد اولیه، زیرآیند و روش رنگ‌گری باشد [۴۲].

به این ترتیب می‌توان یک رنگ همانندی کالریمتریک در کنار مزایای رنگ همانندی اسپکتروفوتومتریک داشت. یعنی برخلاف محدودیت تعداد انتخاب اولیه‌ها در رنگ همانندی کالریمتریک، می‌توان از هر تعداد ماده رنگی اولیه (عدم محدودیت آن در رنگ همانندی اسپکتروفوتومتریک) استفاده کرد. در واقع این روش مزایای رنگ همانندی اسپکتروفوتومتریک و رنگ همانندی کالریمتریک را در کنار یکدیگر دارا است.

با استفاده از تئوری تجزیه طیفی در استخراج اجزاء انعکاس‌های طیفی و امکان معرفی این اجزاء برای آموزش شبکه عصبی، با توجه به نظم بیشتری که اجزاء (منحنی محرک پایه رنگ و منحنی سیاه متامریک) دارند، می‌توان انتظار داشت که آموزش شبکه جهت پیش‌گویی در الگوریتم رنگ‌همانندی بهتر عمل نماید [۴۸، ۴۷، ۲، ۳].

### ۴- مدل‌های فیزیکی و عددی ترکیبی

امروزه برای ایجاد الگوریتم‌های دوباره تولید یک رنگ، ترکیبی از روش‌های گفته شده نیز به کار برده می‌شود. به عنوان مثال یک مدل عددی ساده مانند رگرسیون، می‌تواند برای مدل‌سازی یک مدل فیزیکی مورد استفاده قرار گیرد. همچنین نتایج حاصل شده از این مدل فیزیکی می‌تواند برای تعیین داده‌های لازم جهت ساخت یک جدول مقایسه‌ای برای انجام درون‌یابی مورد استفاده قرار گیرد. در این

1- Fundamental color stimuli  
2- Metameric blacks

## ۶- مراجع

1. R. McDonald, Recipe prediction for textile, in colour physics for industry. second edition. SDC, 1997.
2. F. Ameri, S. Moradian, M. Amani, The use of fundamental color stimulus to improve the performance of artificial neural network color match prediction systems. *Iran. J. Chem. Chem. Eng.* 24(2005), 53-61.
3. A. Karbasi, S. Moradian, S. Asiaban, Improving the performance of computer color matching procedures. *J. Opt. Soc. Am. A.* 25(2008), 2251-2262.
4. A. Karbasi, S. Moradian, S. Asiaban, Computer color matching procedures for mass colored polypropylene. *Polym-Plast Technol.* 47(2008), 1024-1031.
5. F. Ameri, S. Moradian, K. Gharanjig, Assessment of various color-matching procedures utilizing spectral decomposition theory. *J. Color Sci. Tech.* 7(2013), 75-83.
6. K. I. Funahashi, On the approximate realization of continuous mappings by neural networks. *Neural Networks.* 2(1989), 183-192.
7. R. Knapp, Advanced color formulation (color iMatch). Xrite company.
8. H. G. Volz, Industrial color testing (fundamentals and techniques). second edition, Wiley-VCH, 2002.
9. J. L. Saunderson, Calculation of the color of pigmented plastics. *JOSA.* 32 (1942), 727-736.
10. S. Chandrasekhar, Radiative transfer. Dover publications. 1960.
11. R. I. Joseph, M. E. Thomas, How accurate is the Kubelka-Munk theory of diffuse reflection? A quantitative answer. *Proc. of SPIE.* 8495 (2012).
12. R. G. Giovanelli, Reflection by semi-infinite diffusers. *Optica Acta.* 7(1955), 153-162.
13. P. Kubelka, F. Munk, *Zeits. f. Tech. Physik,* 7(1931), 593-600.
14. H. Amirshahi, F. Agahian, Computational color physics. 1th printing. Arkan Danesh publish, 2007.
15. Y. Zhao, R. S. Berns, Predicting the spectral reflectance factor of translucent paints using Kubelka-Munk turbid media theory: Review and evaluation. *Color Res Appl.* 34 (2009), 417-431.
16. R. S. Berns, M. Mohammadi, Single-constant simplification of Kubelka-Munk turbid-media theory for paint systems- A review. *Color Res Appl.* 32 (2007), 201-207.
17. A. B. Murphy, Modified Kubelka-Munk model for calculation of the reflectance of coatings with optically-rough surfaces. *Applied Physics.* 39 (2006), 3571-3581.
18. L. Yang, S. J. Miklavcic, Revised Kubelka-Munk theory. III. A general theory of light propagation in scattering and absorptive media. *JOSA.* 22 (2005), 1866-1873.
19. K. Klier, Absorption and scattering in plane parallel turbid media. *JOSA.* 62 (7) (1972), 882-885.
20. M. J. C. van Gemert, W. M. Star, Relations between the Kubelka-Munk and transport equation models for anisotropic scattering. *Lasers Life Sci.* 1 (1987), 287-298.
21. A. Roy, Empirical relationship between Kubelka-Munk and radiative transfer coefficients for extracting optical parameters of tissues in diffusive and nondiffusive regimes. *JBO.* 17(11) (2012), 115006(1)-115006(7).
22. B. G. Yust, D. K. Sardar, A. Tsin, A comparison of methods for determining optical properties of thin samples. *Proc. of SPIE.* 7562 (2010), 75620C(1)-75620C(9).
23. S. A. Prahl, M. J. C. van Gemert, A. J. Welch, Determining the optical properties of turbid media using the adding-doubling method. *Appl. Opt.* 32 (1996), 559-568.
24. A. Rosema, W. Verhoef, J. Schroote, J. F. H. Snel, Simulating fluorescence light-canopy interaction in support of laser-induced fluorescence measurements. *Remote Sens. Environ.* 37(1991), 117-130.
25. S. Leyre, G. Durinek, B. Van Giel, Extended Adding-Doubling method for fluorescent applications. *Opt Express.* 20(2012), 17856-17872.
26. S. A. Prahl, M. Keijzer, S. L. Jacques, A. J. Welch, A Monte Carlo model of light propagation in tissue. *SPIE Institute series.* 15 (1989), 102-111.
27. B. C. Wilson, G. Adam, A Monte Carlo model for the absorption and flux distributions of light in tissue. *Med. Phys.* 10(1983), 824-830.
28. D. J. Dahm, K. D. Dahm, Representative layer theory for diffuse reflectance. *Appl. Spectrosc.* 53(1999), 647-654.
29. D. J. Dahm, K. D. Dahm, Interpreting diffuse reflectance and transmittance. NIR publications. 2007.
30. E. Allen, Colorant formulation and shading, Chapter 7. In: Grum F, Bartleson CJ, editors. Optical radiation measurements: Color measurement. Academic Press. 2(1980).
31. R. B. Love, S. Oglesby and I. Gailey, The relation between dye concentration and reflectance (amendments to the Kubelka-Munk equation). *SDC.* 81 (1965), 609-614.
32. P. Hoffenberg, A mathematical model and algorithm for commercial color matching software based on single-constant Kubelka-Munk theory. Proc. AATCC Ann. Conf. Philadelphia (1989).
33. S. Jeler, V. Golob, Color 89, Proc. AIC conf. Buenos Aires (1989).
34. D. Pedoe, A geometric introduction to linear algebra, Wiley, 1963.
35. Y. Tao, L. Ningfang, W. Weimin, Computer color matching of paints based on neural networks. 2005.
36. J. M. Bishop, M. J. Bushnell, S. Westland, The application of neural networks to computer recipe prediction. *Color Res Appl.* 1991.
37. S. Westland, L. Iovine and J. M. Bishop, Kubelka-Munk or neural networks for computer colorant formulation?, 9th Congress of the International Color Association. *SPIE.* 4421 (2002), 745-748.
38. M. Senthilkumar, Modelling of CIELAB values in vinyl sulphone dye application using feed-forward neural networks. *Dyes and Pigments.* 75 (2007), 356-361.
39. J. Spehl, M. Wolker, Application of backpropagation nets for color recipe prediction as a nonlinear approximation problem. IEEE world congress on computational intelligence. 1994.
40. E. Mizutani, H. Takagi, David M. Auslander, J.S.R Jang, Evolving color recipes. *IEEE.* 30( 2000), 22-30 .
41. S. Gorji Kandi, M. Amani Tehran, Color recipe prediction by genetic algorithm. *Dyes and Pigments.* 74(2007), 677-683.
42. K. Ansari, F. Hatami, S. Moradian, Applying spectral decomposition theory to hyperspectral data in order to minimize the color difference between the actual and the reconstructed data, 5th International Color and Coatings Congress (ICCC 2013) Isfahan-Iran, (2013), 18-19.
43. G. Wyszecki, W. S. Stiles, Color science: concepts and methods, John Wiley and sons, 2000.
44. R. Furferi, M. Carfagni, Colour mixing modelling and

- simulation: Optimization of colour recipe for carded fibres. *AMSES*. 8( 2010), 487-492.
45. R. Furferi, m. Carfagni, An as-short-as-possible mathematical assessment of spectrophotometric color matching. *JAPPS*. 18(2010), 300-309.
46. J. B. Cohen, W. E. Kappauf, Metameric color stimuli, fundamental metamers and Wyszecki's metamer black. *Am J Psych*. 95(1982). 537-564.
47. N. Majidi, S. Moradian, The design of neural network for color matching using genetic algorithms, MSc thesis, Amirkabir University of Technology, 2002, (in persian).
48. M. Gorji Bandpay, K. Ansari, S. Moradian, The impact of different papers on the prediction accuracy of a prediction model based on the color of the cube's nearest neighbors in a table used in an inkjet printer. *J. Color Sci. Tech*. 7(2013), 257 -263